

JOURNÉE
TECHNIQUE

Fabrication additive

Comment construire
une prévention adaptée ?



Risques toxicologiques liés aux émissions et à la réutilisation des poudres métalliques

Jérémie POURCHEZ – 17 05 2022

Mardi 17 mai 2022
Paris – Maison de la RATP



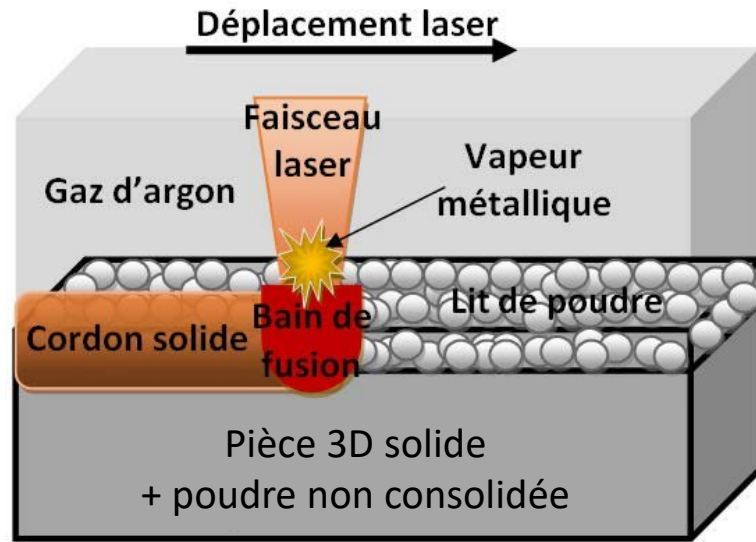
Elodie CABROL



Mohamed AZZOUAGH
Une école de l'IMT

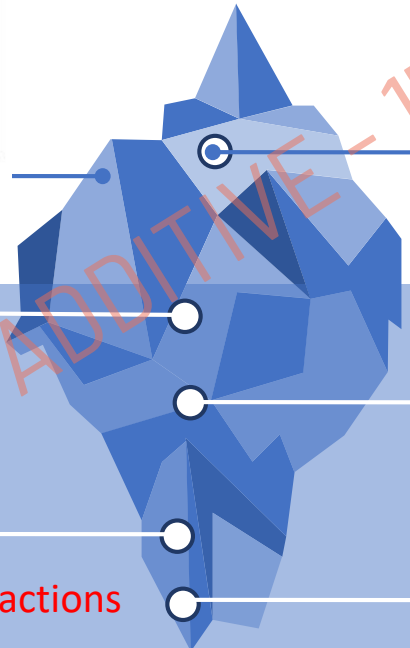


François-Xavier KELLER



Fusion laser sur lit de poudre

17/05/2022



- Liberté de conception
- Réalisation de pièces monoblocs
- Réutilisation de la matière
- Gain de masse

Verrou économique

- Prix et productivité des machines
- Prix des matières (poudres)
- Les coûts d'obsolescence

Verrou scientifique

- Meilleure compréhension des interactions matériau/laser.
- Optimisation des conditions opératoires du procédé de fabrication additive

Verrou réglementaire

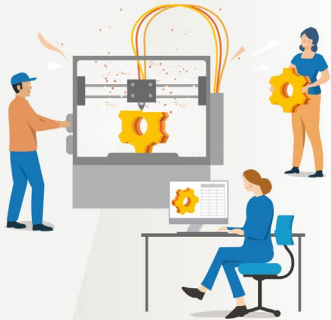
Nécessité des travaux réglementaires de normalisation

Verrou sanitaire

Maitrise préventive des risques, potentiellement nouveaux induits par le déploiement de la fabrication additive

1. Risque nanotoxicologique

2. Risque toxicologique lié à la réutilisation de la poudre métallique



Exposition

*Particules
ultrafines*

Danger

*poudres
métalliques et
émissions*

*Risque chimique
Risque ATEX
Risque machines*

Risque



Opérateur



Machine Pro X200

**Mesures préventives de gestion
des risques ?**



- Equipements de protection collective (EPC)
- Equipements de protection individuelle (EPI)

1. Risque nanotoxicologique



La toxicité par inhalation

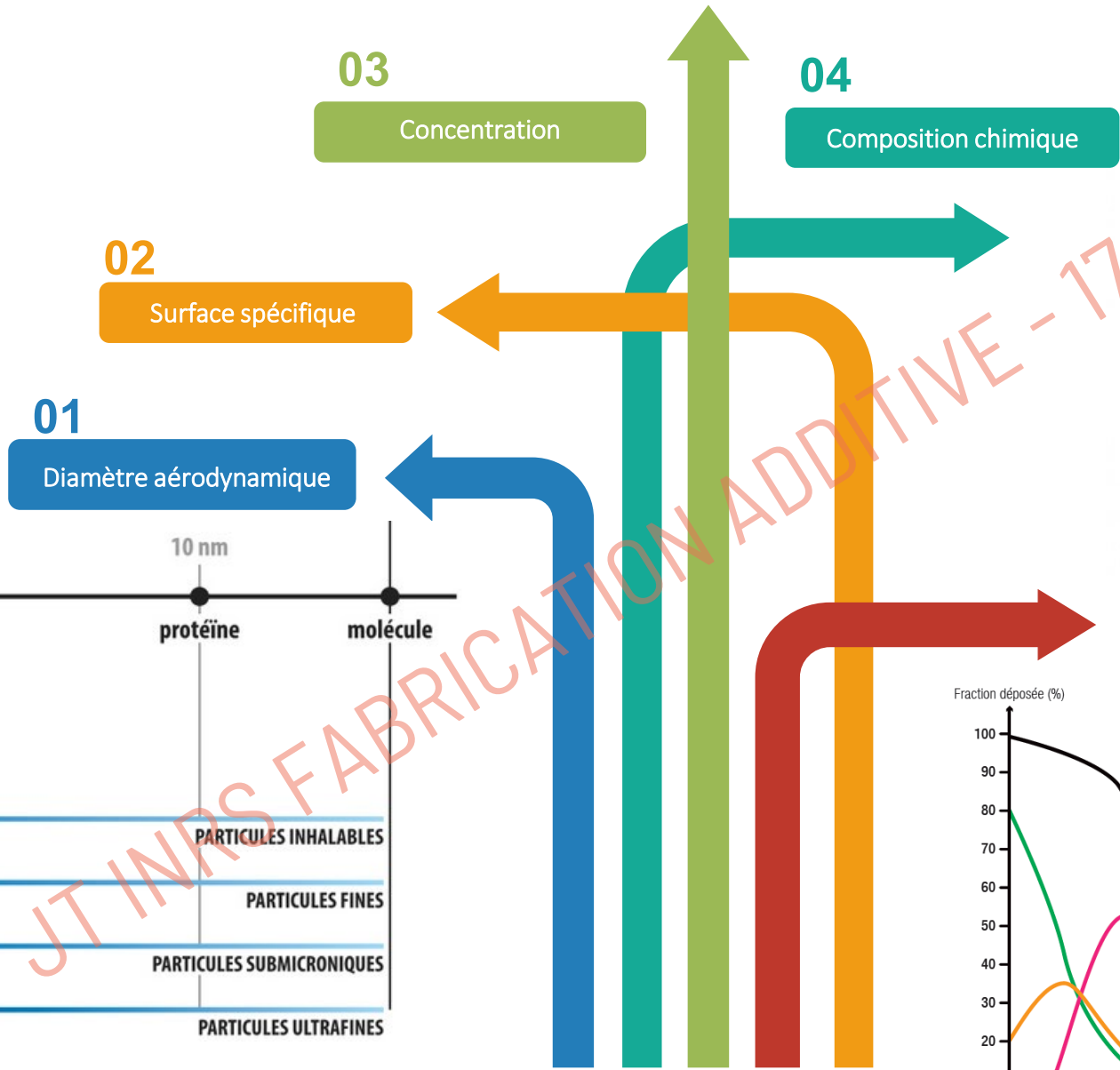
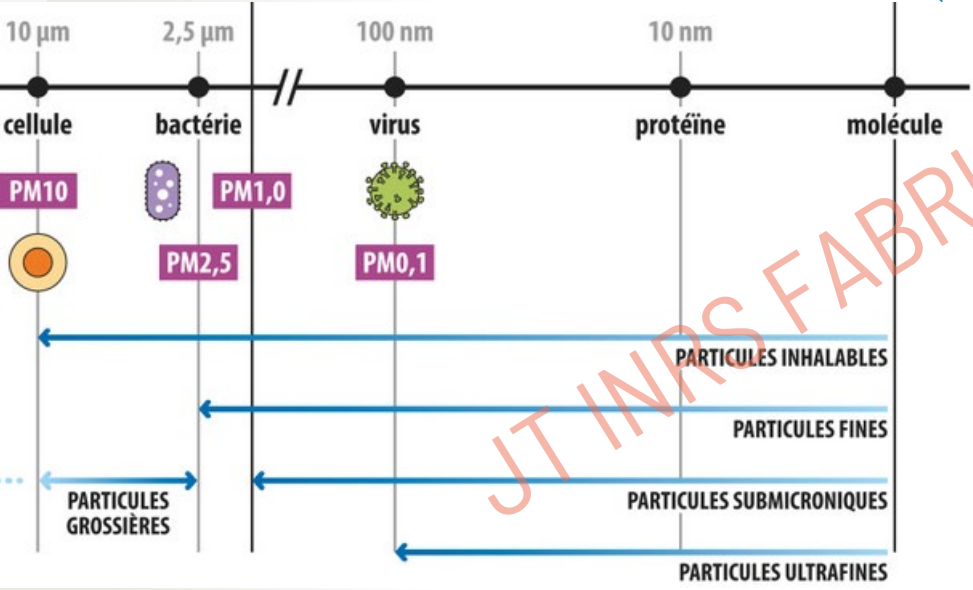
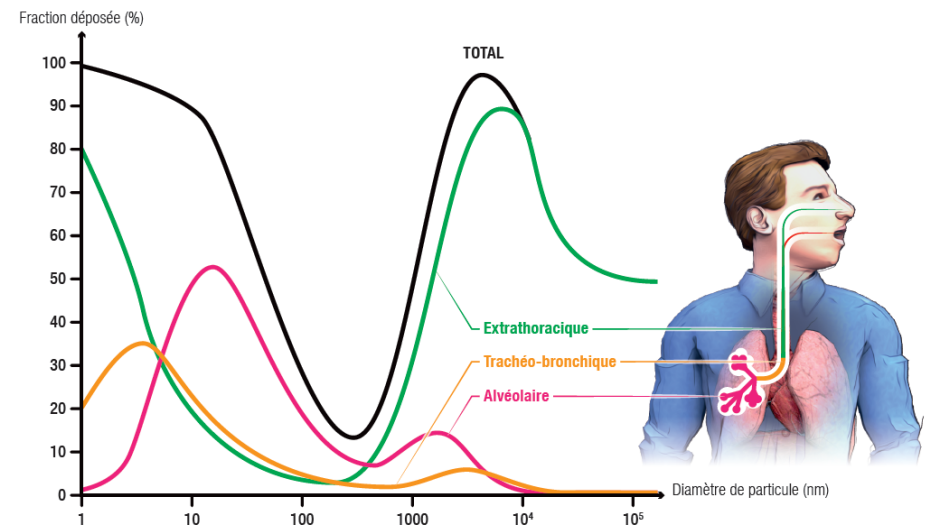


TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

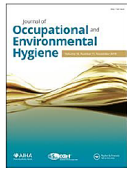
1	H																2	He																												
3	Li		Be		[Transition Metals]										B		C		N		O		F		Ne																					
11	Na		Mg		[Transition Metals]										Al		Si		P		S		Cl		Ar																					
19	K		Ca		[Transition Metals]										Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni		Cu		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr	
37	Rb		Sr		[Transition Metals]										Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ag		Cd		In		Sn		Sb		Te		I		Xe	
55	Cs		Ba		[Transition Metals]										La		Hf		Ta		W		Re		Os		Ir		Pt		Au		Hg		Tl		Pb		Bi		Po		At		Rn	
87	Fr		Ra		[Transition Metals]										Ac		Rf		Db		Sg		Bh		Hs		Mt		Ds		Rg		Cn		Uut		Fl		Uup		Lv		Uus		Uuo	
58		59		60		61		62		63		64		65		66		67		68		69		70		71																				
Ce		Pr		Nd		Pm		Sm		Eu		Gd		Tb		Dy		Ho		Er		Tm		Yb		Lu																				
90		91		92		93		94		95		96		97		98		99		100		101		102		103																				
Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm		Bk		Cf		Es		Fm		Md		No		Lr																				



05
dépôt pulmonaire



1. Risque nanotoxicologique



Journal of Occupational and Environmental Hygiene



ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: <https://oeh.tandfonline.com/loi/uoeh20>

Occupational exposure during metal additive manufacturing: A case study of laser powder bed fusion of aluminum alloy

Mohamed Nour Azzougagh, Francois-Xavier Keller, Elodie Cabrol, Mehmet Cici & Jeremie Pourchez

To cite this article: Mohamed Nour Azzougagh, Francois-Xavier Keller, Elodie Cabrol, Mehmet Cici & Jeremie Pourchez (2021): Occupational exposure during metal additive manufacturing: A case study of laser powder bed fusion of aluminum alloy, Journal of Occupational and Environmental Hygiene, DOI: [10.1080/15459624.2021.1909055](https://doi.org/10.1080/15459624.2021.1909055)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/15459624.2021.1909055>

Published online: 14 May 2021.

Echelles

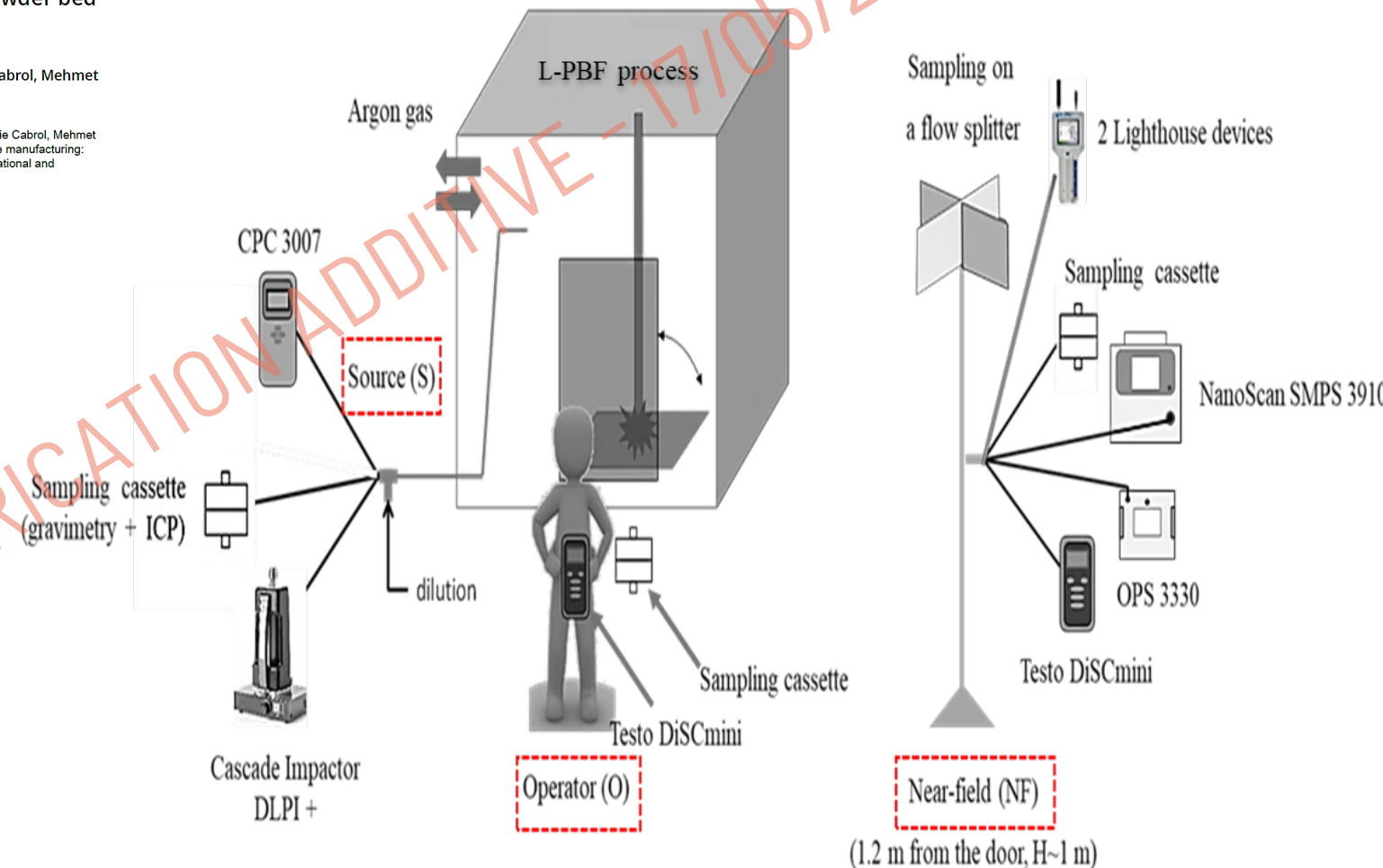
Opérations



- ✘ Source
- ✘ Champ proche
- ✘ Opérateur

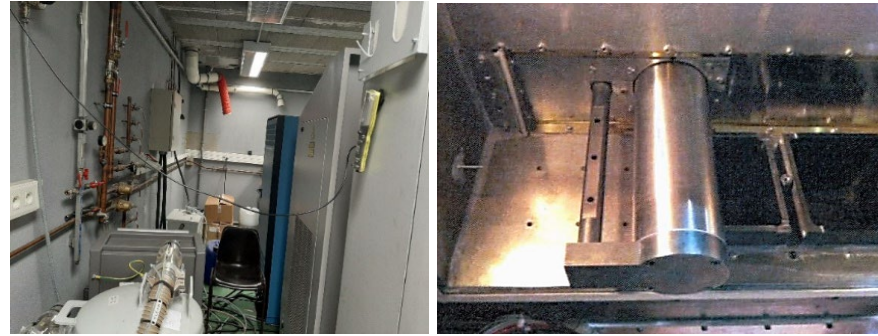
- ✘ Aerosol ambiant
- ✘ Chargement
- ✘ Fabrication
- ✘ Déballage
- ✘ Nettoyage
- ✘ Post-fabrication

