

JOURNÉE
TECHNIQUE

Fabrication additive

Comment construire
une prévention adaptée ?



Retour d'expériences pluridisciplinaires sur les risques de la fabrication additive dans l'aéronautique

Docteur Delphine Bouvet

Mardi 17 mai 2022

Paris - Maison de la RATP

JT INRS FABRICATION ADDITIVE - 17/05/2022



Airbus Atlantic - Montoir de Bretagne

Assemblage et équipement

Des fuselages avant et des tronçons centraux des avions commerciaux Airbus (A320, A330, A350) et militaires A400M



Airbus Atlantic - Protospace : Fab'Lab



Dédié à l'innovation technologique

Réalisation d'essais, conseils techniques

Moyens de prototypage



Airbus Atlantic - Imprimante 3D type FDM

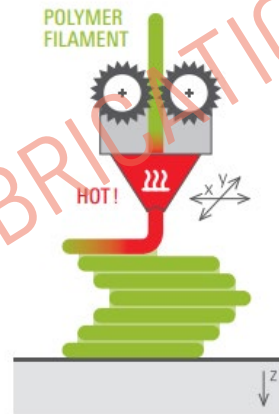
L'impression "Fused Deposition Modeling" (dépôt de filament fondu) majoritairement utilisée



Filaments plastiques:
PLA (Acide PolyLactique)
PETG (Polyéthylène Téréphtalate Glycolisé)
ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrene)

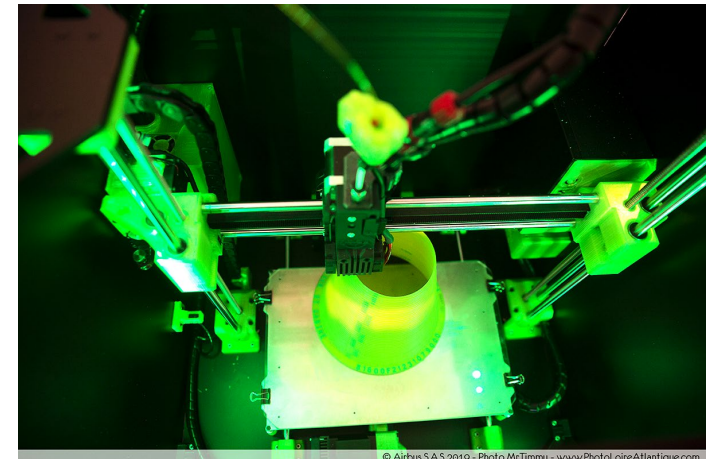
Filaments métalliques,
céramiques...

T° Plateau
50° - 80°C



T° Extrudeur
PLA : 190° - 210°C
PETG : 220° - 250°C

Extrusion de matière



Les principaux risques pour la santé



**Particules ultrafines
Nanoparticules**



Atteintes pulmonaires



Risques cardiovasculaires



Passage des barrières biologiques



Inflammations

Facteurs de variation

Autres risques

Autres agents chimiques
Incendie
Brûlure

COV

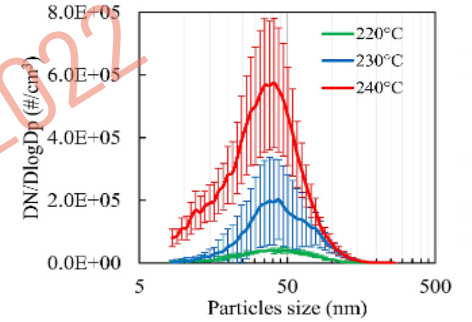
Styrène (ABS)
150 à 250µg/m³

Ethanol

Ethylbenzène

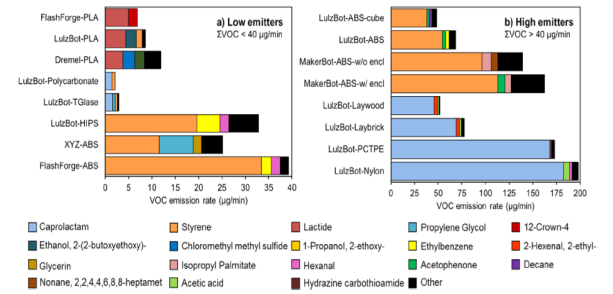
Propylène glycol

Caprolactame



Characterization of particle emission from thermoplastic additive manufacturing, Atmospheric Environment - 2020 S:Sittichompoo et Al.

