

Congrès

FABRICATION ADDITIVE : ÉTAT DES LIEUX DE LA PRÉVENTION ET PERSPECTIVES

Compte rendu de la journée technique organisée par l'INRS : « Fabrication additive : comment construire une prévention adaptée ? », à Paris, le 17 mai 2022.

L'INRS a organisé en mai 2022 une journée technique intitulée « *Fabrication additive : comment construire une prévention adaptée ?* » avec l'objectif de sensibiliser aux risques et de mettre en visibilité les solutions de prévention. Cette manifestation a réuni environ 1 200 participants en présentiel ou à distance. Elle s'est concentrée principalement sur les risques chimiques liés à l'utilisation de ces technologies, grâce à la coopération d'experts et d'acteurs d'entreprises, qui ont partagé l'état des connaissances, le contexte réglementaire, ainsi que leurs retours d'expériences et les bonnes pratiques mises en œuvre.

FRANÇOIS-
XAVIER
KELLER*
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

*** Sur la base
des contributions
des intervenants :**

B. Salengro
(CA de l'INRS),
A. Bernard
(école Centrale
de Nantes),
N. Albinet
(AddUp),
J. Bajolet (UIMM),
M. Ricaud,
M. Guillemot,
S. Bau (INRS),
O. Dufaud (LRGP),
L. Coates (INRS),
J. Pourchez
(école des Mines
de Saint-Etienne),
L. Wioland,
E. Drais (INRS),
F. Beaupoil,
N. Morais
(Carsat),
D. Bouvet
(Airbus),
M. Hirt
(Decathlon),
D. Boisselier
(Irepa Laser),
J.P. Leclerc (INRS).

ADDITIVE MANUFACTURING: REVIEW OF PREVENTION AND PROSPECTS –

In May 2022, INRS held a symposium titled “Additive manufacturing: building the correct prevention strategy”, with the goal of raising awareness about the risks and highlighting the prevention solutions. The event brought together roughly 1,200 people online and in person. It focused mainly on the chemical risks related to the use of these technologies, with presentations by experts and business players who shared knowledge, the regulatory context, and their feedback and good practices.

Contexte de la journée technique

La fabrication additive – ou impression 3D – consiste à fabriquer des pièces par addition de matière en couches successives. Initialement réservée au prototypage, cette technologie est maintenant utilisée à l'échelle industrielle, aussi bien dans les TPE/PME que dans les grands groupes. Elle se déploie dans de nombreux secteurs d'activité, comme l'aéronautique, l'automobile, la médecine, l'électronique, la bijouterie, les sports et les loisirs, pour ne citer que quelques exemples. Outre les risques liés à la manutention, aux rayonnements optiques, à l'utilisation de matériel électrique, à l'incendie-explosion, cette technologie peut exposer les opérateurs à des risques chimiques liés aux processus de fabrication et aux matières premières mises en œuvre – qu'il s'agisse de métaux, de polymères, de céramiques – ou aux sous-produits émis. Les experts et acteurs de prévention en entreprise constatent cependant que d'autres phases de travail sont sources d'expositions potentielles,

telles que les phases de déballage, de récupération de pièces, de finition, de nettoyage des pièces et des machines ou encore, celles liées aux opérations de maintenance.

La journée technique organisée par l'INRS s'est donc focalisée sur les risques chimiques associés à la fabrication additive, en vue de favoriser les partages sur l'état des connaissances, le contexte réglementaire, mais aussi les retours d'expériences et bonnes pratiques développées sur le terrain.

Contexte industriel

La fabrication additive s'est développée au sein du tissu socio-économique et industriel par le biais de nombreuses applications cibles. Les développements récents se sont orientés vers la fabrication directe de pièces métalliques, sans minimiser les progrès importants en termes de productivité dans le domaine de la fabrication additive mettant en œuvre des polymères. Les secteurs d'activité