Mesure de l'exposition



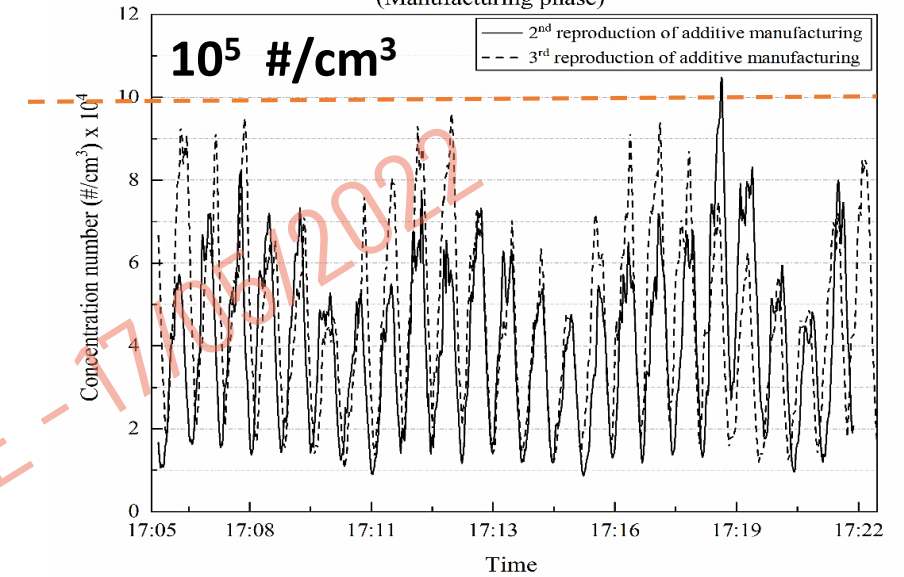
1. Risque nanotoxicologique

$2,37 \pm 0,35 \text{ mg/m}^3$



Figures : Piquage réalisé au niveau de la machine - Enceinte de fabrication

CPC source measurement with dilution
(Manufacturing phase)

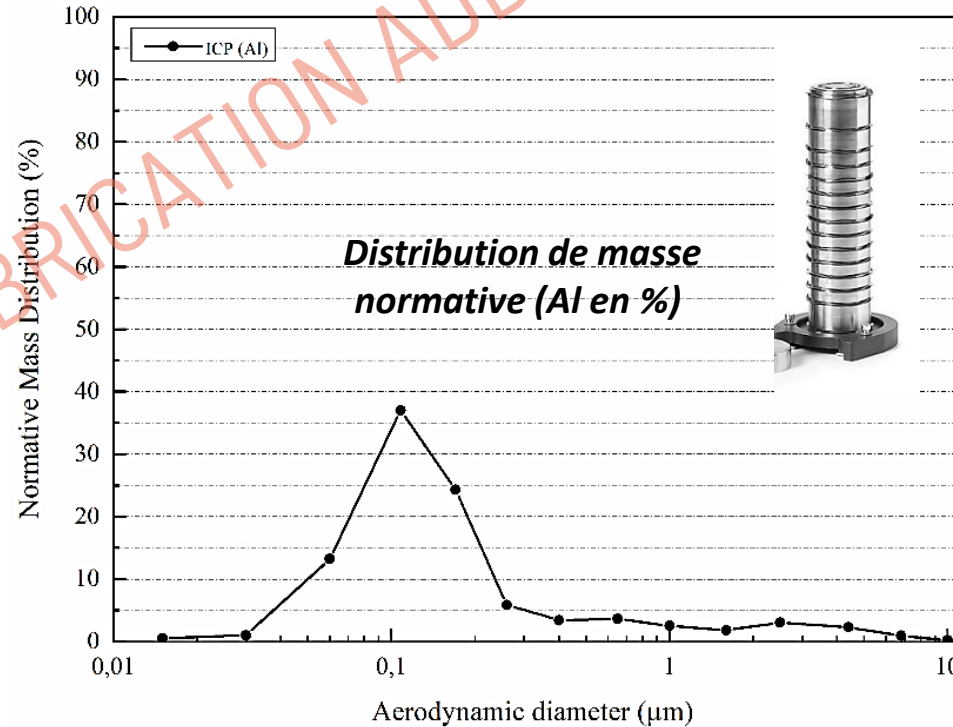


Echelles

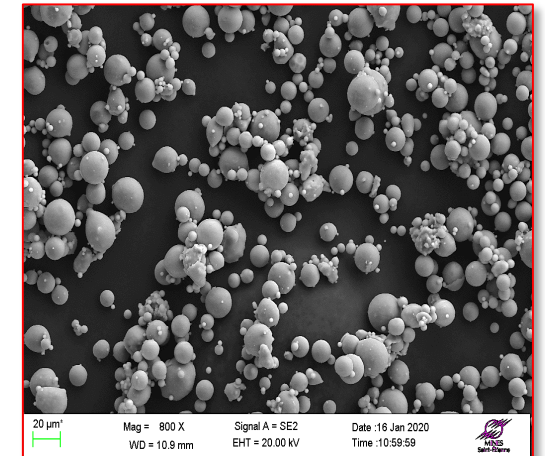
Opérations

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input checked="" type="checkbox"/> Source | <input type="checkbox"/> Chargement |
| <input type="checkbox"/> Champ proche | <input type="checkbox"/> Tamisage |
| <input type="checkbox"/> Opérateur | <input checked="" type="checkbox"/> Fabrication |
| | <input type="checkbox"/> Déballage |
| | <input type="checkbox"/> Nettoyage |
| | <input type="checkbox"/> Post-fabrication |

➤ Concentration importante en nombre (10^5 \#/cm^3) et en masse ($2,37 \pm 0,35 \text{ mg/m}^3$)



Poudre initiale: AlSi10Mg
entre 10 et 45µm



➤ Présence d'aérosols de dimensions nanométriques (100 nm)

