



Rendez-vous  
de la science

Mohamed Zemzem, CPI., Ph.D.

Pr. Ludwig Vinches, Ph.D.

Pr. Stéphane Hallé, Ing., Ph.D.

# Émission de particules ultrafines et de composés organiques volatils lors d'un processus d'impression 3D

26-10-2021

Université   
de Montréal

  
Le génie pour l'industrie



# La fabrication additive, c'est quoi ?



## Définition

La fabrication additive (FA), communément appelée impression 3D, désigne un ensemble de technologies permettant l'obtention d'un objet tridimensionnel par ajouts de matière, disposés couche par couche [1].

Concevoir les pièces plus complexes

Personnaliser les pièces à produire

Réduire le coût de la production

1

2

3

4

5

Faire gagner du temps de fabrication

Réduire la génération de déchets



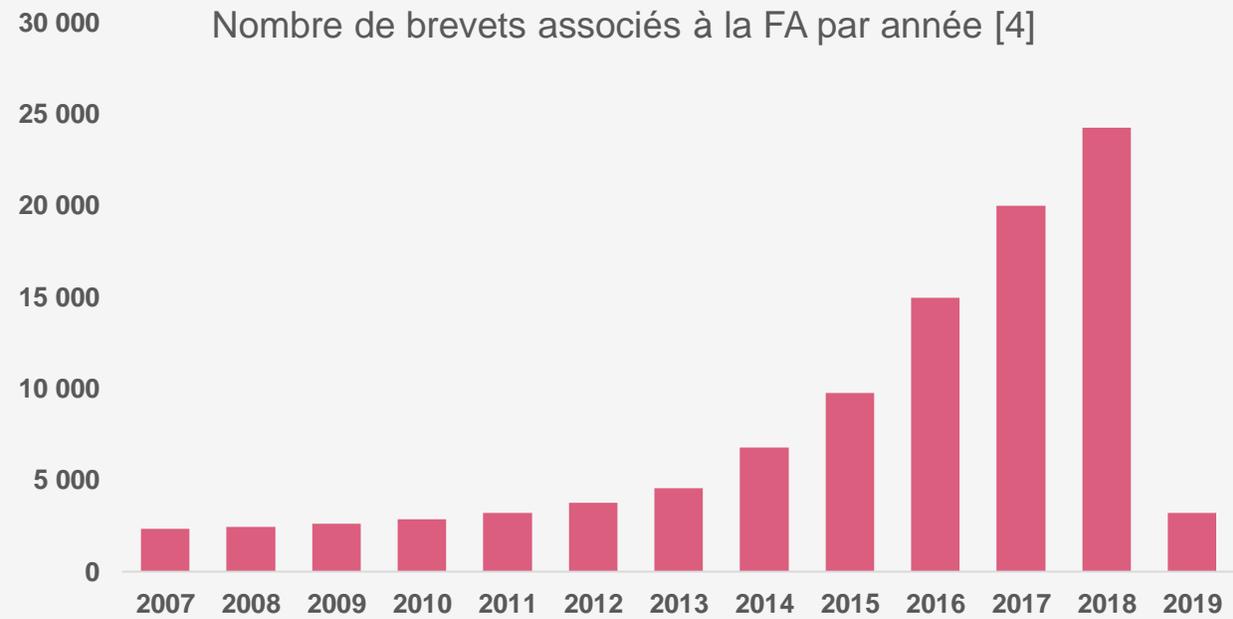
[2]



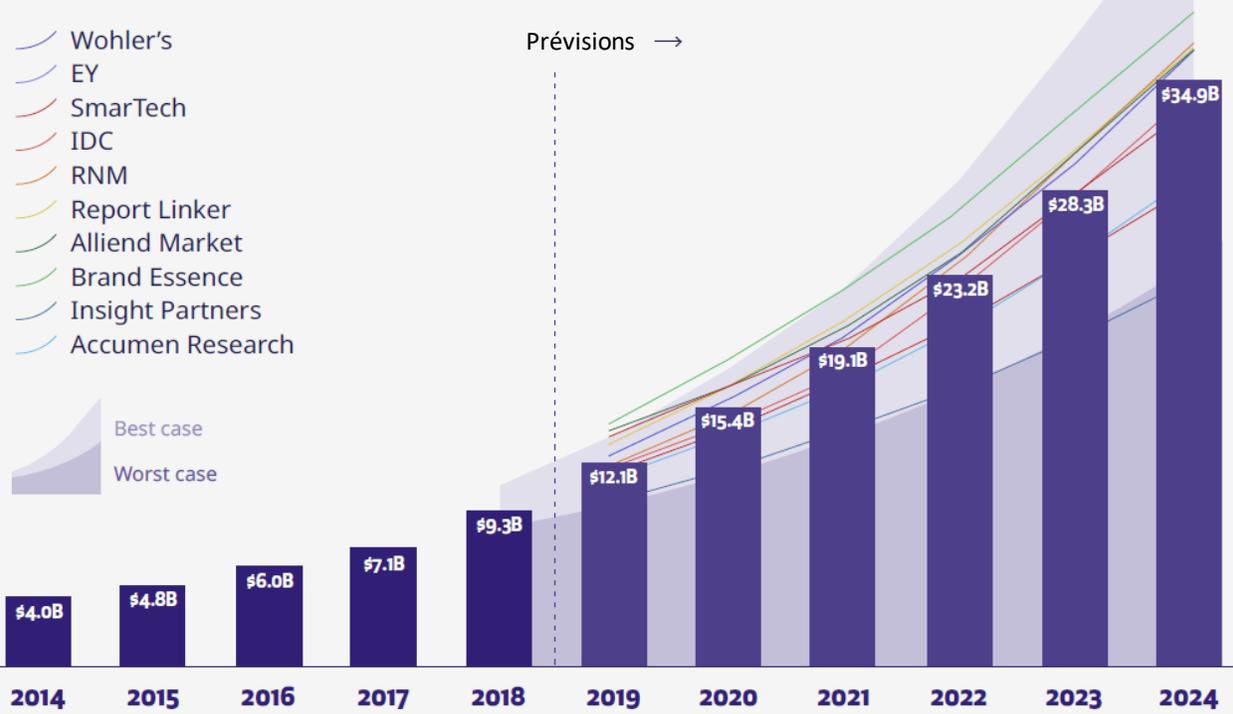
# La fabrication additive, en chiffres



Nombre de brevets associés à la FA par année [4]

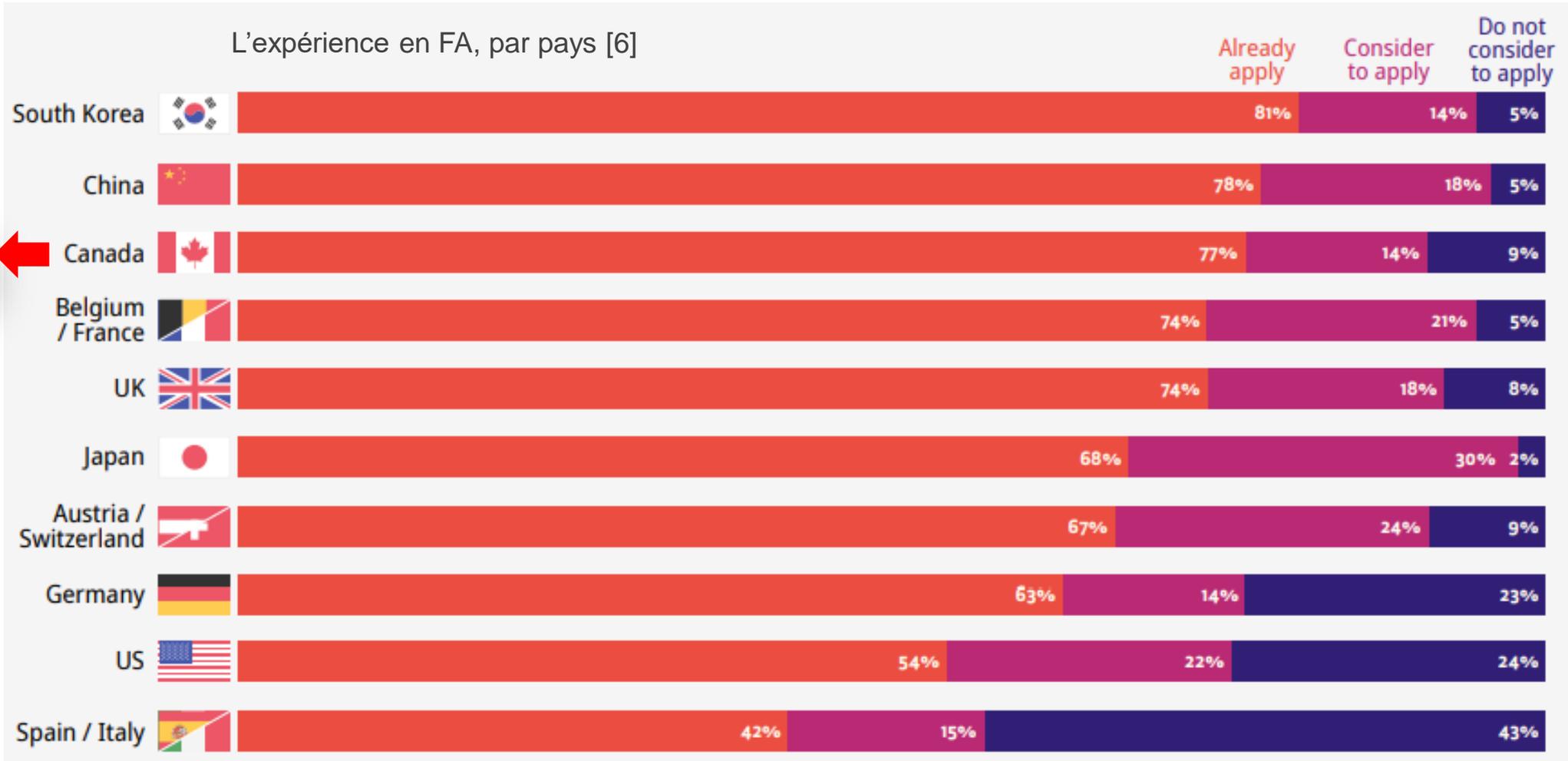


Taille du marché mondial de la FA, historique et prévisions [5]



