

# La fabrication additive (ou impression 3D) : Un empilement de risques?

Eric Silvente – INRS/ECT/RC

Juin 2023

Notre métier,  
rendre le vôtre plus sûr

[www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)

# L'INRS EN BREF



## Missions

Contribuer à la prévention des **accidents du travail et des maladies professionnelles** en déployant des activités d'assistance, d'études et recherche, de formation et d'information pour :

- **identifier** les risques professionnels et **mettre en évidence** les dangers
- **analyser leurs conséquences** pour la santé et la sécurité de l'homme au travail
- **développer et promouvoir** les moyens pour maîtriser ces risques au sein des entreprises

## Répartition de l'activité par mode d'action (volume horaire)

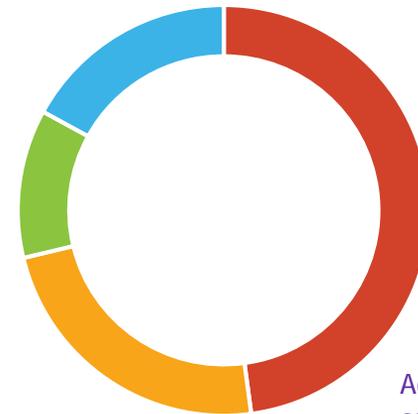
- **Budget** 79 M€
- **Effectif** **579 personnes** (à Paris et en Lorraine)

**45 %**  
Etudes et Recherche

**22 %**  
Assistance

**11 %**  
Formation

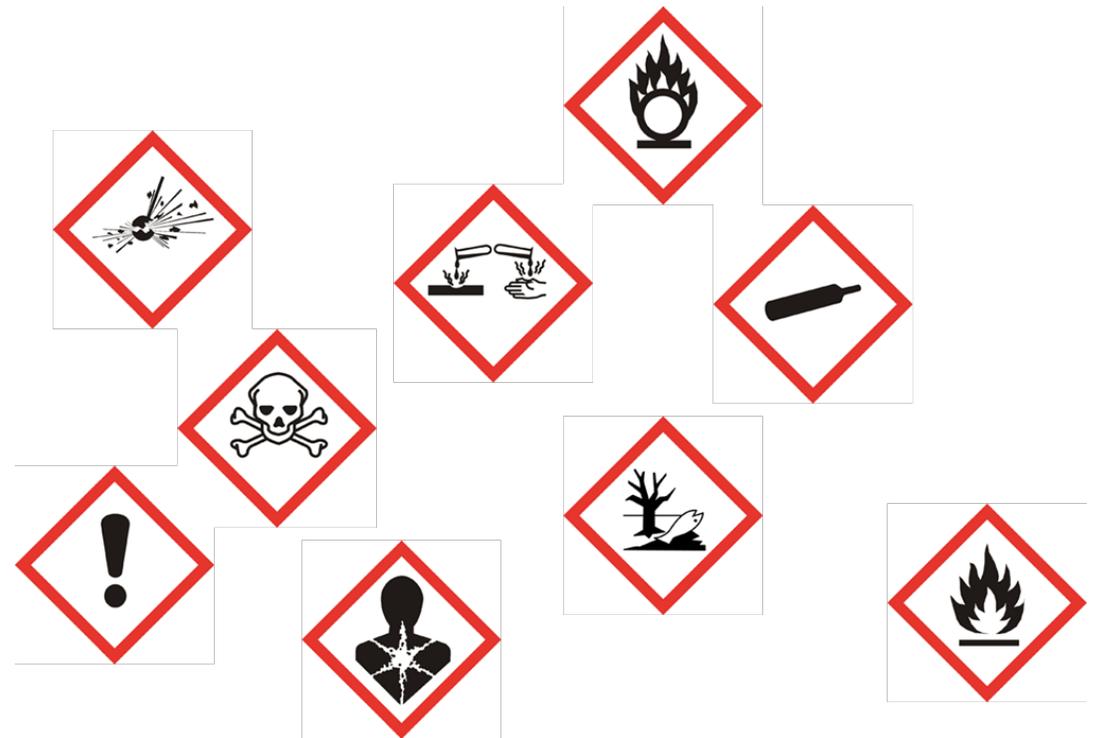
**16 %**  
Information



Activités spécifiques  
ou transverses **6 %**

# Evaluation du risque

- **Danger**
  - Intrinsèque à l'objet/action
  - Ce qui fait « mal »
- **Exposition**
  - Entrer en contact avec...
- **Risque** = Danger + Exposition

