

JOURNÉE  
TECHNIQUE

Fabrication additive

Comment construire  
une prévention adaptée ?



# Risques d'inflammation et d'explosion de poudres en fabrication additive

Olivier Dufaud – Univ. Lorraine – 17 05 2022

**Mardi 17 mai 2022**  
Paris – Maison de la RATP



# Plan de la présentation



Moyens de prévention,  
protection adaptés



# 1. Identifier les dangers

Conditions  
de l'explosion de poussières :

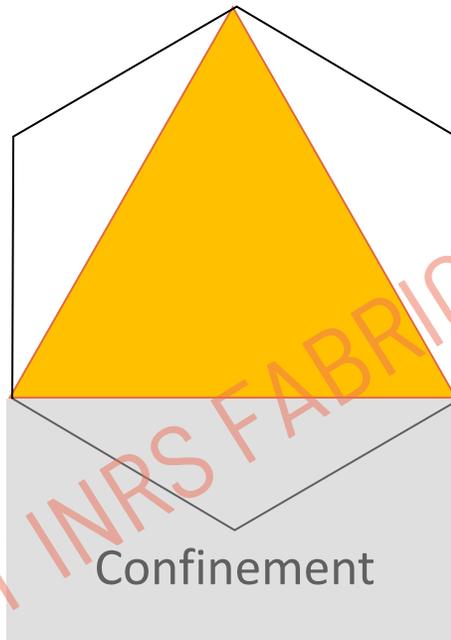
Fabrication additive :



Domaine  
d'explosivité

Solide  
combustible

Source  
d'inflammation



Poudres en  
suspension

Comburant  
(oxygène, air...)

Laser, racleur, électricité  
statique, auto-échauffement...

Introduction, collecte par  
aspiration...

Présent, si inertage insuffisant,  
réaction thermites...

Présent

# 1. Identifier les dangers

Qu'est-ce qu'une poussière ? (cadre ATEX) Nature  
Qu'est-ce qu'une poussière ? Taille



1. Poudre combustible :

Organique ou métal (minéral)

ex. polymères : PE, ABS, nylon, PTFE...

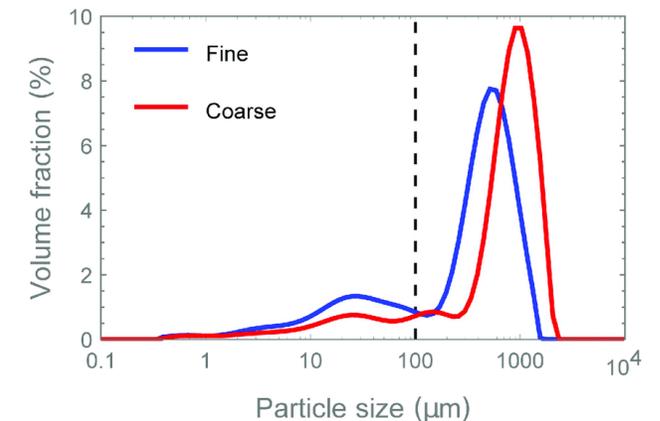
ex. métaux : Aluminium, fer,  
magnésium, titane, cobalt, tantale,  
niobium, zirconium, nickel, zinc...  
et leurs alliages !

sauf exception : Inox...

2. Taille des particules :

NFPA 484 (2012) →  $d < 500 \mu\text{m}$

En pratique →  $d < 1 \text{ mm}$



Explosion d'Al

# 1. Identifier les dangers

## Retour d'expériences



Général :



Kunshan – 2014 – 146 morts

Li G. et al. A catastrophic **aluminium-alloy** dust explosion in China (2016) J. Loss Prev. Proc. Ind., 39, 121-130.



Imperial Sugar – 2008 – 14 morts

From CSB Chemical Safety Board

Fabrication  
additive :

Powderpart inc. – 2013

**Impression 3D**

1 brulé grave



eu.wickedlocal.com

Ti et Al  
alliages

→ Aspirateur

→ Electricité statique

→ Explosion

## 2. Evaluer les risques d'explosion de poudres

Beaucoup (trop) de paramètres influents !



