



BUT Hygiène Sécurité Environnement  
Site de Gradignan

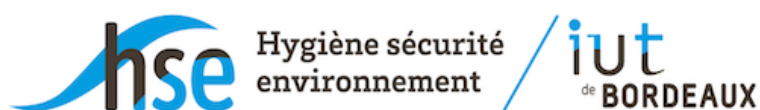
**Université de Bordeaux**

Projet EMP

# **Etude de l'émission de COV pendant la découpe et la gravure laser**

par GALIBERT Félix et GINI Enzo

achevée le 21/02/2025



# Remerciements

Nous souhaitons remercier notre tuteur professionnel M.Bonnemaison, ainsi que M.Grangé-Praderas responsable du FabLab pour nous avoir accueillis, répondu à nos questions et conseillés tout au long de notre présence au FabLab.

Nous remercions également notre tutrice pédagogique, Mme.Le Guen qui a été disponible et à pu répondre à toutes nos questions concernant notre rapport.

De plus, nous adressons nos sincères remerciements à M.Galey, pour toutes les informations qu'il a su nous faire part sur les nanoparticules et microparticules.

Notre gratitude s'adresse également à M.Tuduri qui nous a prêté le matériel nécessaire pour nos études, ainsi que conseiller pour l'utilisation de ces derniers. Tout comme M.Pasquerau qui a su répondre à nos questions et aider pour collecter et extraire les données obtenues.

Enfin, un grand merci à :

- Tous les adhérents du FabLab et aux étudiants présents dans les locaux qui ont pris du temps pour répondre à nos questions.
- M.Morin, chef de département HSE.
- M.Godde pour l'organisation des EMP.

# Table des Matières

Résumé.....	4
Liste des abréviations.....	5
Glossaire.....	5
Introduction.....	6
Partie 1 : Contexte de la recherche.....	7
1.1 - Analyse de la demande.....	7
1.2 - Interrogations.....	7
Partie 2 : Recherches, documentation et réglementation.....	8
2.1 - Composés Organiques Volatils.....	8
2.2 - Poussières de bois.....	9
2.3 - Matériaux utilisés.....	9
2.4 - Microparticules et nanoparticules.....	9
Partie 3 : Intervention en ergonomie.....	11
3.1 - Observation de la situation de travail.....	11
3.2 - Observations systématiques.....	11
3.2.1 - Matériel.....	11
3.2.2 - Protocole.....	11
3.2.3 - Résultats et Interprétations.....	11
3.2.4 - Limites.....	13
3.3 - Diagnostic.....	14
Partie 4 : Moyens de prévention.....	15
4.1 - Filtres à particules.....	15
4.2 - Turbine d'extraction d'air.....	15
4.3 - Mesures de préventions supplémentaires.....	15
Partie 5 : Conception d'un capteur Arduino.....	16
5.1 - Ressources.....	16
5.2 - Capteur Metal Oxyde MOX.....	16
5.3 - Matériel.....	16
5.4 - Montage.....	16
5.6 - Résultats et interprétation.....	16
Conclusion.....	17
Bibliographie.....	18
Annexes.....	20

## Résumé

Il existe des sources d'émission de particules encore peu connues, auxquelles nous sommes soumis quotidiennement. En effet, si on prend en compte que la plupart des procédés industriels, ou bien même tout simplement les objets présents dans notre quotidien, fait de peintures, colles, plastiques et autres composés chimiques émettent des particules : alors nous sommes constamment exposés.

Pour tenter de répondre à l'urgence de traiter ce sujet pour pouvoir préserver la santé des travailleurs, cette étude est centrée sur l'émission de particules en situation de travail, et notamment lors des procédés industriels à haute énergie comme la découpe laser.

Il était alors nécessaire de se poser la question suivante : Comment le procédé industriel à haute énergie de découpe laser génère-il des polluants, en quelles quantités, et comment ce phénomène peut-il être limité ?

Pour répondre à cette problématique, nous avons été accueillis au FabLab Cohabit de l'IUT de Gradignan pour évaluer la qualité de l'air dans les locaux, lors de l'utilisation de leur machine de découpe laser. Nous avons effectué des mesures des principales particules émises lors de ces procédés: les Composés Organiques Volatils, les NPs et les MPs.

Les résultats obtenus ont permis de démontrer une bonne qualité de l'air en salle de découpe. En effet, les seuils d'exposition pour les composés organiques volatils sont respectés et l'analyse de la quantité de microparticules et nanoparticules a témoigné de l'efficacité des moyens de prévention déjà en place, étant la présence d'une turbine d'extraction d'air sur la machine.

Mais même si les résultats sont positifs, il est nécessaire de garder en tête que ceux-ci peuvent évoluer, en fonction des évolutions de l'activité au fablab, et doivent être donc vérifiés fréquemment. Sur le même principe, des analyses en situation de travail pour les entreprises utilisant des procédés de fabrication similaires ou susceptibles d'émettre des particules dangereuses sont alors nécessaires.

Cette étude propose donc un modèle d'analyse de l'activité de découpe laser, avec une approche favorisant la répétabilité des protocoles et des mesures, dans l'objectif d'une amélioration continue, pour assurer la santé et la sécurité des opérateurs utilisant la machine de découpe laser au FabLab. Sur ce principe, nous avons conçu un capteur COV à partir d'une carte arduino, qui a été mis à disposition pour que les adhérents du FabLab puissent récolter des données lors des différentes situations de travail.

## Liste des abréviations

COV	Composé organique volatil
INRS	Institut national de recherche et de sécurité
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ECHA	Agence européenne des produits chimiques
CIRC	Centre international de recherche sur le cancer
CMR	Cancérogène mutagène reprotoxique
DIY	<i>Do It Yourself</i> , autrement dit “fait maison”
VIN	<i>Unregulated voltage input</i> (connected to a regulated voltage input)
WAKE	<i>Wake up pin</i>
GND	<i>Ground pin</i> , enable the completion of the circuit
SDA	<i>Serial data pin, send the data</i>
SCL	<i>Serial clock pin, send signals at regular intervals</i>
ATEX	Atmosphère explosive
VLEP	Valeur limite d'exposition professionnelle
VLCT	Valeur limite d'exposition à court terme
MPs	Microparticules
NPs	Nanoparticules
PUFs	Particules ultrafines
NPMs	Nanoparticules manufacturées
ppm	Partie par million
ppb	Partie par milliard

## Glossaire

**COV** : Composé Organique Volatil Selon l'Article R224-48, le COV est : "tout composé organique dont le point d'ébullition initial, mesuré à la pression standard de 101,3 kPa, est inférieur ou égal à 250 °C". [Source](#)

**Substance** : "tout élément chimique et ses composés, tels qu'ils se présentent à l'état naturel ou tels qu'ils sont produits par l'industrie, que ce soit sous forme solide, liquide ou gazeuse". [Source](#)

# Introduction

La découpe laser est un procédé industriel largement utilisé pour sa précision et son efficacité. Cependant, cette technologie à haute énergie engendre des émissions de polluants, notamment des Composés Organiques Volatils (COV), sous forme de microparticules ou des nanoparticules, ainsi que des poussières de bois dont l'impact sur la qualité de l'air et la santé des opérateurs est difficile à quantifier.

Dans le cadre du FabLab de l'IUT, les salariés utilisant la machine découpe laser Trotec Speedy 300 ont signalé la présence d'odeurs persistantes après utilisation, créant ainsi des interrogations quant aux émissions de polluants et aux risques associés. Face à cette problématique, il devient essentiel de mesurer ces rejets, d'évaluer leur toxicité et d'envisager des solutions pour limiter l'exposition des utilisateurs.

De plus, une demande a été effectuée du FabLab, cette dernière concerne le mesurage des COV/poussières de bois dans les lieux de travaux. Ainsi, concevoir et assembler des capteurs de COV, afin de récolter des données concrètes sur la présence de composés organiques volatils et poussière de bois dans les locaux du FabLab.

Comment le procédé industriel à haute énergie de découpe laser génère-t-il des polluants, en quelles quantités et comment ce phénomène peut-il être limité ?

Pour répondre à cela, une recherche et documentation a été faite sur les réglementations en vigueur et aux dispositifs existants pour limiter ces émissions. Suivi d'une analyse sur les émissions produites lors de l'utilisation de cette dernière. Après cela, des recommandations et moyens de prévention ont été formulées afin de réduire les risques d'exposition aux polluants générés par la découpe laser. Enfin, la conception du capteur arduino, permettant de mesurer les composés organiques volatils et poussières de bois.

# Partie 1 : Contexte de la recherche

## 1.1 - Analyse de la demande

L'objectif final du projet est de pouvoir réaliser des mesures de la concentration en Composés Organiques Volatils (COV) présents dans la pièce de découpe laser au FabLab de l'IUT pour préconiser des actions de réduction des risques.

Cette demande résulte du fait que les utilisateurs de la machine "Trotec Speedy 300" ont remarqué percevoir des odeurs lors de la découpe des différents matériaux. Celles-ci persistent sur une durée de plusieurs jours. Il est donc possible de se demander si les odeurs dégagées par la découpe laser témoignent du dégagement de COV.

Le principe de la découpe laser repose sur "l'amplification de la lumière, créant un faisceau de lumière extrêmement concentré capable de couper et de graver", avec une très haute précision.

En ce qui concerne le fonctionnement de la machine, celle-ci est en libre-service et peut être réservée par tout adhérent du FabLab, qui peut l'utiliser pour la découpe de ses propres matériaux. L'utilisation de la machine se fait avec l'assistance du personnel et des consignes de sécurité sont données pour renseigner les utilisateurs sur la procédure à suivre en cas de départ de feu ou d'accident quelconque avec la machine. L'utilisation d'EPI n'est pas préconisée puisque l'accès au laser est impossible lors du fonctionnement de la machine, celle-ci dispose d'un mécanisme de sécurité la désactivant lors de l'ouverture du panneau d'accès.

Cette demande génère plusieurs enjeux :

- Des enjeux économiques et financiers : la fabrication du capteur COV doit se faire à moindre coût et les mesures de réduction des risques doivent être raisonnées et adaptées au budget du FabLab.
- Des enjeux au niveau de la praticité : la récupération des données du capteur doit être rapide et facile, le capteur doit être de petite taille et facile à transporter et à mettre en place.
- Des enjeux pour la santé des adhérents et du personnel : il est nécessaire d'améliorer les conditions d'utilisation de la machine et de réduire les risques liés à l'exposition aux rejets.

## 1.2 - Interrogations

Le capteur COV "DIY" peut-il fournir des relevés fiables et être utilisé au même titre que le capteur COV professionnel ?

Quelles sont les normes actuellement en vigueur par rapport à la découpe laser ?

Quelles sont les normes actuellement en vigueur par rapport à l'exposition professionnelle aux COV ?

Y a-t-il des différences au niveau des rejets de COV lors de la découpe de différents matériaux ?

Quel est l'impact de la résine utilisée dans la conception des matériaux lorsque celle-ci est brûlée lors de la découpe ?

Existe-t-il d'autres propriétés physico-chimiques pouvant expliquer différents types d'exposition ?

Comment fonctionnent les filtres professionnels et quel est leur coût, d'achat et d'entretien, et est-il possible d'en fabriquer un pour un prix réduit ?

