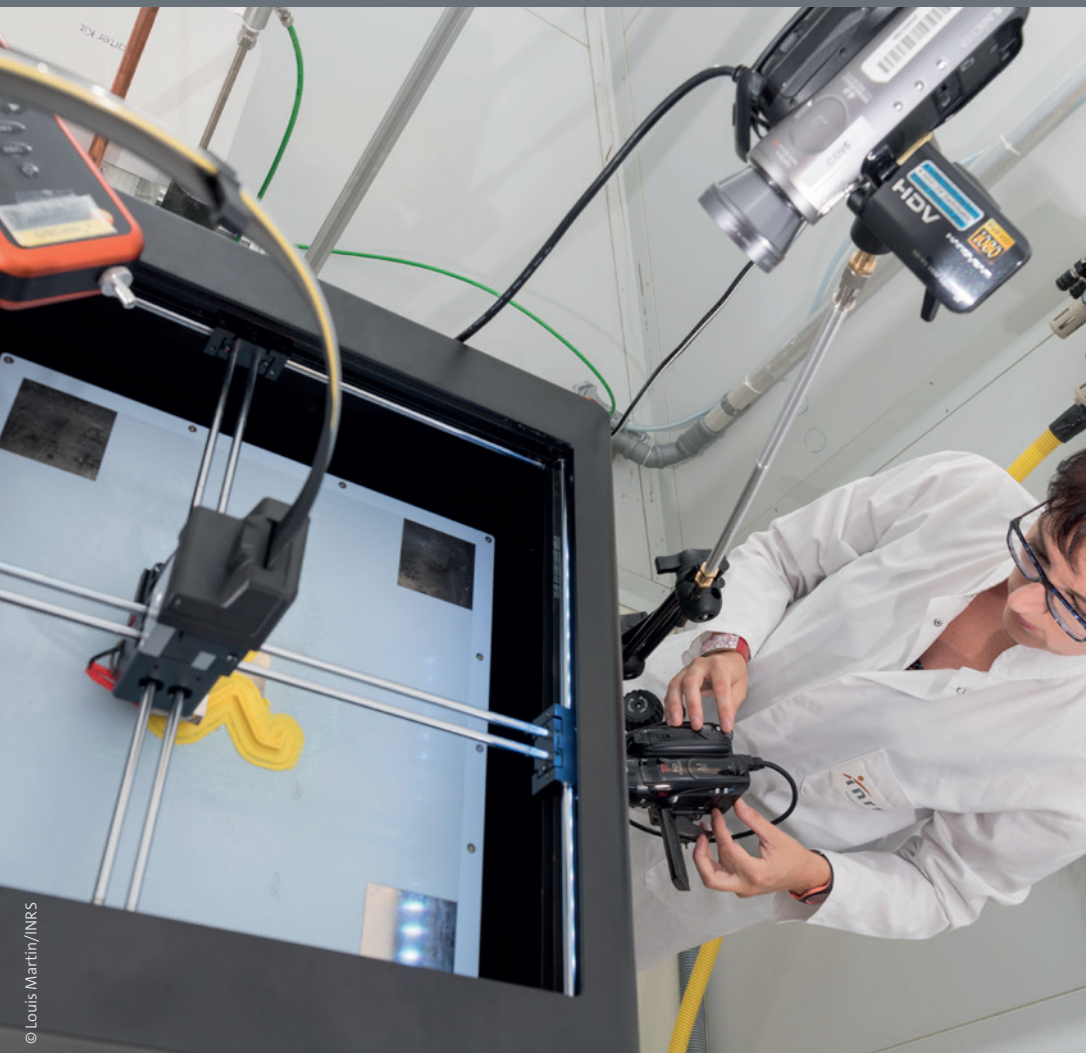




En plus des risques classiques associés à toute activité industrielle, la fabrication additive utilisant des matières plastiques comporte des risques spécifiques liés aux produits mis en œuvre ou générés. Les opérations annexes, comme la préparation et la récupération des matières plastiques, la récupération et la finition des objets fabriqués, et la maintenance peuvent être plus exposantes que la fabrication proprement dite. Pour la majorité des matières plastiques, le risque chimique s'accompagne également du risque d'incendie et d'explosion. Les principales solutions de prévention visent à limiter l'exposition par le travail en circuit fermé, par le captage des polluants et par l'organisation du travail.