# La fabrication additive, en chiffres

L'expérience en FA, par pays [6]



230  
M\$

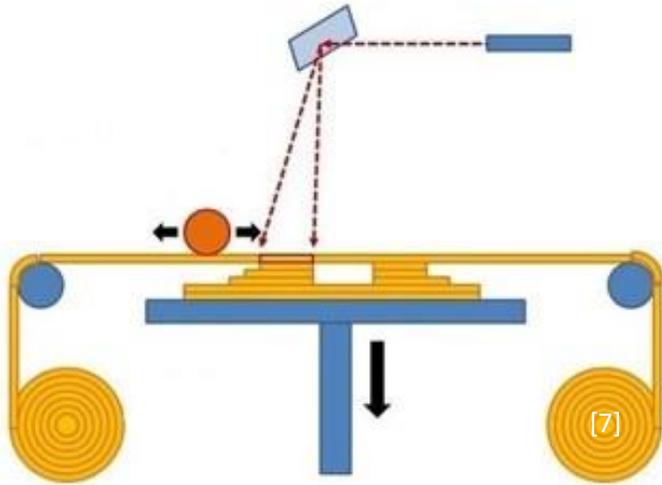
# Technologies de fabrication additive

1

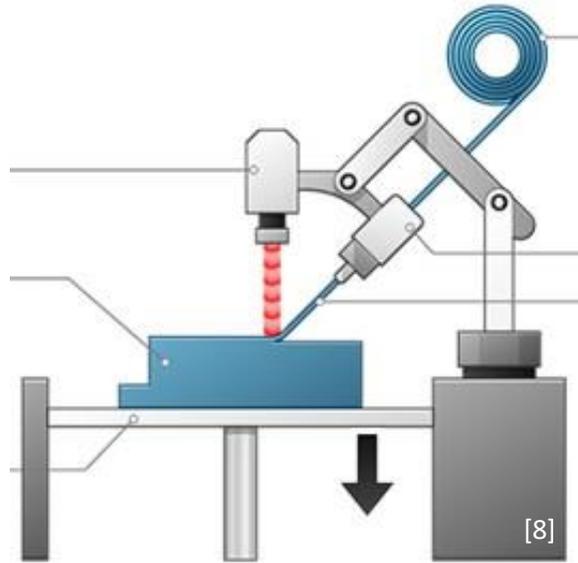
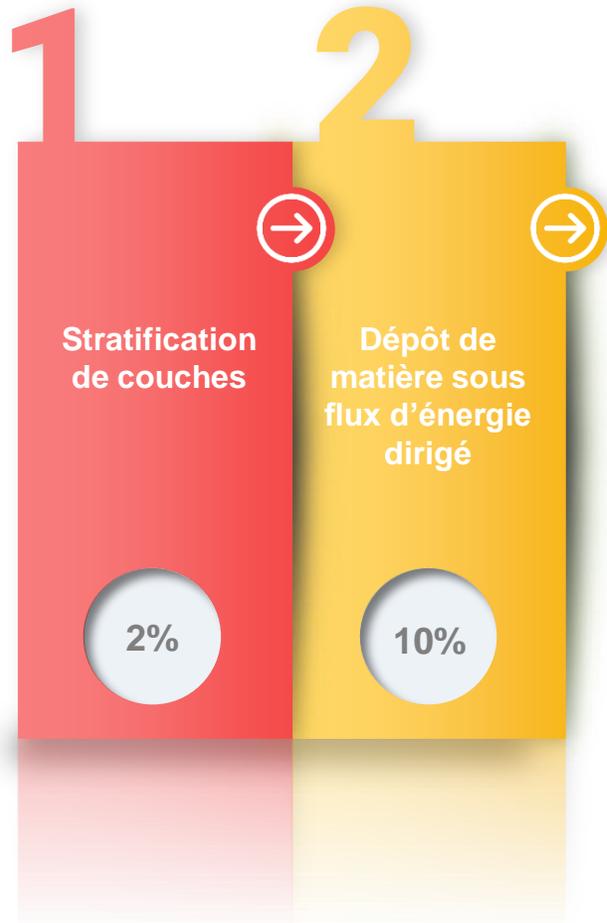
→

Stratification de couches

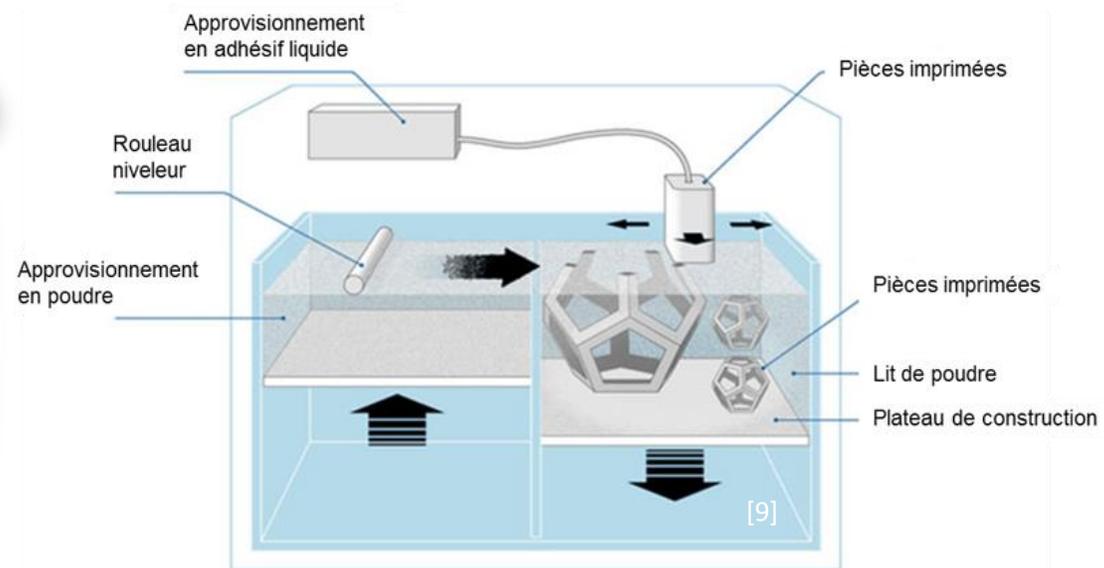
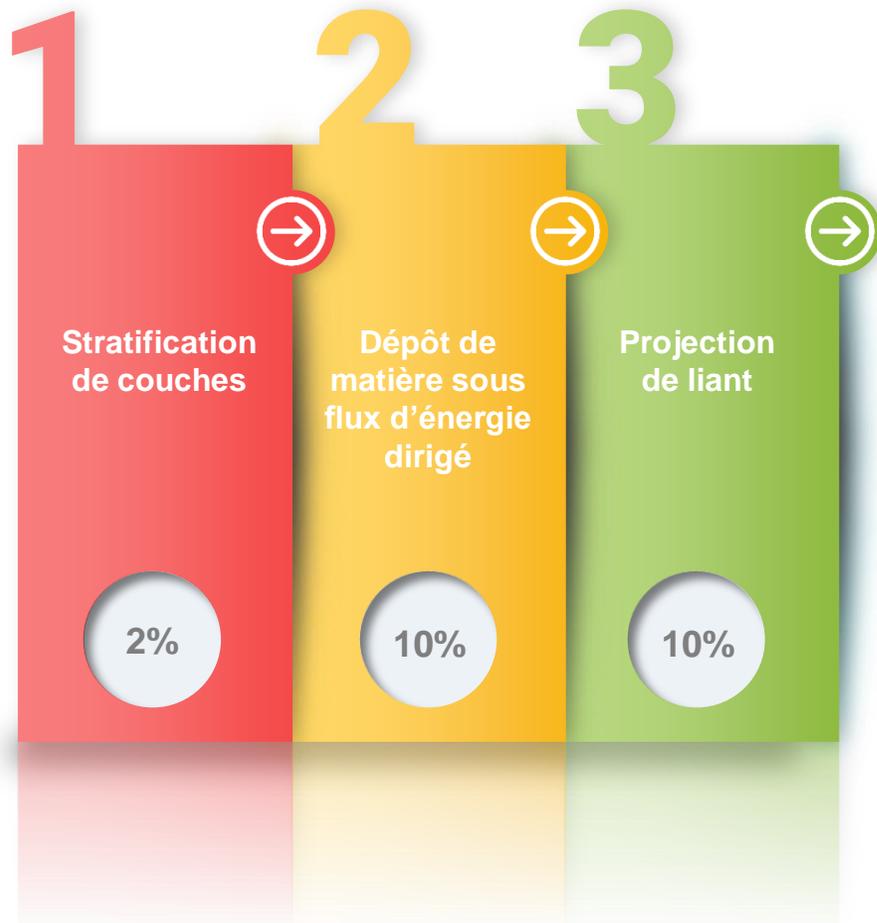
2%



