



Fabrication Additive :

Quelles finalités pour quels matériaux et procédés ?

« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »

30 minutes d'intervention

« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »

Rappel des Procédés

Nom et description succincte du procédé		Matières utilisées *
Extrusion de matière (FDM – Fused Deposition Modeling) Le matériau est distribué de manière sélective par une buse en couches successives. Généralement la buse est dotée d'un système pour chauffer et faire fondre la matière.		Fils plastiques : ABS, PLA, PET, PC, PEEK...
Photopolymérisation en cuve (stéréolithographie – SLA) Un photopolymère liquide est durci de manière sélective par un rayonnement spécifique (LED ou laser généralement).		Photopolymères liquides : acryliques, polyuréthanes, résines époxy, polyéthylène glycol, glycérol...
Fusion sur lit de poudre (Laser Bed Melting) L'énergie thermique (rayon laser, faisceau d'électrons...) fait fondre de manière sélective le matériau présent sous forme de poudre.		Poudres plastiques : polyamides (PA11, PA12, PA6), TPU... Poudres métalliques : titane, nickel, aluminium, inox...

Projection de liant Un produit liquide (une colle) est déposé de manière sélective pour lier le matériau qui est sous forme de poudre. Cette technologie nécessite généralement une deuxième étape, de cuisson pour stabiliser la forme finale de l'objet.		Poly(acide acrylique), polyuréthanes, copolymères styrène acrylate, cyanoacrylate de méthyle, polyamides... Poudres métalliques : titane, nickel, aluminium, inox...
Stratification en couches Les couches de matériau sont découpées de manière sélective puis liées pour former l'objet à fabriquer.		Feuilles papier ou plastique
Projection de matière Des gouttelettes de matériau sont déposées de manière sélective et solidifiées sous l'action d'une lumière UV.		Photopolymères liquides : acryliques, polyuréthanes, résines époxy, polyéthylène glycol, glycérol, silicones, élastomères, cires...
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...).		Poudres plastiques : polyamides (PA11, PA12, PA6), TPU... Poudres ou fils métalliques : titane, nickel, aluminium, inox...

© Illustrations : A. Vilkoç pour l'INRS

La norme NF EN ASTM ISO 52900 et la collection de normes NF EN ISO 17296 - 2 à 4 définissent sept procédés de fabrication additive

ABS (acrylonitrile butadiène styrène) – PLA (acide polylactique) – PET (polyéthylène téréphtalate) – PC (polycarbonate) – PEEK (polyéther éther cétone)



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



Parlons des effets sur la santé

Effets sur la santé dépendent :

- de la voie d'exposition (contact cutané, inhalation)
- de l'intensité de l'exposition,
- des caractéristiques physico-chimiques des agents chimiques (nature chimique, taille des particules...)
- de l'état de santé des salariés (sensibilisation à certains composés allergènes, femmes enceintes, pathologies respiratoires préexistantes...).

Cela peut entraîner :

- Une irritation de la peau ou des muqueuses oculaires et respiratoires (poussières de cuivre par exemple) ;
- Des allergies cutanées (eczéma au méthacrylate de méthyle par exemple) ou respiratoires (asthme au cobalt par exemple) ;
- Des atteintes du système nerveux (somnolence ou vertiges en cas de forte exposition à des composés organiques volatils par exemple) ;
- Des effets cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction (inhalation de composés métalliques du cobalt, du cadmium et du nickel notamment). (ou suspicion d'effets cancérogènes pour des particules ultrafines)
- Des phénomènes de surcharge pulmonaire (en cas d'inhalation chronique et à concentration élevée de poussières dites inertes) ;



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



La **nature des émissions de polluants** et les **niveaux d'exposition** sont **dépendants de la matière première utilisée** mais aussi de la **technologie de transformation**. À titre d'exemple, **l'extrusion de fil fondu plastique** émet principalement des **particules ultrafines** de dérivés de polymère, la **stéréolithographie** émet principalement des **vapeurs organiques** et la **fusion sur lit de poudres métalliques** émet des **particules de composés métalliques**.

L'identification des dangers repose sur un inventaire exhaustif de tous les agents chimiques utilisés ou générés en fonction de la technique mise en œuvre :

- les matières premières plastiques et métalliques (y compris celles recyclées),
- les produits de dégradation (les sous-produits),
- les produits annexes (les gaz, les liants, etc.),
- les produits de nettoyage, d'entretien et de maintenance.