1. Risque nanotoxicologique



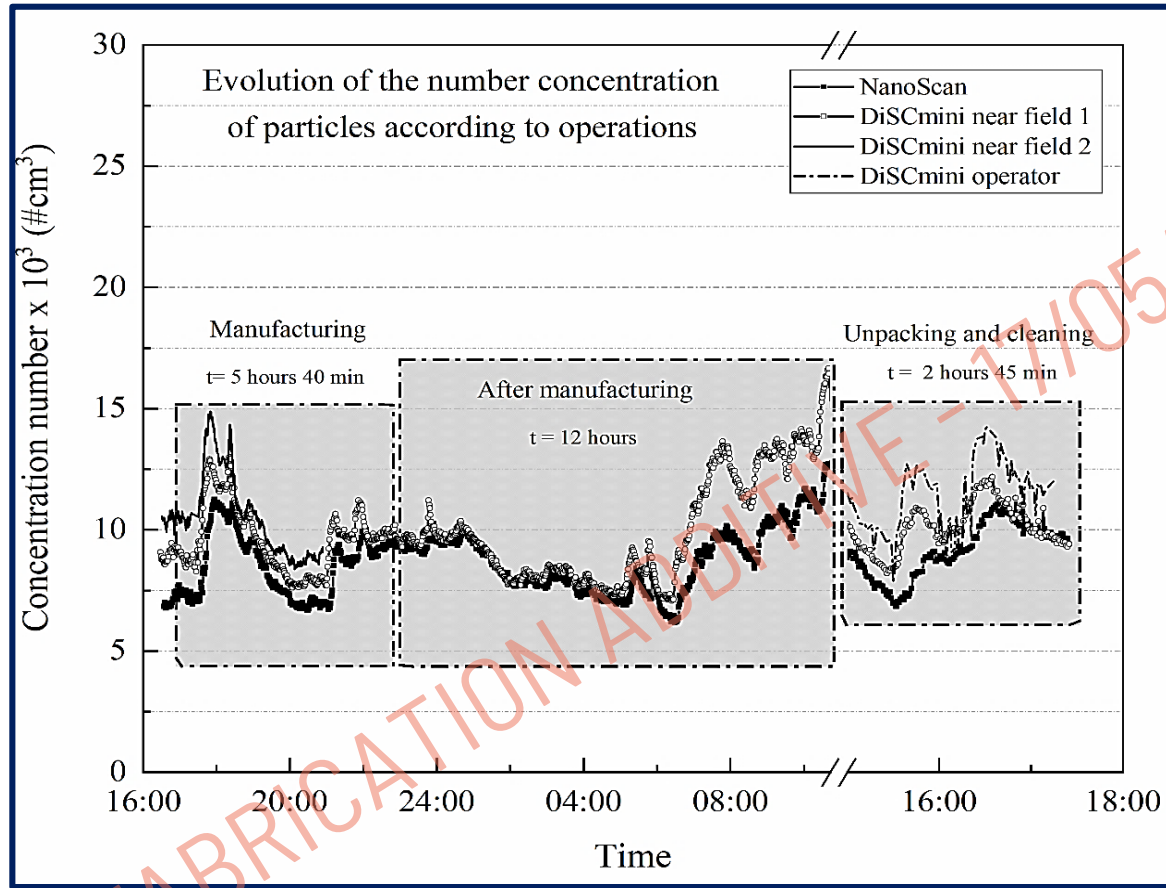
Echelles

Opérations

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> Source | <input type="checkbox"/> Chargement |
| <input checked="" type="checkbox"/> Champ proche | <input type="checkbox"/> Tamisage |
| <input type="checkbox"/> Opérateur | <input checked="" type="checkbox"/> Fabrication |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Déballage |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Nettoyage |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Post-fabrication |

Niveau d'exposition est faible par rapport à l'aérosol de fond et rapport 10 par rapport à la source

→ Capotage efficace !!



Concentration massique

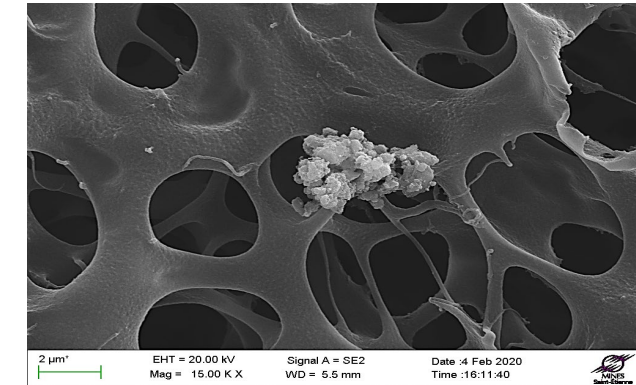


- Phase de déballage et nettoyage : $0,77 \pm 0,20 \text{ mg/m}^3$
- Phase de fabrication : $1,28 \pm 0,39 \text{ mg/m}^3$

Concentration en nombre

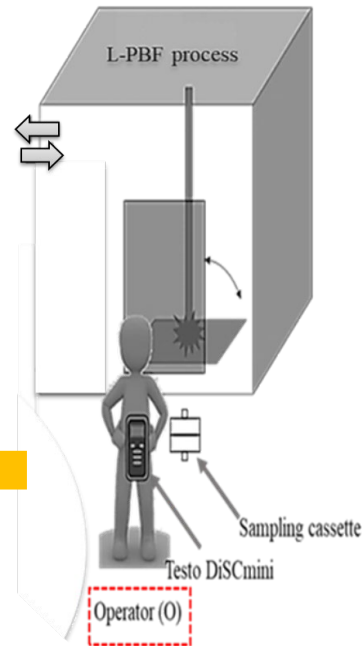


- **Aérosol de fond :** 10^4 \#/cm^3
- **Phase de fabrication, post-fabrication, déballage et nettoyage :** $[10^4 \text{ \#/cm}^3 ; 2 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3]$
- **Aucune exposition à des particules micrométriques.**



Cassette de prélèvement, Champ proche, 2L/min

1. Risque nanotoxicologique



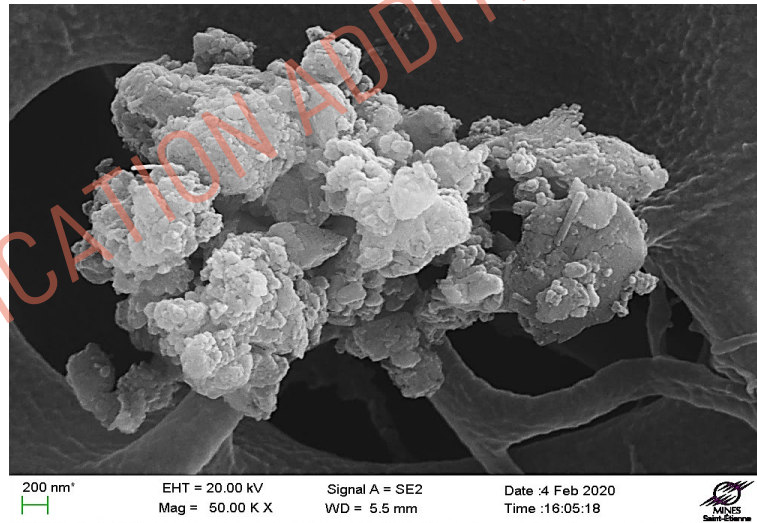
Echelles

Opérations

Echelles	Opérations
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Source	<input type="checkbox"/> Chargement
<input type="checkbox"/> Champ proche	<input type="checkbox"/> Tamisage
<input checked="" type="checkbox"/> Opérateur	<input type="checkbox"/> Fabrication
	<input checked="" type="checkbox"/> Déballage
	<input checked="" type="checkbox"/> Nettoyage
	<input type="checkbox"/> Post-fabrication

**Pas d'exposition importante mesurée
mais risque d'inhalation de l'aluminium
et pics ponctuels avec concentration
massique importante !**

Phase la plus exposante : déballage et nettoyage
Les autres phases : cohérent aux valeurs du champ proche
Fraction inhalable : $1,73 \pm 0,3 \text{ mg/m}^3$
Analyse ICP : masse d'aluminium de 6 mg/filtre
**Concentration en nombre de particules : entre 10^4 et 1.5×10^4
#/cm³ (pics ponctuels)**
Tailles moyennes des particules : entre 50 et 150 nm (DiSCmini)

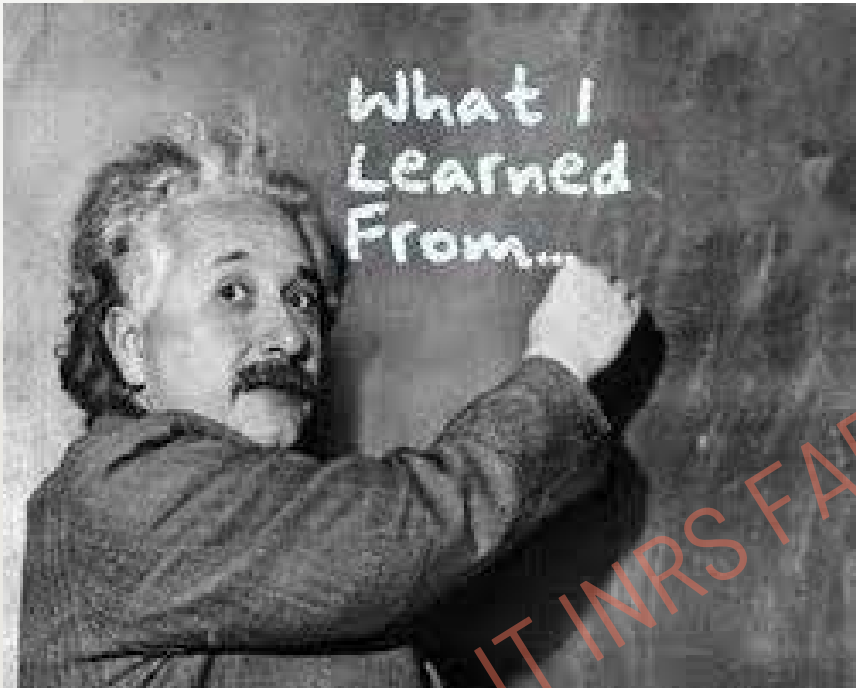


*Aérosols prélevés sur la
cassette installée sur la zone
de respiration de l'opérateur*



*L'opérateur lors des
phases de déballage et
nettoyage*

1. Risque nanotoxicologique



Cette étude pilote a pu montrer :

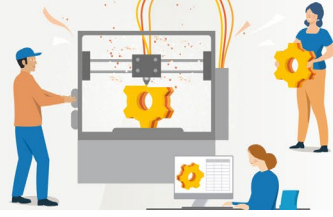
Au niveau de la source (dans l'enceinte de la machine) lors de la fabrication : Présence **d'aérosols métalliques de dimensions nanométriques** dans la machine de fabrication additive métallique.