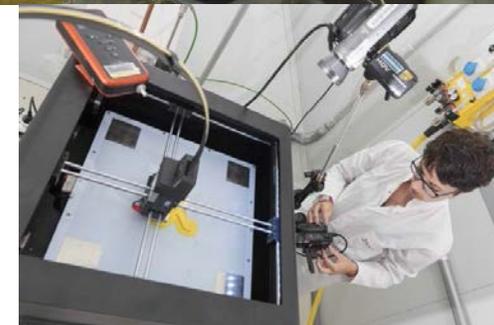


# Un empilement de risques!

La fabrication additive (FA) regroupe des techniques et des matériaux divers et variés :

- ✓ les principaux matériaux utilisés sont **les plastiques\* et les métaux° (ainsi que les céramiques, les bétons, etc.)**. Ils peuvent se présenter sous différentes formes: **poudres\*°, fils\*° ou liquides\***;
- ✓ les techniques les plus répandues sont **l'extrusion de matières plastiques, la photopolymérisation en cuve et la fusion sur lit de poudre**.

Comme tout procédé industriel, la fabrication additive présente des risques multiples (TMS, brûlures, chutes, incendie, etc.) liés à l'utilisation de matériel électrique, de produits inflammables ou de rayonnements optiques, à la manipulation de récipients sous pression, à la manutention répétée de charges, etc.



# Focus sur le risque chimique

La fabrication additive présente également des risques associés **aux agents chimiques qui 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



Risques chimiques



# L'évaluation du risque chimique

L'évaluation des risques chimiques repose sur **un inventaire** 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



Les caractéristiques (données physico-chimiques, dangers, etc.) des agents chimiques doivent être identifiées à l'aide des sources d'information disponibles : **l'étiquetage, les fiches de données de sécurité (FDS), les indications du fabricant, organismes de prévention Carsat, Service de Santé au Travail (SST), INRS, Outil Seirich (INRS)**

# L'inventaire des agents chimiques - FA métallique



- **Les matières premières : les poudres et les fils d'alliages métalliques**

L'aluminium, le nickel, le cobalt, le fer, le cadmium, le titane, le manganèse, le zinc, le tungstène, le chrome, etc.

- **Les produits de dégradation : les oxydes métalliques**

Les oxydes de nickel, de cobalt, de manganèse, etc.

} **Particules ultra-fines**

- **Les produits d'entretien, de nettoyage et de maintenance**

L'isopropanol, l'acétone, etc.

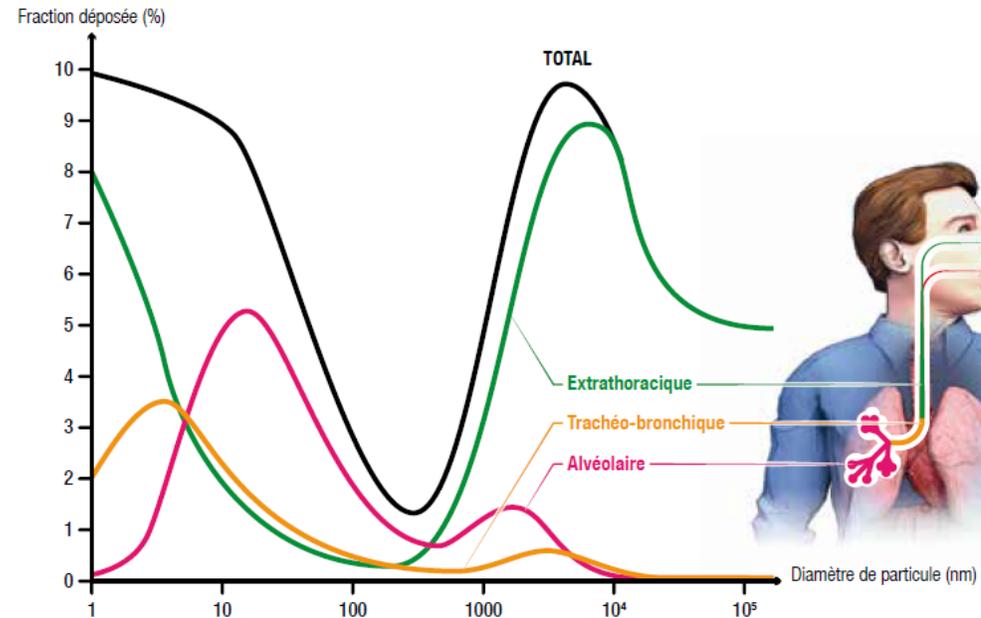
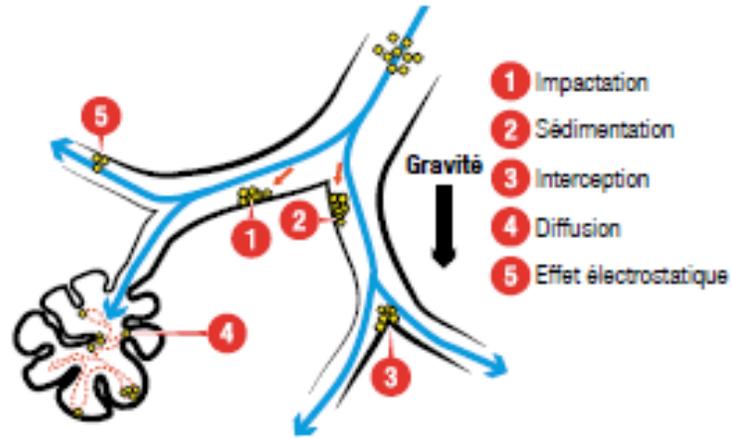
- **Les liants**