**Poudre**



Prop. Phys.  
(indice ref., Cp,  $T_{fus}$ ...)

Prop. Chim.  
( $\Delta_r H$ , composition...)

Aw

PSD<sub>d</sub>

Densité

Conc (O<sub>2</sub>)

Turbulence

Confinement

Humidité R

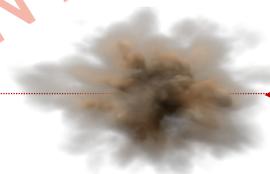
Autres poudres/gaz

Encombrement  
/ géom.

**Nuage**

PSD<sub>ini</sub>

F.E.R.



Turbulence<sub>ini</sub>

Distribution  
spatiale

**Inflam.**

délat



Energie  
d'inflam.

**Propagation**

Emissivité



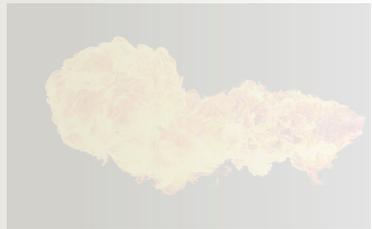
Environnement

**Procédé**



## 2. Evaluer les risques d'explosion de poudres

Normes → Paramètres de sécurité



### 1. Sensibilité à l'inflammation :

Concentration Minimale Explosive  
**CME** ou LIE (**pas de LSE** !)

→ Plus faible **concentration**  
permettant l'explosion

Température Minimale d'Inflammation  
- **TMI** en nuage  
- TMI en couche

→ Plus faible **température**...  
→ explosion d'un nuage  
→ inflammation d'une **couche de 5 mm**

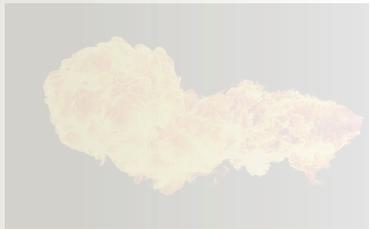
Energie Minimale d'Inflammation  
**EMI**

→ Plus faible **énergie**...

Concentration Limite en Oxygène  
**CLO**

→ Plus faible **concentration**  
**en oxygène**...

## 2. Evaluer les risques d'explosion de poudres



### Paramètres de sécurité

#### 1. Sensibilité :

En général :

Ordres de grandeurs

Fabrication additive :

CME	→	60 g/m <sup>3</sup> entre 30 et 250 g/m <sup>3</sup>	→	Ti et Al purs < 60 g.m <sup>-3</sup> Nylon 30 g.m <sup>-3</sup> Al Si, Ti Al, Fe 150 à 500
TMI				
- TMI en nuage	→	350 - 700°C	→	Alliages Al, Ti < autres métaux
- TMI en couche	→	250 - 400°C	→	souvent Métaux > 400°C
EMI	→	100 mJ entre 1 mJ et > 1 J	→	Al, Ti, ABS, nylon < 100 mJ Acier, cuivre, fer, Ni Cr > 1 J
CLO	→	5 - 15 % selon gaz	→	Attention aux réactions métaux avec N <sub>2</sub> et CO <sub>2</sub>

## 2. Evaluer les risques d'explosion de poudres

### Paramètres de sécurité

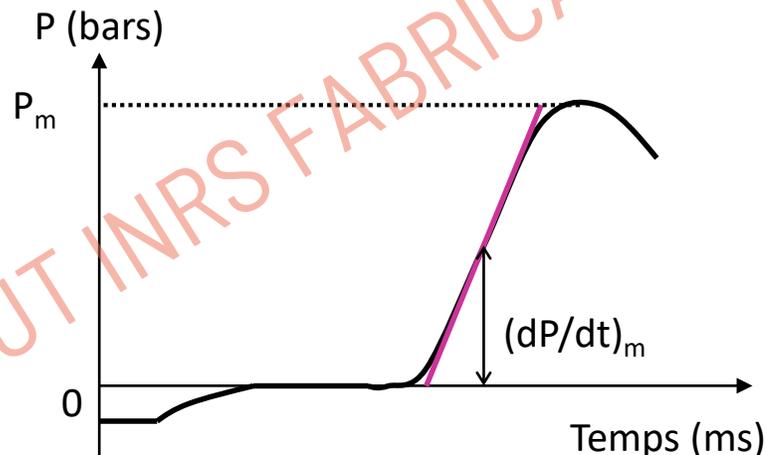
#### 2. Sévérité de l'explosion :

$P_{\max}$  → Pression maximale (2 à 10 bars env.)