Comment est-il possible de fabriquer un capteur COV et quelles sont les ressources nécessaires, au niveau de la documentation et du matériel, pour y parvenir ?

Quelles préconisations sont à prévoir pour la réduction des risques après l'obtention de résultats ?

## Partie 2 : Recherches, documentation et réglementation

Afin de mieux comprendre les enjeux liés à l'activité de découpe laser, il sera nécessaire d'identifier les différents matériaux utilisés ainsi que leurs composants, les substances rejetées par le procédé et leur dangerosité, et la réglementation liée à l'exposition professionnelle.

### 2.1 - Composés Organiques Volatils

Lorsqu'une découpe au laser à CO<sub>2</sub> est réalisée sur une matière organique (bois, plastique, caoutchouc), des fumées contenant des substances tel que les COV sont alors dégagées. Les COV proviennent des hydrocarbures et de leurs dérivés chimiques. Ils sont présents dans les colles, vernis, traitements de surface, caoutchouc... des éléments présents dans les matériaux découpés par laser au FabLab [Source](#). Les COV constituent une famille de produits très large qui se trouve à l'état de gaz ou s'évapore facilement dans les conditions normales de température et de pression (293,15 K et 1 013 hPa), comme le benzène, l'acétone, le perchloroéthylène... [Source](#). Les substances présentes sont le Benzène, le Toluène, le Formaldéhyde, le Mésitylène, l'éthanol, l'acide méthanoïque et le xylène, comme décrit dans la recherche "*Characterization of Emissions in Fab Labs: An Additive Manufacturing Environment Issue*" [Source](#). Ces dernières peuvent être toxiques en fonction de leur concentration, l'inhalation de ces fumées peut alors être dangereuse pour l'Homme. [Source](#)

Tableau 1 : valeurs des VLCT et VLEP des substances qui peuvent être présentes dans la fumée produites par la machine découpe laser à CO<sub>2</sub>

Substances	VLEP 8h (ppm)	VLEP 8h (mg/m <sup>3</sup> )	VLCT (ppm)	VLCT (mg/m <sup>3</sup> )	Date d'application	Bibliographie	Toxicité
Acide méthanoïque	5	9	-	-	Septembre 2022	<a href="#">Source</a>	-
Benzène	0,5	1,65	-	-	Du 5 avril 2024 au 5 avril 2026	<a href="#">Source</a>	Cancérogène Reprotoxique
	0,2	0,66	-	-	A partir du 5 avril 2026		
Ethanol	-	-	-	-	-		Cancérogène Reprotoxique
Formaldéhyde	0,3	0,37	0,6	0,74	Novembre 2023	<a href="#">Source</a>	Cancérogène Mutagène
Mésitylène	20	100	50	250	Septembre 2022	<a href="#">Source</a>	-
Toluène	20	76,8	100	384	Avril 2024	<a href="#">Source</a>	-
Xylène	50	221	100	442	Septembre 2022	<a href="#">Source</a>	Reprotoxique



## 2.2 - Poussières de bois

Elles sont une substance cancérigène mutagène reprotoxique, classées cancérogènes (Groupe 1) par le CIRC, et peuvent induire des pathologies respiratoires et cutanées. [Source](#)

Une concentration en poussières de bois trop importante pourrait créer une atmosphère explosive ATEX. Pour identifier les atmosphères explosives potentielle, on se réfère au document de l'INRS ED 945, stipulant qu'il est nécessaire de réunir 6 conditions pour générer une atmosphère ATEX : présence d'un combustible + présence d'un comburant (O<sub>2</sub> à 21 %) + présence d'une source d'inflammation + état du combustible particulier (poussières de bois en suspension) + atteinte du domaine d'explosivité (domaine de concentration du combustible dans l'air à l'intérieur duquel les explosions sont possibles) + confinement suffisant (pas indispensable mais aggravant).

Les poussières de bois ont donc une Limite Inférieure d'Explosivité (LIE) comprise entre 30 à 40 g/m<sup>3</sup>. Au-delà de cette limite, on peut considérer que l'atmosphère d'un local entre en catégorie ATEX, dans laquelle il faut supprimer toutes les sources d'inflammation et adopter une signalétique adaptée.

Dans le cas de la salle de découpe au FabLab, la concentration de poussières en suspension dans l'air n'est pas assez élevée pour générer une atmosphère ATEX.

## 2.3 - Matériaux utilisés

Une grande diversité de matériaux est utilisée au FabLab, chacun présentant des propriétés physiques ou esthétiques répondant aux attentes des adhérents.

Liste des matériaux les plus utilisés :

- TroCraft Eco
- Aggloméré
- Medium Density Fiberboard (MDF)
- Contreplaqué
- Liège aggloméré
- PMMA - Plexiglas
- PolyChlorure de Vinyle (PVC)
- Polyéthylène (PE)

## 2.4 - Microparticules et nanoparticules

[Source](#): *Comprendre les situations d'exposition aux nanoparticules par l'intégration de l'activité de travail à la mesure : vers une construction de la prévention*, Louis Galey, 2019

La question de l'exposition aux micro-particules (MPs) et aux nanoparticules (NPs) est à prendre en compte en plus de l'exposition aux COV que génèrent la découpe de matériaux au laser. Il sera alors nécessaire de prendre en compte ce facteur pour pouvoir développer au mieux l'analyse et obtenir des résultats exhaustifs.

Le sujet des micro-particules (MPs) et nano-particules (NPs) en milieu de travail est un sujet auquel les chercheurs et préventionnistes s'intéressent depuis peu (début des années 2000), avec l'apparition de procédés industriels techniques utilisant des méthodes de fabrication à haute énergie, à grande vitesse, par combustion et de nouveaux matériaux aux composés chimiques présentant des risques pour la santé. Les particules sont alors omniprésentes dans les milieux de travail, mais

également dans notre quotidien. Les NPs soulèvent encore de nombreuses interrogations quant à leur dangerosité et font l'objet de nombreuses recherches.

La problématique principale que génère les microparticules et leur absorption dans l'organisme. En effet, la principale voie d'exposition est l'inhalation, les particules se déposent au niveau des alvéoles pulmonaires une fois inhalées et ont la capacité grâce à leur taille infime de pénétrer dans l'organisme en passant dans le sang.

Mais les conséquences sur l'Homme de l'absorption des NPS sont encore inconnues et les études menées sont soumises à de nombreuses contraintes et incertitudes rendant l'obtention de résultats très complexe. Malgré cela, certains organismes de recherches comme le CIRC et l'ANSES parviennent à mettre en évidence les potentiels effets de l'exposition de certaines particules issues de quelques procédés industriels, sans que ces résultats soient approuvés et classés dangereux pour la santé humaine par l'Union Européenne. L'une des principales contraintes pour l'analyse et la mesure de MPs et NPs est la grande diversité de composés pouvant être présents dans l'air. Cette variété est une caractéristique de ces polluants qui pose des contraintes pour l'identification et la caractérisation de façon précise les éléments présents dans l'air en vue d'une quantification et d'un bilan sur la dangerosité : on ne peut seulement émettre des hypothèses sur les espèces mesurées.

Du point de vue de l'évaluation des risques professionnels, dans un objectif de caractériser le risque associé à une exposition aux MPs et aux NPs pour apporter des mesures préventives, il faut pouvoir caractériser la dangerosité des particules, reliée à l'exposition à celles-ci. Alors, les incertitudes dans l'évaluation des dangers liés aux particules induisent des incertitudes dans l'évaluation des risques.

Malgré les incertitudes dans les mesures et les identifications de substances, quelques réglementations sont en construction pour les NPs. La réglementation repose principalement sur le principe de précaution pour les NPs, un principe qui s'applique pour prendre des mesures de prévention même si les recherches scientifiques sont toujours en cours. Aussi, la réglementation ne disposant pas de références assez stables quant aux risques liés aux NPs, il n'est pas possible de définir une concentration potentiellement mesurée comme acceptable ou inacceptable, car il n'existe pas de VLEP concernant les NPs en France. En revanche, il est possible de prendre des VLEP "guides", issue des recherches effectuées dans d'autres pays d'Europe, d'Amérique, d'Asie... Celles-ci ne sont pas applicables par la réglementation en France et peuvent être utilisées par les préventeurs à titre indicatif, en tant que référentiel.

Même si les VLEP ne peuvent pas être obtenues, en prenant en compte le risque pour la santé humaine que représente les espèces rejetées lors de la découpe laser du plastique et de bois et le risque généré par l'inhalation de nanoparticules en général, il est nécessaire de prendre en compte le principe de précaution et d'adapter les moyens de prévention pour prévenir les expositions aux NPs.

Il est nécessaire d'appliquer une démarche d'intervention similaire à celle appliquée dans la maîtrise des risques en général. En effet, l'objectif est de supprimer le risque à la source ou de réduire celui-ci en proposant des actions de prévention adaptées, qu'elles soient collectives ou individuelles. Des guides pour la prévention des risques en laboratoires de recherches (INRS ED 6115) et en entreprises (INRS ED 6050) ont été mis en place par l'INRS pour proposer des démarches d'analyse et des mesures d'action de prévention.

Pour s'assurer de l'efficacité des mesures adoptées, il sera idéal d'effectuer des examens sur les opérateurs exposés pour vérifier une potentielle présence ou non de polluants et donc une contamination.

## **Partie 3 : Intervention en ergonomie**

### **3.1 - Observation de la situation de travail**

Cette étape consiste à rencontrer les différents acteurs en activité et à observer leur situation de travail. En effet, la situation de travail est composée de trois déterminants de l'activité : les déterminants techniques, humains et organisationnels, ayant une incidence sur la situation de travail et la différence entre le prescrit et le réel. Il a été alors possible grâce à des observations et des interviews avec les opérateurs de récolter des informations sur leur situation de travail pour adapter au mieux l'analyse. Grâce à cela, des observations dites systématiques peuvent être dirigées pour la mesure de données exploitables en situation de travail.

### **3.2 - Observations systématiques**

Dans l'objectif de promouvoir la répétabilité de l'étude, une description complète du matériel utilisé et des protocoles élaborés sera nécessaire.

Il est essentiel de réaliser une analyse de l'activité en mobilisant des appareils de mesures afin d'obtenir des résultats pouvant être exploités et comparés avec les valeurs de références fournies dans les normes et dans la réglementation, et afin de vérifier l'exposition potentielle des opérateurs aux poussières de bois. Seront alors utilisés un capteur de COV, deux capteurs de micro-particules ainsi que deux capteurs de nano-particules.