Le cyanoacrylate de méthyle

- **Les gaz d'inertage**

L'argon, l'azote, etc.

# Particules ultrafines/nano (<100nm)



- Déposition variable selon la **taille** des particules et leur **comportement dans l'air**
- Part des particules déposées dans le **poumon profond** plus importante que dans le cas des particules micrométriques
- Déposition préférentielle au niveau des **alvéoles pulmonaires**
- Plus de particules se déposent **à l'effort** ou en cas de **fonction pulmonaire altérée**

# L'inventaire des agents chimiques - FA plastique



## Les matières premières :

- **Les fils plastiques (polymères et additifs)** : ABS, PLA, PET, PC, PEEK, etc. + pigments, stabilisants thermiques, ignifugeants, charges, etc.
- **Les résines liquides** : monomères et pré-polymères (acrylates, polyuréthanes, résines époxy) dissous dans des solvants organiques (polyéthylène glycol, glycérol, etc.) + additifs (pigments, charges, etc.)
- **Les poudres plastiques** : polyamides (PA11, PA12, etc.), polyuréthane thermoplastique (TPU), etc.
- **Les produits de dégradation** : les gaz (CO, CO<sub>2</sub>, composés organiques volatils : styrène, aldéhydes, etc.) et les particules (fines et ultra-fines)
- **Les produits de finition, de nettoyage et d'entretien** : L'isopropanol, l'acétone, etc.
- **Les liants** : Les polyuréthanes, les copolymères styrène-acrylate, le cyanoacrylate de méthyle, etc.

# Caractérisation de l'exposition

## 2 voies d'exposition principales

**Par inhalation** des fumées dégagées lors de la fabrication, des vapeurs lors des étapes de finition ou de nettoyage, des poussières lors de la manipulation ou lors des étapes de finition, des gaz lors de la manutention...

**Par contact cutané** avec des poussières ou des solvants

# Caractérisation de l'exposition - Fusion sur lit de poudre (métal)

Polluant	Valeurs	VLEP	Commentaire
Nickel alvéolaire	99 à 12 $\mu\text{g.m}^{-3}$	1000 $\mu\text{g.m}^{-3}$	Proposition européenne à 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ VLEP Allemagne 5 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Cuivre alvéolaire	200 $\mu\text{g.m}^{-3}$	200 $\mu\text{g.m}^{-3}$	VLEP Allemagne 10 $\mu\text{g.m}^{-3}$
Cobalt	52,4 $\mu\text{g.m}^{-3}$		VLEP USA 20 $\mu\text{g.m}^{-3}$ Proposition européenne : fraction alvéolaire 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PUF	1,6.10 <sup>4</sup> #.cm <sup>3</sup>	-	soudage 4,8.10 <sup>5</sup> #.cm <sup>3</sup>
PUF	0,12 à 0,33 mg.m <sup>-3</sup>	0,9 mg.m <sup>-3</sup>	