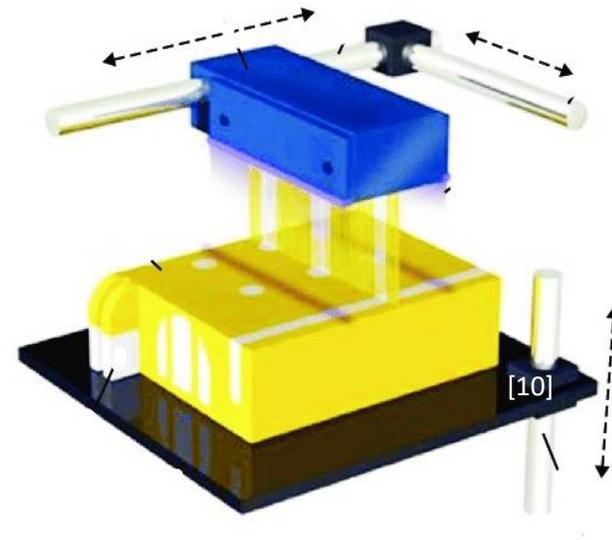
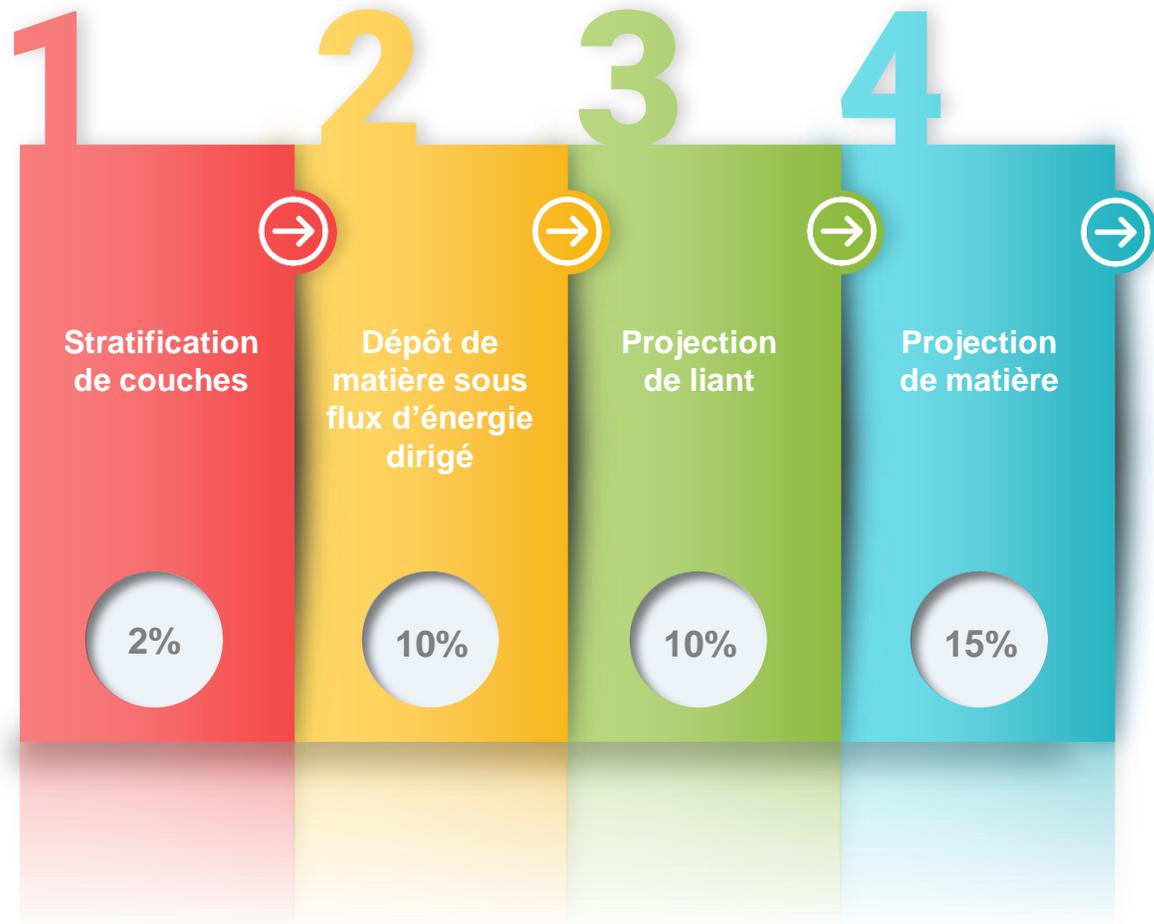
# Technologies de fabrication additive



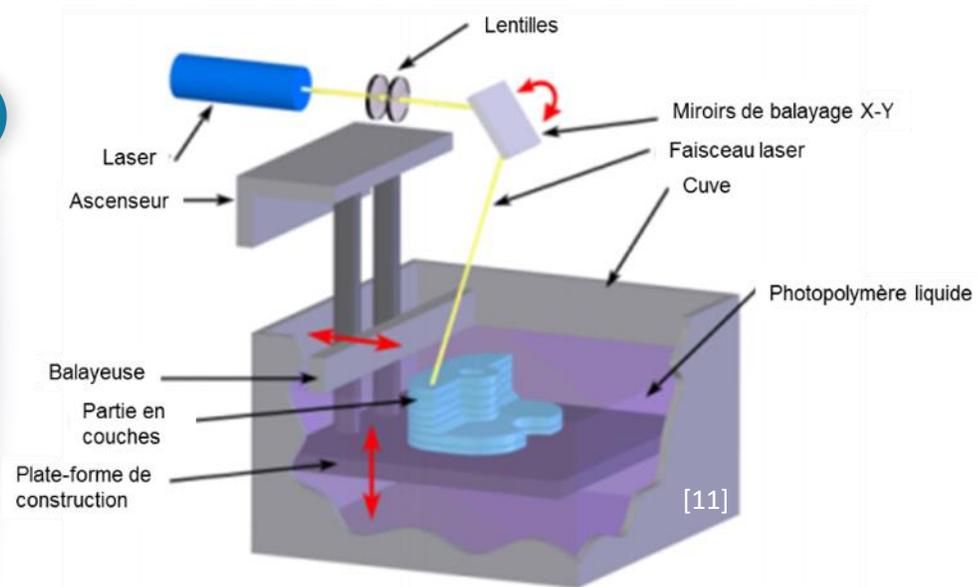
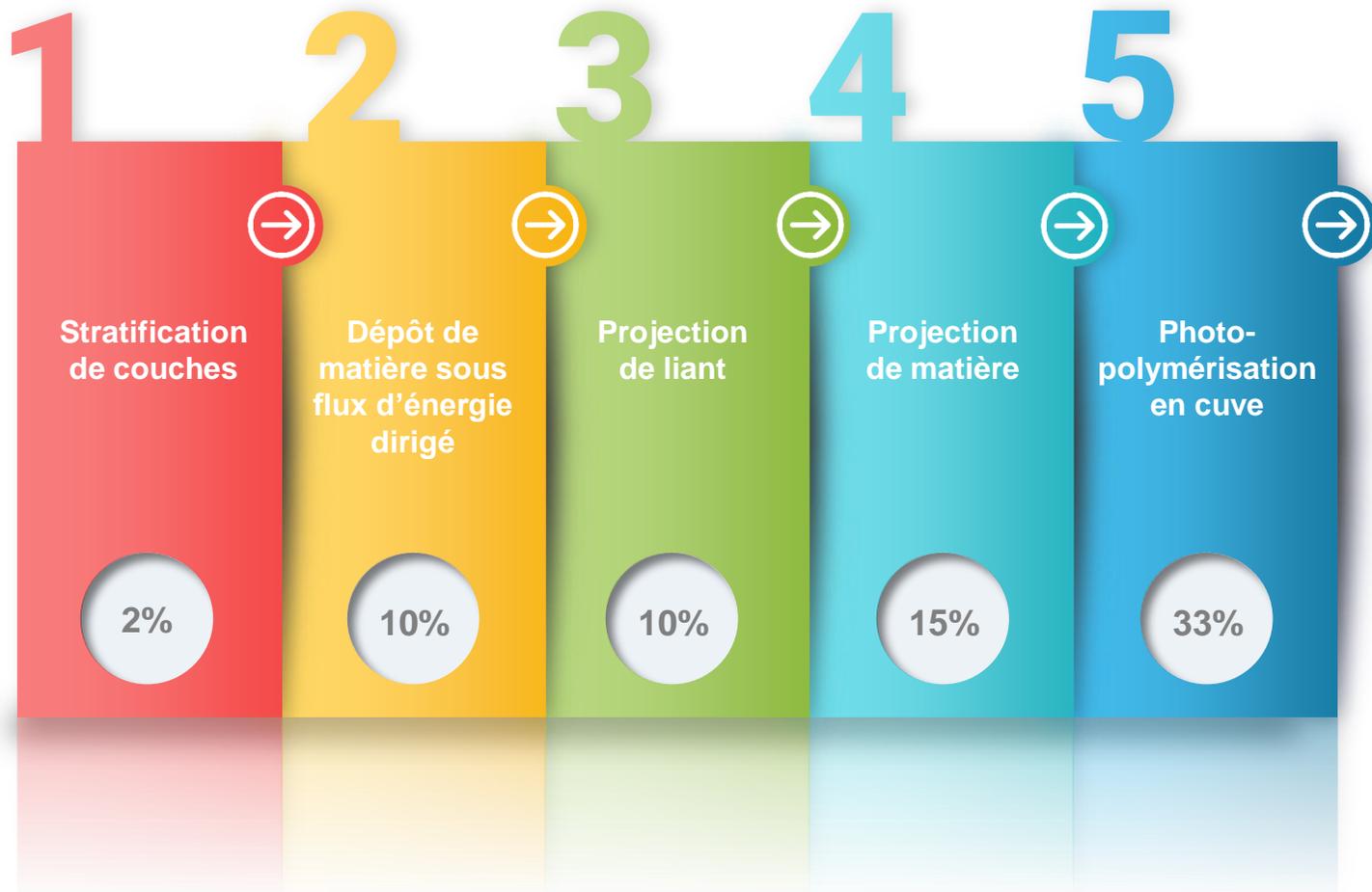
# Technologies de fabrication additive