#### **3.2.1 - Matériel**

Au total, 3 types de capteurs ont été utilisés pour l'analyse de la qualité de l'air en salle de découpe. Un capteur de COV (PID COV MiniRAE 3000), un capteur de micro-particules (Thermoscientific MIE PDR-1500), ainsi qu'un capteur de nano-particules (Testo Discmini). Le choix de ces appareils répond à une nécessité de diversifier les résultats en étudiant plusieurs types de polluants, dans la recherche de précision. (*Voir Annexe 9*)

#### **3.2.2 - Protocole**

- Démarrer la vidéo de l'activité
- Filmer le démarrage du capteur de poussières
- Filmer le démarrage du capteur COV
- Faire une mesure en dehors de la salle de découpe durant 5 minutes
- A l'issue des 5 minutes, placer les appareils de mesures dans la salle : un capteur nanoparticules/microparticules et le capteur COV à proximité de la machine et un capteur nanoparticules/microparticules en retrait.
- L'opérateur utilise la machine et réalise toutes ses activités
- A la fin de l'activité, placer les capteurs en dehors de la salle de découpe durant 5 minutes
- Arrêt des appareils de mesure et de la vidéo

#### **3.2.3 - Résultats et Interprétations**

La mesure des concentrations en salle de découpe ainsi que l'analyse des résultats a été effectuée sur 4 parties différentes, en fonction de la chronologie des recherches effectuées et du développement de la réflexion. En effet, au fur et à mesure des recherches, il a semblé judicieux d'effectuer également des mesures avec les capteurs de particules PDR et DiscMini.

Les schémas ont été exploités de la même façon, selon un découpage chronologique en fonction des différentes phases de l'activité, et ce afin d'identifier les situations les plus à risques et les moments clés pouvant expliquer soit une baisse soit une augmentation des concentrations en particules. Pour des raisons de manquement de place, seul deux activités seront présentées et interprétées, l'activité 1 sera présente en Annexe 10.

#### **Activité 1 :**

L'activité 1 est la première à avoir été effectuée, et avait pour objectif de prendre en main le MiniRAE et de commencer à obtenir des mesures qui serviront "d'état des lieux" pour avoir une idée de la quantité de particules mesurée, pour tester le bon fonctionnement du protocole élaboré et pour commencer à interpréter les premiers résultats (*Voir Annexe Fig 1*).

#### **Activité 2 :**

L'activité 2 a été réalisée dans le but d'obtenir des données sur la quantité de microparticules rejetées, à l'aide de la mesure avec les capteurs PDR. Deux boîtiers ont été utilisés, l'un était placé à proximité de la machine (PDR 1) (*Voir fig 2*) et l'autre en retrait pour obtenir une "mesure de fond" (PDR 2) (*Voir fig 3*). Cette mesure a duré environ 1h10, pendant qu'un groupe d'étudiants effectuait des découpes. Au total, une dizaine de personnes étaient présentes dans la salle de découpe. Les phases de l'activité comprennent 1 phase de découpe à la scie à main, 1 phase de gravure laser et 3 phases de découpe laser sur des plaques de MDF.

Pour cette mesure, les concentrations en micro particules relevées dans le hall sont inférieures à celles mesurées en salle de découpe (*Voir fig 2 et fig 3*). En effet, cela pourrait s'expliquer par deux facteurs. Lors de l'entrée dans la salle de découpe, la machine n'était pas encore en utilisation et la turbine d'extraction d'air n'était pas en fonctionnement. Aussi la découpe des planches à la scie à main combinée à la présence de 10 personnes dans la salle pourrait expliquer une augmentation en microparticules progressive, jusqu'à la mise en route de la turbine d'extraction à partir du moment où les concentrations ont commencé à diminuer, jusqu'à la première phase de gravure où elles se sont stabilisées. Ensuite, une augmentation est identifiable lors de la découpe des plaques de bois, produisant plus de fumées, et après ouverture de la vitre de protection. Ces oscillations se produiront également sur les étapes suivantes de découpe, ouverture de la vitre puis aspiration des fumées par la turbine.

Il est donc possible d'observer l'efficacité de la turbine d'extraction d'air qui réduit considérablement la concentration en particules dans l'air de la pièce, notamment après la phase de découpe à la scie à main et les phases de découpe et gravure observables sur le graphique. De plus, il est possible de remarquer que la découpe produit davantage de microparticules que la gravure, étant donné que la découpe nécessite un réglage du laser sur une intensité plus élevée, ce qui produit plus de fumées.

#### **Activité 3 :**

L'activité 3 avait pour objectif d'étudier l'émission de COV et nanoparticules durant la découpe de 8 matériaux pour comparer les différences d'émissions entre ceux-ci. Deux boîtiers DiscMini ont été utilisés de la même manière que les PDR, pour obtenir une mesure de fond et une mesure à proximité de la machine. Le capteur COV a également été placé près de la machine découpe laser pour relever des données relatives à l'exposition de l'opérateur.

Les 8 matériaux ont été sélectionnés en fonction de leur type (bois ou plastique), en fonction de leur famille (bois brut, MDF, ou plexiglass) et en fonction de leur épaisseur (*Voir Annexe 3 Tableau 2*) pour émettre une comparaison entre l'émission de particules durant la découpe de ceux-ci.

Les capteurs DiscMini ont permis d'obtenir des données concernant la concentration en NPs dans l'air en Pt/ccm (particules par centimètre cube) (*Voir Annexe 4 fig 4 et Annexe 5 fig 7*), la taille des particules en nanomètres (*Voir Annexe 4 fig 5 et Annexe 5 fig 8*) et la Lung Deposit Surface Area en  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  (*Voir Annexe 4 fig 6 et Annexe 5 fig 9*). Pour la comparaison entre les mesures de fond et les mesures à proximité de la machine, celles-ci sont similaires, seulement la précision des mesures change. En effet, on observe des pics plus précis sur les courbes de l'appareil à proximité de la machine, mais les allures des courbes restent les mêmes. Les données de concentration, de taille et de Lung Deposit Surface Area restent relativement constantes dans les locaux, que ce soit dans le hall ou dans la salle de découpe laser, mais augmentent significativement à la sortie du local, lors des mesures en extérieur. En effet, l'objectif de la mesure en extérieur était d'obtenir des valeurs de concentration faibles à la fin du protocole afin de faciliter la lecture du graphique une fois les données extraites. En revanche, les données obtenues et les allures des courbes laissent supposer que les concentrations en NPs dans la salle de découpe seraient inférieures à celles présentes dans l'atmosphère.

Le capteur COV MiniRAE a également été utilisé pour déterminer la quantité de COV dégagés par les différents matériaux durant la découpe (*Voir Annexe 6 fig 10*). Il est possible de voir sur le graphique que la concentration en COV à l'extérieur de la salle de découpe est plus élevée qu'à l'intérieur de celle-ci. En effet, les quantités mesurées chutent aussi tôt que le MiniRAE est placé à proximité de la machine découpe laser, où la turbine d'extraction d'air fonctionnait déjà. Ensuite, tout au long des manipulations, les valeurs restent constantes pour l'ensemble des matériaux testés, même si on peut observer des pics de concentration durant les phases de découpe, qui restent négligeables. Aussi, lorsque la turbine d'extraction a été arrêtée pour la phase de rangement de la pièce, les concentrations en COV ont de nouveau augmenté. Cela montre à nouveau l'efficacité de la turbine d'extraction d'air qui évacue convenablement les fumées et particules émises lors de la découpe. Il est également possible d'observer une différence dans les concentrations mesurées dans le hall avant l'entrée dans la salle et après la sortie de la salle. Cela peut être expliqué par le fait que les mesures ont été effectuées pendant la pause de midi et que les opérateurs ont pu circuler et ouvrir des portes et des fenêtres en créant alors des courants d'air pendant que les mesures étaient effectuées en salle de découpe, ce qui a diminué la quantité de COV dans le hall entre le début et la fin de la phase de mesures.

### **3.2.4 - Limites**

Mais les mesures effectuées sont restreintes par des limites et doivent faire l'objet de précaution quant à l'interprétation des résultats.

Comme introduit dans le principe de fonctionnement du MiniRAE, la méthode d'analyse des gaz est une méthode non sélective, c'est à dire que l'appareil ne peut pas détecter uniquement le gaz demandé : tous les gaz présents dans l'air sont détectés et un facteur de conversion est appliqué pour chaque substance demandée. Pour les mesures effectuées, le facteur de conversion est de 0,50 étant donné que le gaz demandé était le toluène. Il est donc important de rappeler que les résultats obtenus peuvent être représentatif d'une mesure des gaz totaux présents dans la salle de découpe. En effet, l'appareil a été réglé sur la mesure du toluène car celui-ci correspond à une substance potentiellement présente dans les fumées rejetées par la découpe laser, mais la mesure correspond en fait à la quantification de la concentration en toluène en plus des autres gaz présents. Il est donc plutôt préférable de regarder l'allure des courbes obtenues pour repérer les phases d'augmentation ou de diminution des concentrations afin de comprendre quelles activités ont une incidence sur la quantité de COV, plutôt que de se focaliser sur les valeurs de concentrations.

Aussi, les mesures n'ont pas pu être effectuées dans des conditions normalisées, à cause de l'activité importante dans les locaux du FabLab. En effet, plusieurs sources de variations peuvent impacter les résultats comme : le nombre de personnes présentes en salle de découpe, l'activité dans le hall conduisant à l'ouverture et fermeture de portes et fenêtres, le passage dans la salle de découpe conduisant à ouvrir et fermer fréquemment la porte de communication entre la salle de découpe et le hall, les autres activités dans le FabLab utilisant des résines et colles ainsi que des imprimantes 3D. De part ces différentes variables, les résultats obtenus doivent être appréhendés avec un regard critique.

Enfin, l'étanchéité des tuyaux évacuant les fumées n'était pas optimale étant donné que les raccords n'étaient pas étanches. De plus, une fuite a été identifiée lors du démontage du système d'évacuation des fumées en vue de l'installation de la seconde imprimante 3D. Ces deux éléments ont été appréhendés après les mesures des activités 1, 2 et 3 en retravaillant les systèmes de raccords et en changeant les tuyaux.

### **3.3 - Diagnostic**

En finalité, il est possible d'établir un diagnostic final résumant les différents résultats obtenus pendant les 3 activités décrites, ainsi que leurs conclusions.

En effet, en tenant compte des valeurs mesurées et de la réglementation, il est possible de voir que les seuils d'exposition sont respectés pour ce qui concerne la présence de COV. Pour les MPs et NPs, il n'est pas possible de confirmer un éventuel respect de la réglementation mais il est possible de confirmer que les moyens de réduction déjà en place, comme la turbine d'extraction d'air, permettent une réduction des concentrations dans l'air efficace.

En revanche, la situation de travail pour la découpe laser au FabLab a évolué après la réalisation de cette étude : une nouvelle machine de découpe laser a été intégrée à proximité de celle déjà présente, en salle de découpe. Par la même occasion, les raccords et l'étanchéité des tuyaux a été retravaillée et optimisée, réduisant les fuites. C'est la raison pour laquelle que, conformément au principe d'amélioration continue, il serait nécessaire de réaliser à nouveau les mesures en suivant le même modèle afin de déterminer l'impact potentiel de l'intégration de cette nouvelle découpeuse laser au parc de machines du FabLab sur la qualité de l'air en salle de découpe.

## Partie 4 : Moyens de prévention

### 4.1 - Filtres à particules

Des filtres sont disponibles pour cette machine mais ne sont pas définis comme obligatoire par le fournisseur et représentent un budget très élevé (changement régulier, entretien...).

Il existe une série de plusieurs modèles de filtres proposés par l'entreprise Trotec. Ceux-ci promettent une "élimination efficace des poussières, des gaz, et des odeurs" grâce à un filtre au charbon actif. Le taux de saturation du filtre peut être surveillé grâce au logiciel RUBY, ainsi que le temps de fonctionnement du charbon actif et les performances. L'extraction des poussières par les filtres au charbon actif pourrait permettre de "prolonger la durée de vie de la machine, et d'assurer un dépoussiérage sûr exempt de substances nocives".