# Caractérisation de l'exposition - Dépôt de matière sous énergie concentrée (métal)

Polluant	Valeurs	VLEP	Commentaire
PUF enceinte	$10^6 \text{ \#.cm}^{-3}$	-	soudage $4,8.10^5 \text{ \#.cm}^3$
PUF enceinte	$0,3-1,3 \text{ mg.m}^{-3}$	$0,9 \text{ mg.m}^{-3}$	

*BEISSER R. Gefahrstoffe- Reinhalt, 2017*

*BAU S. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2019*

*GRAFF P. Journal of Industrial Ecology 2016*

# Caractérisation de l'exposition - Extrusion matière (polymère)

Polluant	Valeurs	VLEP	Commentaire
Styrène (ABS)	150 à 250 $\mu\text{g.m}^{-3}$	100 $\text{mg.m}^{-3}$	20x niveau bureaux
Isopropanol	40,8 $\text{mg.m}^{-3}$	MAK 200 $\text{mg.m}^{-3}$	
TVOC	Emission Max 3552 $\mu\text{g.h}^{-1}$	-	imprimante laser 5782–7735 $\mu\text{g.h}^{-1}$
PUF (ABS )	$10^9$ à $10^{11}$ $\#. \text{min}^{-1}$	-	
PUF (PLA)	$10^8$ à $10^{10}$ $\#. \text{min}^{-1}$	-	PLA < ABS

# Caractérisation de l'exposition – Photopolymérisation (polymère)

Polluant	Valeurs	VLEP	Commentaire
Acétone	26 ppb	VLEP 250 ppm	infime
TVOC	14300–23700 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	-	imprimante laser 5782–7735 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ Extrusion - 3552 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$

# La prévention des risques chimiques

Dans **le Code du travail**, les règles de prévention des risques chimiques se répartissent en plusieurs sections regroupant:

- Les règles générales de prévention des risques associés aux agents chimiques dangereux (ACD) (articles R.4412-1 à R.4412-57)
- les règles particulières applicables aux agents chimiques dangereux définis réglementairement comme cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction (CMR) (articles R.4412-59 à R. 4412-93)

Métaux et oxydes métalliques : cadmium, oxydes de nickel, trioxyde de chrome, cobalt, etc.

- Les **valeurs limites d'exposition professionnelle** (VLEP) pour certains agents chimiques (articles R. 4412-149 à R. 4412-151)

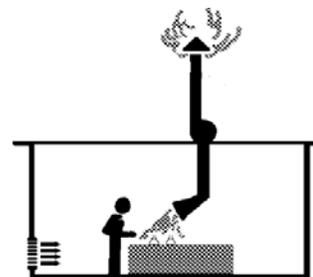
Acétone, monoxyde de carbone, méthacrylate de méthyle, métaux et oxydes métalliques (cadmium, trioxyde de chrome, etc.)

# L'aération et l'assainissement

L'aération et l'assainissement de l'atmosphère des lieux de travail font l'objet de **textes réglementaires** issus du Code du travail : les articles R.4212-1 à 7, R.4222-1 à 22, R.4722-1 et 2 et R.4724-2 et 3.

Les locaux où sont mises en œuvre des machines de fabrication additives ont des **«locaux à pollution spécifique»**

Obligation pour l'employeur **de capter les poussières, gaz et vapeurs «au fur et à mesure de leur production, au plus près de leur source d'émission et aussi efficacement que possible, notamment en tenant compte de la nature, des caractéristiques et du débit des polluants de l'air ainsi que des mouvements de l'air»** (article R.4422-12).