utilisant les technologies de fabrication additive en France sont très variés. Suite à une enquête réalisée par l'INRS, la technologie de fusion sur lit de poudre apparaît comme la plus répandue pour la fabrication de pièces métalliques. Selon cette même enquête, 88 % des entreprises utilisant la fabrication additive non métallique sont des TPE-PME. Pour ce type de fabrication, 71 % des utilisateurs mettent en œuvre la technique du dépôt de fil fondu et 16 % utilisent la technique de photopolymérisation en cuve. De très nombreux acteurs industriels, dont certains sont français, produisent des machines pour les procédés métalliques et non métalliques. Les machines récentes deviennent de véritables outils de production de petites séries personnalisables. La chaîne de valeur centrée sur la fabrication additive apporte, de plus en plus, des réponses viables économiquement. Lors de cette journée technique, des intervenants du monde industriel ont pu partager leur expertise. C'est notamment le cas de la société AddUp, fabricant français de machines mettant en œuvre des procédés de fabrication additive. Deux procédés à base de matériaux métalliques ont été présentés : la fusion sur lit de poudre et la projection de poudre. L'analyse des risques a été détaillée, depuis la phase de conception des pièces, la fabrication, le nettoyage et le traitement des pièces (traitement de surface, traitements thermiques) jusqu'au contrôle final de la pièce. Un rappel sur le risque chimique a été effectué,

ainsi que sur celui lié à l'inflammabilité des poudres. La suppression des risques à la source a également été abordée. Au sein de cette entreprise, les postes de travail ont fait l'objet d'une réflexion étendue sur la prévention des risques et leur ergonomie. Cela implique de limiter par exemple la manutention ; les locaux de travail ont été adaptés à la mise en œuvre de machines 3D ; des actions sur l'organisation/ la mise en place de formations pour les opérateurs, et le port d'équipements de protection individuelle (EPI) ont été mises en œuvre lorsque cela était nécessaire. La prise en compte de la sécurité dans les formations en fabrication additive a été détaillée dans une présentation de l'AFPMA (pôle formation de l'UIMM de l'Ain). Cette intervention a montré comment sont intégrés, sur des lieux de travail, des équipements de fabrication additive en polymères et métal, tout en assurant la sécurité des apprenants. En effet, il est désormais nécessaire de standardiser les compétences des personnes travaillant avec ces technologies : concepteurs, opérateurs, managers. C'est dans ce cadre que l'UIMM a créé des certifications dédiées aux opérateurs et aux concepteurs. L'AFPMA a développé des formations certifiantes sur l'ensemble de la chaîne de valeur et délivre également des certifications internationales en fabrication additive suivant les référentiels IAMQS (*International Additive Manufacturing Qualification System*). Toutes les qualifications en fabrication additive intègrent des modules autour des thématiques d'hygiène – sécurité – environnement (HSE).

ENCADRÉ
LES AGENTS CHIMIQUES FRÉQUEMMENT RENCONTRÉS DANS LES TECHNOLOGIES DE FABRICATION ADDITIVE

Dans la fabrication additive métallique, on retrouve les matières premières sous forme de poudres ou de fils d'alliages métalliques contenant de l'aluminium, du nickel, du cobalt, du fer, du cadmium, du titane, du manganèse, du zinc, du tungstène ou du chrome. Les produits de dégradation sont principalement des oxydes métalliques : oxydes de nickel, de cobalt, de manganèse. En ce qui concerne les produits d'entretien, de nettoyage et de maintenance, on retrouve principalement l'isopropanol et l'acétone. Lorsque le procédé nécessite un liant, c'est très fréquemment du cyanoacrylate de méthyle.

Pour la fabrication additive non métallique, l'inventaire des agents chimiques se compose des matières premières : les fils plastiques (ABS, PLA, PET, PC, PEEK, pigments, stabilisants thermiques, ignifugeants, charges), les résines liquides : monomères et prépolymères (acrylates, polyuréthanes, résines époxy) dissous dans des solvants organiques (polyéthylène glycol, glycérol), ainsi que des additifs (pigments, charges) et des poudres plastiques : polyamides (PA 11, PA 12), polyuréthane thermoplastique (TPU).

En savoir plus : voir notamment les Fiches toxicologiques de l'INRS, accessibles sur : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox.html>

Risques chimiques associés à la fabrication additive

Panorama des polluants émis

Les acteurs de la prévention qui s'intéressent au panorama des polluants émis pour les différents procédés de fabrication additive constatent que les risques chimiques associés à cette technologie peuvent être multiples. Des agents chimiques peuvent être utilisés ou générés à chaque étape du procédé (réception des matières premières, préparation des chargements, finition des pièces, maintenance de la machine, gestion des déchets ; Cf. Encadré). L'évaluation des risques repose donc sur un inventaire de tous les agents chimiques utilisés ou générés en fonction de la technique mise en œuvre. Elle concerne : les matières premières plastiques et métalliques (y compris celles recyclées), les produits de dégradation (sous-produits), les produits annexes (gaz, liants), les produits de nettoyage, d'entretien et de maintenance. Les caractéristiques (données physicochimiques, dangers) des agents chimiques doivent être identifiées à l'aide des sources d'information disponibles : l'étiquetage, les fiches de données de sécurité et les indications du fabricant. Les produits de dégradation des plastiques sont bien connus pour les procédés de fabrication standard,

