

## EVALUATION DES EMISSIONS DE FUMEES LORS DU DECAPAGE LASER : CAS D'UNE PEINTURE THERMOLAQUEE

A. Santandrea<sup>\*1</sup>, S. Tomaz<sup>2</sup>, M. Guillemot<sup>2</sup>, S. Melin<sup>2</sup>, M. Marchal<sup>1</sup> et D. Bémer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Procédés et Epuration des Polluants, Département Ingénierie des Procédés

<sup>2</sup> Laboratoire Métrologie des Expositions aux Polluants Organiques, Département Métrologie des Polluants  
Institut National de Recherche et de Sécurité, 1 rue du Morvan, CS 60027, 54519 Vandoeuvre Cedex,  
France

\*Courriel de l'orateur : audrey.santandrea@inrs.fr

### TITLE

**Assessment of fume emissions during laser cleaning: the case of a powder-coated paint**

### RESUME

Bien que le décapage laser constitue une alternative prometteuse aux procédés classiques de décapage, l'interaction laser-matière génère des émissions dont la nature et les quantités sont peu documentées. Un banc d'essai a été développé à l'INRS pour caractériser les polluants émis lors de ce procédé. Cette étude présente les premiers résultats obtenus lors du décapage laser d'une peinture thermolaquée, selon deux conditions opératoires de fonctionnement du laser. Les mesures réalisées montrent que les particules émises sont majoritairement ultrafines ( $< 0,1 \mu\text{m}$ ) et que des composés organiques tels que des hydrocarbures aromatiques polycycliques ou des isocyanates peuvent être formés. Les concentrations mesurées dépendent fortement du réglage du décapeur ; une bonne maîtrise du procédé peut permettre de limiter les émissions à la source et de dimensionner plus efficacement les moyens de prévention adaptés.

### ABSTRACT

Although laser cleaning is a promising alternative to conventional surface cleaning methods, the laser–material interaction generates emissions whose nature and quantities are still poorly documented. A test bench was therefore developed at INRS to characterize the pollutants emitted during this process. This study presents the first results obtained during the laser cleaning of a powder-coated paint under two different laser operating conditions. Measurements show that the emitted particles are mainly ultrafine ( $< 0.1 \mu\text{m}$ ), and that organic compounds such as polycyclic aromatic hydrocarbons or isocyanates may be formed. The measured concentrations strongly depend on the operating conditions; a proper control of the process can limit emissions at the source and enable a more effective design of preventive measures.

**MOTS-CLES :** laser, décapage, émission, particules / **KEYWORDS:** laser, cleaning, emissions, particles

### 1. INTRODUCTION

Depuis quelques années, les procédés de décapage de surface connaissent de fortes évolutions, avec pour objectif de les rendre plus efficaces et respectueux de l'environnement. Parmi ces nouveaux procédés, la technologie par laser, présentée comme éco-compatible du fait de son absence de consommables et de produits chimiques, trouve un essor important. Les secteurs concernés sont très nombreux et divers comme l'industrie automobile, navale, aérospatiale et manufacturière, la construction et rénovation des monuments, la restauration des œuvres d'art etc. (Bertasa & Korenberg, 2022; Labouré et al., 2000; Razab et al., 2018; Wiedemann et al., 2000)

Lors d'une utilisation sur poste fixe, des solutions de ventilation et de captage à la source peuvent être proposées ; mais les sources laser étant de plus en plus compactes, elles permettent le développement de systèmes ambulatoires qui rendent plus problématique le captage et le traitement des fumées. Celles-ci sont constituées à la fois de particules fines et ultrafines ( $< 0,1 \mu\text{m}$ ) et de gaz, dont la toxicité est encore largement indéterminée ; l'impact sur la santé des opérateurs est par conséquent difficile à évaluer (Dewalle, 2009; Kahl et al., 2023).