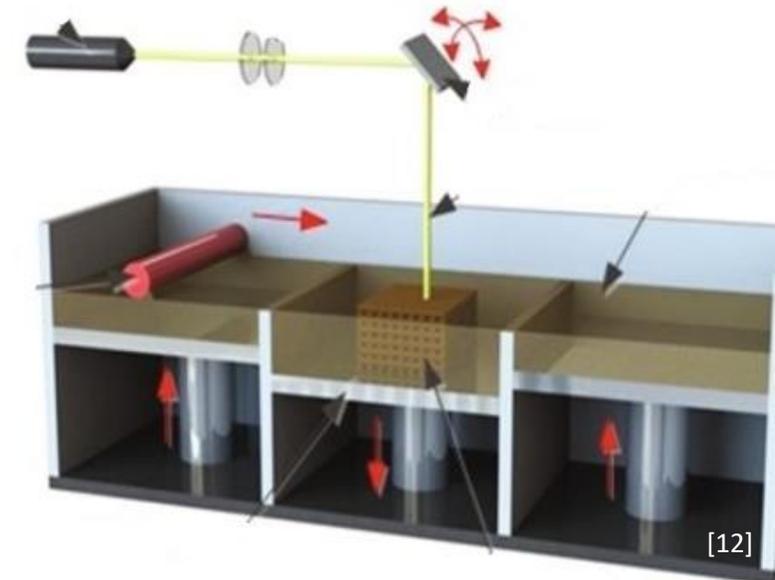
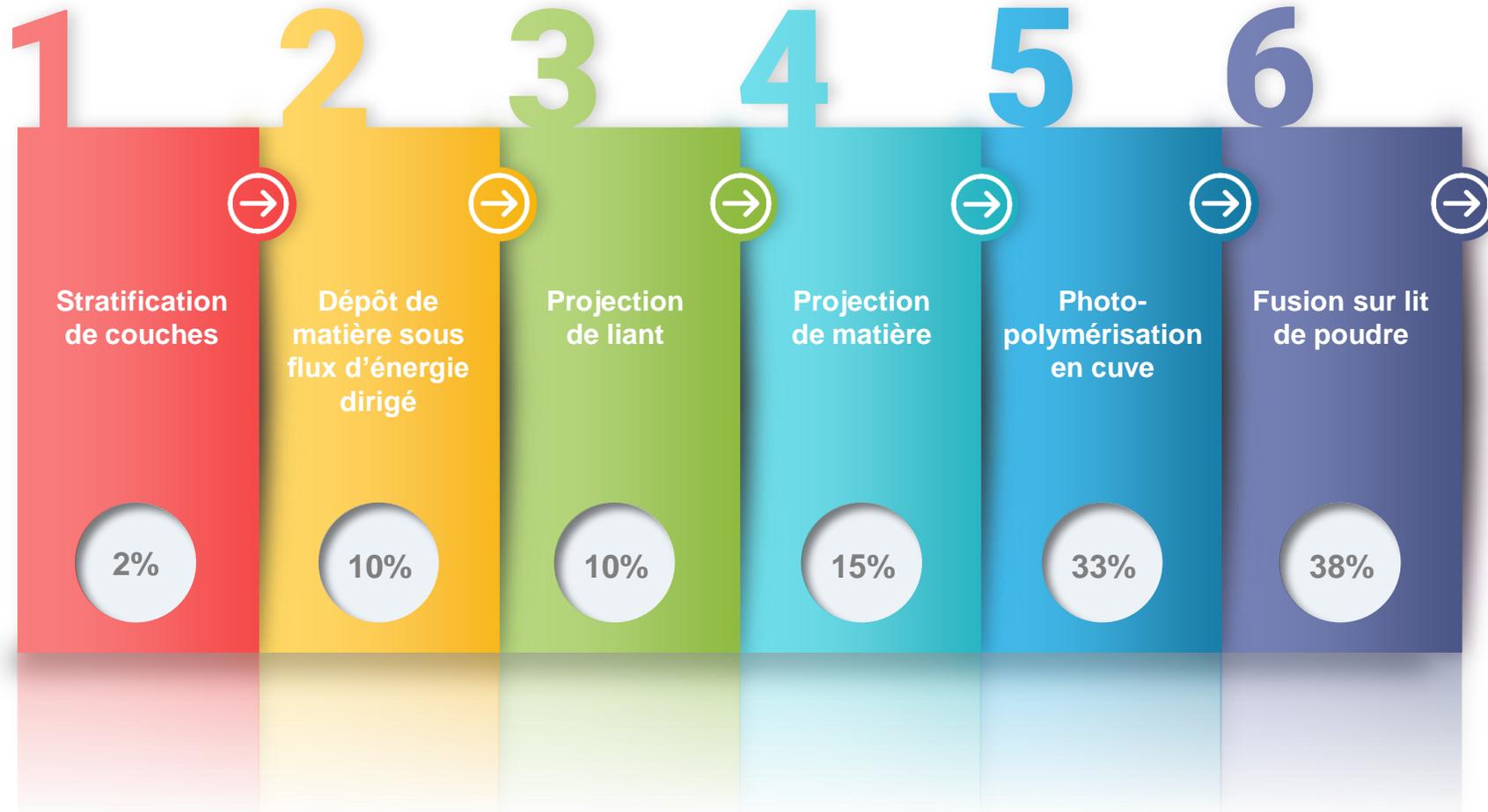
# Technologies de fabrication additive



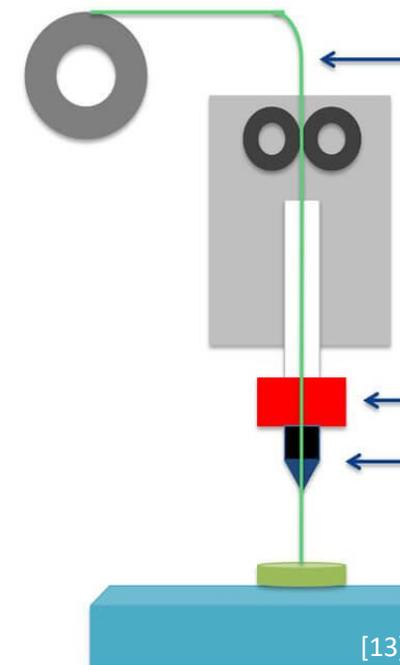
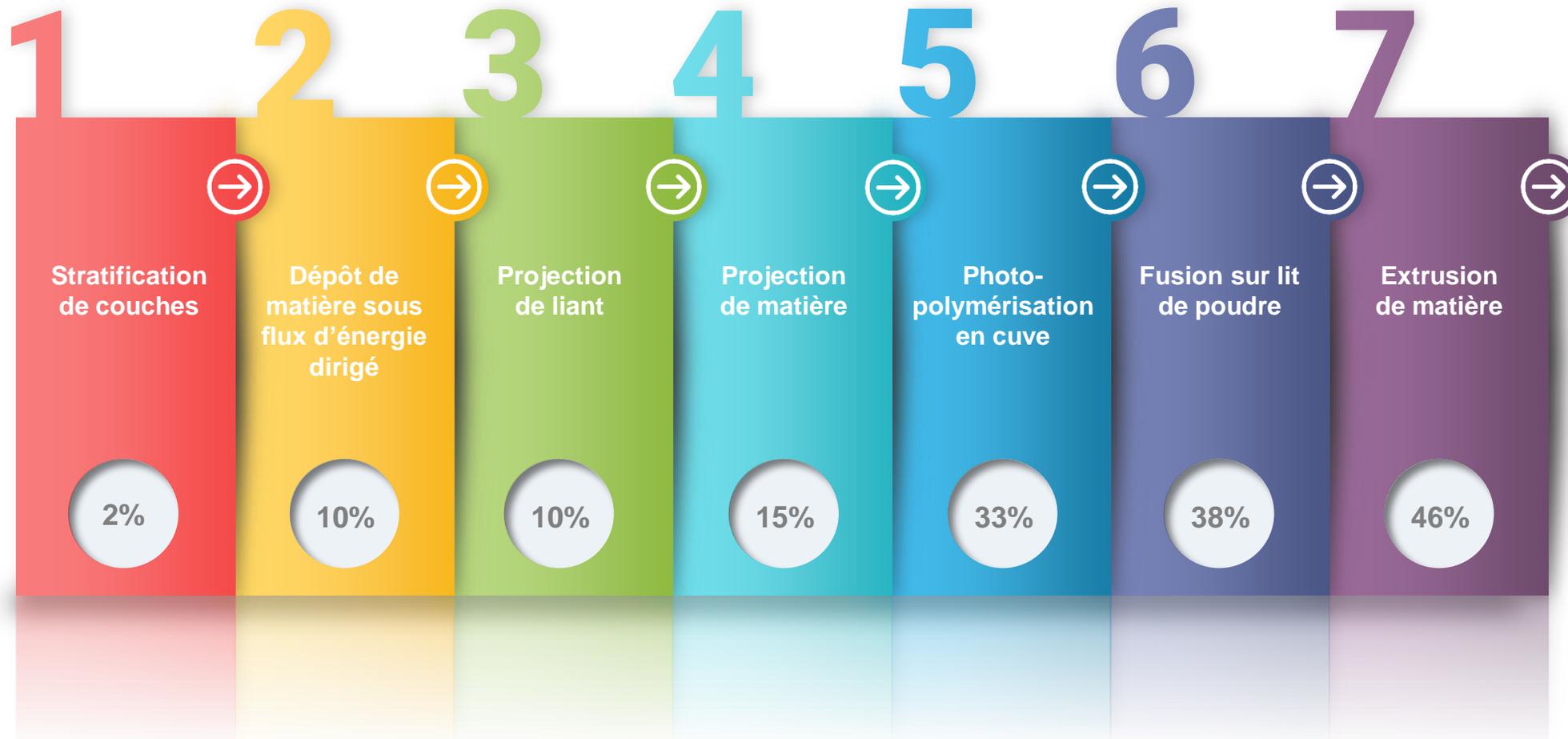
# Technologies de fabrication additive



# Technologies de fabrication additive



# Technologies de fabrication additive



# Matériaux utilisés en fabrication additive



PLA      ABS      PC      Nylon



Polyester  
Polyuréthane  
Résine époxy

## Nanocomposites



- Conducteur
- Magnétique
- Biocompatible
- Biodégradable

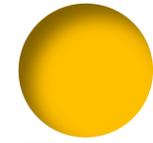
[17]