comme l'injection, l'extrusion ou le thermoformage et de nombreuses informations se trouvent dans la base de données INRS « Plastique, risque et analyse thermique »¹. Pour la technologie du fil fondu, des prélèvements actifs ont été réalisés dans l'enceinte des imprimantes 3D et des analyses en temps réel des composés organiques volatils (COV) ont été effectuées. Des aldéhydes, des aromatiques, des composés oxygénés ont été identifiés lors des différents essais. Des mesures ont aussi été réalisées pour la technologie de photopolymérisation. Des composés organiques oxygénés issus des résines ont principalement été retrouvés (formaldéhyde, acrylate de méthyle).

En ce qui concerne les émissions particulaires, la fabrication additive métallique compte parmi les procédés qui émettent des particules sous forme d'aérosols nanométriques. Si, dans la grande majorité des cas, les procédés sont clos, il existe néanmoins des phases au cours desquelles les opérateurs peuvent être en contact avec les aérosols émis. Sur la base d'un retour d'expérience, une démarche a été mise en œuvre pour caractériser les aérosols émis par un procédé de fabrication additive métallique, ainsi que pour évaluer les expositions individuelles. Elle a été complétée par l'analyse de données issues de la littérature, afin de formuler des préconisations générales permettant d'assurer la sécurité des opérateurs.

Risques d'inflammation et d'explosion

Au sujet des risques d'inflammation et d'explosion de poudres dans le cadre de la fabrication additive, la source d'inflammation peut provenir du laser, des phénomènes d'électricité statique ou encore de l'échauffement intrinsèque lié au processus de fabrication. Des poudres métalliques peuvent être mises en suspension, soit lors de leur introduction dans la machine, soit lors de la collecte par aspiration. Le comburant (oxygène, air) est aussi présent si l'inertage de la machine est insuffisant. Afin de prévenir le risque de formation d'atmosphères explosives (« Atex »), il existe des solutions décrites dans les séries de « normes Atex » NF EN IEC 60079, ou bien encore les standards (normes) NFPA 652 et 484².

De l'adoption de la technologie à la prévention : critères et leviers d'action

Technologie clé de l'industrie du futur, source d'innovation continue, la fabrication additive s'impose comme un moteur de performance dans un contexte de compétitivité mondiale. Les technologies de fabrication additive ont considérablement gagné en maturité ces dernières années. Même si les applications industrielles sont de plus en plus nombreuses, les procédés continuent d'évoluer pour gagner en performance, offrir de nouveaux débouchés et fabriquer aux meilleurs coûts. Les enjeux et bénéfices de la technologie sont tels qu'ils en font négliger la prise en



© Patrick Delapierre pour l'INRS/2020

compte des risques associés. Une analyse associant la question de la perception des risques et de l'acceptation des nouvelles technologies par les utilisateurs a été proposée lors de cette journée technique. D'une part, elle permet de comprendre les conditions de l'adoption et de la diffusion rapide de la fabrication additive. D'autre part, appliquée à la prévention, elle offre des leviers d'action pour favoriser la mise en œuvre de moyens de prévention. Ainsi combinées, les variables de perception des risques et d'acceptation de la technologie sont envisagées comme des déterminants de l'application des mesures de prévention pour des risques tant avérés qu'émergents.

Retours d'expérience

Émissions lors de différentes phases de travail

Les préconisations générales en termes de prévention des risques chimiques s'appliquent à la fabrication additive : travail en vase clos pour éviter le contact direct avec la poudre métallique, mise en



place de protections collectives, formation/information des salariés exposés, port des EPI, respect de l'hygiène. Des études ont été menées pour caractériser les deux procédés de fabrication additive métallique les plus utilisés dans l'industrie française : la fusion sur lit de poudre et la projection de poudre. Des études similaires ont été réalisées pour caractériser les deux procédés de fabrication non métallique les plus utilisés : la fusion de fil et la photopolymérisation. Les phases exposantes lors de l'utilisation de machines de fabrication additive sont multiples : fabrication, alimentation des machines, récupération de pièces, nettoyage, parachèvement, maintenance. Pendant la fabrication des pièces, la génération de particules ultrafines ou de COV est importante et il est nécessaire de placer les machines dans un local ventilé ou sous hotte aspirante, afin de capter les émissions générées lors de la fabrication. Au cours des opérations de remplissage des machines ou de récupération de pièces, l'utilisation de postes de travail ventilés est recommandée. Enfin, le port d'équipements de protection individuelle est nécessaire lors de l'intervention sur la machine pendant les phases de maintenance, de nettoyage ou de chargement de matières premières dans la machine.