L'entretien se fait par les utilisateurs grâce à la facilité d'accès et de nettoyage simple. Les filtres peuvent être remplacés efficacement et rapidement.

Il existe différents types d'appareils à filtration : Atmos nano / Atmos cube / Atmos Pure 300 / Atmos Pure 600 / Atmos PowerJet. Concernant le filtre pure il y a une maintenance régulière à effectuer, cette dernière est présentée dans le mode d'emploi [Source](#). Lors de la procuration du filtre, le constructeur nous dit quand faut-il le nettoyer (de façon cyclique).

De plus, il annonce les consignes à respecter avant et pendant l'utilisation de l'atmos pur 300 et l'atmos pure 600, ainsi que les risques encourus.

### 4.2 - Turbine d'extraction d'air

La machine est équipée d'une turbine aspirant les fumées dégagées par la découpe et les rejetant à l'extérieur du bâtiment. Cela permet de préserver le bon fonctionnement du laser et d'éviter la propagation de fumées à travers la pièce. En effet, la présence de fumées perturbent le fonctionnement des optiques et des miroirs et peuvent dégrader les composants.

. **Référence** : Ventilateur extracteur d'air ELEKTOR RE 6 Courant monophasé 50 Hz

. **Description technique** : [Source](#)

- Débit volumique : 21 m<sup>3</sup>/min

Il est possible d'installer un filtre sur ce ventilateur extracteur d'air au niveau de l'admission mais celui-ci n'est utile seulement pour la "rétention de saletés nuisibles et grossières pour protéger le processus et les soufflantes/ventilateurs", et non pour prévenir une propagation de COV et de poussières.

. **Schémas** : [Source](#)

La turbine a une très bonne extraction des COV, cette affirmation peut être déduite des résultats obtenus lors des études. seulement très peu de particules enregistrées par les capteurs dans le local. Contrairement aux autres locaux voisins, où eux les concentrations étaient plus importantes. Concernant le caractère hermétique de la turbine, il y a un important rejet d'air lorsqu'elle est en fonctionnement mais il est impossible de déterminer si cela est volontaire afin que la turbine ne surchauffe pas, ou si cela est un problème d'étanchéité.

### 4.3 - Mesures de préventions supplémentaires

**Préconiser des mesures organisationnelles :**

En se référant aux résultats obtenus, il a pu être démontré le réel impact qu'avait l'attente de l'évacuation totale des fumées après une découpe ou une gravure sur la libération de particules. Ainsi, il serait alors judicieux de s'assurer du respect de l'attente de 30 secondes avant l'ouverture de la vitre de sécurité. Cette mesure est en effet déjà mise en place et inscrite dans le manuel d'utilisation de la machine, créé par les membres du FabLab, mais n'est pas forcément respectée par les opérateurs.

## Partie 5 : Conception d'un capteur Arduino

### 5.1 - Ressources

La conception de notre capteur DIY s'est principalement appuyée sur le modèle décrit dans la thèse suivante : Air Quality Arduino Based Monitoring System, King Faisal University, College of Engineering, Electrical Engineering. [Source](#)

De plus, des ressources pour apprendre les bases de l'utilisation du logiciel arduino ont été utilisées : "Faire des sciences expérimentales avec Arduino", par Gwénaél Le Bras. [Source](#)

### 5.2 - Capteur *Metal Oxyde* MOX

Le composant CCS811 utilisé pour la conception de notre capteur COV est composé d'un capteur Métal Oxyde MOX. Celui-ci est fourni par GoTronics, qui ne précisent pas le fonctionnement du capteur. En revanche, le fournisseur Sensirion utilise le même type de capteur pour ses composants et dispose d'un document expliquant son principe de fonctionnement. [Source](#)

C'est une surface chauffée d'oxyde métallique, qui va changer la résistance électrique qui dépend de l'oxygène contenue dans la surface. Les gaz comburant comme le NOx (fournissant plus d'oxygène que l'air ambiant) créent de la résistance, alors que les VOC réduisent la résistance. L'Humidité a un impact direct sur le capteur MOX, due à la vapeur d'eau qui va être "gaz réducteur". Il existe des composants qui peuvent compenser ce phénomène. Le capteur MOX va bien détecter les changements de la composition des gaz. Il va également comprendre l'association d'événements gazeux dans l'air.

Il est possible de calibrer le capteur MOX afin de mesurer un seul gaz dans l'air mais il faut être dans des conditions spécifiques type laboratoire. Pour notre situation, il y a deux aspects qui vont s'avérer problématiques pour mesurer un seul gaz : il faut utiliser une base de référence pour laquelle la concentration est connue, afin de pouvoir déterminer les concentrations que nous obtiendrons lors des mesurages de notre local. Nous pouvons étalonner et calibrer un appareil sur un gaz spécifique ou un mélange des gaz, mais le capteur ne va pas mesurer spécifiquement un seul gaz. Ce genre d'appareil ne sait pas distinguer des gaz entre eux.

### 5.3 - Matériel

\* Capteur avec composant CCS811B capable de détecter la totalité des COV et le niveau de CO2 dans l'air. [Source](#) / DataSheet : "Data Sheet CCS811B" [Source](#)

\* Alimentation 5V

\* Carte Arduino UNO

\* 10 câbles BBJ21 pour associer les 5 pins du composant à la carte arduino. [Source](#)

\* Cable USB-A vers USB-B pour connecter la carte à l'ordinateur

\* Application "MIT AI2 Companion" [Source](#) ou "Bluetooth Terminal HC-05" [Source](#)

### 5.4 - Montage

Un montage et paramétrage du capteur pour faire le lien entre la carte arduino, le capteur et le PC a été effectué pour assurer le bon fonctionnement du capteur (*Voir annexe 10*).

### 5.6 - Résultats et interprétation

#### Activité 4 :

L'activité 4 a été réalisée dans le but de comparer la fiabilité du capteur COV DIY (*Voir Annexe 7 fig 11*) avec un capteur COV professionnel (MiniRAE) (*Voir Annexe 7 fig 11*). Pour cela, le protocole utilisé pour les activités 1, 2 et 3 a été mis en place et une mesure a été faite pendant environ



30 minutes avec les deux appareils en simultané. Aussi, les mesures ont été effectuées pendant une phase de découpe du carton et une phase de préparation d'une machine impression 3D à résine. Enfin, la différence visible dans les résultats obtenus par le MiniRAE et le capteur DIY est l'unité de mesure : le MiniRAE fait les relevés en parties par million (ppm) et le capteur DIY fait les mesures en partie par milliard (ppb).

Une calibration de l'appareil DIY a été nécessaire pour augmenter sa fiabilité : en effet, une mesure de quelques minutes est faite à l'air extérieur pour faire le "zéro" de l'appareil. Ces mesures sont observables au début et à la fin du graphique, où les valeurs sont proches de 0 ppb. Les concentrations en COV augmentent légèrement dès l'entrée dans le hall, puis augmentent drastiquement lors de l'entrée dans la salle de découpe.

Les allures des courbes des deux graphiques obtenus sont très similaires et les valeurs obtenues sont relativement proches, même si le capteur DIY ne fournit pas des mesures aussi précises que le capteur professionnel. Le capteur DIY pourrait alors être utilisé par les adhérents du FabLab pour fournir des données d'analyse sur lesquelles il serait possible de s'appuyer pour estimer l'émission de COV qu'induit une activité ou une tâche en particulier pour ainsi apporter des mesures correctives pour protéger la santé des adhérents, tout en prenant en compte que le capteur utilisé est en effet de moins bonne qualité qu'un capteur professionnel pour garder un oeil critique sur les résultats.

## Conclusion

Cette étude, sur l'émission des COV a permis de déterminer l'importance des mesures de prévention mises en place. En effet, les données récoltées ont mis en évidence l'efficacité de la turbine extracteur d'air présente dans le local. Elle permet de respecter les seuils de réglementation de la bonne qualité de l'ambiance de travail.

Cependant, l'efficacité des moyens de prévention mises en place ne sont jamais suffisantes. En effet, l'ajout d'une aération de type ventilation mécanique contrôlée pourrait améliorer la qualité de l'air dans les locaux. En outre, le respect des consignes de sécurité après utilisation de la Speedy 300 est essentiel, veiller à maintenir la vitre de protection fermée pendant 30 secondes après chaque découpe ou gravure pour garantir une évacuation complète des fumées. En ce qui concerne les recommandations sur les filtres à particules, celui-ci ne pourra malheureusement pas être mis en place au vu du prix de ces derniers à l'achat, ainsi qu'à l'entretien.

Au sujet du capteur COV DIY arduino, il peut apporter au FabLab une récolte de données sur les COV présents dans les locaux, ils peuvent donc obtenir un suivi en continu et ainsi améliorer les conditions de travail des adhérents/utilisateurs. De plus, un guide d'utilisation a été créé et mis à disposition du FabLab, ainsi, il facilitera la prise en main du capteur et la collection des données récoltées.

Pour finir, cette étude pourrait ouvrir sur des futures investigations, comme l'analyse des émissions de COV lors de l'utilisation de l'imprimante 3D à résine, ainsi qu'évaluer l'impact que pourrait avoir l'ajout d'une machine découpe laser plus puissante. Cela permettrait une meilleure adaptation des moyens de prévention, ainsi que l'ajustement de ces derniers.

# Bibliographie

## a. Ouvrages

- Thermo Fisher Scientific, MIE pDR-1500 Instruction Manual, 15 Novembre 2017, p112 ; [Source](#)
- Testo, Mode d'emploi du DiscMini, Septembre 2016, p22 ; [Source](#)
- RAE systems, Guide d'utilisation du MiniRAE 3 000, Février 2016, p118 ; [Source](#)
- AMS, Datasheet du capteur CCS811B ; [Source](#)

## b. Articles, pdf

- INRS, *Fiches Toxicologiques* :
  - **Acide Formique**, Avril 2024 ; [Source](#)
  - **Benzène**, Juillet 2024 ; [Source](#)
  - **Ethanol**, Novembre 2019 ; [Source](#)
  - **Formaldéhyde**, Mars 2022 ; [Source](#)
  - **Mésitylène**, Mars 2023 ; [Source](#)
  - **Toluène**, Juillet 2021 ; [Source](#)
  - **Xylènes**, Juin 2021 ; [Source](#)
- Marc Mortureux, **avis de l'ANSES sur le formaldéhyde**, 07 Novembre 2011 ; [Source](#)
- Chemos, **FDS Formaldéhyde**, 26 Février 2019 ; [Source](#)
- Testo, **récupération de données** ; [Source](#)
- Honeywell, Principe de fonctionnement du MiniRAE 3 000 ; [Source](#)
- Trotec, Modes d'emplois :
  - Atmos cube, Novembre 2018 ; [Source](#)
  - Atmos pure, Janvier 2024 ; [Source](#)
- Elektror, caractéristiques de la turbine RD6 RE 6 de 50Hz en monophasé ; [Source](#)
- Sensorion, informations sur les MOX ; [Source](#)
- Joy-It, mode d'emploi pour la connectique du CCS 811 ; [Source](#)