Polymères



Métaux

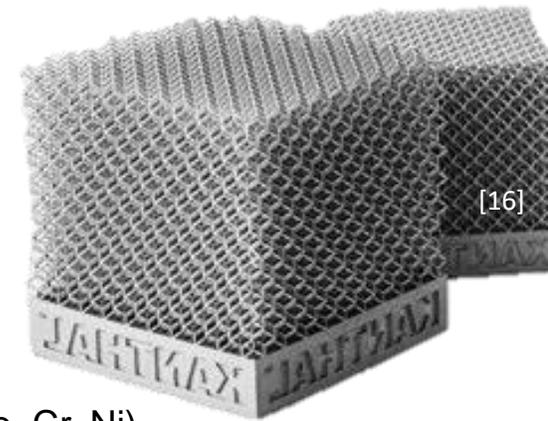


Autres

## Céramiques



[18]



[16]

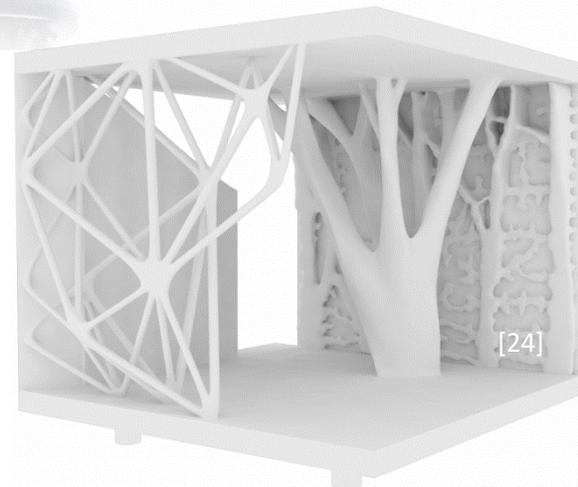
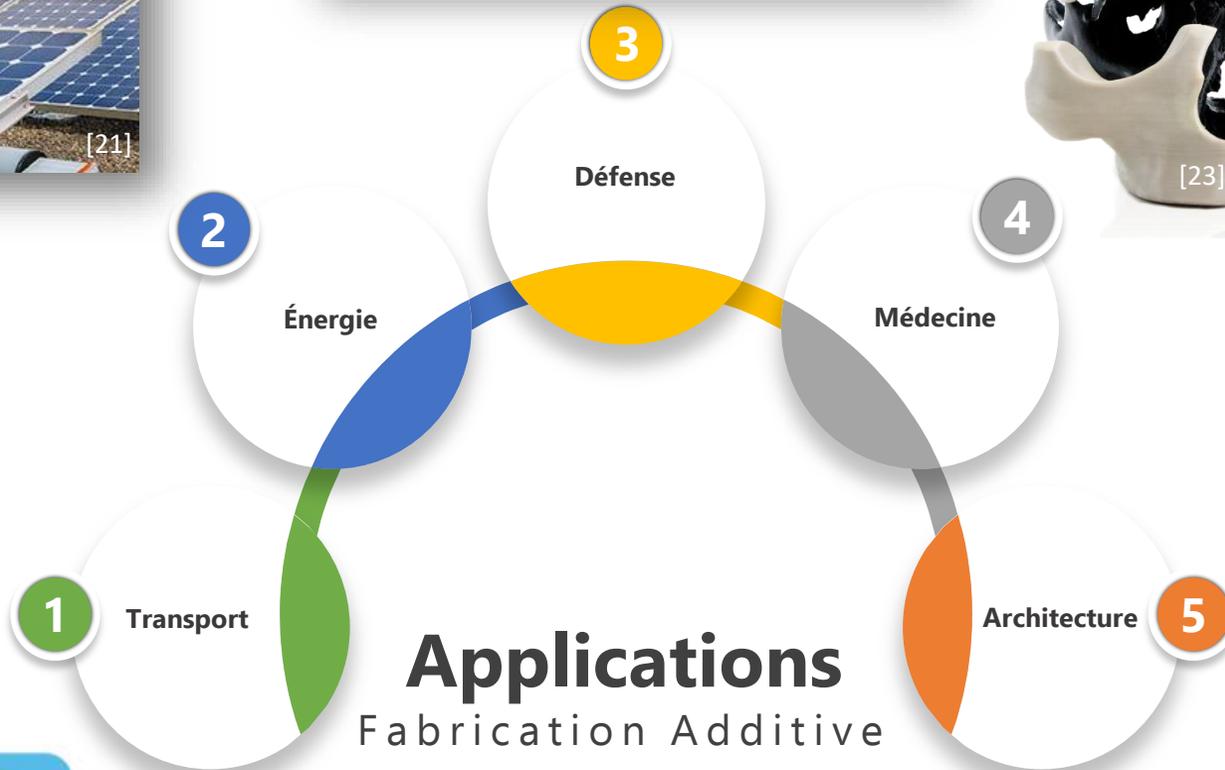
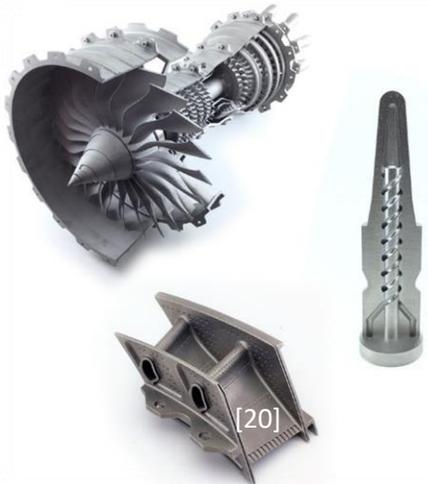
- Acier inoxydable
- Acier à outils
- Métaux précieux
- Alliages (Al, Ti)
- Superalliages (Co, Cr, Ni)

## Biomatériaux

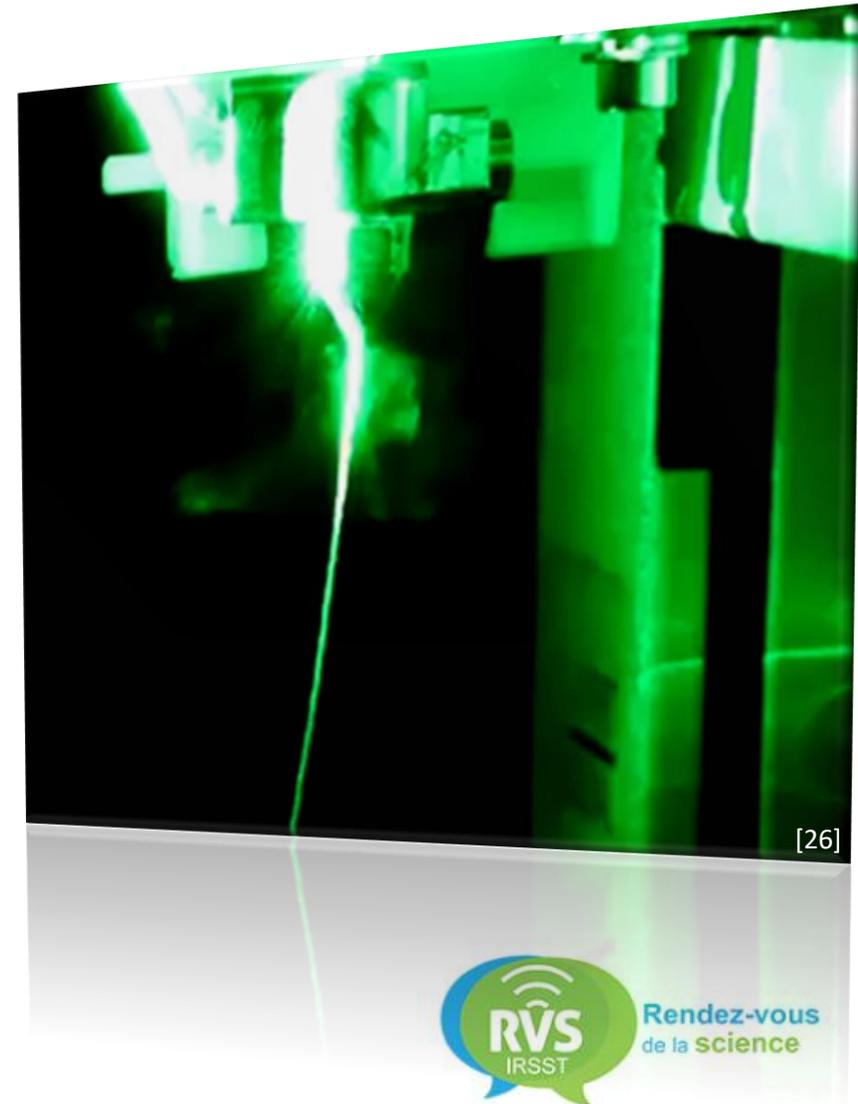
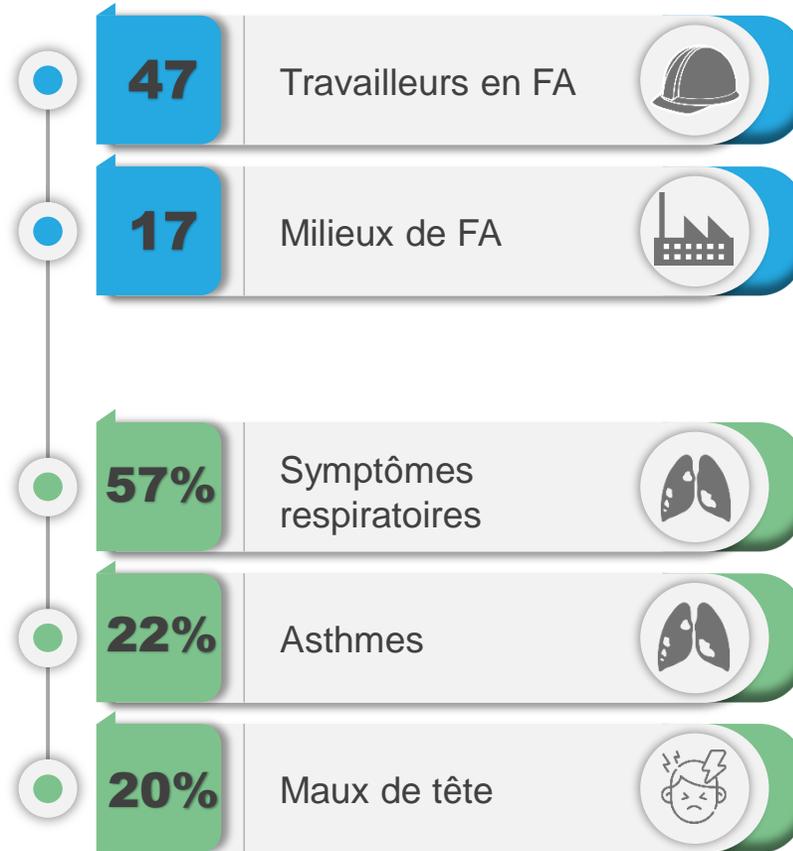