Cas particulier du secteur aéronautique

Du prototype à l'utilisation de pièces finales, la fabrication additive connaît un essor important au sein de l'entreprise Airbus, en particulier la technologie par extrusion de matière utilisant des fils plastiques. En parallèle de ce déploiement, l'anticipation des risques est apparue comme une évidence à prendre en compte de manière pluridisciplinaire. Une présentation de la société Airbus a détaillé l'apport des compétences pour évaluer et prévenir ces risques pour la santé. Ainsi, le médecin du travail, le responsable QHSE d'Airbus, les experts (en particulier de la Caisse d'assurance retraite et de santé au travail – Carsat) sont intervenus sur les aspects concernant la ventilation ; de même, des experts utilisateurs de la

technologie sur le site au sein d'un FabLab³ utilisant des technologies de fabrication additive ont travaillé ensemble pour réaliser différents essais techniques, élaborer un cahier des charges de moyens d'aspiration, les tester et contrôler leur efficacité par de la métrologie atmosphérique.

Secteur des biens de consommation

Les différents axes de développement pour la mise en place des techniques de fabrication additive à base de polymères au sein de l'entreprise Decathlon ont porté sur le cloisonnement des machines et la création de pièces dédiées en fonction de la technologie et des matières premières utilisées. Les machines ont aussi été connectées à un système d'extraction direct. La ventilation générale permet d'assurer le renouvellement de l'air dans les locaux et les salles sont équipées d'un accès par badge, afin de limiter la circulation des opérateurs. Dans certains cas, les protections individuelles sont recommandées et des EPI spécifiques aux salles sont proposés aux travailleurs. Les protocoles d'utilisation des techniques de fabrication additive, des formations pour les salariés, un suivi médical renforcé, la mise en place du document unique d'évaluation des risques (DUER) et l'utilisation des fiches de données de sécurité sont généralisés dans l'ensemble de l'entreprise.

Conclusions

Plusieurs types de risques existent pour les opérateurs de fabrication additive : les risques à court terme liés au fonctionnement des machines, aux inflammations/explosions/brûlures, aux opérations de manutention et les risques à plus long terme liés à la toxicité chronique de produits chimiques ainsi qu'aux gestes répétitifs par exemple. Des substances toxiques peuvent être présentes dans les matières premières utilisées, les produits annexes utilisés ou émis lors du procédé mis en œuvre. Il existe une difficulté à extrapoler les conséquences d'une exposition professionnelle, d'où la nécessité de poursuivre la recherche sur les effets à long terme des expositions et/ou polyexpositions. Deux risques potentiels sont aussi à prendre en compte dans les études à moyen terme : le risque lié aux émissions de nanoparticules, ainsi que le risque induit par la modification des paramètres physicochimiques et du profil toxicologique des poudres métalliques réutilisées. ●

1. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques.html>.

2. Série de normes NF EN IEC 60079 – Atmosphères explosives. Accessibles sur : <https://www.boutique.afnor.org/site-payant>. NFPA 652 – Standard on the fundamentals of combustible dust. NFPA 484 – Standard for combustible metals. Accessibles sur : <https://www.nfpa.org/en-anglais>. Voir aussi : <https://www.inrs.fr/risques/explosion/ce-qu-il-faut-retenir.html> (ndlr).

3. Atelier mettant à la disposition du public des outils de fabrication d'objets assistée par ordinateur.

POUR EN SAVOIR +

- Actes et présentations de la Journée technique accessibles sur : <https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/fabrication-additive.html>.
- Dossier Web INRS accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/fabrication-additive/ce-qu-il-faut-retenir.html>.
- *Fabrication additive ou impression 3D utilisant des matières plastiques.* Fiche pratique de sécurité INRS ED 148. Accessible sur : www.inrs.fr.
- *Fabrication additive ou impression 3D utilisant les poudres métalliques.* Fiche pratique de sécurité INRS ED 144. Accessible sur : www.inrs.fr.
- *Fabrication additive ou impression 3D. Références en santé au travail, 2021, 165, TP 47.* Accessible sur : www.rst-sante-travail.fr.
- *Expositions professionnelles lors de la fabrication additive utilisant des poudres métalliques. Hygiène & sécurité du travail, 2021, 263, NT 90.* Accessible sur : www.hst.fr.