## c. Thèses, mémoires

- **Louis Galey**  
*Comprendre les situations d'exposition aux nanoparticules par l'intégration de l'activité de travail à la mesure : vers une construction de la prévention*  
Bordeaux Population Health Research Center, 17 Octobre 2019, [Source](#)
- **Shirin Khaki, Maud Rio et Philippe Marin**, MDPI,  
Characterization of Emissions in Fab Labs: An Additive Manufacturing Environment Issue (2022), p23.  
[Source](#)
- Air Quality Arduino Based Monitoring System, King Faisal University, College of Engineering, Electrical Engineering, 2019, p3 ; [Source](#)

## d. Sources Internet

- **LégiFrance**, code de l'environnement, Articles R224-48 à R224-59, 23 Septembre 2010 ; [Source](#)
- **France machine outils**, "mécanisme de la découpe laser" ; [Source](#)
- INRS, "Rayonnement Laser", 05 Décembre 2022 ; [Source](#)
- **Officiel Prévention**, santé et sécurité au travail, "La prévention des risques professionnels des Composés Organiques Volatils (COV)", Janvier 2011 ; [Source](#)

- **AIDA**, COV ; [Source](#)
- **AccTek**, “La fumée produite par les machines de découpe laser est-elle toxique ?” ; [Source](#)
- **Centre de lutte contre le cancer**, fiches toxicologiques :
  - Benzène, 16 Août 2022 ; [Source](#)
  - Formaldéhyde, 16 Août 2022 ; [Source](#)
- **INRS**, Bases de données VLEP :
  - Acide Formique, Septembre 2022 ; [Source](#)
  - Formaldéhyde, Novembre 2023 ; [Source](#)
  - Mésitylène, Septembre 2022 ; [Source](#)
  - Toluène, Avril 2024 ; [Source](#)
  - Xylènes, Septembre 2022 ; [Source](#)
- **INRS**, “Prévenir les risques liés au poussières de bois”, 10 Novembre 2022 ; [Source](#)
- **Wikipédia**, le capteur Néphélométrie, 16 Juillet 2022 ; [Source](#)
- **Artisan Technology Group**, “PDR-1500 Thermo Fisher Scientific Personal DataRAM Aerosol Active Sampling Data Logger” ; [Source](#)
- **Immotech**, effet corona, 31 Octobre 2019 ; [Source](#)
- **Zone Industrie**, principe de fonctionnement du DiscMini, 19 Novembre 2017 ; [Source](#)
- **Trotec**, les appareils à d’extraction ; [Source](#)
- **NavLab**, Alimentation de la carte Arduino ; [Source](#)
- **Play Store**, application "MIT AI2 Companion" ; [Source](#)
- **Play Store**, application "Bluetooth Terminal HC-05" ; [Source](#)

# Annexes

## ANNEXE 1

### MiniRAE / Activité 1

#### Activité 1 :

La mesure en salle de découpe a donc duré environ une demi heure, pendant l'activité d'un adhérent au FabLab qui a au total effectué 3 phases de découpe et 2 phases de gravure sur des plaques de MDF. Sur le graphique les mesures pendant la première et les dernières minutes ont été effectuées dans le hall du FabLab, et il est possible de constater que les concentrations en COV sont plus élevées que dans la salle de découpe. Cela peut s'expliquer par le fait que lors de l'entrée en salle de découpe, l'opérateur était déjà en activité et avait allumé la turbine d'extraction d'air. Celle-ci fonctionnerait alors de manière optimale pour extraire les particules présentes dans la pièce, ce qui pourrait expliquer cette différence entre les deux pièces. De plus, il est également possible de relever deux pics de concentration sur le graphique. Ceux-ci correspondent à l'augmentation soudaine en particules, qui diminuera et se stabilisera rapidement par la suite, due à l'ouverture de la vitre de protection de la machine libérant une partie des fumées encore piégées dans l'habitacle et n'ayant pas encore pu être évacuées.

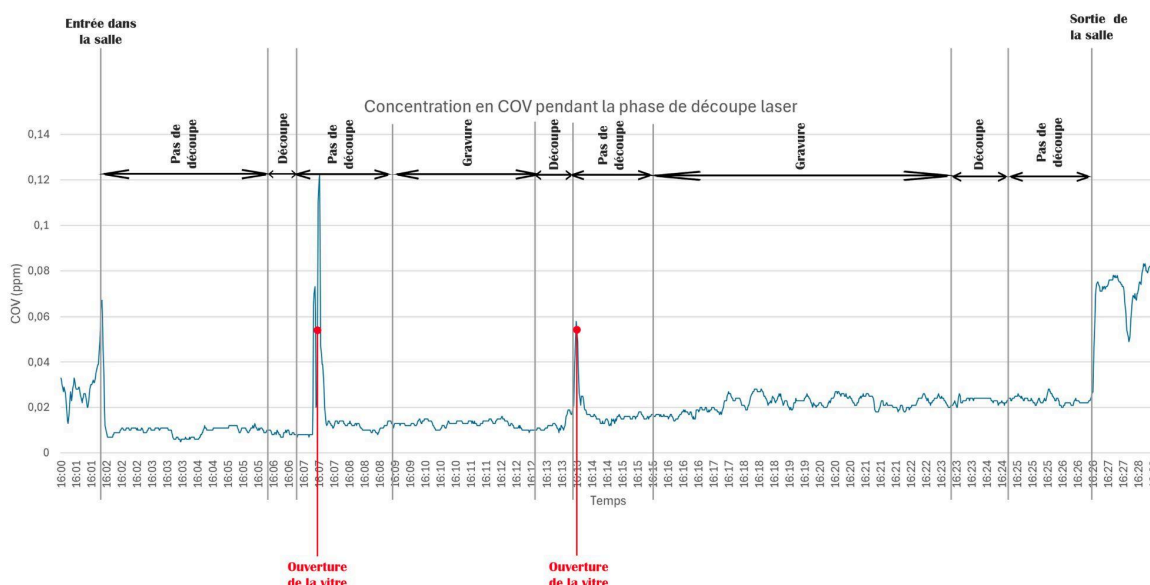


Fig. 1 : Mesure de la concentration en Toluène pendant l'activité de découpe de bois, activité n°1

## ANNEXE 2

### PDR 1 et 2 / Activité 2

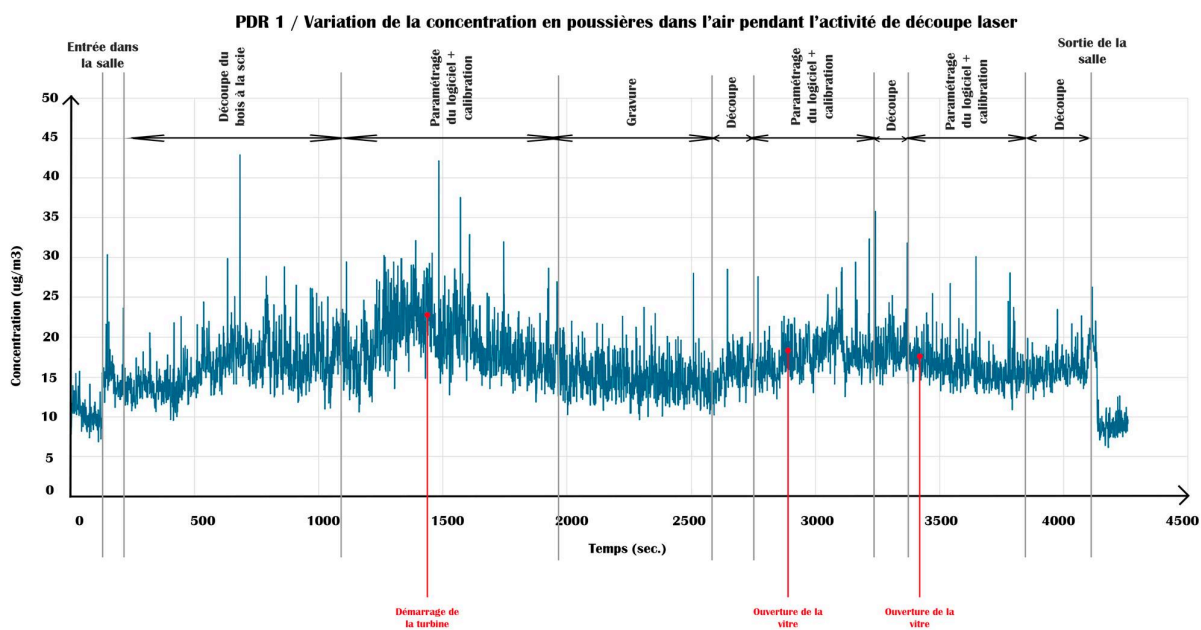


Fig. 2 : Mesure de la concentration en poussières dans l'air pendant l'activité de découpe de bois, capteur placé à proximité de la machine de découpe, activité n°2

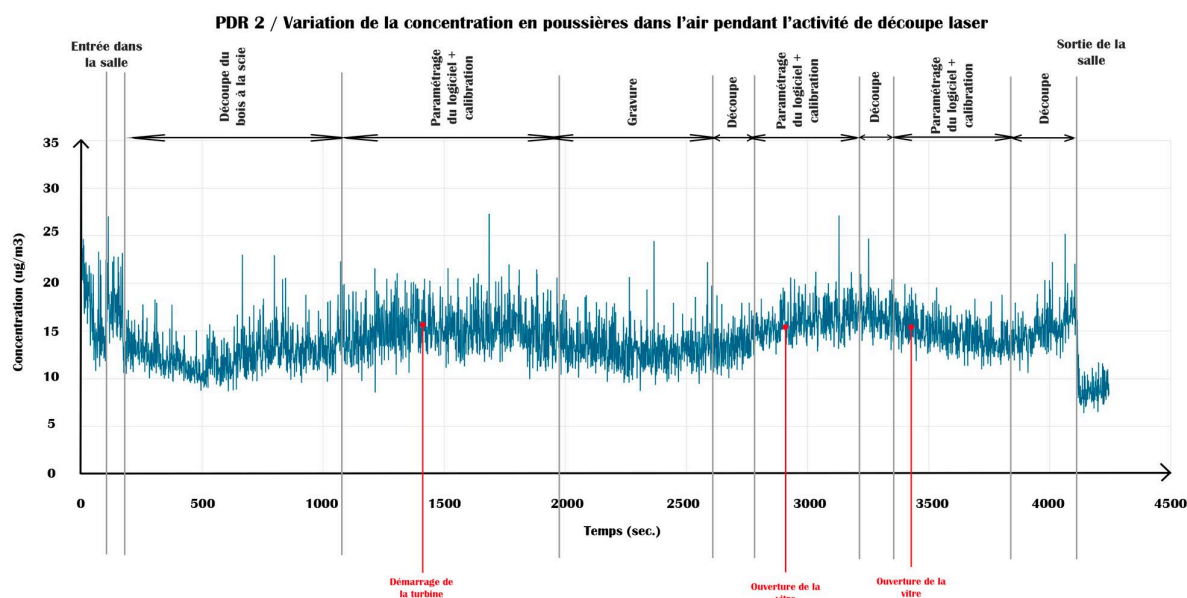


Fig. 3 : Mesure de la concentration en poussières dans l'air pendant l'activité de découpe de bois, capteur placé en retrait, activité n°2