Température d'extrusion
Paramètres impression
Type de filament



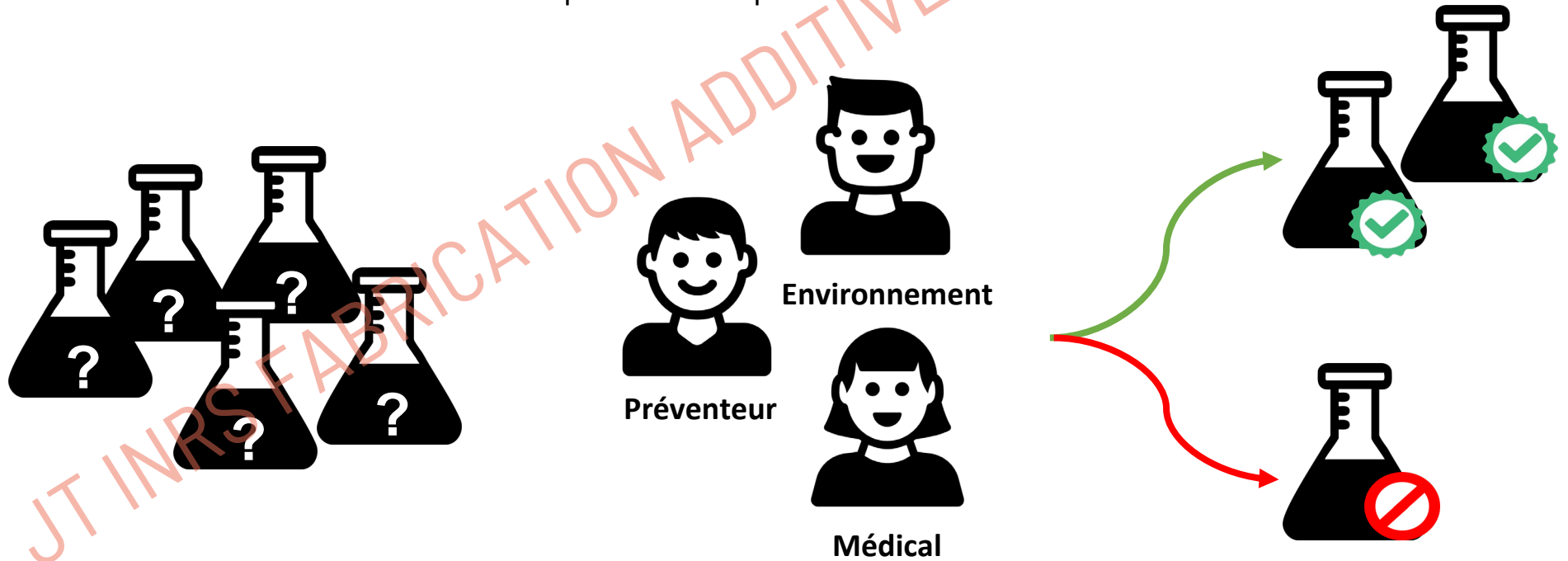
Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments Environ. Sci. Technol 2016 PAimi et Al



Les règles d'utilisation des produits

Commission d'Autorisation d'Emploi (CAE)

Analyse des produits et de leurs conditions d'utilisation à partir des Fiches de Données de Sécurité,
Selon certains produits, possibilité de demande de composition confidentielle
Préconisations d'utilisation sur les aspects santé & prévention ou interdiction



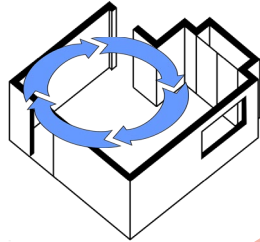
Les prescriptions générales de prévention