Pour pallier ce manque de connaissances et établir des recommandations en termes de prévention, un banc d'essai a été adapté à l'INRS afin de caractériser les polluants émis lors du décapage laser. L'étude vise dans un premier temps à identifier des conditions opératoires (puissance de laser, fréquence et durée de pulsation, taille et motif du faisceau) menant à un décapage efficace et rapide. Pour ces cas retenus, les émissions particulières et gazeuses sont alors caractérisées en termes de débit d'émission, nature chimique, concentration et granulométrie des aérosols. Les résultats sont ensuite exploités afin d'ajuster les conditions opératoires en vue de réduire les émissions à la source et de formuler des préconisations limitant l'exposition des travailleurs (ventilation, captage à la source, équipements de protection individuelle), en se basant sur des configurations opérationnelles adaptées aux usages industriels.

Bien que tous types de supports et de revêtements puissent être étudiés, cet article s'intéresse plus particulièrement au cas du décapage laser d'une peinture thermolaquée dans deux conditions opératoires de fonctionnement du laser. La méthode expérimentale mise au point pour la caractérisation des émissions et les premiers résultats obtenus sont présentés dans cet article. Ceux-ci, bien qu'issus d'essais préliminaires, permettent à la fois de mettre en évidence l'émission de certains composés spécifiques tels que des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ou des isocyanates, et d'estimer les débits d'émissions associés. Ces essais expérimentaux ont également pour but d'identifier des leviers potentiels d'optimisation du procédé afin de réduire les émissions à la source.

## 2. MATERIEL ET METHODES

L'échantillon de test consiste en une plaque d'acier inoxydable, sur laquelle une peinture thermolaquée de couleur grise a été appliquée de manière homogène par une société de peinture. Une analyse d'échantillon de peinture réalisée par spectroscopie infrarouge à transmission a notamment révélé la présence de liaisons caractéristiques de polyester uréthane et de polypropylène.

L'appareil de décapage utilisé (Cosphi, PLA300 Q5) contient un laser pulsé de puissance maximale de 300 W, d'énergie maximale d'impulsion de 5 mJ et opérant à la longueur d'onde de 1064 nm. A noter que les équipements laser utilisés pour le décapage appartiennent à la classe 4 selon la norme EN 60825-1 :2014 et sont à ce titre dangereux pour la peau et les yeux, à la fois par exposition directe et indirecte (réflexion diffuse). Le décapage a été réalisé selon deux types de conditions opératoires, basées sur les recommandations du fabricant de l'appareil pour le décapage de peinture. Les deux configurations sont identiques à l'exception de la fréquence de pulsation (de 150 kHz pour l'essai 1, 40 kHz pour l'essai 2) et du motif de balayage du faisceau. Dans le premier cas, un motif en vague a été utilisé, délivrant davantage d'énergie à la surface et induisant un effet principalement thermique, tandis que dans le second cas, un motif en croix a été choisi, avec un effet principalement mécanique plus doux.

Le banc d'essai a été conçu pour collecter et analyser de manière sécurisée les fumées produites par des opérations de décapage laser (Figure 1). Il est constitué d'une boîte à gants d'un volume de 2,3 m<sup>3</sup>, munie d'un écran de protection contre le rayonnement infrarouge du laser et ultraviolet émis par le plasma généré lors du décapage. L'échantillon à décapeur est placé sur un support plan déplaçable longitudinalement à l'aide d'une poignée. La tête du décapeur laser est fixée sur un rail et déplacée manuellement, de manière guidée, au-dessus de l'échantillon. La cabine est alimentée en air filtré au moyen d'un ventilateur de soufflage, et les émissions sont collectées dans un conduit d'extraction terminé par un système d'épuration des gaz et particules. La pression relative à l'intérieur de la cabine est contrôlée et maintenue à  $-5 \pm 2$  Pa afin d'éviter toute contamination du hall d'essais. Le mélange des polluants dans l'enceinte est assuré par un ventilateur interne. Le débit d'air extrait Q est déterminé par mesure de la vitesse moyenne de l'air au centre de la conduite à l'aide d'un anémomètre. Le débit d'extraction lors des essais a été fixé à 400 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.