$(dP/dt)_{\max}$  → Vitesse maximale de montée en pression

$$(dP/dt)_{\max} = K_{St} \cdot (V)^{-1/3}$$

$K_{St}$  → Classe St



Classes St	$K_{St}$ (bar.m/s)	Poudres
Non explosible		Inox, alliages Cr...
St 1	$0 < K_{St} < 200$	Fer, PE, nylon, Cu Zn...
St 2	$200 < K_{St} < 300$	Ti, Al fins...
St 3	$300 < K_{St}$	Ti, Al encore + fins...



### 3. Plan d'actions - ATEX



#### Prévention

CME



limiter les quantités / gérer les stocks  
 Supprimer les dépôts, capter les poussières (e.g. filtration)  
 Par aspiration : **pas de remise en suspension !**  
 Aspirateur adapté : **ATEX**, voie sèche ou avec bain d'huile...

TMI

- TMI en nuage



Identifier les sources d'inflammation, zonage-équip<sup>t</sup> ATEX

- TMI en couche



**Nettoyage régulier** (NFPA 654 : 0.8 mm sur 5% de la pièce)

EMI



Eviter les effets triboélectriques, **mise à la terre**, ATEX

Si inertage avec N<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> : attention réactifs avec métaux

CLO



Si **métaux** : **pas humidité** (car génération H<sub>2</sub> !)

Formation des salariés

### 3. Plan d'actions - ATEX

#### Protection

Enceintes résistantes à la pression

Systèmes de **suppression d'explosion**

**Events d'explosion** : soupapes, disques de rupture

Systèmes de découplage (éviter la propagation)

Systèmes d'extinction : classe D pour métaux, pas d'eau !



Prendre en compte la **toxicité** des émissions en cas de feu/explosion :

- particules fines,
- gaz toxiques (e.g. HCN avec nylon...)



# Conclusions

Le risque ATEX lié à la fabrication additive existe...

Poudres métalliques ou organiques ?

Taille < 1 mm ?

Mise en suspension potentielle ?

Les solutions aussi...

DRPCE – Directives ATEX directives / ISO 60079

NFPA 652 et 654 + NFPA 484 pour les métaux

Données, ordres de grandeur : IFA / BGIA / INRS

...

Utiliser du verre ou de la céramique



*NB : les valeurs données dans cette présentation sont des ordres de grandeur fournis dans un but pédagogique. Elles varient en fonction de nombreux paramètres (cf diapo 6)...*



**IFA**  
Institut für Arbeitsschutz der  
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

**GESTIS-CARATEX POUSSIÈRES**

Recherche

Home

Recherche

La recherche peut porter sur le nom des produits et sur leurs caractéristiques. Le système recherche toutes les occurrences d'un terme dans le nom.

« résine » permet d'afficher les données relatives aux « résines époxy ».

La casse (majuscule ou minuscule) n'intervient pas dans la recherche.

Terme recherché :  Rechercher

La banque de données GESTIS - CARATEX POUSSIÈRES comprend 6974 échantillons de poussières.



Alliage base ferrosilicium-magnésium FeSiMg30

Critère		
+ Granulométrie <250 µm [% pondéral]	100	
+ Granulométrie <125 µm [% pondéral]	99	
+ Granulométrie <63 µm [% pondéral]	75	100
+ Granulométrie <32 µm [% pondéral]	42	61
+ Granulométrie <20 µm [% pondéral]	50	
+ Médiane [µm]	39	20
+ Humidité [% pondéral]	0,2	0,2
+ Limite inf. d'explosivité [g/m³]	125	
+ Pression max. d'explosion [bar]	9,4	
+ Valeur K <sub>St</sub> [bar m/s]	222	
+ Classe d'explosivité	St 2	
+ Energie minimale d'inflammation [mJ]	30/100	
+ Température d'inflammation BAM [°C]	580	