Règles d'implantation

Locaux

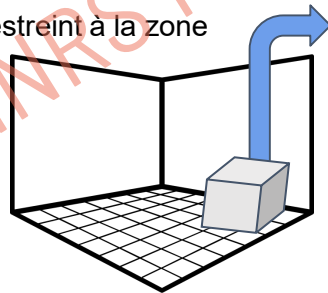
Local Dédié

Ventilation : 10* renouvellements volume /heure
Pas de poste de travail à proximité "journalier"



Espace ouvert type Atelier

Installation en vase clos avec extraction et rejet à l'extérieur
Accès restreint à la zone



Consignes générales

Détection incendie



Extincteurs



Affichage consignes de sécurité



Protections individuelles

Intervention pendant le fonctionnement de l'imprimante 3D:

Gants



Masque A2P3



Le suivi médical



Information

- Sur les risques liés à l'utilisation
- Sur les protections collectives et individuelles (masque poussières et chimique = Filtre A)
- Préconisation lors du nettoyage: gants, humide, vigilance sur les angles



Examen Clinique

- **Traçabilité** des expositions dans le dossier médical de santé au travail
- Importance d'un **examen clinique médical rigoureux**
- **Traçabilité des pathologies.** Motifs des arrêts maladies (CV, maladie de système, pulmonaire...)



Veille sanitaire

- Exposition à un **risque émergent** : les nanoparticules
- Données de santé parcellaires et expérimentales (in vitro & animales)
- Absence de consensus pour des examens complémentaires
- Métrologie atmosphérique des Puf : peu courante

Intérêt d'une approche pluridisciplinaire

Santé - Prévention des risques - Spécialistes de la fabrication additive



Déploiement exponentiel d'une technologie innovante au sein d'Airbus



Besoin d'un groupe pluridisciplinaire

Pour anticiper les risques d'exposition aux nanoparticules non intentionnelles en accompagnant une innovation sur le plan technique



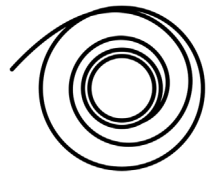
Déclenchement d'actions

- **Échanges** avec experts en ventilation, en prévention et nanoparticules : CARSAT, l'INRS, CEA
- Etude de différents moyens de **protection collective** avec des spécialistes de la fabrication additive
- **2018** Campagne de métrologie atmosphérique pour évaluer l'exposition aux PUF et produits de dégradation des fils par le Laboratoire Interrégional Chimique de l'Ouest (LICO) de la CARSAT
- **2020** Prélèvements surfaciques de chrome VI (Utilisation de filaments inox)
- **2021** Définition d'un cahier des charges avec la CARSAT d'un **caisson ventilé**
- **2022** Campagne de métrologie atmosphérique pour évaluer les différentes configurations du caisson par le LICO - CARSAT

Campagne de métrologie atmosphérique de l'exposition aux PUF et COV (2018)

MÉTHODOLOGIE

Comparaison des émissions lors des impressions avec 2 filaments différents



Filaments:

ABS : Acétonitrile butadiène styrène
PLA : Acide polylactique + polymères acryliques (< 30 %)

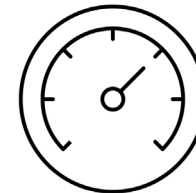


Absence de protection collective



Paramètres mesurés :

Solvants COV
Poussières dont PUF



Appareils de mesures utilisés:

Analyseur de poussières GRIMM G 1105
Impacteur MARPLE
DISCmini
Pompe individuelle (Solvants)