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



Effets sur la santé de produits (liste non exhaustive) utilisés lors de la mise en œuvre de procédés de fabrication additive

PRODUITS UTILISÉS	PRINCIPAUX EFFETS SUR LA SANTÉ
Azote	Anoxie
Cadmium	Atteintes digestives - respiratoires - osseuses et cardio-vasculaires, peut provoquer le cancer, effets mutagène et toxique pour la reproduction suspectés (agent cancérigène de catégorie 1B et mutagène et toxique pour la reproduction de catégorie 2 selon le règlement CLP)
Cobalt	Allergies cutanée et respiratoire, peut provoquer le cancer, effet mutagène suspecté, toxique pour la reproduction (agent cancérigène et toxique pour la reproduction de catégorie 1B et mutagène de catégorie 2 selon le règlement CLP)
Cuivre	Irritant pour les yeux, la peau et les voies respiratoires
Cyanoacrylate de méthyle	Irritant pour la peau, les yeux et les voies respiratoires
Isopropanol	Irritant pour les yeux, vertiges et somnolence
Méthacrylate de méthyle	Allergie cutanée, irritant pour la peau et les voies respiratoires
Nickel	Allergie cutanée, susceptible de provoquer le cancer (agent cancérigène de catégorie 2 selon le règlement CLP*)

* Règlement CLP : règlement européen sur la classification, l'étiquetage et l'emballage des produits chimiques



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



Effets sur la santé de produits émis (liste non exhaustive) lors de la mise en oeuvre de procédés de fabrication additive

PRODUITS ÉMIS	PRINCIPAUX EFFETS SUR LA SANTÉ
Acétone	Irritant pour les yeux, vertiges et somnolence
Isopropanol	Irritant pour les yeux, vertiges et somnolence
Oxydes de nickel	Allergie cutanée, peut provoquer le cancer (agents classés cancérogènes de catégorie 1A selon le règlement CLP*)
Oxydes de cobalt	Allergies cutanée et respiratoire, cancérogénicité et toxicité pour la reproduction présumées
Oxydes de cuivre	Irritant pour les yeux, la peau et les voies respiratoires
Oxyde de chrome (trioxyde de chrome)	Irritant pour les yeux, la peau et les voies respiratoires, atteintes des voies aériennes, peut provoquer le cancer, mutagène présumé, toxique pour la reproduction suspecté (agent cancérogène de catégorie 1A, mutagène de catégorie 1B et toxique pour la reproduction de catégorie 2 selon le règlement CLP*)
Oxydes de cadmium	Atteintes digestives - respiratoires - osseuses et cardio-vasculaires, peut provoquer le cancer, effets mutagène et toxique pour la reproduction suspectés (agent cancérogène de catégorie 1B et mutagène et toxique pour la reproduction de catégorie 2 selon le règlement CLP*)
Poussières ultrafines	Effets respiratoires et cardiovasculaires, voire cancérogènes (en fonction des particules)
Styrène	Nocif par inhalation, effets ototoxiques et toxicité pour la reproduction suspectée, irritant pour la peau et les yeux



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



Evaluation du niveau de risque avec:

- Nb de personnes/ pourcentage exposé au danger → P
- Fréquence d'exposition → F
- La gravité liée au danger → G
- La maîtrise du risque par l'OTH → M

$$\text{Niveau de risque} = \frac{(P \times F \times G)}{M}$$

✓ Nombre de personnes exposées

P = 1 si < 25 % de l'effectif

P = 2 si 25 % < effectif < 50 %

P = 3 si 50 % < effectif < 75 %

P = 4 si > 75 % de l'effectif

✓ Gravité

G = 1 si très faible ou risque d'incident bénin

G = 2 si faible ou risque de lésions réversibles et sans arrêt de travail

G = 3 si importante ou risque de lésions irréversibles ou avec arrêt de travail

G = 4 si catastrophique ou mort ou incapacité totale de travail

✓ Fréquence d'exposition (liée aux statistiques de l'entreprise)

F = 1 si exceptionnelle (trimestrielle ou quelques fois / an)

F = 2 si faible (mensuelle ou quelques fois / mois)

F = 3 si importante (hebdomadaire ou quelques fois / semaine)

F = 4 si majeure (quotidienne ou quelques fois / jour)

✓ Maîtrise du risque organisationnel (consignes de poste), technique (EPC/EPI), humain (lié à l'expérience de l'opérateur...)