[19]

# Applications de la fabrication additive



# La fabrication additive, technologie prometteuse, mais pas sans danger !



# La fabrication additive, technologie prometteuse, mais pas sans danger !

## Particules fines et ultrafines - PF / PUF

Catégorie de particules en suspension dans l'air ambiant, ayant un diamètre aérodynamique inférieur ou égal à [27] :

- 2,5 µm, particules fines, PM2.5 (PF)
- 0,1 µm, particules ultrafines, PM0.1 (PUF)

## Effets sur la santé [29]

Toxicité respiratoire

- Pneumopathie
- Hypersensibilité
- Asthme

Réactions allergiques

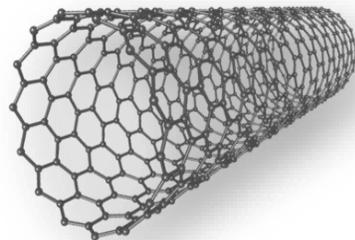
- Dermatite

Conséquences cardiovasculaires

## Exemple

Nanotubes de carbone (NTC)

- Cancérogènes [30]
- Peuvent provoquer des tumeurs pulmonaires



## Composés organiques volatils - COV

Composés chimiques regroupant des substances d'origine biogénique ou anthropogénique [28] :

- Aldéhydes
- Cétones
- Alcools
- Composés aromatiques

## Effets sur la santé [31]

- Maux de tête
- Étourdissements
- Vertiges

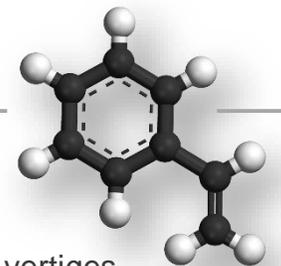


- Baisse de l'attention
- Baisse de la concentration
- Accidents de travail

## Exemple

Styrène (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>)

- Effets aigus : nausées, vomissements, vertiges
- Effets chroniques : atteinte du système nerveux et auditif
- Groupe 2A : agent probablement cancérogène [32]
- VEMP : 50 ppm / 213 mg·m<sup>-3</sup>



# Activités professionnelles liées à la fabrication additive

13.5B

Prévisions pour la prochaine décennie [36] :

- FA créera **plus de 13 500** emplois
- FA ajoutera **plus de 13,5 milliards** de dollars à l'économie canadienne

Entre 2011 et 2016 [37],

- **67 860** employés canadiens – FA métaux
- **57 443** employés canadiens – FA plastiques

25%

Selon une étude menée en 2018 par Joblift, le marché de l'impression 3D a créé des emplois avec une croissance de 25 % supérieure à celle des autres marchés [33].

Indeed.com - Poste d'expertise en FA [34]

- 2014 - 474 postes
- 2017 - 1 067 postes
- 2020 - 2 760 poste (9 salaires plus de 130 000 \$/an)

Canada



04

Global



03

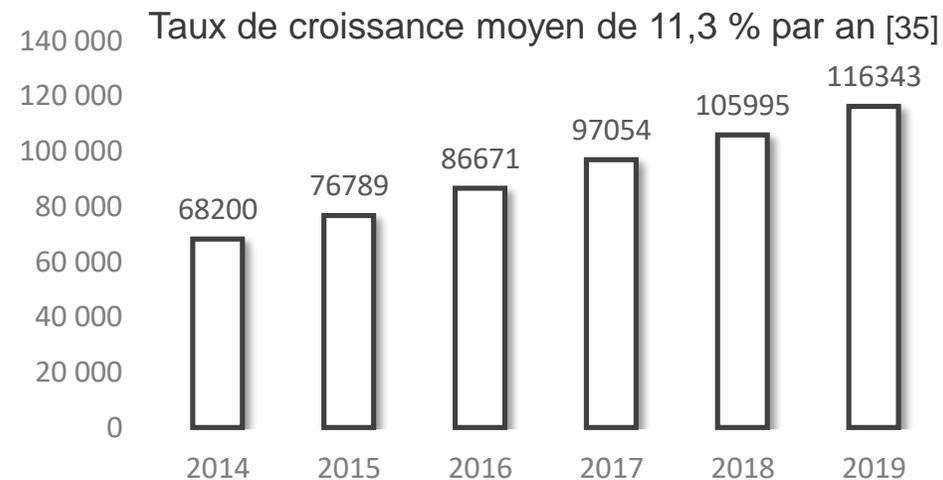
02

01

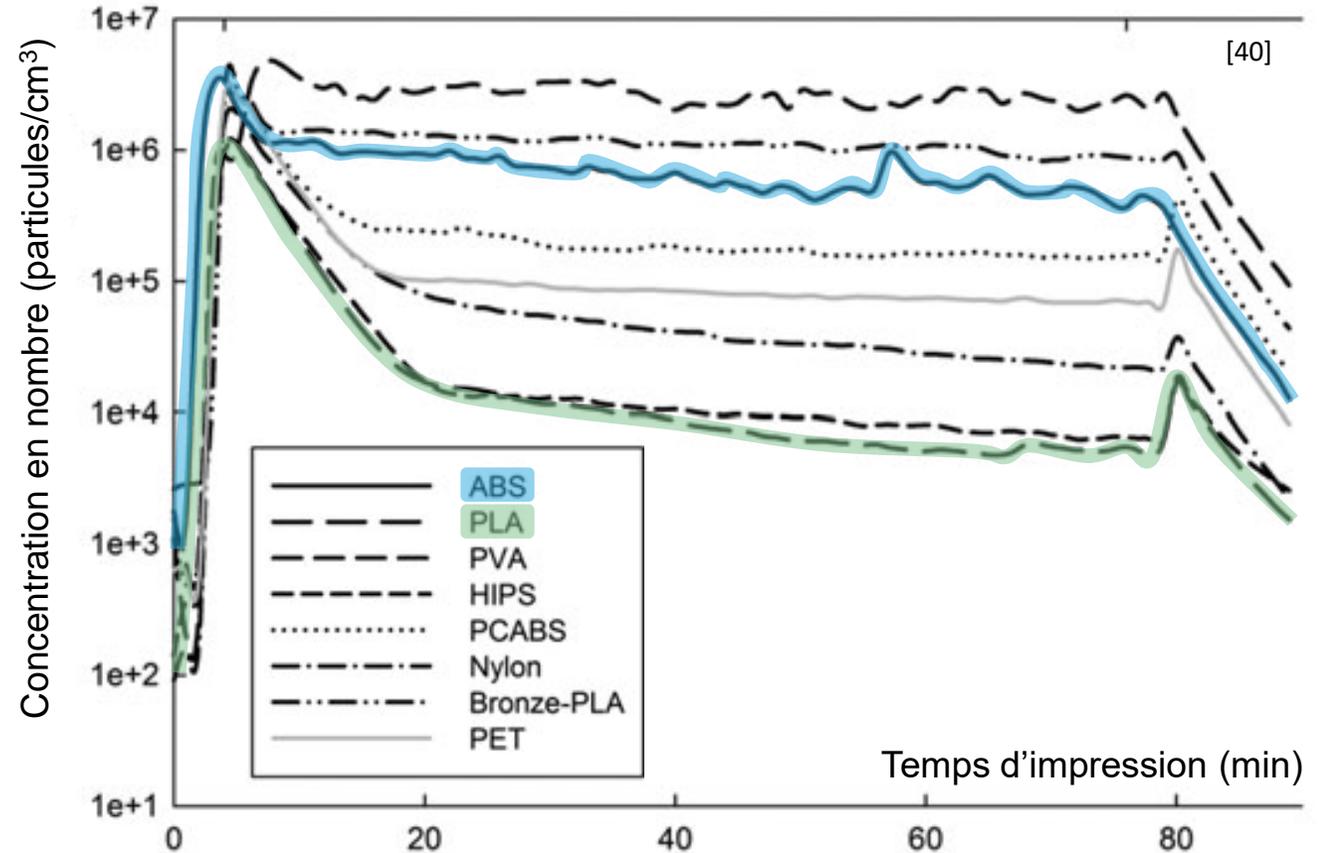
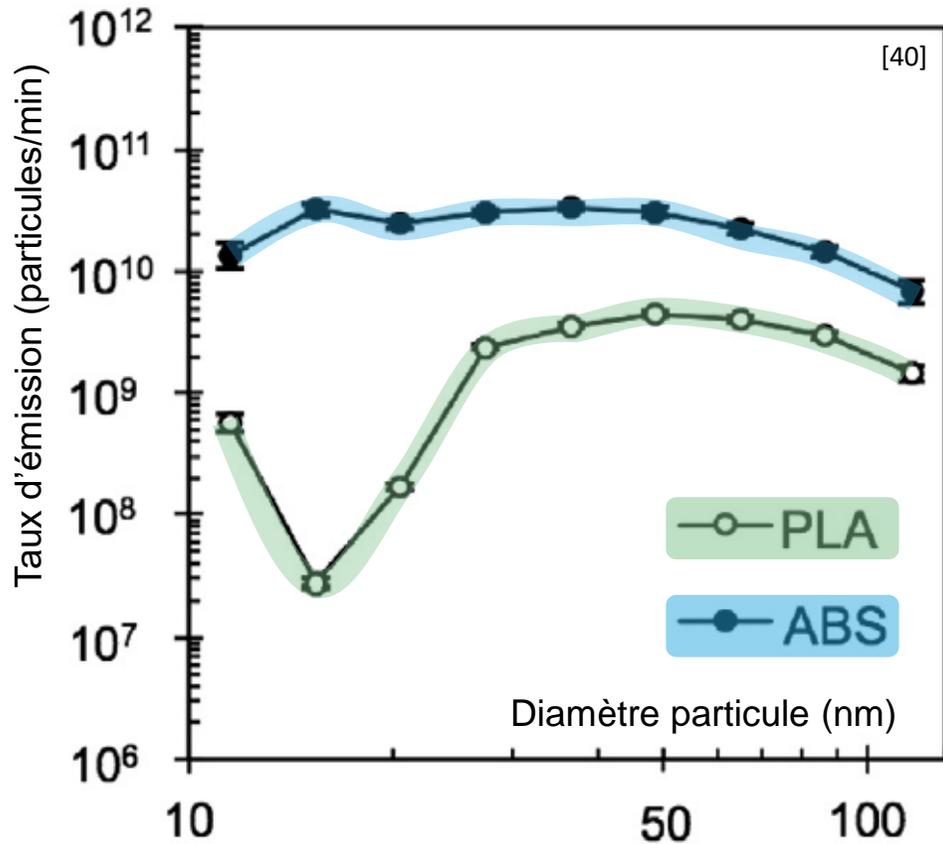
Québec