### ANNEXE 3

#### Description des matériaux découpés

Tableau 2 : Description des matériaux découpés durant l'activité n°3

Nom	Matériau	Epaisseur
Matériau 1	Bois brut	18mm
Matériau 2	MDF (type 1)	10mm
Matériau 3	MDF (type 1)	5mm
Matériau 4	MDF (type 2)	3mm
Matériau 5	MDF (type 1)	3mm
Matériau 6	Plexiglas (transparent)	5mm
Matériau 7	Plexiglas (noir)	8mm
Matériau 8	Plexiglas (noir)	3mm

## ANNEXE 4

### Discmini 1 / Activité 3

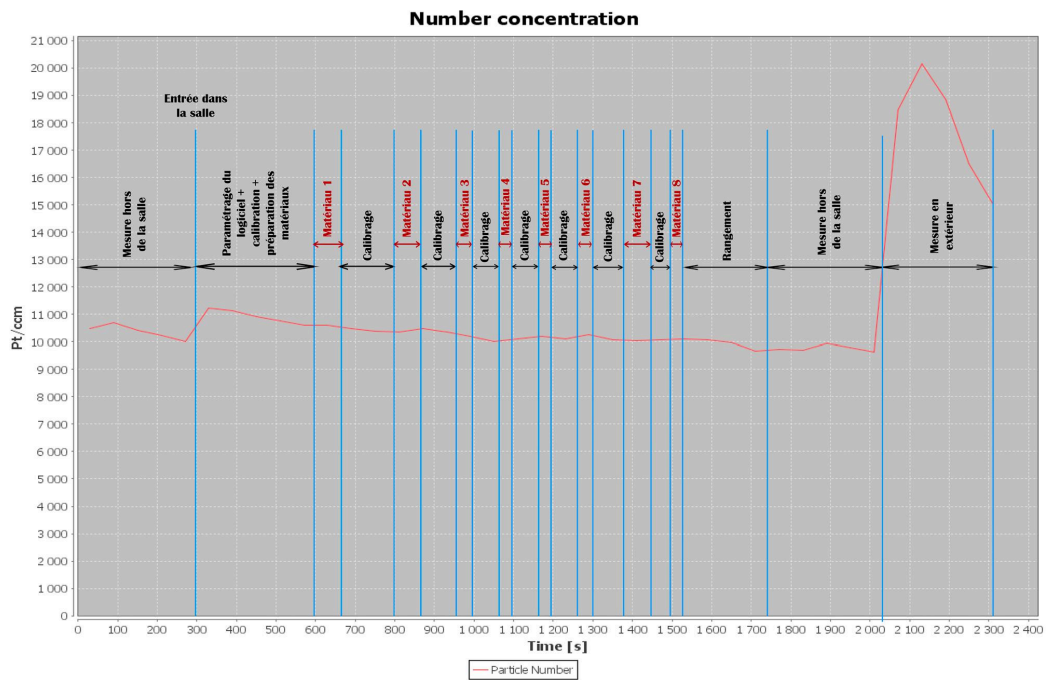


Fig. 4 : Mesure de la concentration en nanoparticules dans l'air (en Pt/ccm) pendant l'activité de découpe de bois, capteur placé en retrait, activité n°3

Average number : 11227,16 pt/ccm (particules par centimètre cube)

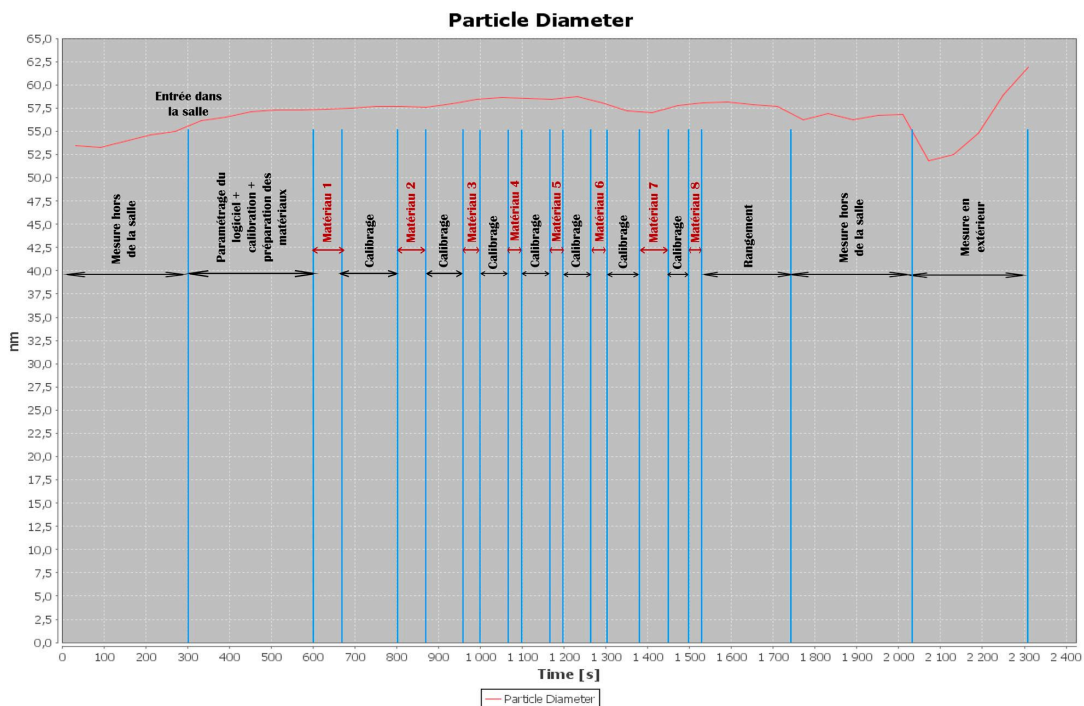


Fig. 5 : Mesure de la taille nanoparticules dans l'air (en nm) pendant l'activité de découpe de bois, capteur placé en retrait, activité n°3

Average diameter : 56,87 nm

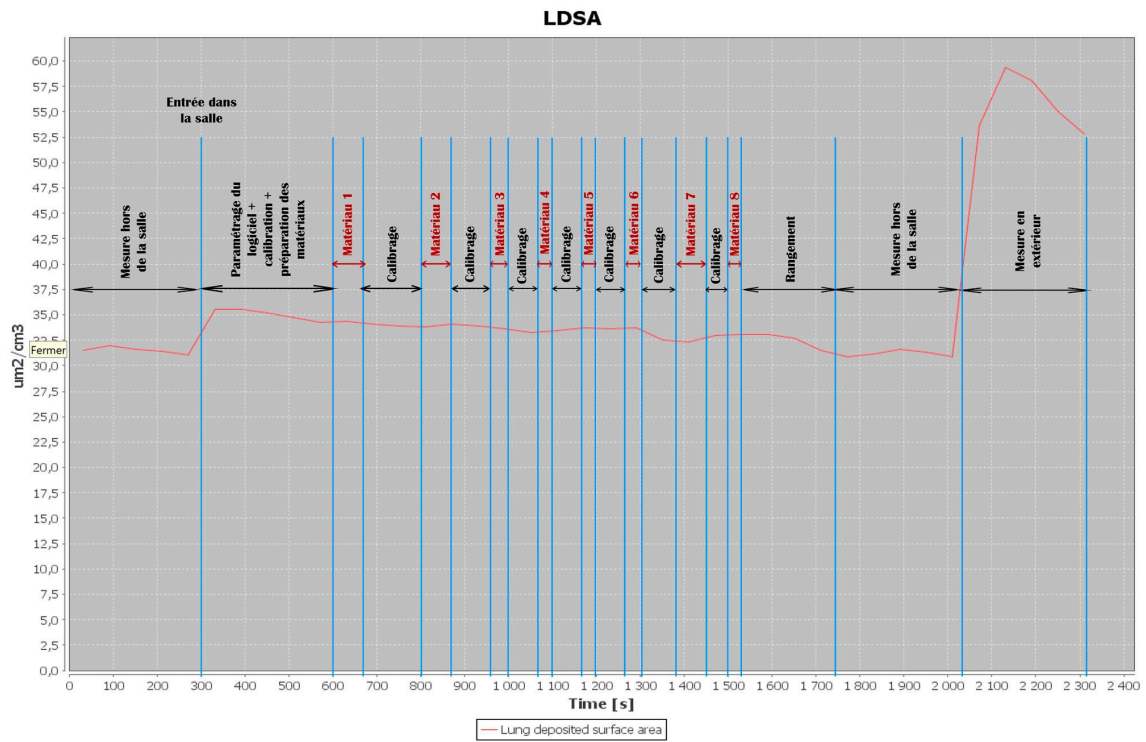


Fig. 6 : Mesure de la Lung Deposit Surface Area (en  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ) pendant l'activité de découpe de bois, capteur placé en retrait, activité n°3

Average LDSA : 35,92  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$



## ANNEXE 5

### Discmini 2 / Activité 3

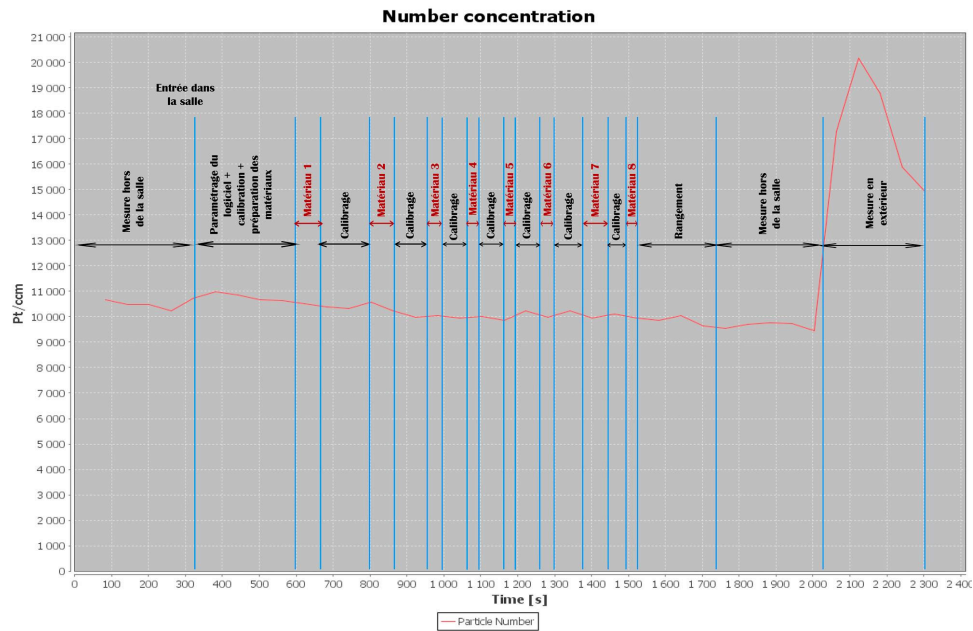


Fig. 7 : Mesure de la concentration en nanoparticules dans l'air (en Pt/cm) pendant l'activité de découpe de bois, capteur placé à proximité de la machine de découpe, activité n°3