M = 1 si 0 critère présent

M = 2 si 1 critère présent

M = 3 si 2 critères présents

M = 4 si 3 critères présents



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



Maitrise du risque :

- Mesures **Organisationnelles** (consignes, procédures, notices, locaux, substitutions...)
- Mesures **Techniques** (Equipements de protection collective, EPI...)
- Mesures **Humaines** (Formations, informations, expériences, suivi médical...)

A vous de classer ces propositions...



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



ORGANISATIONNELLES

Signalétique affichée sur la porte d'accès

Revêtements de surfaces lisses, nettoyables, décontaminables (sols, paillasse, murs)

Locaux séparés des activités tertiaires (couloir, bureau...)

Inventaire des produits et mise à disposition des FDS

Principe de substitution mis en œuvre

Réduction de la production d'aérosols par le procédé

Réduction du nombre de salariés exposés

Dispositif interdisant l'accès aux imprimantes 3D

Vérification périodique annuelle des équipements ventilés

Levée des non conformités relevées lors des vérifications

Procédure de nettoyage écrite, affichée

Procédure de gestion des déchets

Poubelles étiquetées (logo, contient des nanomatériaux)

Filières produits chimiques toxiques et/ou CMR

Entreposage dans un local de stockage adapté

TECHNIQUES

Encoffrement de la zone d'émission des polluants

Ventilation générale des locaux

Compensation d'air (entrée d'air égale à l'extraction)

Captage à la source d'émission des polluants (sorbonne, bras aspirant ...)

Extraction en toiture à distance des prises d'air

Capotage avec rejet en toiture

Stockage (matériaux, produits finis) en armoire ventilée

Masque de type FFP3

Gants jetables / réutilisables

Vêtement jetable / réutilisable

Lunettes de protection

Voie humide (lingette imbibée)

Aspirateur industriel (filtre HEPA H14)

Poubelles dédiées fermées

HUMAINES

Renseignement de la fiche individuelle d'exposition (ACD, ROA, RI)

Diffusion au Médecin du travail des fiches individuelles d'exposition

Suivi médical réalisé par le Médecin du travail

Formation générale

Formation au poste de travail par l'encadrant

Information du prestataire d'élimination des déchets de la présence de nanomatériaux



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



Exemple de phases pour l'impression 3D poudre métallique

Des étapes à surveiller de près :

- Les pesées
- L'ouverture de la machine
- La maintenance ou le nettoyage des équipements
- Le changement des filtres
- La récupération des poudres
- Les post-traitements des pièces

PRÉPRODUCTION	<ul style="list-style-type: none">- Récupération de la poudre (métallique) de l'endroit de stockage ;- transfert de la poudre du récipient de stockage dans le récipient adapté à la machine ;<ul style="list-style-type: none">- pesée de la poudre ;- alimentation en poudre de la machine ;- réglage de la machine.
PRODUCTION	<ul style="list-style-type: none">- Fabrication proprement dite de la pièce.
FINITION	<ul style="list-style-type: none">- Ouverture de la machine ;- nettoyage de la pièce dans la machine, récupération / retrait du maximum de poudre ;<ul style="list-style-type: none">- récupération du plateau avec la pièce ;- nettoyage de la pièce en dehors de la machine ;- découpe de la pièce du plateau de fabrication ;- finition de la pièce (ponçage, ébavurage, etc.) ;- récupération de la poudre non utilisée de la machine ;<ul style="list-style-type: none">- tamisage de la poudre avant recyclage.



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



Formation générale :

- Les Risques identifiés dans la structure
- La Prévention de manière générale
- Les Equipements de protection collective à disposition dans la structure
- Les Equipements de protection individuelle à disposition dans la structure (et leur entretien)
- La Gestion des déchets
- La Conduite à tenir en cas d'incident
- La Conduite à tenir en cas d'urgence

Formation au poste de travail impression 3D :

- Les Risques identifiés selon le procédé et les matières utilisées et les effets sur la santé
- La Prévention spécifique liée au procédé et matériaux
- Les Equipements de protection collective à disposition selon le procédé
- Les Equipements de protection individuelle à disposition selon le procédé
- La Gestion des déchets liés au procédé et aux matériaux
- La Conduite à tenir en cas d'incident avec le procédé
- La Conduite à tenir en cas d'urgence selon le procédé