Au niveau du champ proche : Niveau d'exposition est plutôt rassurant par rapport à la source (facteur de 10) et l'aérosol ambiant (facteur 2), démontrant un **excellent capotage de la machine.**

Au niveau de l'exposition de l'opérateur : concentration massique potentiellement importante relevée pour l'opérateur (1.73 mg/m^3) lors de pic d'exposition lors de certaines phases spécifiques (déballage et nettoyage), démontrant **l'intérêt de porter des EPI et d'envisager un système de captage à la source.**

Le risque nanotoxicologique par inhalation ne peut pas être exclu, d'où la nécessité de mesures préventives (capotage machine, captage à la source, EPI).

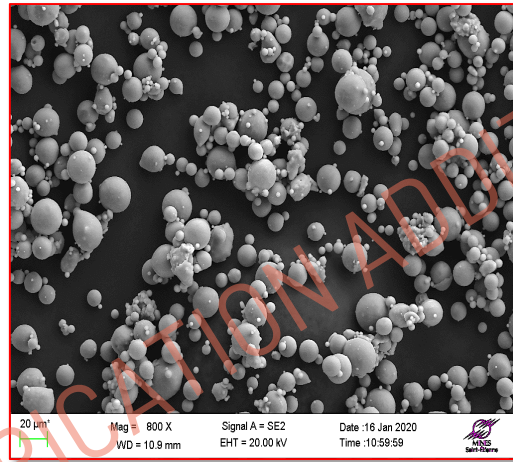
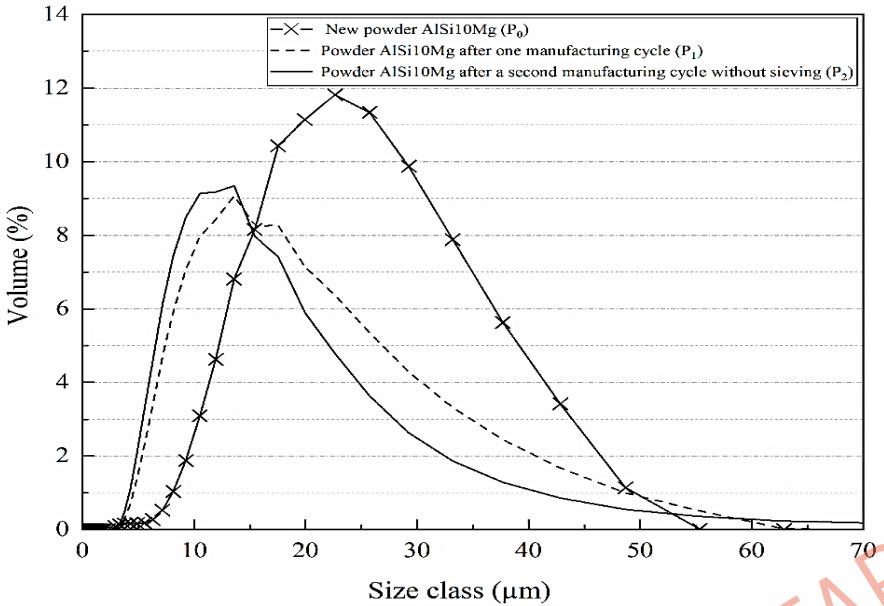
2. Risques liés à la réutilisation des poudres métalliques



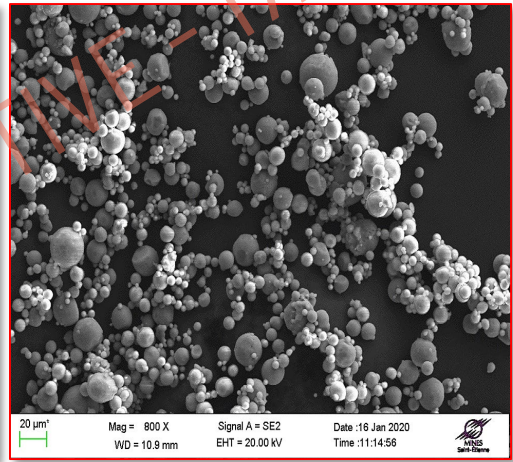
Cas 1 : AlSi10Mg – variation granulométrique

3 types de poudres analysées :

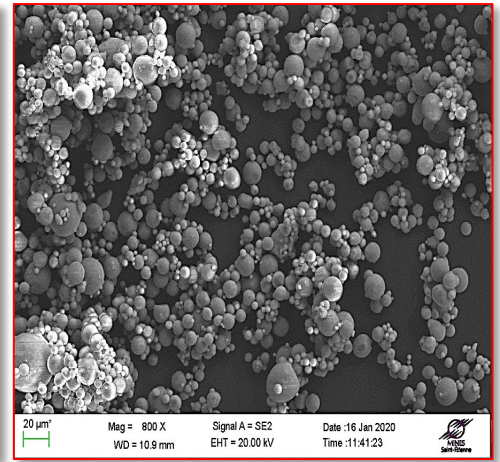
- Poudre neuve P_0 (granulométrie initiale : 15 - 45 μm)
- Poudre P_1 : 1 cycle de fabrication + 1 tamisage
- Poudre P_2 : après une 2^{ème} fabrication mais sans tamisage



P_0



P_1

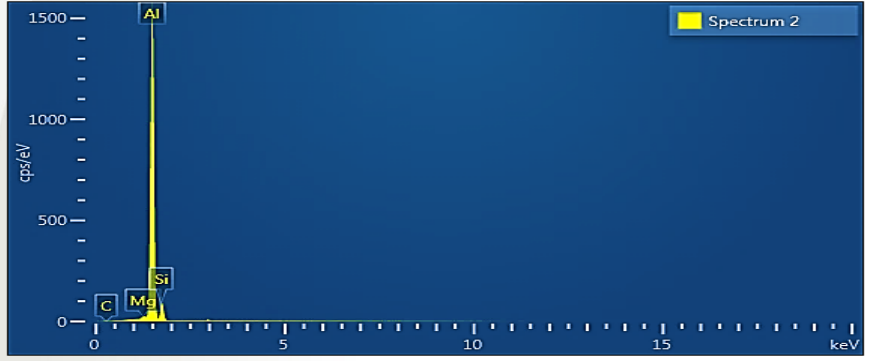


P_2

- **Poudre neuve** : sphérique 20 μm /10 μm / 1 μm
- **Poudre P1 et P2** : sphérique, 10 μm /1 μm + agglomération
- **Diminution de la taille des particules** : De P_0 à P_1

	Poudre vierge (P_0)	Poudre recyclée (P_1)	Poudre recyclée (P_2)
Surface BET (m^2/g)	0.14	0.20	0.22
Diameter BET (μm)	15,8	11,0	9,9