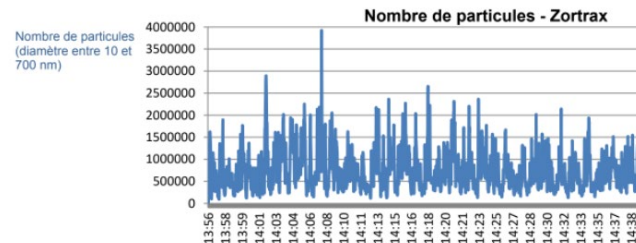
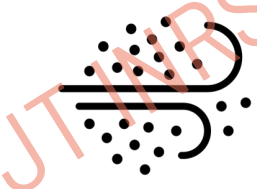
Campagne de métrologie atmosphérique de l'exposition aux PUF et COV

RÉSULTATS 2018

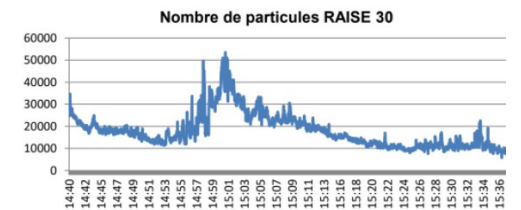
Paramètres	ZORTRAX ABS	RAISE 3D PLA	VLEP Française
Température de mise en oeuvre Durée (minutes)	Plateau : 110° C Buse : 280°C 42'	Plateau : 60° C Buse : 227°C 58'	
Poussières (fraction inhalable)	0,805 mg/m ³	0,576 mg/m ³	Fraction inhalable 7 mg/m ³ Au 1er juil 23 : 4 mg/m ³
Poussières (fraction thoracique)	0,562 mg/m ³	0,542 mg/m ³	
Poussières (fraction alvéolaire)	0,387 mg/m ³	0,484 mg/m ³	Fraction alvéolaire 3,5 mg/m ³ Au 1er juil 23 : 0,9 mg/m ³
Nombre moyen de particules #/cm ³ (diamètre entre 10 et 700 nm)	700 000 Pics à 1 500 000	30 000	



Styrène : Reprotoxique cat.2 / CIRC 2A
Formaldéhyde : Mutagène cat.2 / Carcinogène.1B
Retrouvés à l'état de traces



Émissivité des particules
ABS >> PLA



Définition avec la CARSAT d'un cahier des charges d'un caisson ventilé

2021

DONNÉES D'ENTRÉES :

- Fabrication additive FDM / Fil plastique
- Émission de polluants uniquement lors du fonctionnement de la tête extrudeuse
- Absence de besoin d'accès lors du fonctionnement de l'imprimante
- Qualité de l'impression : Tête extrudeuse sensible aux variations de T° / déplacements d'air

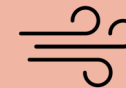
OBJECTIFS



Mise en dépression de l'enceinte > 20 Pa



Niveau sonore < 60 dB



Vitesses d'air - Evaluation hauteur de fente

- A l'entrée 3 m/s

- Gaine d'extraction : 7 et 10 m/s

- Intérieur du caisson < 0,1 m/s



Qualité de l'impression



Priorité sur le rejet extérieur

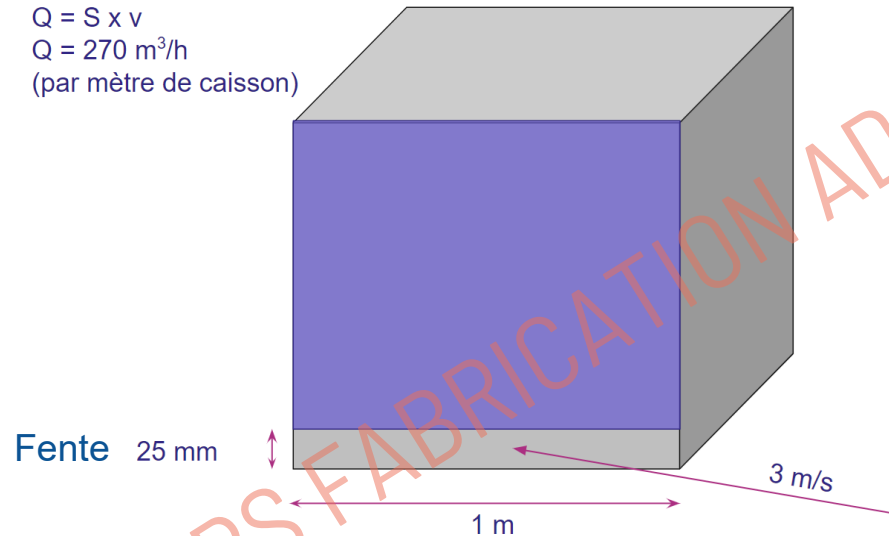
Définition avec la CARSAT d'un cahier des charges d'un caisson ventilé