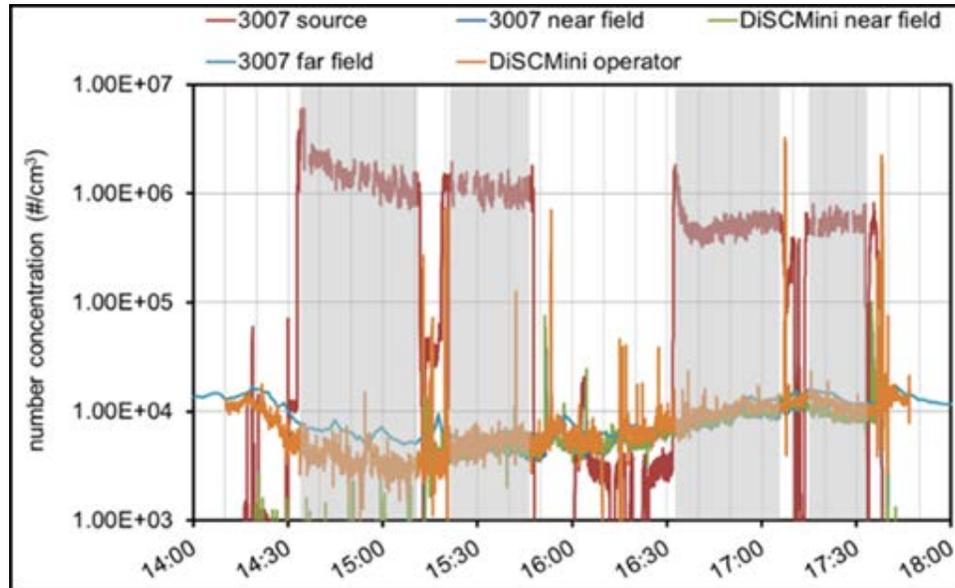
# La démarche de prévention des risques chimiques

**La démarche de prévention vise à supprimer ou à réduire au minimum le risque d'exposition à des agents chimiques dangereux à chaque étape du procédé :**

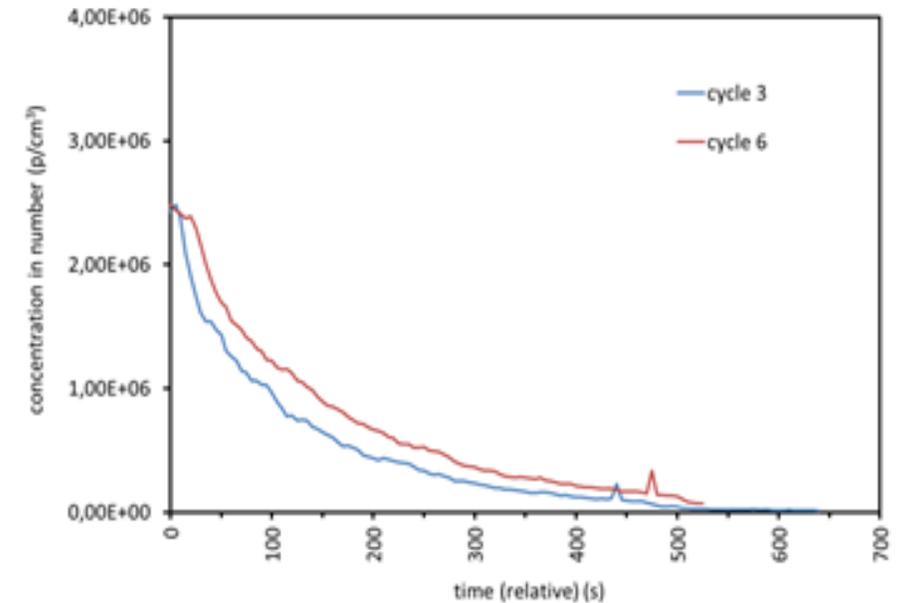
- 1 La substitution des produits dangereux  
Diminuer la teneur en nickel, cobalt, chrome, etc. des poudres utilisées
- 2 La réduction de la quantité d'agents chimiques dangereux utilisés ou émis
- 3 Le captage à la source des polluants  
Travailler en vase clos sur l'ensemble des étapes, à défaut mettre en place un dispositif de captage au plus près de la source d'émission des polluants (vitesses d'air adaptées aux polluants)
- 4 La ventilation générale et le traitement de l'air extrait
- 5 Les mesures organisationnelles
- 6 Le port d'équipements de protection individuelle  
Porter un appareil de protection respiratoire, un vêtement de protection, des gants et des lunettes