Fabrication additive ou impression 3D utilisant des matières plastiques

INTRODUCTION

La fabrication additive, communément appelée « impression 3D », consiste à obtenir des objets par addition de matière en couches successives. Initialement réservée au prototypage, cette technique se développe pour des applications industrielles, notamment dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, de la médecine, du sport, du loisir et du luxe.

Types de matières premières

De très nombreuses matières sont mises en œuvre dans cette technologie : les matières plastiques, les métaux et les céramiques sont les plus fréquemment rencontrés.

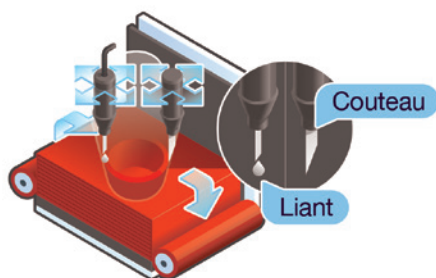
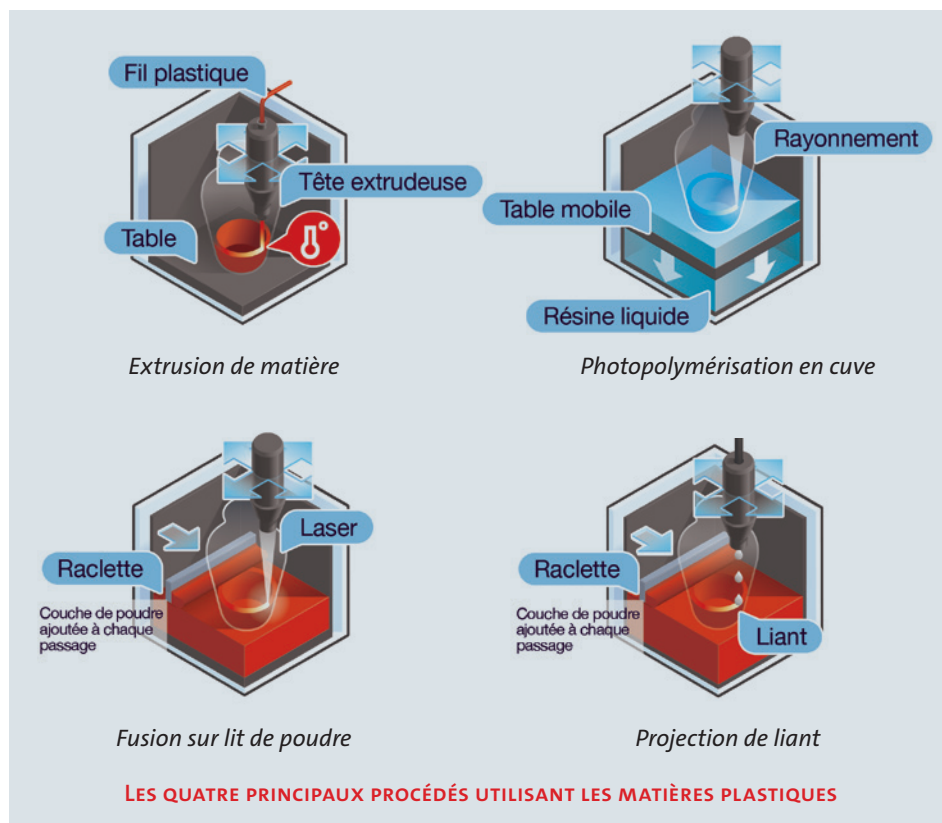
Ce document traite des risques et des principales mesures de prévention associés à la fabrication additive **utilisant des matières plastiques**. Par matières plastiques, on consi-

dère les polymères sous forme de fil, de poudre ou de résine liquide.