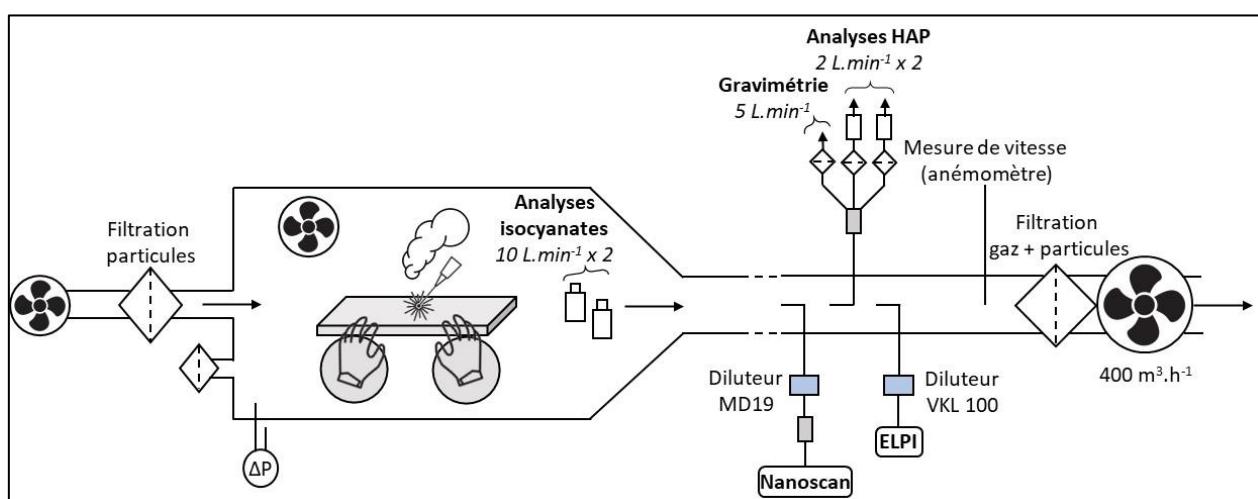


Figure 1. Schéma du banc d'essai utilisé pour la caractérisation des émissions particulières lors du décapage de peinture thermolaquée

Les prélèvements ont été réalisés dans le conduit d'extraction à l'isokinétisme au moyen de sondes profilées. Deux granulomètres ont été utilisés après dilution de l'aérosol à l'aide de dispositifs VKL 100 (Palas) et MD19-3E (Matter Engineering) : un ELPI (Dekati) et un Nanoscan (TSI). Un prélèvement sur filtre de 37 mm (QMA, Whatmann) a été mis en place pour l'analyse gravimétrique des particules émises.

D'autre part, des échantillonnages complémentaires ont été réalisés afin d'identifier et quantifier certains composés organiques susceptibles d'être émis lors du décapage laser de peintures, tels que des isocyanates (Boutin et al., 2006) ou des HAP. Les HAP visés correspondent aux seize composés retenus comme prioritaires par l'agence environnementale américaine (US EPA, 1993), et sont prélevés à l'aide de deux dispositifs placés en série : un filtre en fibres de quartz (QMA, Whatmann) et un tube adsorbant XAD-2 (Orbo 609, Supelco). Les isocyanates (MDI<sup>1</sup>, 2,4-TDI<sup>2</sup>, 2,6-TDI<sup>3</sup> et HDI<sup>4</sup>) ont été recueillis en plaçant des dispositifs CIP 10 (Capteur Individuel de Poussières, Arelec) pour la fraction inhalable avec mousses imprégnées de MPP<sup>5</sup> directement à l'intérieur de la cabine. Les analyses chimiques des HAP et isocyanates générés ont été réalisées en se basant sur les protocoles définis respectivement par les fiches MetroPol M-332 (INRS, 2018) et MetroPol M-451 et M-452 (INRS, 2024a, 2024b).

### 3. RESULTATS

Les premiers essais de décapage laser ont permis d'obtenir une première estimation de quelques paramètres caractéristiques des émissions générées (Tableau 1). Dans les deux cas, la proportion de particules ultrafines (< 100 nm) est particulièrement importante : environ 75 % pour l'essai 1 et 85 % pour l'essai 2. En revanche, la quantité totale de particules émises varie fortement entre les essais. Les mesures gravimétriques indiquent des concentrations massiques moyennes respectives de 17 mg.m<sup>-3</sup> et 5 mg.m<sup>-3</sup>. Cette différence confirme que les conditions opératoires peuvent affecter directement la quantité de particules émises lors du décapage.