- 2018, le gouvernement canadien a investi au Québec **21,1 millions** de dollars pour aider à développer la société de fabrication additive *TEKNA Plasma Systems Inc* [38]
- À Sherbrooke seulement, cet investissement a créé **170 emplois** [39]

États-Unis

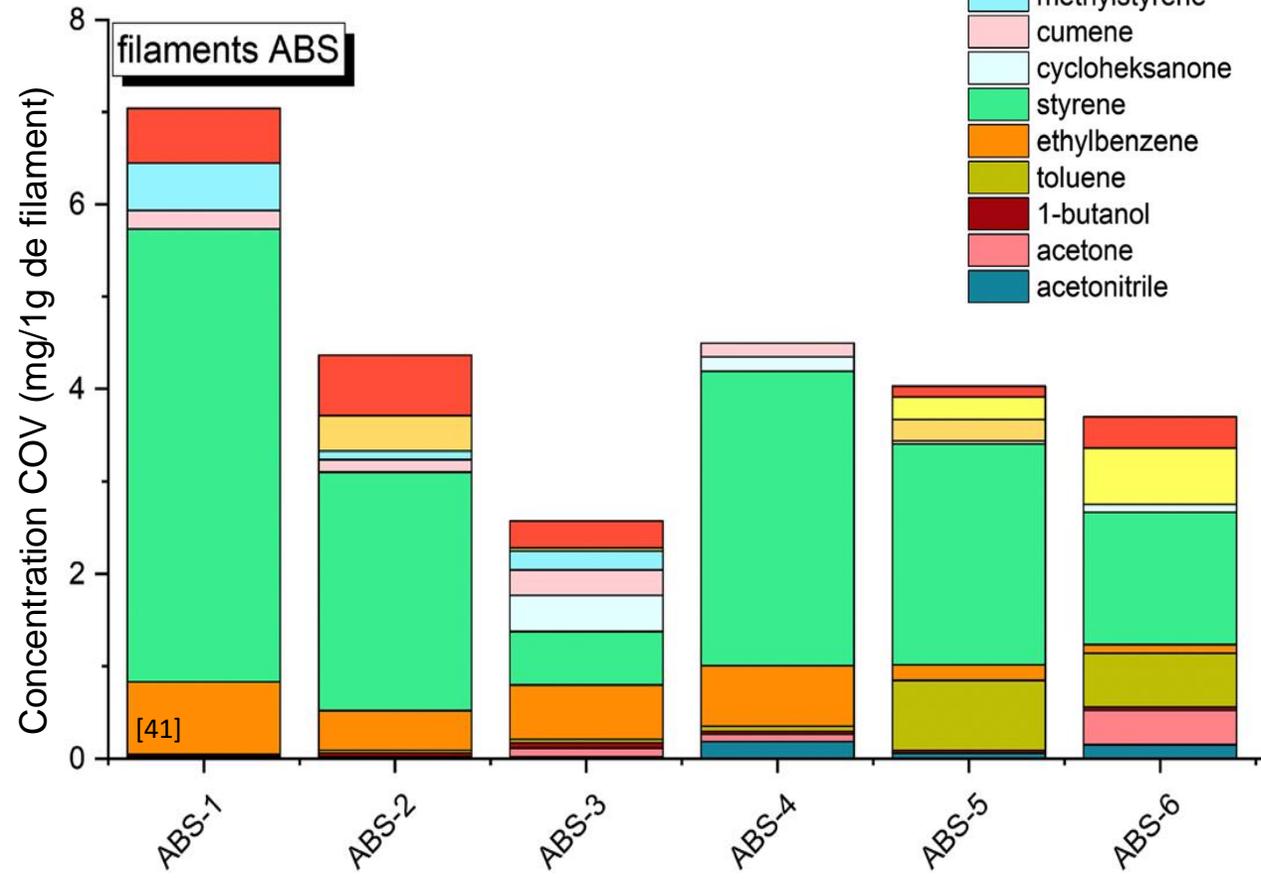
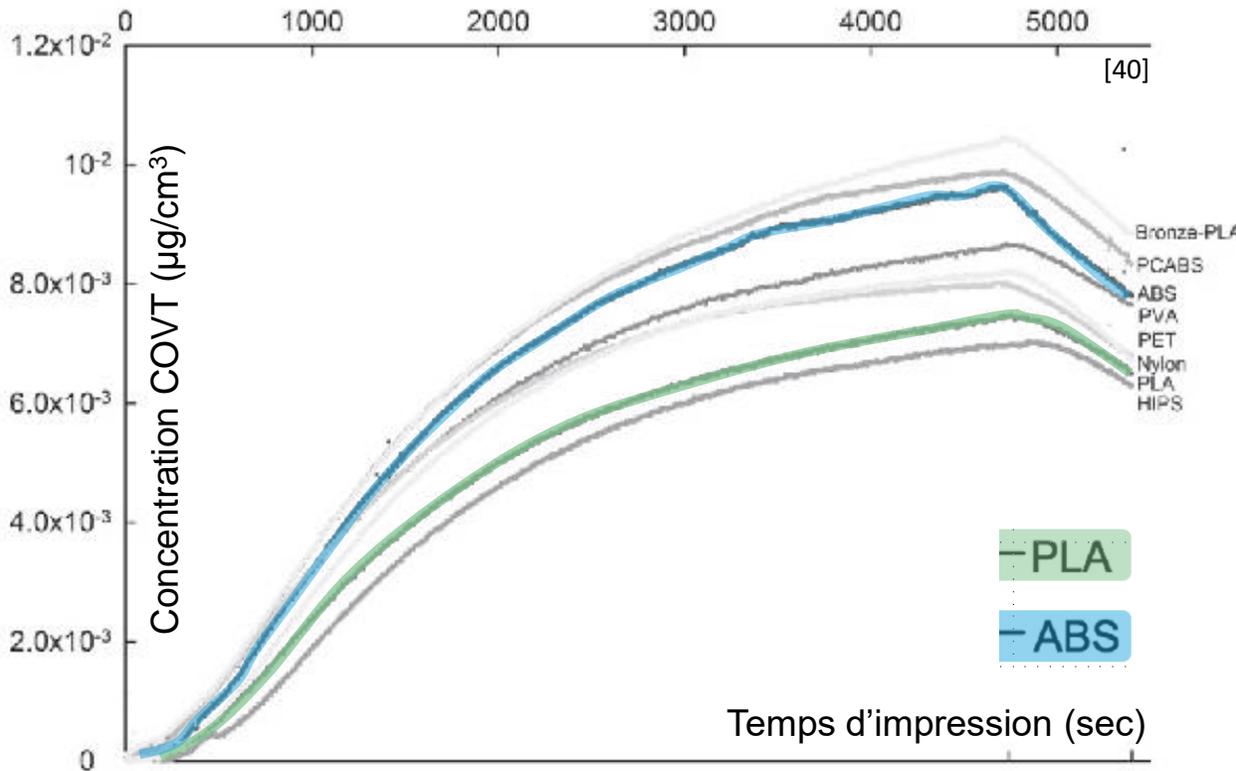


# Émissions de particules fines et ultrafines – FDM



# Émissions de composés organiques volatils - FDM

- acrylonitrile
- méthylmétacrylate
- propylène glycol
- méthylstyrène
- cumène
- cyclohexanone
- styrène
- éthylbenzène
- toluène
- 1-butanol
- acétone
- acétonitrile



# Paramètres d'influence sur les émissions de PUF et COV

Émissions ABS >> Émissions PLA  
[43]

Couleur affecte la **concentration** et la **taille** des particules émises [45]

Température de la buse



Émission **augmente** avec la **température de la buse** [42]



Nature du matériau

Vitesse d'extrusion

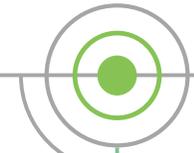


Variation de **30 mm/s** fait **augmenter** les émissions **3 fois** [44]