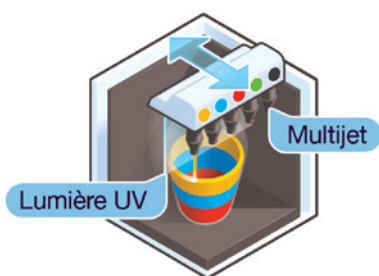
Types de fabrication

La norme NF EN ASTM ISO 52900 et la collection de normes NF EN ISO 17296 – 2 à 4 définissent sept grands procédés de fabrication additive. Ce domaine étant en plein essor, d'autres procédés de fabrication additive sont en cours de développement.

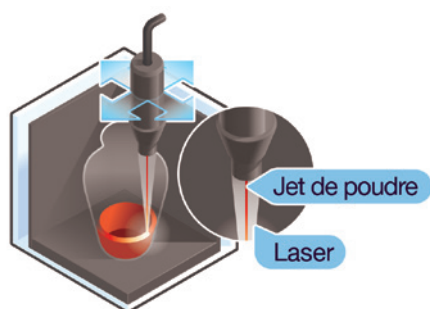
Figure 1. Procédés de fabrication additive



Stratification en couches



Projection de matière



Dépôt de matière sous énergie concentrée

• Extrusion de matière

Le matériau est distribué de manière sélective par une buse en couches successives.

• Photopolymérisation en cuve

Un photopolymère liquide est durci de manière sélective par un rayonnement spécifique.

• Fusion sur lit de poudre

L'énergie thermique (rayon laser, faisceau d'électrons...) fait fondre de manière sélective le matériau présent sous forme de poudre.

• Projection de liant

Un produit liquide est déposé de manière sélective pour lier le matériau qui est sous forme de poudre.

• Stratification en couches

Les couches de matériau sont découpées de manière sélective puis liées pour former l'objet à fabriquer.

• Projection de matière

Des gouttelettes de matériau sont déposées de manière sélective et solidifiées sous l'action d'une lumière UV.

• Dépôt de matière sous énergie concentrée

La matière est déposée de manière sélective puis est fondue progressivement par un apport d'énergie thermique (rayon laser, faisceau d'électrons...).

Principaux procédés utilisant les matières plastiques

Parmi les procédés utilisant les matières plastiques, l'extrusion de matière (fil fondu) est la technologie la plus répandue actuellement. On trouve ensuite la photopolymérisation en cuve (stéréolithographie) et la fusion sur lit de poudre.

1. IDENTIFICATION DES RISQUES

La fabrication additive utilisant des matières plastiques présente des risques généraux liés, par exemple, à la manutention ou à l'électricité et des risques spécifiques liés aux processus et aux produits mis en œuvre ou émis (produits de dégradation). L'ensemble des risques doit faire l'objet d'une évaluation formalisée dans le document unique, conduisant à la mise en place de mesures, tant techniques qu'organisationnelles afin de les supprimer ou de les réduire.

Dans la suite du document, seuls les risques spécifiques (qui sont principalement des risques chimiques et le risque d'incendie/explosion) ainsi que les principales mesures de prévention associées sont détaillés.

Les risques chimiques dépendent de la nature des produits mis en œuvre ou émis et de leurs effets sur la santé.

Le risque d'incendie/explosion provient du fait que la quasi-totalité des produits sont combustibles ou inflammables. Ils sont donc susceptibles de s'enflammer sous l'effet d'une source d'inflammation (flamme, surface chaude, étincelle). Cette inflammation peut se propager et générer un incendie. Lorsque ce produit apparaît sous forme de gaz/vapeur (utilisation d'un solvant inflammable, par exemple) ou sous forme de particules fines en suspension dans l'air, cette inflammation peut produire une explosion.

Risques spécifiques

L'identification des risques liés aux différents produits passe par l'inventaire, à toutes les étapes du procédé, de tous les produits entrants, sortants et émis. Les propriétés physico-chimiques et les dangers de ces produits doivent être identifiés à l'aide des sources d'information disponibles : fiche de données de sécurité, fiches toxicologiques, base de données CarAtex, etc.