+ Information et formation des opérateurs

# Projection de poudres - temporisation

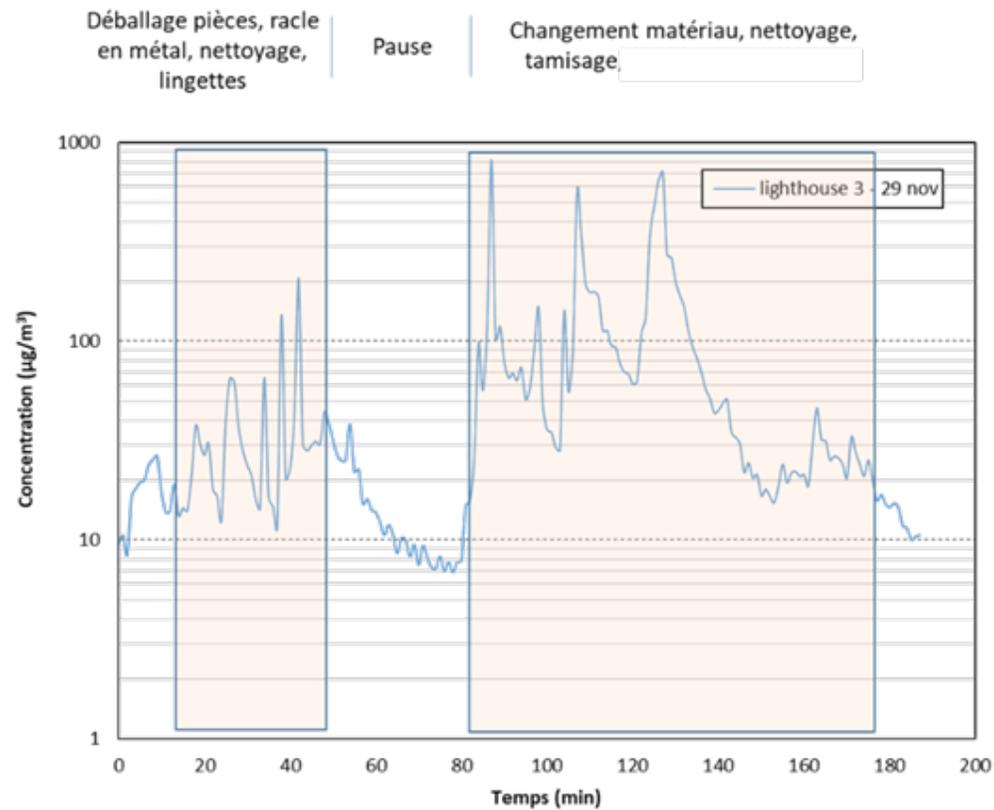


- Machine avec balayage d'air
- A chaque ouverture de porte pour récupérer la pièce augmentation de la concentration en nombre  $10^4 \text{ \#.cm}^{-3}$  à  $10^6 \text{ \#.cm}^{-3}$