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



Parlons visite médicale

Traçabilité des expositions :

- A l'aide des FIE (agents chimiques dangereux, rayonnements optiques artificiels, rayonnements ionisants)
- Rempies sous la responsabilité du directeur d'unité
- Copie de ces FIE transmise au médecin du travail
- FIE précise l'état physique des produits chimiques incluant les nanomatériaux auxquels l'opérateur a été exposé, les procédés développés, la durée et la fréquence des manipulations

Suivi médical :

- Avoir ses FIE lors de la visite (ou transmises avant)
- Eventuellement examens complémentaires (biologiques ou autres) (recommandations de bonnes pratiques professionnelles lorsqu'elles existent)
- Un suivi médical renforcé si procédé utilise ou émet des produits classés CMR de catégories 1 A ou 1 B.
- Possible surveillance par IBE (Indice Biologique d'Exposition) en fonction des niveaux d'exposition repérés par des mesures atmosphériques ou de surface
- Traçabilité des expositions et des visites médicales dans le dossier médical de santé au travail (DMST)
- Surveillance post-professionnelle si besoin.



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



Bon à savoir

Le **suivi individuel renforcé (SIR)** de l'état de santé des travailleurs exposés à des postes dits « à risque » comprend un **examen médical d'aptitude à l'embauche**, lequel a notamment pour objet :

- **de s'assurer** que le travailleur est médicalement apte au poste de travail auquel l'employeur envisage de l'affecter ;
- **de rechercher** si le travailleur n'est pas atteint d'une affection dangereuse pour les autres travailleurs ;
- **de proposer** éventuellement les adaptations du poste ou l'affectation à d'autres postes ;
- **d'informer** le travailleur sur les risques des expositions au poste de travail et le suivi médical nécessaire, ainsi que les moyens de prévention à mettre en œuvre.

Cet examen ainsi que son renouvellement donnent lieu à la délivrance par le médecin du travail d'un avis d'aptitude ou d'inaptitude, lequel est transmis au travailleur et à l'employeur et versé au dossier médical en santé au travail de l'intéressé.

L'**aptitude physique** se définit comme l'appréciation établie par le médecin du travail quant à la possibilité, pour un salarié, d'effectuer le travail qui lui est confié en fonction de son état de santé. Le médecin du travail peut déclarer le salarié apte, mais peut aussi se prononcer sur une aptitude partielle, accompagnée d'indications pour l'employeur en vue de l'aménagement du poste de travail ou de l'adaptation du contrat du salarié. Il peut enfin déclarer le salarié inapte au travail, ce qui ouvre à l'employeur la possibilité de le licencier s'il ne peut pas le reclasser à un autre poste.

À chaque examen médical (embauche, périodique, reprise et à la demande), le médecin du travail établit une fiche d'aptitude en double exemplaire, dont il remet un exemplaire au salarié et transmet l'autre à l'employeur. Le médecin du travail ne note évidemment sur cette fiche que ses conclusions administratives : aptitude sans restriction ou demande d'aménagement du poste par exemple.

« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »

Question : Selon vous, le risque est-il **maitrisé** ? **Moyennement maitrisé** ? **Non maitrisé** ?



Exemple de situation :

4 imprimantes 3D (3 sous hottes et 1 à côté de la hotte)

Impression avec filament PLA

Conditions : support chauffé à 60°C, fil chauffé à 205°C.

2 imprimantes qui fonctionnent en même temps sous la hotte ventilée

Pièce commune avec d'autres activités

Mesure réalisée en Mai 2023 au CRPP

« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



Partector

Le PARTECTOR est le plus simple et le plus petit des appareils de mesure de nanoparticules à lecture directe. Sa compacité permet un port personnel. Bien que ne différenciant pas le type de particules (substances d'intérêt, polluants de procédés ou pollution atmosphérique), il est utile pour détecter les sources émissives. Utilisé en parallèle avec un Echantillonneur PARTICLEVER, il peut apporter des renseignements utiles sur les variations de concentration. L'appareil mesure la LDSA (Surface des particules se déposant dans le poumon) en $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$.



Mesure réalisée en Mai 2023 au CRPP



« Sensibilisation interactive pour une meilleure prévention liée à la fabrication additive »



Merci de votre attention et de votre participation