CALCUL DU DÉBIT NÉCESSAIRE exemple d'un caisson de 1 m³

$$Q = S \times v$$
$$Q = 270 \text{ m}^3/\text{h}$$

(par mètre de caisson)

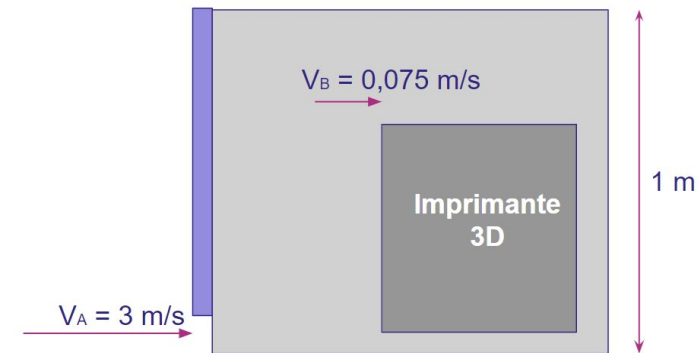


CALCUL DU DÉBIT NÉCESSAIRE exemple d'un caisson de 1 m³

$$Q = S_A \times V_A \text{ (avec } S_A \text{ : section de passage au point A)}$$
$$Q = 270 \text{ m}^3/\text{h}$$

Vitesse en B :

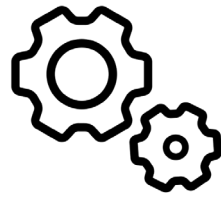
$$V_B = Q/S_B \text{ avec } S_B = 1 \text{ m}^2$$
$$V_B = 0,075 \text{ m/s}$$



Campagne de mesures des vitesses d'air dans le caisson

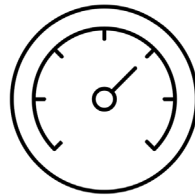
Evaluation de l'impact sur la qualité de l'impression

MÉTHODOLOGIE



Paramètres d'impression

Filament PLA
Durée 20 min
T° buse 200°C
T° plateau 60°C



Appareils de mesures utilisés :

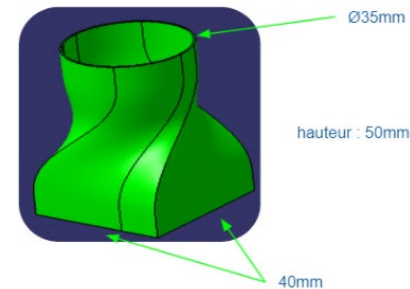
Thermomanomètre VelociCalc 9535-A
Fumigène Dräger : vérification des zones mortes

2 configurations :

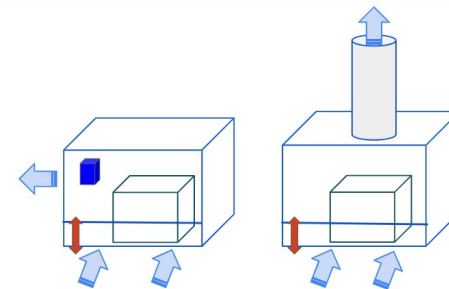
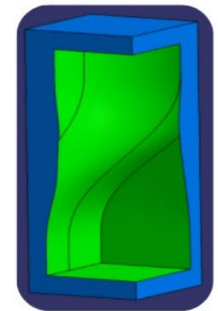
- Caisson avec extraction d'air et rejet extérieur
- Enceinte ventilée avec filtre HEPA 14 - Média charbon

Choix d'une pièce d'impression à paroi unique (mode vase)
Visualisation rapide des déformations à l'aide d'un gabarit