Average number : 10842,58 pt/ccm

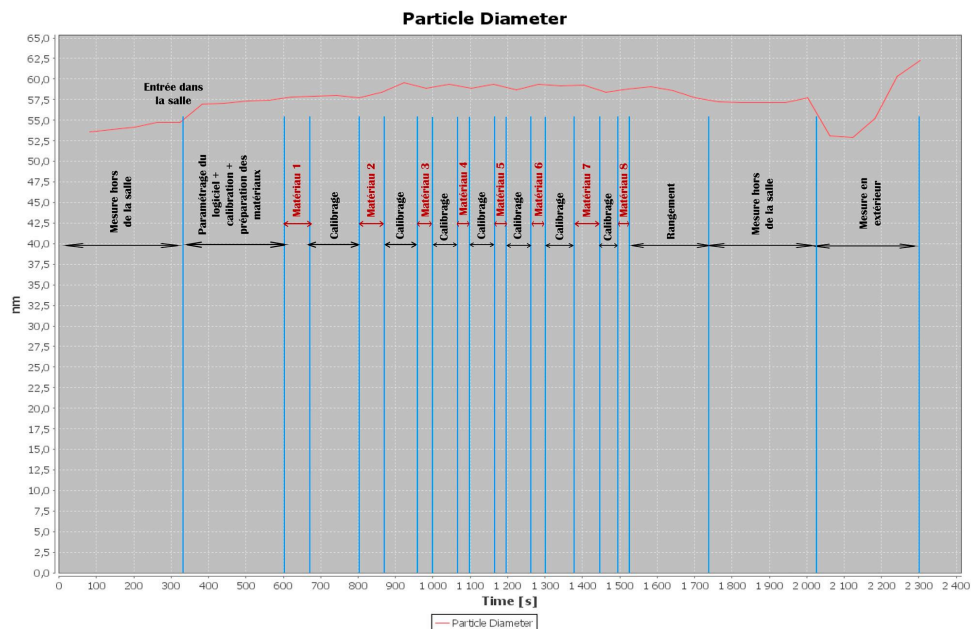


Fig. 8 : Mesure de la taille nanoparticules dans l'air (en nm) pendant l'activité de découpe de bois, capteur placé à proximité de la machine de découpe, activité n°3

Average diameter : 56,03 nm

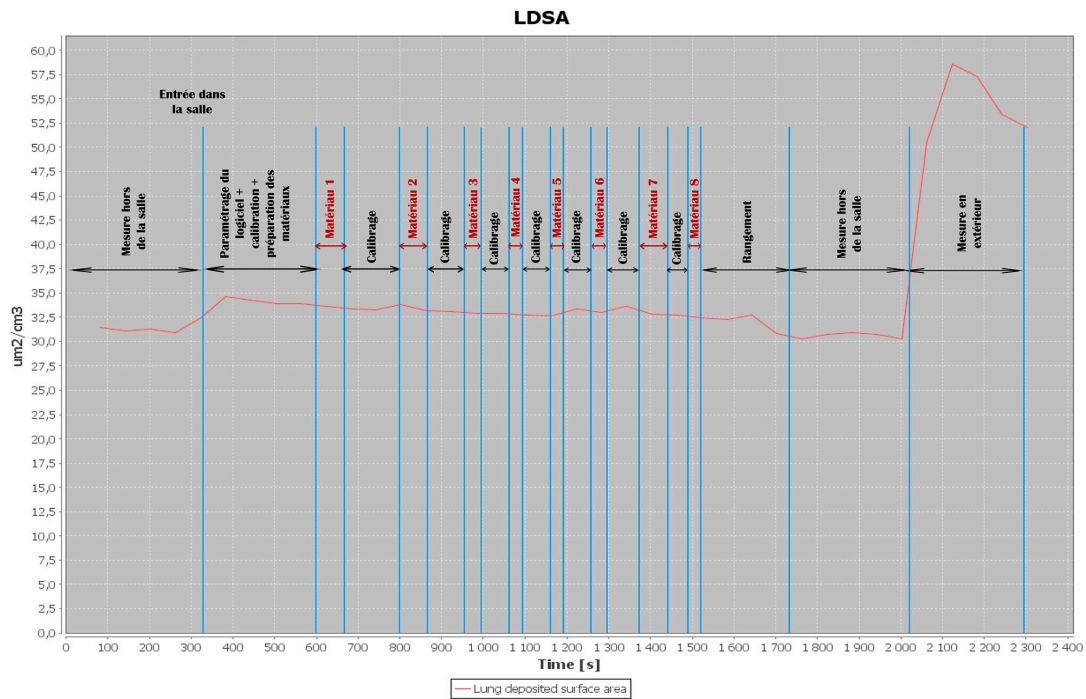


Fig. 9 : Mesure de la Lung Deposit Surface Area (en  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ ) pendant l'activité de découpe de bois, capteur placé à proximité de la machine de découpe, activité n°3

Average LDSA :  $34,45 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$

## ANNEXE 6

### MiniRAE / Activité 3

#### Variation de la concentration en COV durant la découpe de 8 matériaux différents

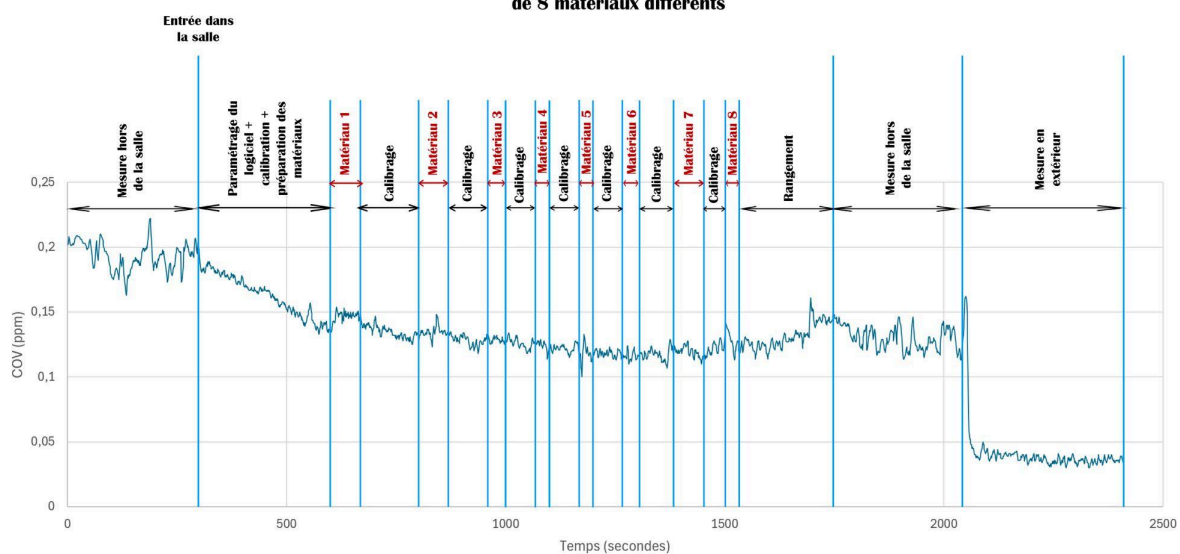


Fig. 10 : Mesure de la concentration en Toluène pendant la découpe de 8 matériaux différents, activité  
n°3

## ANNEXE 7

### Capteur DIY / Activité 4

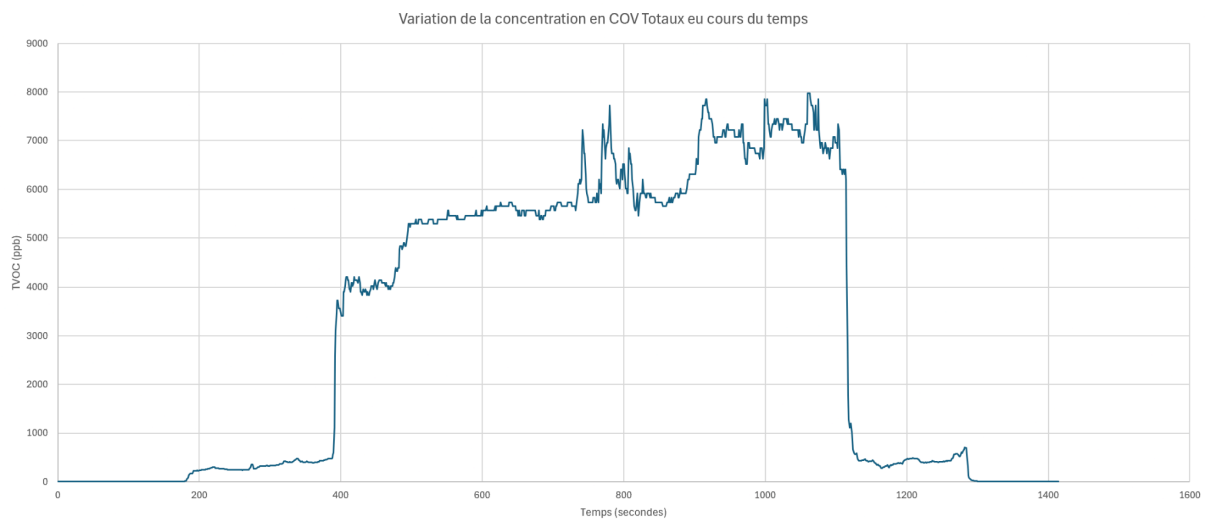


Fig. 11 : Mesure de la concentration en COV Totaux pendant l'utilisation de la machine découpe laser, activité n°4

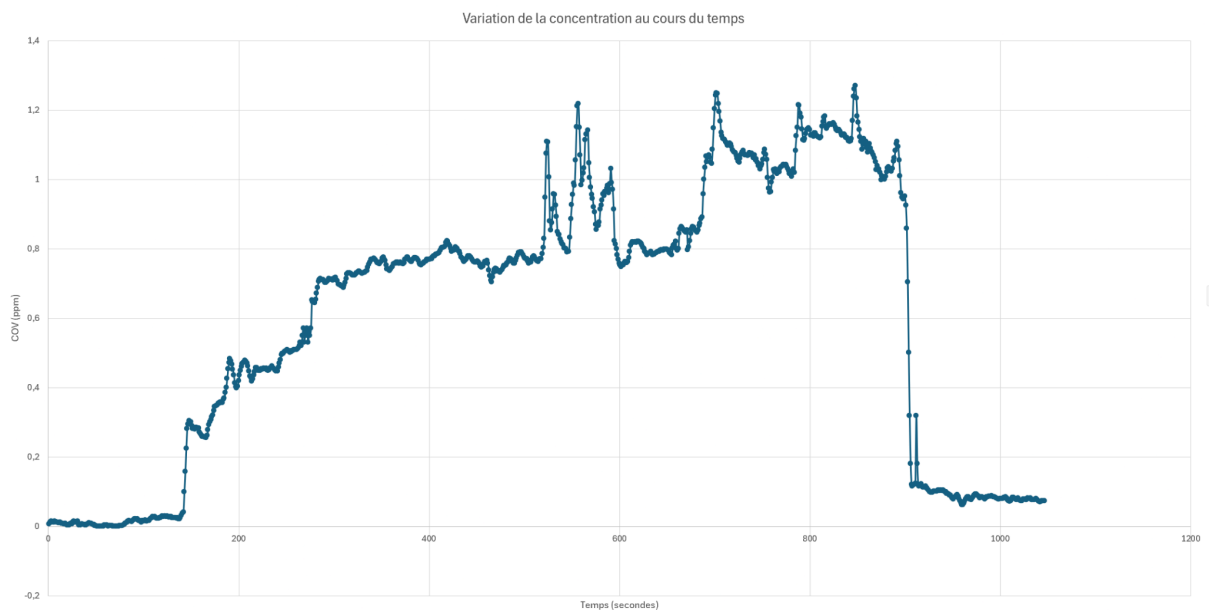
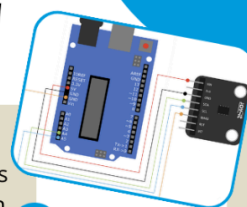


Fig. 12 : Mesure de la concentration en Benzene pendant l'utilisation de la machine découpe laser, activité n°4

## Guide d'utilisation du capteur COV

### Pourquoi utiliser le capteur COV ?

Le capteur COV est à disposition de quiconque souhaite effectuer des mesures des concentrations en particules émises lors d'un processus de fabrication (impression 3D, découpe laser, découpe du bois...). La dangerosité des particules varie en fonction des procédés et des matériaux utilisés. Attention tout de même ce capteur fait une mesure de la quantité TOTALE en particules, comprenant celles étant dangereuses pour la santé humaine et celles étant inoffensives : il est donc important d'avoir connaissance du type de particules émises par un procédé.