Tableau 1. Paramètres des émissions caractérisées pour les deux configurations d'essais de décapage laser

Essai	Proportion de particules ultrafines	Concentration totale en nombre (#.cm <sup>-3</sup> )	Concentration massique (mg.m <sup>-3</sup> )	Concentration équivalente BaP (ng.m <sup>-3</sup> )
#1	75 %	$4,4 \times 10^6$	17	774
#2	85 %	$3,6 \times 10^6$	5	29

En ce qui concerne les isocyanates, le 2,4-TDI n'a été détecté pour aucun des deux essais réalisés. Lors de l'essai 1, une concentration à l'équilibre de 0,054 mg.m<sup>-3</sup> a été mesurée pour le HDI, 0,028 mg.m<sup>-3</sup> pour le MDI et 0,010 mg.m<sup>-3</sup> pour le 2,6-TDI. En revanche, aucun des trois composés n'a été détecté lors de l'essai 2. Comme présenté dans le Tableau 1, la concentration totale en HAP, exprimée en équivalent toxique en benzo[a]pyrène (BaP,eq) (Doornaert et al., 2003) est également très variable d'un essai à l'autre, atteignant 774 ng.m<sup>-3</sup> lors de l'essai 1 et seulement 29 ng.m<sup>-3</sup> lors de l'essai 2.

Le débit d'émission des différents composés a été calculé comme le produit de la concentration mesurée à l'équilibre et du débit d'extraction du banc d'essai. Un scénario d'utilisation type a été simulé, en considérant deux cycles de 15 minutes de décapage suivies de 15 minutes de pause, dans un local de 200 m<sup>3</sup>. Deux cas de ventilation ont été étudiés : 1 renouvellement d'air par heure (1 RH, 200 m<sup>3.h<sup>-1</sup>) et 10 renouvellements d'air par heure (10 RH, 2000 m<sup>3.h<sup>-1</sup>).</sup></sup>

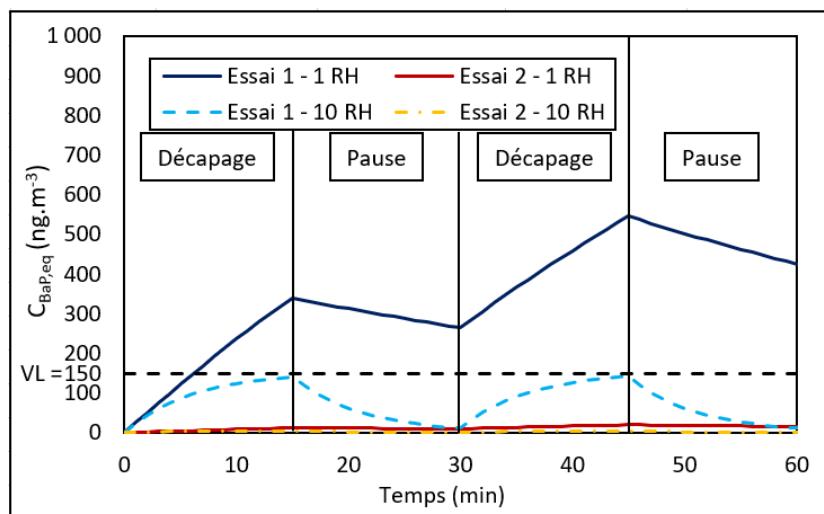


Figure 2. Evolution de la concentration en équivalent BaP calculée pour le scénario simulé

<sup>1</sup> 4,4'-diisocyanate de diphenylmethane

<sup>2</sup> 2,4-Diisocyanate de toluylène

<sup>3</sup> 2,6-Diisocyanate de toluylène

<sup>4</sup> Diisocyanate d'hexaméthylène

<sup>5</sup> 1-(2-methoxyphényl)piperazine

Pour le scénario considéré, les concentrations calculées en isocyanates restent systématiquement inférieures à la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) indicative française, quelle que soit la configuration testée. Cependant, cette valeur est ancienne (1986), et la valeur proposée par l'Union Européenne (2024), plus faible, serait dépassée pour le MDI et le HDI dans le cas d'une faible ventilation (essai 1 - 1 RH).