Fils plastiques

Les fils plastiques sont composés de polymères mélangés à différents additifs. Les principaux matériaux polymères sont l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène), le PLA (acide polylactique), le PET (polyéthylène téréphtalate), le PC (polycarbonate) et le PEEK (polyéther éther cétone). En ce qui concerne les additifs, on retrouve des pigments, des stabilisants thermiques, des stabilisants UV, des charges (particules métalliques, fibres de carbone...) et des ignifugeants.

Le matériau plastique 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.

Tous ces produits sont susceptibles d'être combustibles. Lorsque la polymérisation est incomplète, les produits émis sont souvent bien plus inflammables que la matière plastique en elle-même.

Résines liquides

Elles sont composées principalement de monomères ou de pré-polymères (acrylates, polyuréthanes, résines époxy) dissous dans des solvants organiques (polyéthylène glycol, glycérol). Les risques (par inhalation ou contact cutané) sont principalement dus aux monomères ou solvants qui composent les résines mais aussi aux additifs, comme dans le cas des fils plastiques, aux catalyseurs et autres additifs de réaction.

Tous ces produits sont combustibles. Les monomères et les solvants sont souvent inflammables.

Poudres plastiques

La majorité des poudres présente des risques pour la santé lors de l'exposition par inhalation ou par contact cutané. 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).

Toutes ces poudres plastiques sont combustibles. De faible granulométrie, elles sont très réactives et plus sensibles à l'inflammation. Une poudre combustible en suspension dans l'air est susceptible de générer une explosion sous l'effet d'une source d'inflammation.

Liants

Les poly(acide acrylique), les polyuréthanes, les copolymères styrène acrylate, le cyanoacrylate de méthyle sont les liants les plus utilisés dans la fabrication additive. Par exemple, le cyanoacrylate de méthyle est irritant pour la peau, les yeux et les voies respiratoires. Il est susceptible de s'enflammer en présence d'une source d'inflammation, à partir d'environ 83°C.

Produits émis (produits de dégradation)

Sous l'effet de la température, les matières plastiques se dégradent superficiellement, formant notamment des composés organiques volatils (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 comme des irritations, des allergies, des atteintes du système nerveux, voire des cancers ou des effets sur la reproduction.

Les produits de dégradation sont majoritairement inflammables. Si leur concentration est suffisante (absence de ventilation), ils sont susceptibles de s'enflammer.

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...).

Les solvants classés inflammables forment, à température ambiante, suffisamment de vapeurs pour pouvoir s'enflammer ou générer une explosion.

2. PRÉVENTION DES RISQUES SPÉCIFIQUES

Les risques mécaniques, électriques¹, et ceux liés aux rayonnements et aux brûlures doivent être pris en compte lors de la conception de la machine en respectant les règles techniques prévues par la directive Machine 2006/42 CE, transposée dans le Code du travail à l'annexe I de l'article R. 4312-1. Les risques chimiques et le risque d'incendie/explosion sont, quant à eux, partiellement pris en compte dans ce cadre.

Les machines de fabrication additive pouvant être modulaires, il est essentiel de respecter les règles de l'art concernant leur conception, notamment en ce qui concerne la partie électrique et les températures maximales admissibles par les différents composants. Par exemple, un défaut de la sonde de température sur la tête d'extrusion peut amener une surchauffe du fil plastique induisant un départ d'incendie.

Les risques existent au cours de toutes les étapes du procédé de fabrication : stockage, nettoyage, finition des pièces, maintenance de la machine... Leur évaluation passe par une cartographie des postes de travail et des tâches, ainsi que des différentes zones d'utilisation des produits dangereux. Le niveau d'exposition est principalement déterminé par la tâche effectuée et les propriétés physico-chimiques du produit manipulé. La quantité de produit et la fréquence des opérations influent également sur l'exposition.

¹ Ces procédés nécessitant une énergie électrique importante, il convient de veiller tout particulièrement au dimensionnement et à la mise en œuvre des canalisations électriques ainsi qu'à la protection des circuits.

La démarche de prévention des risques chimiques ne se limite pas à l'évaluation des risques mais doit être poursuivie par la mise en place d'actions concrètes de prévention et de protection, visant à supprimer ou à limiter le risque, hiérarchisées en fonction des priorités et des délais de réalisation.