### Installation du logiciel et initialisation

Le capteur fonctionne à l'aide du logiciel *Arduino IDE*. Le code nécessaire à son fonctionnement est disponible sur le wiki du fablab : FabLab Cohabit --> Redmine --> Projets --> Projets des étudiants --> Wiki --> HSE --> Capteur COV. Il suffit de copier le code sur le logiciel et de suivre les instructions pour installer la bibliothèque et démarrer la mesure.

### Étalonnage et mesurage

L'appareil doit être étalonné environ 2 à 3 minutes à l'air extérieur : les mesures de TVOC doivent atteindre 0 à 1 ppb à l'air libre. Après étalonnage, mesurer les activités voulues, en prenant soin de faire un chronométrage et de prendre des notes pour l'analyse des résultats. Enfin, remettre le capteur à l'air extérieur pendant 2 à 3 minutes pour faciliter plus tard l'analyse des résultats.

### Extraction des résultats et interprétation

Arrêter le mesurage sur le logiciel et copier coller les valeurs sur Excel. Il sera nécessaire d'utiliser le séparateur pour obtenir une colonne "temps", une colonne "CO2" et une colonne "TVOC". Créer ensuite un graphique de l'évolution de la quantité de TVOC en fonction du temps pour analyser la quantité de particules émises lors de l'activité mesurée.



## ANNEXE 9

### Informations complémentaires sur les capteurs utilisés

#### - Capteur de micro-particules

. Référence : Thermoscientific MIE PDR-1500

. Caractéristiques : Mesure en continu de la concentration massique des particules en suspension dans l'air Choix de la fraction à mesurer (thoracique, alvéolaire, poussières totales)

. Mesure : Fraction à mesurer pour l'analyse de la concentration en poussières de bois : fraction alvéolaire (PM-4).

Mesure de la température ambiante, pression atmosphérique et humidité relative : régulation volumique du débit et compensation de l'hygrométrie

. Principe de fonctionnement : Le Thermoscientific MIE PDR-1500 est un capteur néphélométrique ayant été optimisé pour la mesure de la fraction respirable des poussières, fumées et brumes en environnement industriel [Source](#). La néphélométrie est donc en effet utilisée pour la mesure des particules en suspension dans l'air, et également la mesure des particules en suspension dans un milieu (turbidité). La mesure se fait par diffusion d'un faisceau lumineux réfléchi à 90° d'angle. L'intensité de la lumière du faisceau réfléchi est mesurée et mise en relation avec celle du faisceau incident [Source](#).

#### - Capteur de nano-particules

. Référence : Testo Discmini

. Caractéristiques : Mesure en continu du nombre de particules dans l'air, de leur taille (diamètre) et de la Lung Deposited Surface Area.

. Étalonnage et Mesure : À l'allumage, l'appareil s'initialise et prépare la mise en marche pendant 300 secondes. À l'issue de ce décompte, le zéro est automatiquement mesuré. Il n'est pas nécessaire d'effectuer un étalonnage de l'appareil, celui-ci est directement étalonné en usine par le constructeur (certifications fournies). Pour réaliser une mesure, dévisser le bouchon du corps de l'impacteur à la base de l'appareil et le nettoyer avec de l'air comprimé, vérifier que tous les voyants soient allumés, et appuyer sur REC pour lancer la mesure. Il est conseillé de faire une mesure pendant une minute avant et après la situation avec un filtre HEPA pour avoir sur le graphique des valeurs neutres au début et à la fin. Ne disposant pas de filtre HEPA, nous n'avons pas pu effectuer la procédure. [Mode d'emploi Disc Mini](#)

. Principe de fonctionnement : Le principe est basé sur la détection de particules chargées électriquement, cela s'appelle "l'effet corona". La détection de particules est un phénomène d'ionisation qui va permettre de détecter facilement le passage des particules dans la matière. Ce phénomène peut être effectué que si la particule est chargée électriquement, sinon il n'y aura aucune ionisation.

Concernant "l'effet couronne" ou "effet corona", c'est un phénomène d'ionisation qui va entraîner une décharge électrique dans le milieu qui l'entoure (le conducteur). [Source](#)

LE DiscMini va enregistrer simultanément : la taille et le nombre de particules. [Principe de fonctionnement](#)

. Récupération des données : Le logiciel Testo DiscMini permet la récupération des données. Celui-ci fonctionne sous Java, il sera alors important d'assurer l'installation de ce programme au préalable. [DiscMini data conversion tool](#)

#### - Capteur COV

. Référence : PID COV MiniRAE 3000

. Caractéristiques : Mesure en continu de la quantité de COV présent dans l'air, en ppm ; Plage de mesure allant jusqu'à 15 000 ppm.

. Etalonnage : Le manuel d'utilisation détermine le protocole pour étalonner l'appareil (page 41) [Manuel d'utilisation](#). Le capteur COV est étalonné lors d'une première calibration à l'air pur (pas de COV) et lors d'une deuxième calibration avec un gaz à concentration connue, ici de l'isobutylène à 100 ppm. Ensuite, on choisit le gaz à mesurer, et l'appareil fait la conversion entre le gaz étalon et le gaz mesuré. Cet étalonnage de l'appareil se fait si l'appareil n'a pas été calibré depuis plus de 30 jours, ou si le détecteur a été changé, si le gaz étalon a été modifié ou encore si le paramétrage de la lampe a été changé. Pour éviter d'avoir une bouteille étalon pour chaque gaz à mesurer, on étalonne l'appareil avec l'isobutylène, puis un facteur de conversion est appliqué pour convertir l'étalonnage assimilé pour ce gaz à l'autre composé à mesurer.

. Principe de fonctionnement : L'appareil est composé d'une lampe 10,6 eV pour ioniser les particules. Le capteur utilise la technologie PID pour détecter les concentrations en produits chimiques dans l'air, c'est la technique de détection des gaz la plus courante pour la mesure des COV. Elle consiste à "ioniser grâce à une source lumineuse (lampe) les composés volatils et à mesurer le courant engendré par cette ionisation entre des électrodes" : les molécules sont ionisées par des photons pour être transformées en cations. C'est une méthode non sélective, c'est-à-dire que tous les gaz détectés par le capteur sont analysés, mais sont reportés pour 1 seul gaz mesuré. C'est donc un paramètre à prendre en compte pour l'interprétation des résultats, la mesure du gaz peut ne pas être représentative de la quantité réelle présente dans l'air. En effet, pour les mélanges complexes, certains composés peuvent interférer. Il existe plusieurs lampes pour ioniser les molécules. L'appareil utilisé est équipé avec une lampe 11,7 eV ayant la capacité de mesurer une plus grande quantité de composés que la lampe 10,6 eV par exemple, mais celle-ci est moins durable et produit moins d'énergie, importante pour obtenir une bonne résolution de mesures. [Source](#)

. Récupération des données : Le manuel d'utilisation détermine le protocole pour récupérer les données [Manuel d'utilisation](#).

## ANNEXE 10

### Montage et paramétrage de la carte arduino

Le détecteur de COV est composé de 8 pins, nous aurons besoin d'en utiliser 5. Le pin VIN sur le CCS811 est un pin à la puissance non régulée, il est connecté au pin 5V de la carte arduino, un pin à la puissance régulée. Le pin GND sur le CCS811 représente la masse, il est connecté au pin GND sur la carte arduino. Le pin SDA sur le CCS811 est chargé d'envoyer les données vers le pin A4 sur la carte arduino. Le pin SCL sur le CCS811 envoie des signaux à intervalles réguliers au pin A5 sur la carte arduino. Le pin WAKE sur le CCS811 est relié au pin GND sur la carte arduino.

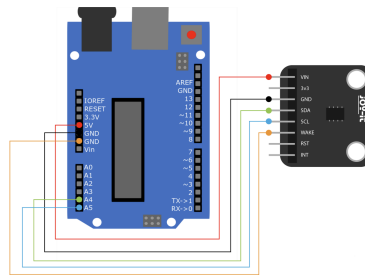


Fig. 13 : Connectique entre la carte arduino et le capteur, issu du mode d'emploi pour la connectique du CCS 811 [Source](#)

Une fois les branchements des pins effectués, on connecte la carte arduino au PC via un câble USB-A vers USB-B. On lance le logiciel "Arduino IDE Software" et on installe la librairie pour l'utilisation du composant : Sketch → Include Library → Manage Libraries. Une fonction recherche apparaît alors. Nous souhaitons dans notre cas installer la librairie adaptée à la carte JOY-IT. Il faudra donc rechercher "CCS811" et installer la librairie *DFRobot\_CCS811 Library* par DFRobot.

Il faudra s'assurer de bien vérifier que la carte Arduino est connectée au PC en regardant en bas à droite de l'interface du logiciel. Si l'information "No Board selected" est affichée, cliquer sur "Select board" en haut de l'interface et sélectionner la carte connectée.

On copie colle dans la librairie le code en C++ : [Mode d'emploi et code C++ pour la connexion à la carte Arduino du CCS 811](#).

Lorsqu'on installe la librairie, des lignes de code sont chargées automatiquement. Nous n'en aurons pas besoin alors il sera nécessaire de les supprimer afin que le programme fonctionne bien après avoir copié collé le code donné.

```
1 void setup() {  
2   // put your setup code here, to run once:  
3  
4 }  
5  
6 void loop() {  
7   // put your main code here, to run repeatedly:  
8  
9 }
```

Fig. 14 : Lignes de code à supprimer

Enfin, il faudra ouvrir le moniteur permettant d'afficher les mesures. Pour cela, cliquer sur l'onglet "Tools", puis "Serial Monitor". Le "baudrate" doit être paramétré sur 115200. On peut alors exécuter le code et lire les résultats directement sur le PC.