Pièce de référence

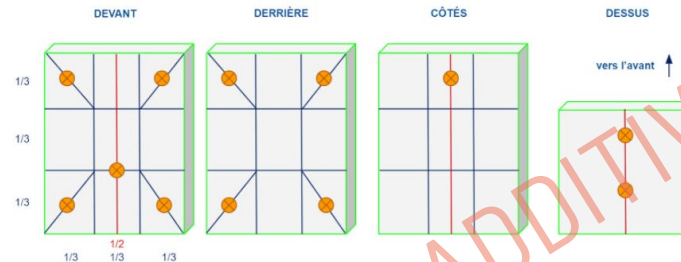


Gabarit



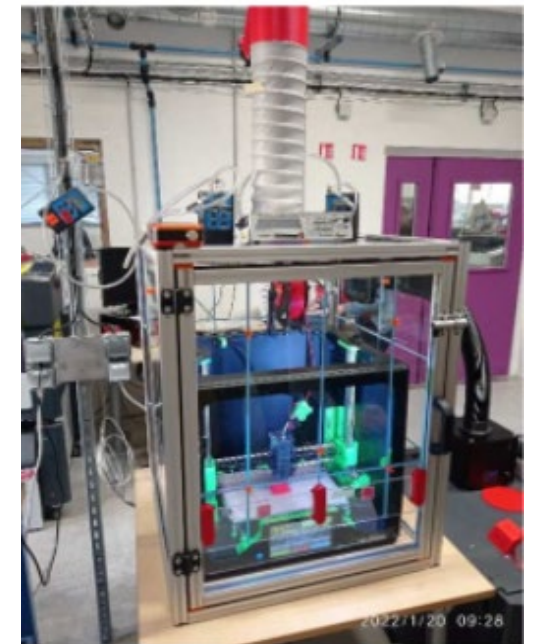
Campagne de mesure des vitesses d'air dans le caisson

RÉSULTATS



Points de mesures de vitesses d'air

Configuration avec extraction d'air

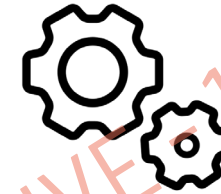


Configuration	Caisson avec extraction d'air						Enceinte filtrante	
	100%	100%	50%	100%	100%	100%	n/a	n/a
Registre	100%	100%	50%	100%	100%	100%	n/a	n/a
Fente avant (mm)	3	13	25	25	30	40	3	13
Vitesse au niveau de la gaine d'extraction	10 m/s	10 m/s	6 m/s	9 m/s	9 m/s	9 m/s	n/a	n/a
Moyenne vitesse au niveau caisson	0,27	0,3	0,456	0,9	n/a	0,4	0,178	0,162
Vitesse d'entrée d'air fente	2,5	6,5	2,9	5,1	4,5	3,2	0,6	0,5
Impact sur la pièce imprimée	N	N	N	N	N	N	N	N

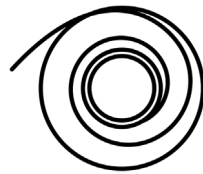
Campagne de métrologie atmosphérique pour évaluer l'efficacité des configurations du caisson (2022)



MÉTHODOLOGIE



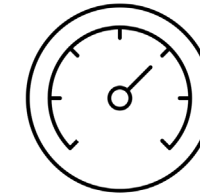
Impression d'un cube identique (4*4*4 cm)
Durée moyenne d'impression 70'



2 filaments à émissivité différente:

Très émissif → ABS

Moins émissif → PET Polyester renforcé
fibre de verre et carbone (30 %)



Appareils de mesures utilisés - sur le dessus des caissons

Analyseur de poussières GRIMM G 1105

Impacteur MARPLE

DISCmini

Pompe individuelle



Paramètres mesurés :