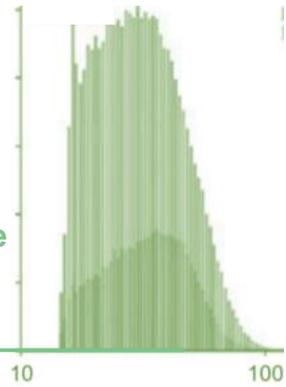


Couleur du matériau

Dysfonctionnement de l'impression



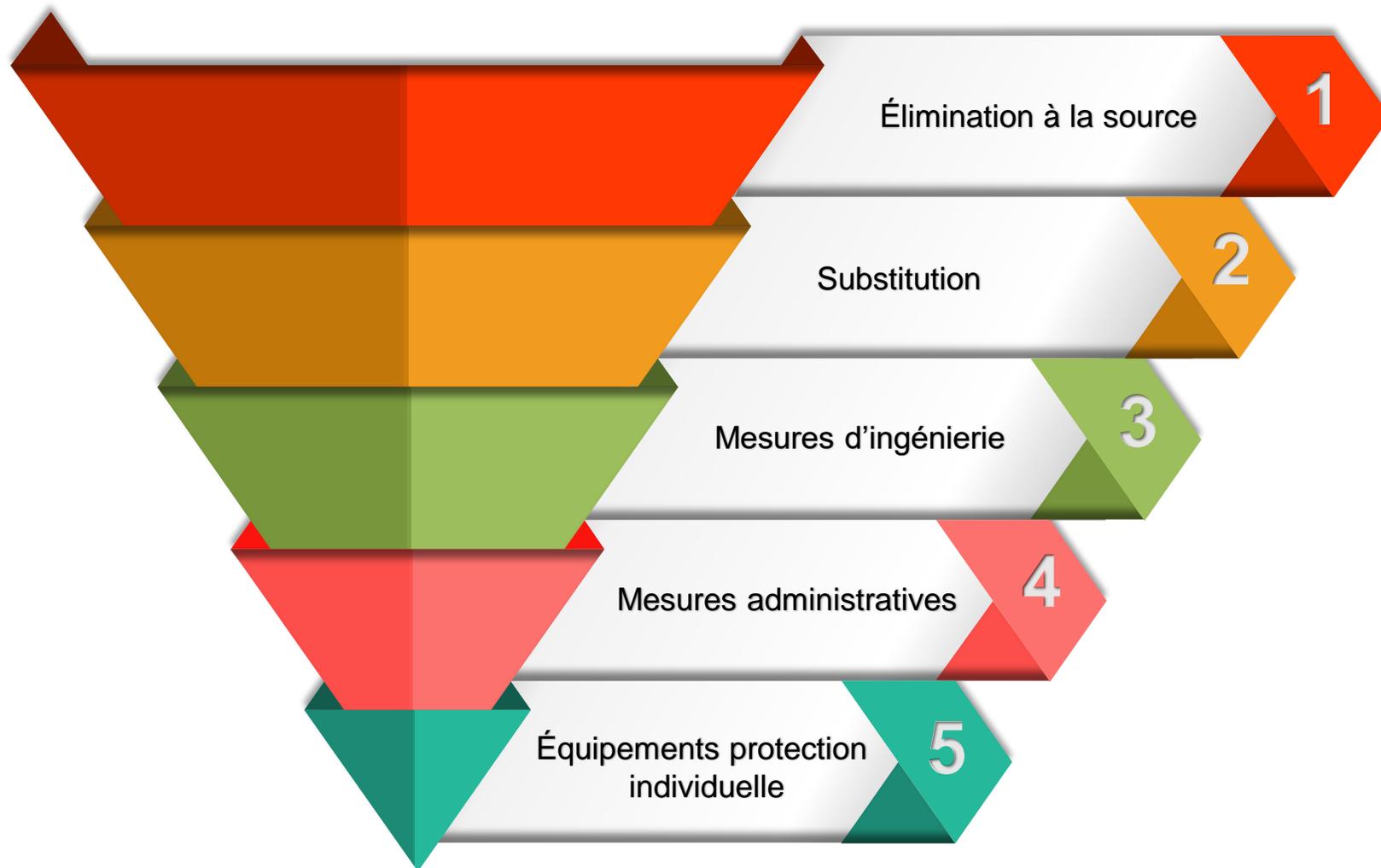
Émission **augmente** lors d'une **panne d'impression** [46]



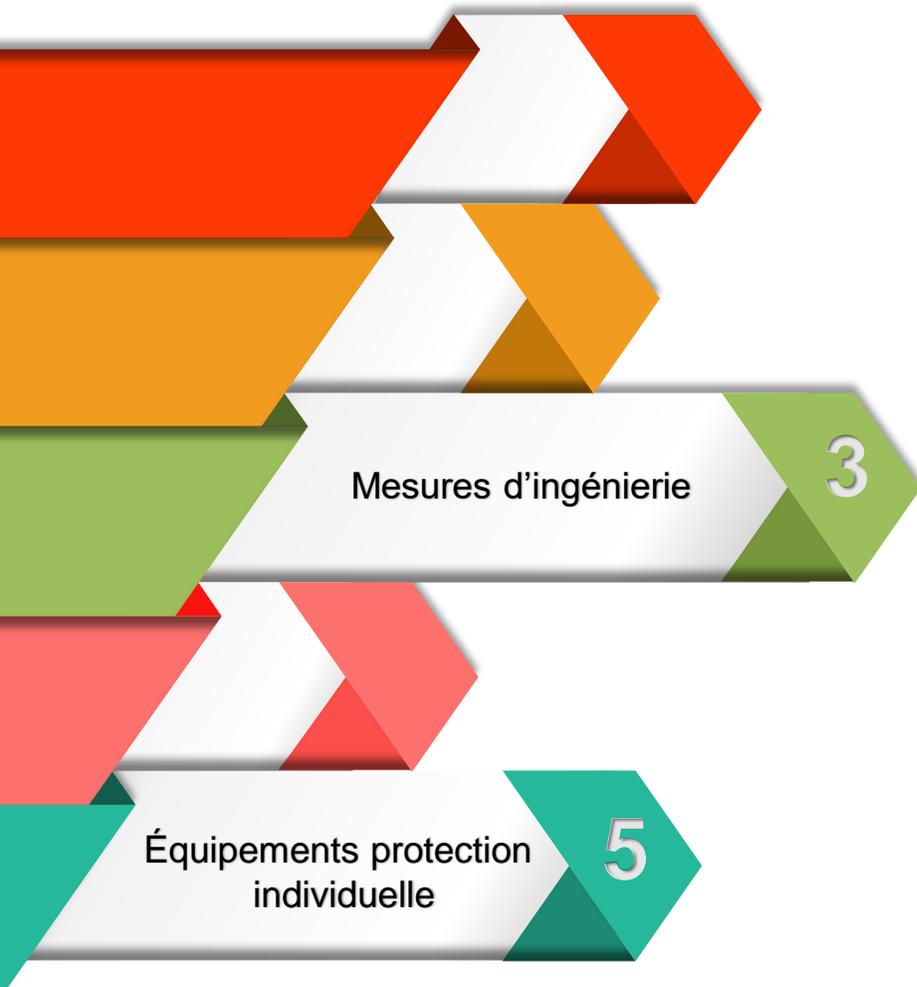
## Conclusions et limites de l'étude

- Difficile de connaître avec précision le nombre de travailleurs qui manipulent directement les imprimantes
- Déséquilibre entre le nombre de publications relatif à la FDM comparativement aux autres technologies
- Majorité des tests est effectuée en laboratoire et ne reflète pas l'exposition *in situ*
- **Pour les PF / PUF**, les taux d'émission et les concentrations sont significatifs, mais difficilement comparables entre les différentes études
  - Études non systématiques (Température de la buse, vitesse d'extrusion, nature du matériau imprimé, dimensions de l'espace, etc.), d'où la difficulté de réaliser une méta-analyse
  - Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de valeur limite d'exposition concernant les PUF
- **Pour les COV**, les VLE réglementaires (RSST) ne sont pas dépassées
  - L'utilisation en parallèle de multiples imprimantes pourrait accroître considérablement les concentrations mesurées

## Nos recherches en cours



## Nos recherches en cours



- **Évaluation de l'exposition des travailleurs *in situ*.**  
**Les mesures « terrain » sont quasiment inexistantes.**
- Réduire les émissions à la source en optimisant les paramètres d'utilisation des imprimantes
- Effets des systèmes de ventilation/extraction sur le fini des produits imprimés
- Efficacité des encoffrements
- Développement de modèles prédictifs de l'exposition
  
- Développer des structures à haute efficacité de filtration adaptables aux VPC
- Optimiser l'efficacité de filtration aux points de faiblesse des VPC de type 5

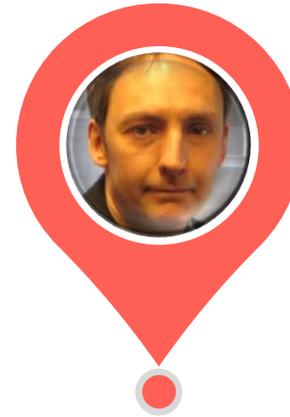
**Exposition des travailleurs aux particules  
ultrafines et aux composés organiques  
volatils émis lors d'un processus  
d'impression 3D**

État des lieux au Québec

Mohamed Zemzem  
Ludwig Vinches  
Stéphane Hallé

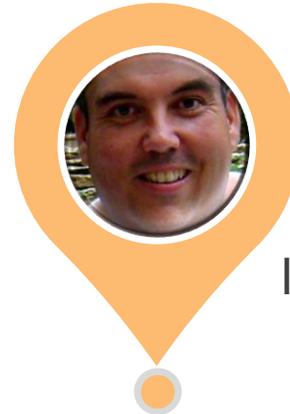
RAPPORTS  
SCIENTIFIQUES

R-1122-fr



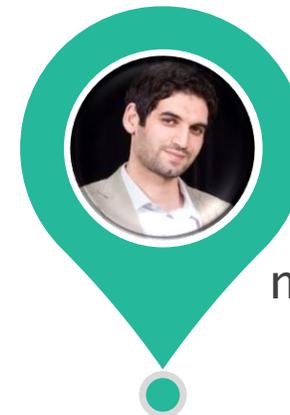
**Pr. Stéphane Hallé**

Professeur titulaire  
stephane.halle@etsmtl.ca



**Pr. Ludwig Vinches**

Professeur adjoint  
ludwig.vinches@umontreal.ca



**Mohamed Zemzem**

Chercheur postdoctoral  
mohamed.zemzem@umontreal.  
ca