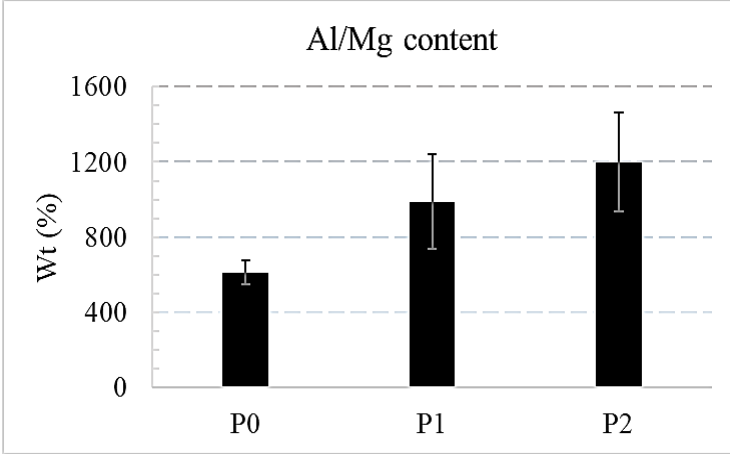
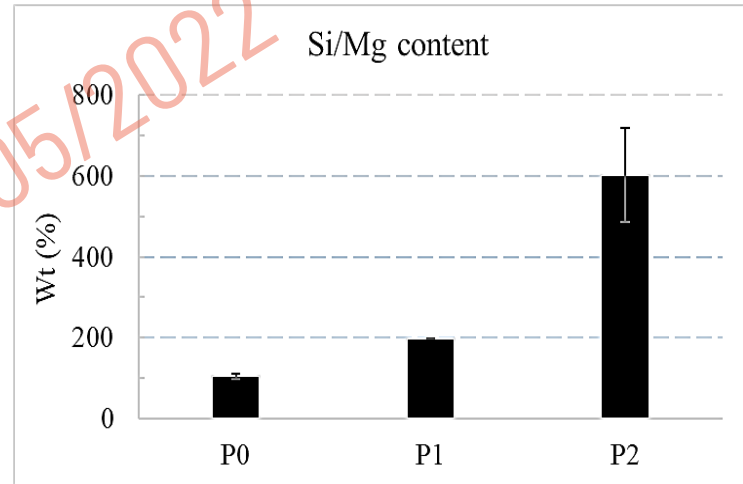
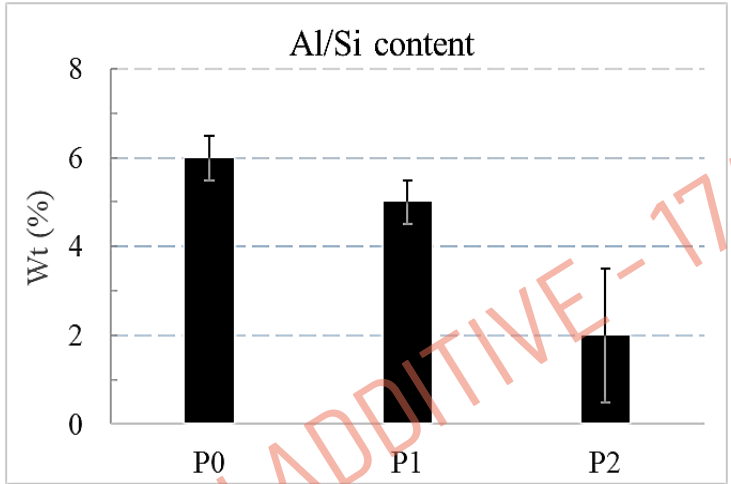
2. Risques liés à la réutilisation des poudres métalliques



Spectre EDX des composants chimiques de la poudre AlSi10Mg

Appauvrissement des éléments Al et Mg et/ou enrichissement en Si au cours des cycles de fabrication (accord avec les températures de vaporisation des éléments)

Cas 1 : AlSi10Mg – variation chimique



Changements du rapport élémentaire mesuré par ICP-MS

2. Risques liés à la réutilisation des poudres métalliques

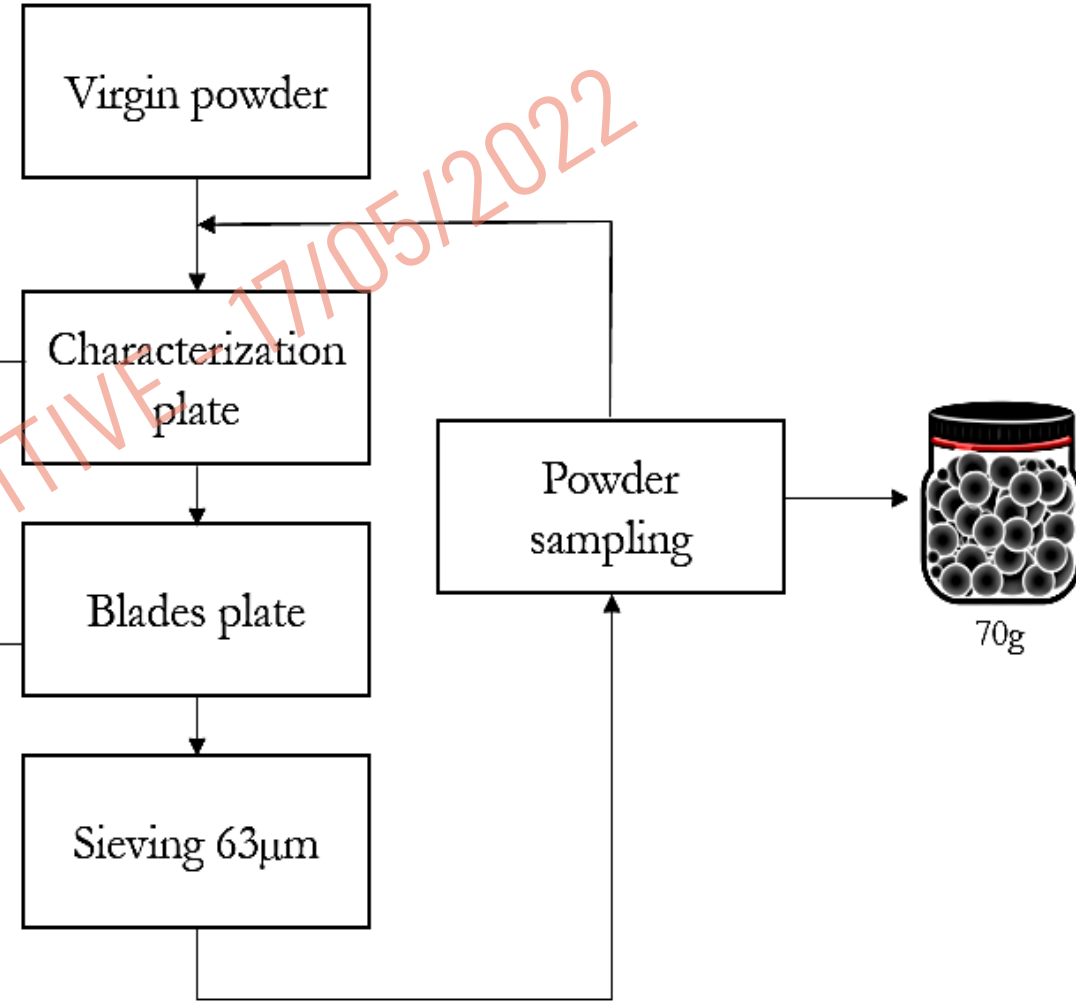
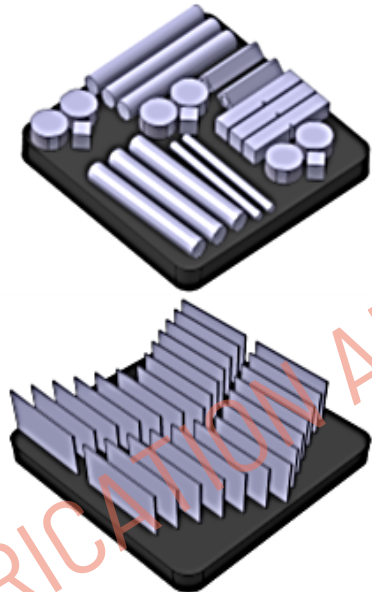


L'objectif est de simuler le réutilisation de la poudre métallique lors d'une production industrielle de quelques pièces

6 réutilisations de la poudre initiale neuve ont été effectuées, sans ajout de poudre neuve entre le cycles.

Cas 2 : Al 6061+Zr

Plateau de construction
Dimensions : 140*140 mm



Tamisage à 63 µm à l'air
Pas de mélange - Pas d'étuvage

2. Risques liés à la réutilisation des poudres métalliques



Cas 2 : Al 6061+Zr

☐ Synthèse après 6 recyclages :

Pas d'impact sur :

- La morphologie et la granulométrie
- Composition chimique
- Taux d'humidité
- Densification du lit de poudre