Principes de prévention

Substitution

Substituer, si c'est techniquement possible, les produits les plus dangereux par des alternatives moins dangereuses. Par exemple, remplacer un solvant de nettoyage inflammable par un qui ne l'est pas (remplacer l'acétone par des hydrocarbures désaromatisés ou des éthers de glycol non reprotoxiques) et substituer des solvants de finition (remplacer l'isopropanol par des éthers de glycol ou des acétates d'éther de glycol non reprotoxiques).

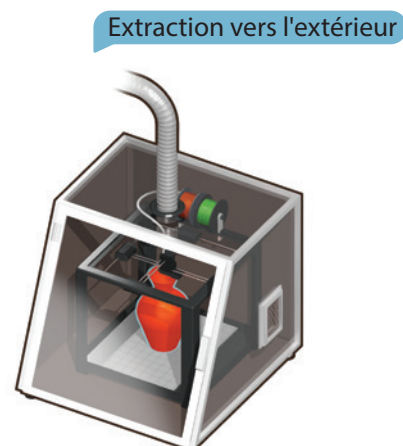
Circuit fermé

Travailler autant que possible en vase clos sur l'ensemble des étapes (manipulation des poudres, manipulation des résines, fabrication, finition, nettoyage...). Lors de l'acquisition d'une nouvelle machine, privilégier celle disposant d'un capotage assurant l'étanchéité de la zone de fabrication dans l'atmosphère de travail. Certaines machines sont, par exemple, équipées d'une boîte à gants et d'un système de nettoyage intérieur (ajouter ces exigences au cahier des charges).

Aspiration/Captage à la source

Les locaux dans lesquels sont utilisées les machines de fabrication additive sont considérés comme des locaux à pollution spécifique. Dans les situations où le travail en vase clos n'est pas techniquement possible, l'emploi d'un dispositif d'aspiration avec captage au plus près de la source d'émission est nécessaire. Les vitesses d'air de transport dans les conduits doivent être adaptées aux polluants. Pour les poudres, un minimum de 20 m/s est requis afin d'éviter les dépôts

Figure 2



dans les canalisations. L'air pollué doit être rejeté à l'extérieur, après traitement le cas échéant. Le captage des vapeurs permet de réduire le risque de formation d'une atmosphère explosive (Atex), notamment lors de l'utilisation de solvants inflammables. Le dispositif de captage et le matériel associé doivent être en adéquation avec le produit et le zonage Atex le cas échéant.

Ventilation générale et apport d'air neuf

En complément des systèmes de captage localisé, une ventilation générale doit être installée afin de fournir aux locaux de l'air neuf et diluer les polluants résiduels. 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, en aucun cas, provenir d'un local à pollution spécifique. De surcroît, la maîtrise des flux d'air permet d'aménager des locaux en dépression par rapport aux locaux contigus afin d'éviter aux polluants de diffuser dans les différentes pièces à proximité.

Mesures organisationnelles

Séparer les activités polluantes des activités non polluantes. En complément, l'accès aux locaux de fabrication additive doit être limité aux personnes autorisées. Une maintenance préventive sur les machines de fabrication additive (remplacement des éléments d'étanchéité, des tuyaux souples, des têtes d'extrusion...), conformément à la notice d'entretien du fabricant, permet de garantir l'efficacité des systèmes de protection mis en place.

EPI

En complément des mesures de protection collective, qui doivent être privilégiées, des équipements de protection individuelle peuvent être utilisés. 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 anti-aérosols de classe P2 ou P3 (selon la nature des poudres) combinés, le cas échéant, à des filtres anti-gaz ainsi que de chaussures de sécurité antistatiques.

Formation/Information

Les salariés doivent être informés des risques liés aux procédés de fabrication additive mis en œuvre dans l'entreprise et des dangers des produits utilisés ou émis. Ils doivent également être formés à l'utilisation des moyens de protection collective et individuelle. Une formation aux moyens d'extinction (extincteurs notamment) et à la démarche à adopter en cas de survenance d'un sinistre (urgence médicale, incendie...) doit aussi être mise en place.

