

FLUIDES DE COUPE : EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES, EFFETS SUR LA SANTÉ ET PRÉVENTION

❶ Formulation des fluides de coupe : suivi des évolutions
P. 20

❷ Expositions aux fluides de coupe et principaux effets sur la santé : une revue des études épidémiologiques
P. 24

❸ Méthodes d'évaluation des expositions aux fluides de coupe
P. 33

❹ Les déterminants de l'exposition appliqués aux brouillards de fluide de coupe
P. 38

❺ Prévention de l'exposition aux fluides de coupe : des solutions concrètes
P. 45

Les fluides de coupe sont utilisés pour usiner des pièces et, plus généralement, pour travailler les métaux dans des secteurs d'activité tels que la métallurgie ou l'automobile. Ces fluides peuvent être à l'origine d'affections, principalement cutanées et respiratoires, du fait d'expositions par contact ou par inhalation de brouillards d'huile générés par les machines d'usinage. Les compositions de ces fluides, qui ont beaucoup évolué au cours du temps, peuvent aujourd'hui comprendre de nombreuses substances. La complexité chimique de ces fluides entraîne des difficultés dans la mesure des expositions et également dans la mise en œuvre de moyens de prévention. Ce dossier fait un point sur l'évolution de la formulation de ces fluides, leurs effets sur la santé, les moyens d'évaluation des expositions et sur l'état de la prévention dans les lieux de travail où ils sont mis en œuvre. Dans le dernier article, deux exemples de démarches de prévention mises en œuvre dans des entreprises sont également présentés.

CUTTING FLUIDS: OCCUPATIONAL EXPOSURE, HEALTH IMPACT AND PREVENTION –
Cutting fluids are used to machine parts, and more generally when working with metals in industries such as metalworking or automobile manufacturing. They mainly cause skin and respiratory disorders, due to contact or inhalation exposure to fluid mists generated by the machining tools. The composition of cutting fluids has evolved considerably over time, and may today include many substances. The chemical complexity of these fluids leads to challenges related to measuring exposure and implementing preventive measures. This dossier reviews how the formulation of these fluids has changed, their health impact, how to assess exposure, and the current state of prevention in workplaces where they are used. The final article presents two examples of prevention approaches implemented in companies.

FORMULATION DES FLUIDES DE COUPE : SUIVI DES ÉVOLUTIONS

Au cours des vingt dernières années, la formulation des fluides de coupe a très fortement été modifiée. Grâce à une meilleure connaissance des substances, de leur impact sur la santé et l'environnement (mise en place du règlement « Reach »), certaines molécules dangereuses entrant dans la composition des fluides de coupe ont été abandonnées, ce qui a obligé les formulateurs à modifier leurs compositions en s'orientant vers des composés moins dangereux, tout en maintenant les performances des fluides pour l'industrie. On peut ainsi suivre les évolutions de formulation au fil des contraintes sanitaires et environnementales.

**BÉNÉDICTE
BIRON**
Commission
HSE de la
Chambre
syndicale
nationale des
lubrifiants
(CSNIL)

Les fluides de coupe sont des composants essentiels dans le travail des métaux. Leur rôle est de faciliter les opérations de travail des métaux, en utilisant leurs propriétés physicochimiques, qui permettent deux actions principales : la lubrification et le refroidissement. Ils sont appliqués par arrosage sur la partie active des outils, ils prolongent leur vie, aident à l'évacuation des copeaux dans la zone de coupe et refroidissent également pièces et outils, en évacuant la chaleur générée lors des opérations de coupe. Les fluides se répartissent en deux grandes familles :

- les fluides dit « entiers » ou huiles entières, sont des fluides qui ne contiennent pas d'eau dans leur composition. Ils ont comme fonction prin-

cipale la lubrification de la coupe, grâce à leur teneur élevée en corps gras. Ils sont généralement à base d'huiles minérales d'origine pétrolière, ou à base d'huiles synthétiques issues de l'industrie chimique. Ils peuvent aussi contenir des huiles végétales comme les huiles de soja, de colza, de tournesol ou d'autres origines, dans des proportions plus ou moins importantes, ainsi que différents additifs chimiques en fonction des applications pour lesquelles ils sont formulés ;