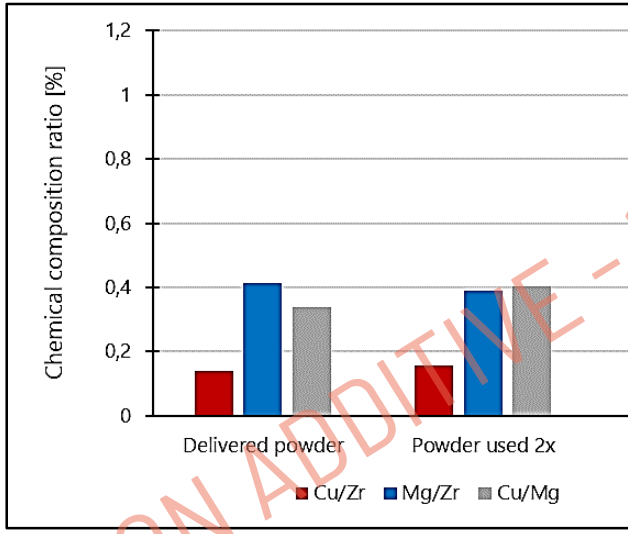


Figure: Evolution de la composition chimique de la poudre

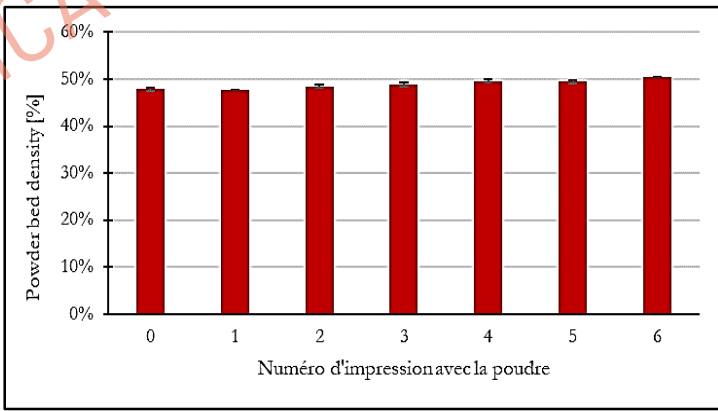


Figure: Densité du lit de poudre pendant le recyclage

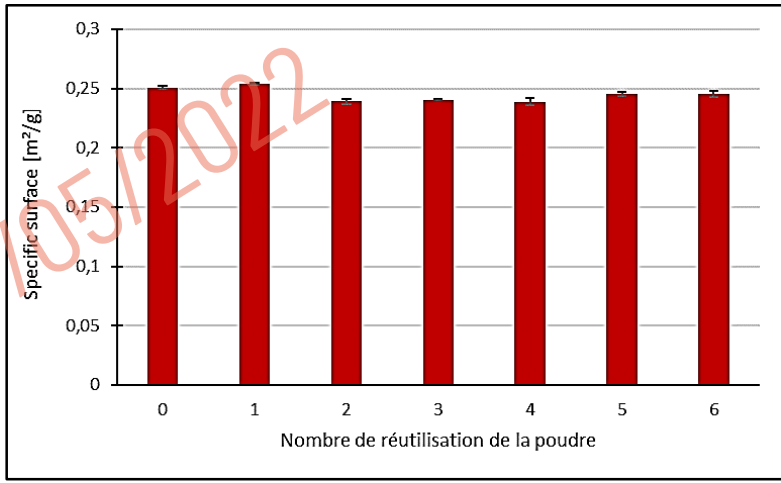


Figure: Étude de l'évolution de la surface spécifique pendant la réutilisation

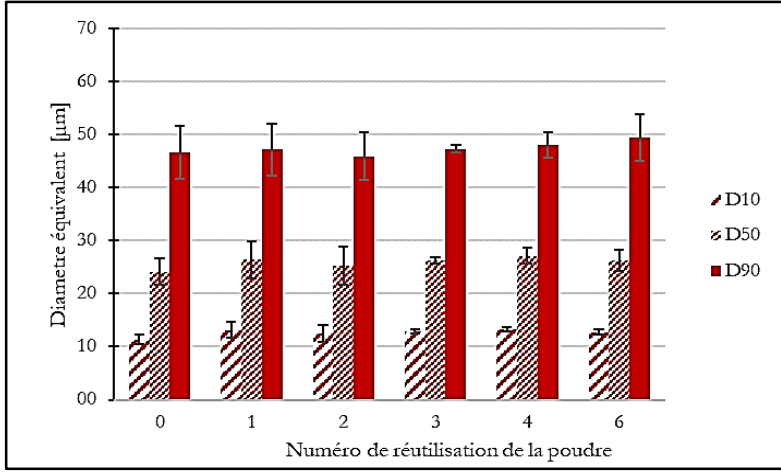


Figure: Taille des particules sur lit de poudre

2. Risques liés à la réutilisation des poudres métalliques

Cas 2 : Al 6061+Zr

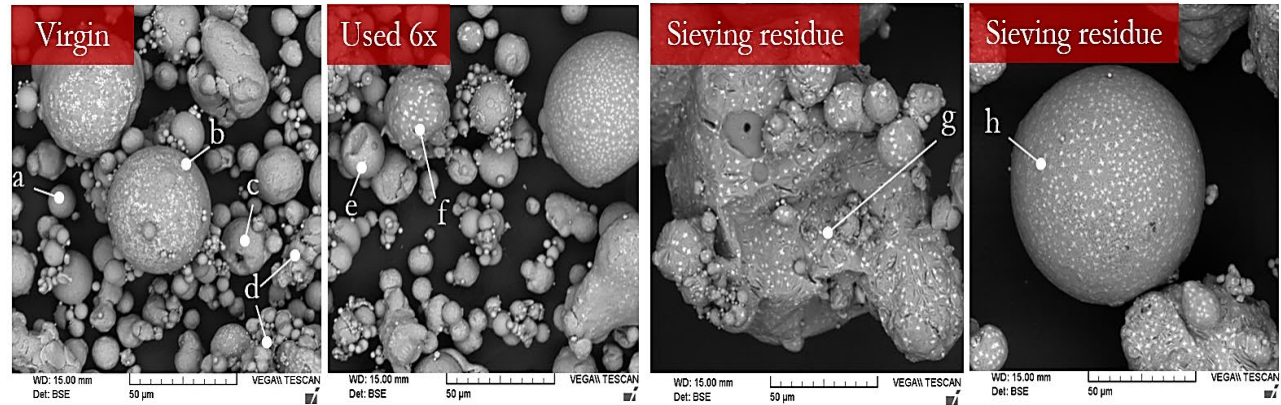


Figure : Images MEB de la poudre vierge, de poudre réutilisée (x6) et de poudre résiduelle après tamisage

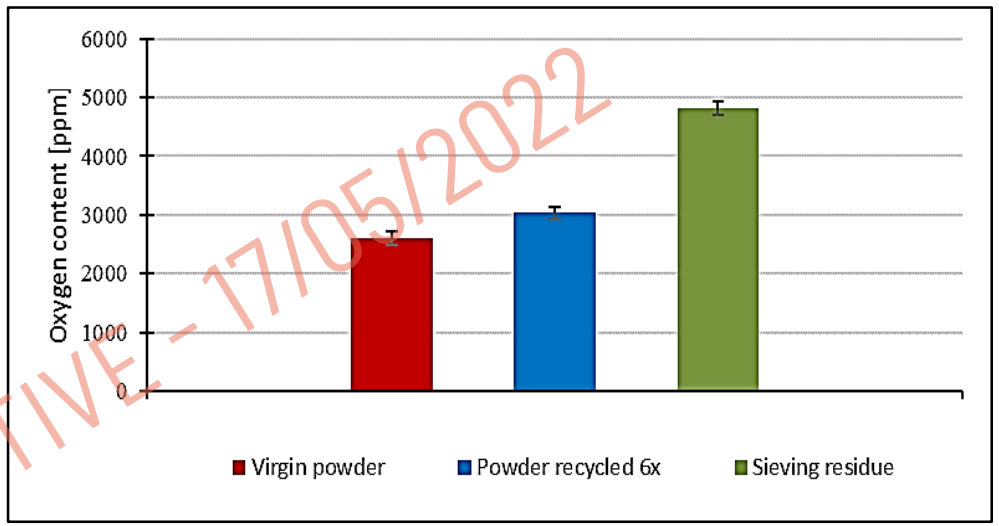


Figure : Teneur en oxygène de la poudre neuve, de la poudre recyclée 6 fois et du résidu de tamisage

❑ Synthèse après 6 recyclages :

Impact :

- **Taux d'Oxygène** : augmentation après réutilisation
- **Analyse MEB + EDX** : Apparition de quelques zones riches en oxygène et en magnésium sur les particules.

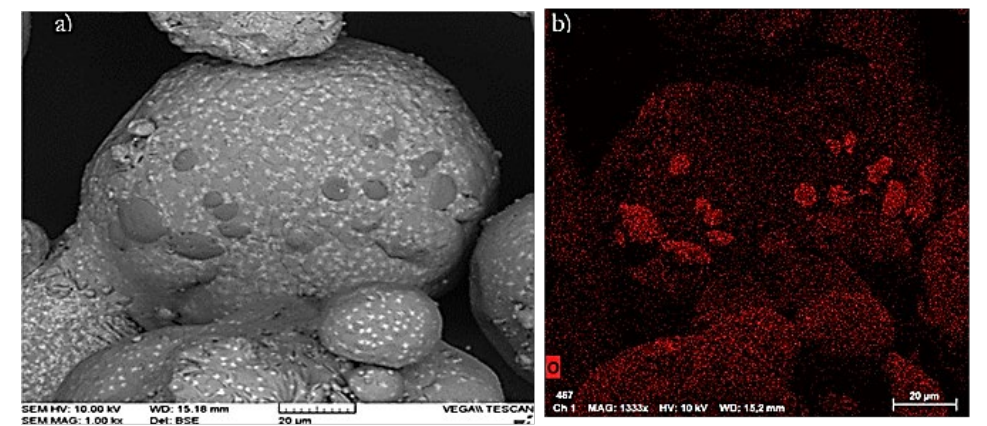
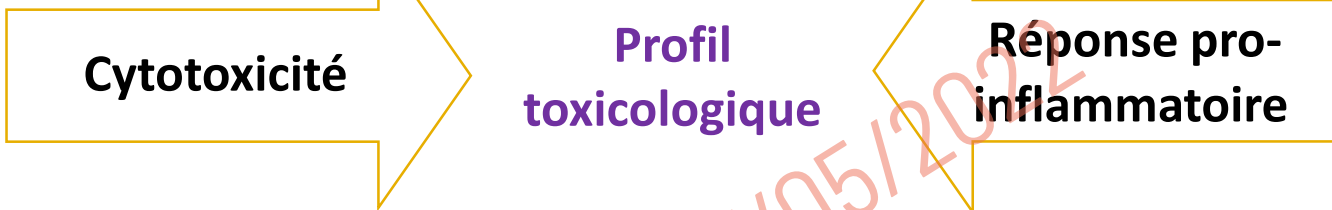