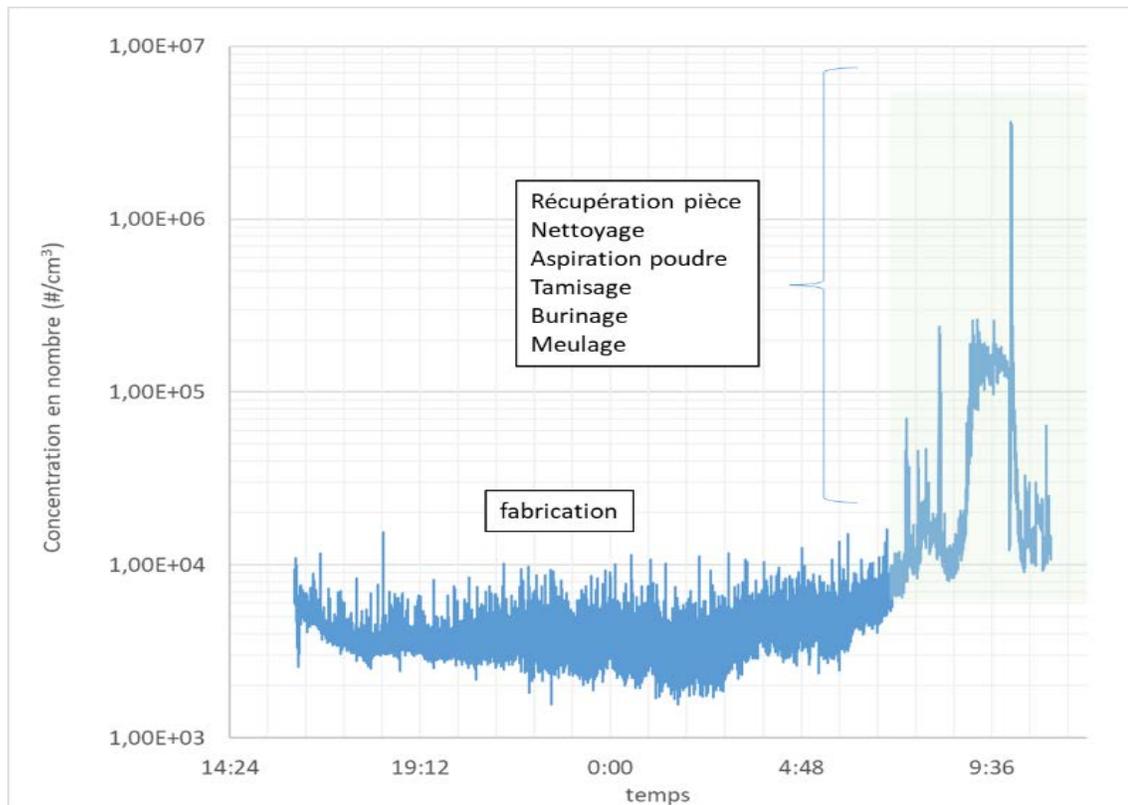


Débit de ventilation à l'intérieur de la chambre de fabrication :  $330 \text{ m}^3/\text{h}$

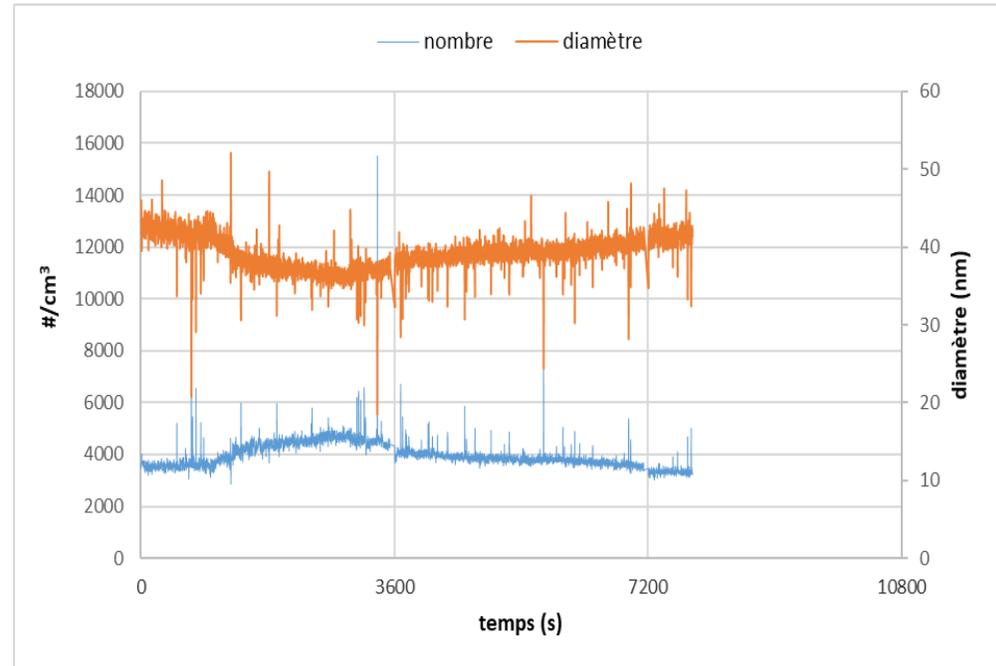
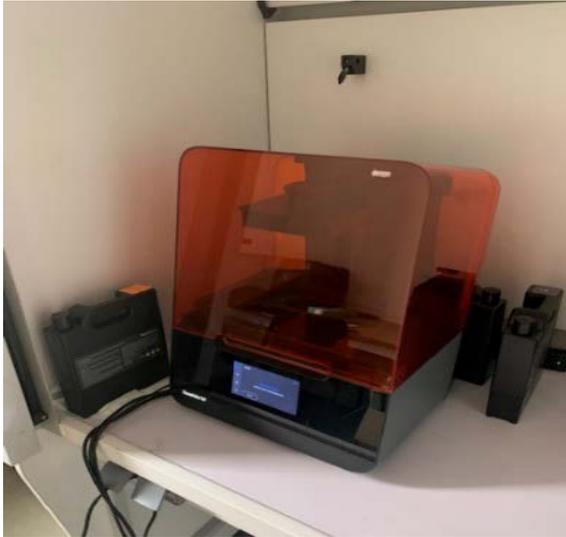
# Fusion sur lit de poudres – chargement de matériau