3. MESURES DE PRÉVENTION POUR LES PRINCIPALES TÂCHES

Avant la mise en œuvre

Réception et transfert des matières premières

Lire l'étiquetage et prendre connaissance des fiches de données de sécurité (FDS) des produits, respecter les consignes mentionnées dans ces dernières. Vérifier le bon étiquetage des récipients en concordance avec la FDS en cas de reconditionnement. Éviter les conteneurs peu étanches, souillés ou abîmés. Pour les résines et les poudres, faire le transvasement en circuit fermé ou sur des postes de travail ventilés (cabine ouverte, dossier aspirant, hotte). N'utiliser que des récipients spécifiques et adaptés aux différents produits.

Stockage

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, étiquetés, en bon état et fermés soigneusement après chaque utilisation. Le stockage des poudres, des résines, des solvants ou autres produits volatils (colles, par exemple) nécessite un système de ventilation mécanique général afin de limiter l'accumulation de produits dangereux dans l'atmosphère.

Mise en œuvre

Préparation de la charge des poudres et résines

Préparer les éventuelles charges sur un poste de travail ventilé (table aspirante, dossier aspirant...). Alimenter la machine en matière première en vase clos, à défaut prévoir un système de captage (anneau aspirant, par exemple) au niveau de l'ouverture de remplissage.

Fabrication *in situ* dans la machine

La machine doit être placée dans un local spécifique et ventilé. Il est recommandé d'utiliser des machines étanches adaptées à l'utilisation des poudres ou des résines. Dans le cas où la machine n'est pas étanche, un système de captage localisé est alors nécessaire (voir figure 2).

Fin de la fabrication à base de poudre ou de résine

Ne pas ouvrir la machine avant la fin de la fabrication. Respecter une temporisation finale en gardant un débit d'aspiration afin d'évacuer les produits de dégradation. Lorsque la machine le permet, aspirer les rejets et les évacuer à l'extérieur après filtration. L'utilisation d'un système de boîte à gants, muni d'une aspiration, permet d'enle-

ver du plateau (support) la matière non utilisée, de nettoyer la pièce, le plateau et l'intérieur de la machine en vase clos. Récupérer la matière non utilisée via un système en circuit fermé s'il existe. Laisser un temps de refroidissement avant la récupération des pièces afin d'éviter les risques de brûlures (surfaces chaudes des machines, tête d'extrusion, récupération des pièces dans le bac de poudre).

Post-traitement

Finition des pièces

Effectuer les opérations de post-traitement (découpe, ponçage, perçage) sur un poste ventilé avec des vitesses d'air de l'ordre de 0,5-1 m/s au point d'émission des polluants (ou supérieures en fonction de la vitesse initiale des polluants).

L'utilisation de soufflette est à limiter au nettoyage final de la pièce et à condition que cette opération s'effectue dans une enceinte étanche mise en dépression par un dispositif d'aspiration. Les bacs à solvants prévus pour la dissolution des polymères supports doivent être fermés lorsqu'ils ne sont pas utilisés et être équipés d'un système de captage des polluants lors de leur utilisation.

Changement des filtres de la machine

Les filtres usagés doivent être emballés et stockés dans des locaux frais, ventilés, à l'abri des rayonnements solaires ou de toute autre source de chaleur.

Tamissage des poudres récupérées

La manipulation des poudres lors de l'opération de tamissage doit être effectuée avec les mêmes mesures de prévention que celles mises en place pour la production des pièces : transvasement en vase clos, emploi de machines étanches, récupération en vase clos, nettoyage par aspiration ou par essuyage (soufflage proscrit).

Gestion des déchets

Les déchets de poudres, de résines et autres produits utilisés ainsi que les filtres usagés et les chiffons de nettoyage souillés doivent être traités comme des déchets chimiques. Ils doivent être stockés dans des locaux ventilés puis être pris en charge par une entreprise spécialisée dans le traitement des déchets chimiques.