Figure : (a) Images MEB de la poudre affectée; (b) Analyse EDS de l'oxygène

2. Risques liés à la réutilisation des poudres métalliques

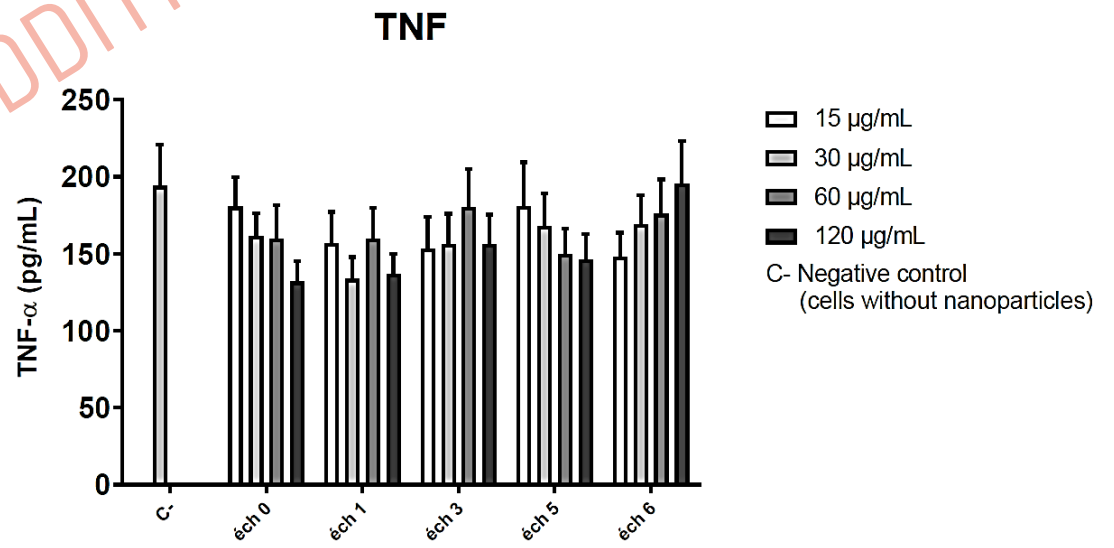
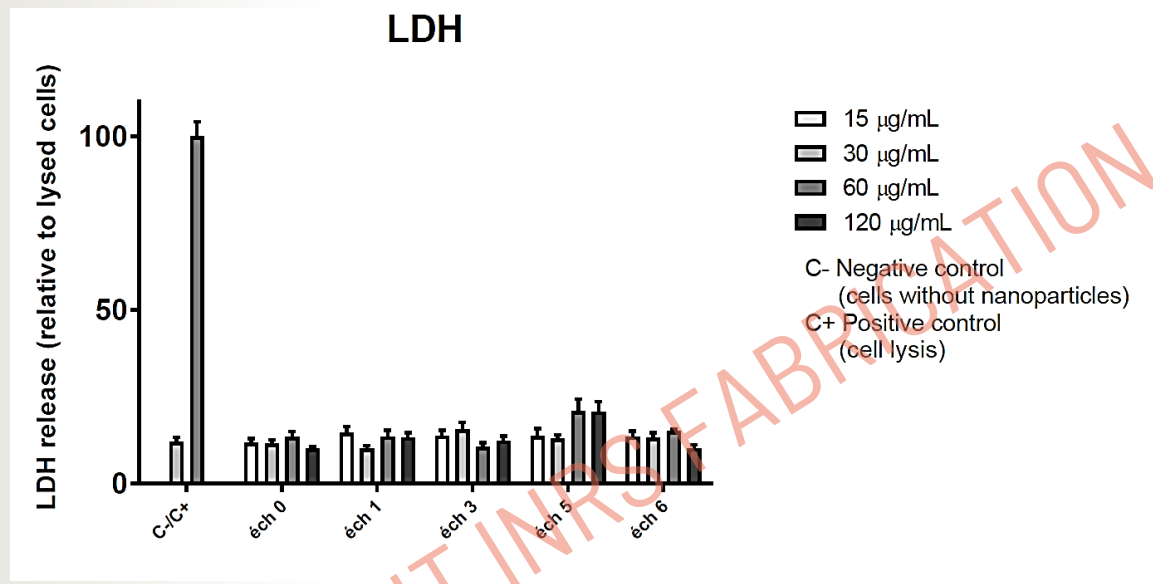


Cas 2 : Al 6061+Zr



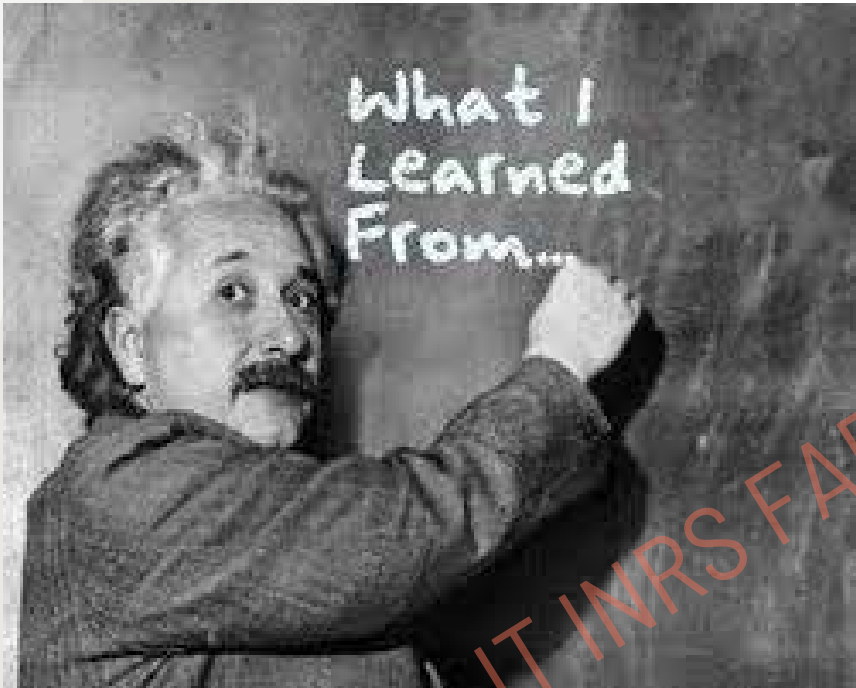
LDH (Lactate Déshydrogénase)

TNF-α (Tumor Necrosis Factor alpha)



La réutilisation de la poudre Al 6061+Zr, n'engendre ni cytotoxicité, ni de réaction pro-inflammatoire.

2. Risques liés à la réutilisation des poudres métalliques



Cette étude pilote a pu montrer :

En fonction de l'alliage, pour un même procédé, il peut y avoir des modifications des propriétés physico-chimiques des poudres métalliques lors de leur réutilisation.

Ces modifications physico-chimiques (morphologie, état d'agglomération, granulométrie, oxydation, appauvrissement en élément volatile) peuvent avoir un impact sur les propriétés fonctionnelles des pièces imprimés mais aussi toxicologiques des poudres.

Par exemple, ces modifications semblent plus importante pour AlSi10MG comparativement à Al 6061+Zr qui semble plus stable au niveau fonctionnel comme toxicologique.

Le risque potentiel induit par la modification des paramètres physico-chimiques pouvant altérer le profil toxicologique des poudres métalliques réutilisées vs. poudre neuve doit être examiné au cas par cas (alliage + procédé). Mais nous avons démontré que des poudres peuvent présenter une excellente stabilité !



MINES
Saint-Étienne

Une école de l'IMT

Merci de votre attention
pourchez@emse.fr



Travaux réalisés
lors de la thèse de
Mohamed Nour
AZZOUAGH

JT MRS FABRICATION ADDITIVE - 17/05/2022