# Fusion sur lit de poudres – Céramiste dentaire



# Stéréolithographie



- Fortes concentrations en acrylate de méthyle (10 ppm)
- A placer sous sorbonne ou sous capot ventilé

## Autres risques

- TMS – gestes répétitifs, surtout manipulation de charges ( poudres métalliques denses)
- Chutes de hauteur – accès en hauteur sur les machines
- Rayonnement – laser en manutention
- Brûlure – accès sur les desktop
- Electrique – accès sur les desktop, machines non-conformes, bricolées, perte de la certification CE
- Physiques – travail avec des EPI (cagoule, combinaison étanche, etc.) : irritation, chaleur
- Co-activité

# Les étapes du procédé les plus polluantes

Maintenance de la machine

Réception, conditionnement, transfert et stockage des matières premières

Préparation des chargements

Gestion des déchets

Récupération et finition des pièces

Nettoyage du poste de travail

Tamisage des poudres récupérées



# Conclusion

- ❑ Les risques associés à la FA dépendent de la technologie employée et des **matériaux utilisés**



Chaque couple technique/matière première présente des risques différents.

- ❑ Divers polluants (particulaires et gazeux) sont émis lors de la FA associés à **la mise en œuvre d'agents chimiques.**
- ❑ L'évaluation et la prévention des risques chimiques reposent sur **un inventaire exhaustif des agents chimiques utilisés et générés à chaque étape du procédé** (étiquetage, FDS, etc.).
- ❑ Certaines étapes sont particulièrement exposantes telles que **la réception et le transfert des matières premières, la préparation des chargements, la finition des pièces**, etc.

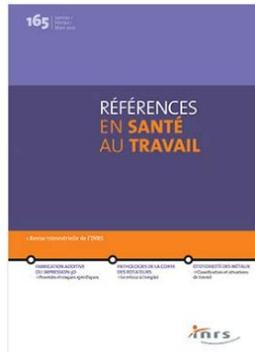
# Les ressources à disposition : INRS



Fabrication additive ou impression 3D utilisant les poudres métalliques  
INRS ED 144



Fabrication additive ou impression 3D utilisant des matières plastiques  
INRS ED 148



Fabrication additive ou impression 3D  
RST, 2021



La fabrication additive : quelle prévention en entreprise ?  
HST, 2021

<https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/webinaire-Fabrication-additive-impression-3D.html>, 2020

<https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/fabrication-additive.html>, 2022

# Les ressources à disposition : Normalisation

NORME INTERNATIONALE ISO/ASTM 52931

Provisional address 2023-05

Fabrication additive de métaux — Environnement, santé et sécurité — Principes généraux pour l'utilisation de matériaux métalliques

Additive manufacturing of metals — Environment, health and safety — General principles for use of metallic materials

ISO/ASTM 52931 : Fabrication additive de métaux — Environnement, santé et sécurité — Principes généraux pour l'utilisation de matériaux métalliques

PROJET DE NORME INTERNATIONALE ISO/ASTM DIS 52938-1

ISO/TC 261

Secretariat: DIN

Date de vote: 2023-04-27

Vote closes on: 2023-07-20

Fabrication additive de métaux — Environnement, hygiène et sécurité —

Partie 1: Exigences de sécurité pour les machines PBF-LB

Additive manufacturing of metals — Environment, health and safety — Part 1: Safety requirements for PBF-LB machines

Pr ISO/ASTM 52938-1 : Fabrication additive de métaux — Environnement, santé et sécurité — Exigences de sécurité pour les machines PBF-LB

ICS: 13.110; 13.100; 25.030

DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO/DIS 27548

ISO/TC 261

Secretariat: DIN

Voting begins on: 2023-05-02

Voting terminates on: 2023-07-25

Additive manufacturing of plastics — Environment, health, and safety — Test method for determination of particle and chemical emission rates from desktop material extrusion 3D printer

Pr ISO/ASTM 27548 : Fabrication additive de plastiques — Environnement, santé et sécurité — Méthode d'essai pour la détermination des taux d'émission de particules et de produits chimiques des imprimantes 3D de bureau par extrusion de matériau

ICS: 13.040.30; 25.030; 13.100



Notre métier, rendre le vôtre plus sûr

Merci de votre attention



[www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)

YouTube