Maintenance de la machine

Toute intervention sur la machine doit être effectuée par du personnel compétent et formé sur les risques existants et sur les moyens de protection mis en place.

Dans le cas où un système de sécurité de la machine doit être neutralisé, lors d'une opération de maintenance par exemple, les risques résiduels inhérents à cette neutralisation (risque électrique, risque de brûlure, rayonnement laser, risque UV) doivent être identifiés et pris en compte dès la concep-

tion (mise en œuvre d'un mode de marche particulier, mesures compensatoires, informations pour l'utilisation). Il faut en outre veiller à la consignation des fluides et énergies avant toute intervention [1]. Enlever le maximum de poudre, de résine et de sous-produits en circuit fermé, avant d'accéder à l'intérieur de la machine. Ventiler l'intérieur de la machine et s'assurer que la ventilation générale de la zone est en fonctionnement. Utiliser des EPI. En plus de la prévention des risques chimiques et du risque d'incendie/explosion, si le laser est la technique utilisée, employer des écrans de protection adaptés [2]. Pour les machines utilisant du fil, les températures mises en jeu pouvant être plus importantes lors de la purge des têtes d'extrusion, les émissions générées lors de cette phase doivent être captées à l'aide de dispositifs de captage adaptés.

Nettoyage du poste de travail

L'ensemble des postes de travail (finition, découpe des pièces, pesée ou transvasement des poudres...) doit être maintenu propre. Un nettoyage par aspiration ou par essuyage est nécessaire (pas de soufflage).

BIBLIOGRAPHIE INRS

[1] *Consignations et déconsignations*. ED 6109

[2] *Rayonnements lasers. Principe, application, risque et maîtrise du risque d'exposition*. ED 6071

■ *Incendie et lieu de travail. Prévention et organisation dans l'entreprise*. ED 990

■ *Évaluation du risque incendie dans l'entreprise. Guide méthodologique*. ED 970

■ *Les mélanges explosifs. 1. Gaz et vapeurs*. ED 911

■ *Les mélanges explosifs. 2. Poussières combustibles*. ED 944

■ *Mise en œuvre de la réglementation relative aux atmosphères explosives (Atex). Guide méthodologique*. ED 945

■ Base de données *Plastiques, risque et analyse thermique*, consultable sur <http://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques.html>

■ Base de données *CarAtex*, consultable sur <http://www.inrs.fr/publications/bdd/caratex.html>

■ *Principes généraux de ventilation. Guide pratique de ventilation*. ED 695

■ *Atelier de plasturgie. Guide pratique de ventilation*. ED 6146

■ *Les appareils de protection respiratoire. Choix et utilisation*. ED 6106

GESTION DU RISQUE D'INCENDIE/EXPLOSION

Les risques d'incendie et d'explosion doivent être évalués à toutes les étapes du procédé. L'identification des zones à risque permet de cibler les dispositions techniques et organisationnelles à mettre en place. Les sources potentielles d'inflammation doivent être notamment identifiées et supprimées. Il est conseillé de mettre en place un cloisonnement (murs et portes coupe-feu) entre les différentes zones présentant des risques d'incendie/explosion (stockage de matières premières, zone de fabrication, stockage des déchets...) afin de limiter la propagation d'un incendie. Une détection de fumée peut être mise en place dans le local de fabrication en cas d'absence de surveillance. La mise en place d'extincteurs permet d'intervenir rapidement sur un début d'incendie. À proximité des machines, on privilégiera des extincteurs au dioxyde de carbone, moins agressif pour le matériel électrique et électronique. En revanche, cet agent extincteur n'ayant qu'une efficacité limitée sur les braises, il pourra être nécessaire de compléter l'extinction avec de l'eau. Des consignes de sécurité doivent être élaborées et les personnes formées à leur contenu (procédure 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).



Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris • Tél. 01 40 44 30 00 • www.inrs.fr • info@inrs.fr

Auteurs : François-Xavier Keller (INRS),
Myriam Ricaud (INRS),
Cosmin Patrascu (INRS)

Illustrations : Alain Vilcocq (p. 2) et
Jean-André Deledda (p. 3)

Mise en pages : Opixido