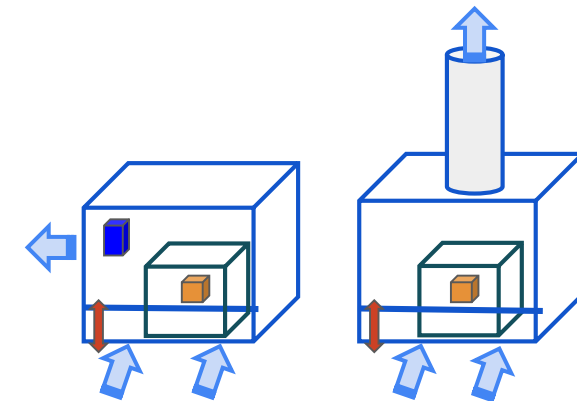
Poussières

Concentration en mg/m^3

Nombre moyen de particules/ cm^3

Lung-Deposited Surface Area (LDSA)

COV



Campagne de métrologie atmosphérique pour évaluer l'efficacité des configurations du caisson

Résultats

Données bibliographiques : ABS : $2-9 \times 10^{10}$ #/min, PLA : 10^{10} #/min (Azimi et al, 2016).



Année	Type de filament	Protection collective	Nbre de particules avec DISCmini (moyenne de #/cm ³)	LDSA Lung Deposited Surface Area (moyenne µm ² /cm ³)
2018	ABS	Absence de caisson	700 000 (pics 1 500 000)	328,8
	PLA	Absence de caisson	17418	19,1
2022	ABS	Caisson avec extraction air	4466	8,7
		Caisson ventilé avec filtres	3055	6,9
	PET (Carbone)	Caisson avec extraction air	/	/
		Caisson ventilé avec filtres	1500-2000	/
	Bruit de fond	Accueil protospace	5435	10,4

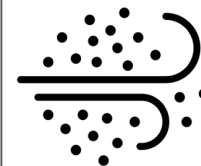


Formaldéhyde

2018 : Maxi 0,07 mg/m³

2022 : Maxi 0,05 mg/m³

VLEP 8h 0,37 mg/m³. ANSES 0,25 mg/m³



Poussières totales, inhalables, thoraciques, alvéolaires

2018 : Maxi 0,805 mg/m³

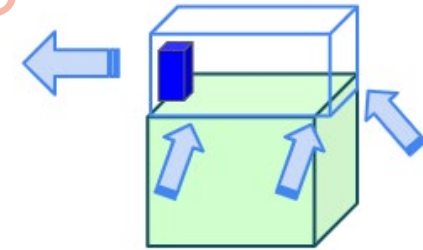
2022 : Maxi 0,021 mg/m³

VLEP Fraction inhalable 7 mg/m³ - Fraction alvéolaire 3,5 mg/m³

Configuration de l'enceinte en capot ventilé : observation d'un arrêt de la ventilation



	Nbre de particules avec DISCmini (moyenne de #/cm ³)	LDSA moyenne μm ² /cm ³
ABS	156 261*	98,9
PET	2317	4,7
Bruit de fond	5435	10,4



*Arrêt de la ventilation durée environ 15'
Pic à 1 600 000 pt/cm³
Erreur de programmation du Timer

Nombre de particules (/cm³)





Conclusions

Enjeu interne de **coopérations pluridisciplinaires** pour accompagner les innovations et anticiper les risques

Intérêt de solliciter des **experts externes** pour maîtriser l'exposition aux risques émergents

Observation de résultats concrets de maîtrise des émissions dans les 2 configurations de caisson (avec et sans extraction d'air)

et Perspectives

- Prioriser la **configuration avec extraction d'air**
- Définir les règles d'utilisation de chaque configuration
- Définir les **consignes de maintenance des filtres HEPA** et média charbon (fréquence de changement, précautions à prendre...)
- Définir les **conditions d'asservissement** des caissons lors de l'impression
- Coopérer avec des fournisseurs
- Prévoir de nouvelles métrologies notamment en cas d'**usage de plusieurs imprimantes** dans un local

Merci



Service médical

Carsat & Lico & Experts

ProtoSpace

Fournisseurs

Service prévention



TEAMWORK