La Figure 2 illustre l'évolution de la concentration totale en HAP, exprimée en BaP,eq. Pour l'essai 1, la valeur recommandée par la CNAM (150 ng.m<sup>-3</sup> par jour), représentée en pointillés sur la figure, est atteinte en à peine 5 minutes avec une ventilation faible (1 RH), et tout juste respectée à 10 RH. La concentration émise par la configuration 2 reste quant à elle largement sous ce seuil, quelle que soit la ventilation.

#### 4. DISCUSSION ET CONCLUSION

Malgré une reproductibilité limitée due à la réalisation manuelle des opérations de décapage, les premiers essais expérimentaux de décapage laser ont permis de mettre au point la méthodologie de mesure et d'identifier certains composés spécifiques émis lors du décapage de peinture.

Les résultats montrent en particulier que le procédé émet une quantité non négligeable de particules ultrafines et de composés organiques (notamment des HAP). Une adaptation des conditions opératoires permet cependant de limiter la génération de ces composés, notamment en privilégiant un mécanisme de décapage mécanique par rapport au décapage thermique.

La simulation d'un scénario type permet également, à partir de la connaissance du débit d'émission des composés, de mettre en évidence l'importance du dimensionnement de la ventilation ainsi que son lien avec la maîtrise des émissions à la source : plus le procédé génère de polluants, plus la ventilation doit être importante. Pour les cas où la ventilation et le captage ne suffisent pas à maintenir les concentrations sous les valeurs limites, le recours à une protection respiratoire adaptée est indispensable.

La mise en place prochaine à l'INRS d'un banc d'essai automatisé permettra d'améliorer la reproductibilité et la fiabilité des mesures, et d'approfondir les analyses afin d'identifier plus précisément les leviers d'optimisation du procédé pour limiter les émissions à la source.

Bertasa, M., & Korenberg, C. (2022). Successes and challenges in laser cleaning metal artefacts: A review. *Journal of Cultural Heritage*, 53, 100–117. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.10.010>

Boutin, M., Dufresne, A., Ostiguy, C., & Lesage, J. (2006). Determination of Airborne Isocyanates Generated During the Thermal Degradation of Car Paint in Body Repair Shops. *The Annals of Occupational Hygiene*, 50(4), 385–393. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mei075>

Dewalle, P. (2009). *Caractérisation des aérosols émis par interaction laser-matière dans le cadre d'expériences de décapage de peintures par laser* [Thèse de doctorat]. Université Paris Ouest Nanterre La Défense.

Doornaert, B., Pichard, A., & Gillet, C. (2003). *Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs)—Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérogènes: Approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique—FET) et approche par mélanges*. INERIS.

INRS. (2018). *MétroPol HAP M-332*. [https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL\\_332](https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_332)

INRS. (2024a). *MétroPol HDI M-451*. [https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL\\_451](https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_451)

INRS. (2024b). *MétroPol TDI 2-4 TDI 2-6 M-452*. [https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL\\_451](https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_451)

Kahl, T., Lohse, F., Herrmann, M., & Hurtado, A. (2023). Evaluation of particle release during cleaning of coated surfaces with pulsed Nd:YAG laser. *Journal of Aerosol Science*, 172, 106187. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2023.106187>

Labouré, M., Bromblet, P., Orial, G., Wiedemann, G., & Simon-Boisson, C. (2000). Assessment of laser cleaning rate on limestones and sandstones. *Journal of Cultural Heritage*, 1, S21–S27. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(00\)00195-3](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(00)00195-3)

Razab, M. K. A. A., Mohamed Noor, A., Suhaimi Jaafar, M., Abdullah, N. H., Suhaimi, F. M., Mohamed, M., Adam, N., & Auli Nik Yusuf, N. A. (2018). A review of incorporating Nd:YAG laser cleaning principal in automotive industry. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 11(4), Article 4. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.08.002>

US EPA. (1993). *Method 610: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (HAPs)*. Code of Federal Regulations (No. 40 CFR Part 423, Appendix A).

Wiedemann, G., Schulz, M., Hauptmann, J., Kusch, H.-G., Müller, S., Panzner, M., & Wust, H. (2000). Laser cleaning applied in the restoration of a medieval wooden panel chamber at Pirna. *Journal of Cultural Heritage*, 1, S247–S258. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(00\)00133-3](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(00)00133-3)