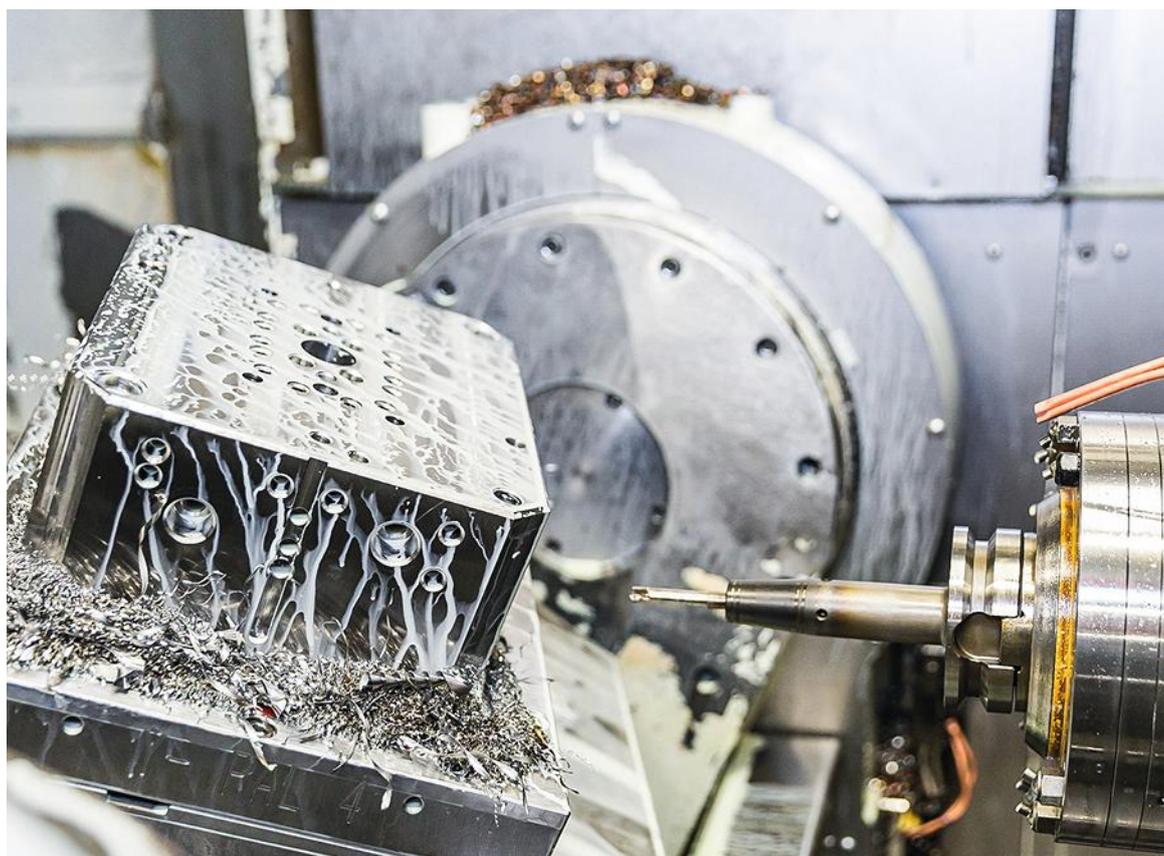
- les fluides aqueux, qui ont comme fonction principale le refroidissement, grâce à la capacité thermique massique élevée de l'eau. Ces fluides, commercialisés sous forme concentrée, sont utilisés en dilution dans l'eau et sont de deux types :
 - les émulsions, constituées de gouttelettes

ENCADRÉ 1 TERMINOLOGIE

Différents termes peuvent être utilisés pour désigner des produits proches : fluide de coupe, fluide d'usinage, ou fluide de travail des métaux.

- La coupe et l'usinage désignent des procédés pour lesquels le métal est travaillé par enlèvement de matière (fraisage, tournage, décolletage, rectification...), alors que le terme « travail des métaux » est plus général et désigne également des procédés de mise en forme du métal par déformation (emboutissage, frappe à froid...).
- Dans ce dossier, le terme de « fluide de coupe » sera généralement utilisé même si, dans certains cas, il peut également inclure des fluides utilisés pour des opérations de déformation des métaux.

- Les opérations d'usinage génèrent la formation « d'aérosols de fluide de coupe » : il s'agit de particules solides ou liquides en suspension dans l'air et le mélange de gaz et de vapeur dans lequel elles sont en suspension. Ces aérosols sont souvent appelés « brouillards d'huile », même si cela est impropre dans le cas des fluides de coupe aqueux (le mot « brouillard » désigne, dans le langage courant, des suspensions de gouttelettes d'eau). Dans la suite du dossier, le terme de « brouillards d'huile » sera généralement utilisé pour désigner les aérosols de fluide de coupe.



Fabrication de moules en acier par usinage de haute précision mettant en œuvre des fluides de coupe dans les machines à commande numérique.

© Cédric Pasquini pour l'INRS/2020

d'huile additivée, dispersées dans l'eau et stabilisées par des tensioactifs ;

- les solutions, dont tous les composants sont solubles dans l'eau.

Une huile entière est toujours constituée d'une part importante d'huile (minérale, synthétique et/ou végétale), dans laquelle sont incorporés des additifs de performance comme les additifs soufrés, phosphorés, tels que des dithiophosphates de zinc ; ou encore, dans certaines compositions, des paraffines chlorées.

Les huiles de base pétrolières ont beaucoup évolué au fil du temps, ainsi que les méthodes de raffinage. Depuis les années 1980, les huiles peu raffinées avec des taux élevés d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont été remplacées par des huiles très hydrogénées dont les cycles aromatiques sont détruits.

Il est néanmoins très important de suivre les taux de HAP dans les huiles en service, car celles-ci, au cours de leur utilisation, peuvent s'enrichir en polluants ou huiles étrangères et ainsi, voir leur taux en HAP augmenter. Il existe des recommandations sur le suivi des huiles en service (*Guide des bonnes pratiques pour une utilisation et une élimination sécurisée des fluides de travail des métaux de UKLA et Recommandation R 451 de la Cnam du 19 mai 2015 ; Cf. En savoir plus*).

Les paraffines chlorées, encore très utilisées

jusque dans les années 2000, sont aujourd'hui pratiquement absentes des compositions. Les paraffines chlorées représentent une très grande famille, répartie en trois catégories en fonction de la longueur de la chaîne carbonée : les paraffines chlorées à chaînes courtes (C10-C13), à chaînes moyennes (C14-C17) et à chaînes longues (\geq C18). Dans les années 1980 et 1990, les paraffines chlorées à chaînes courtes étaient très utilisées dans les huiles entières car elles étaient peu chères et donnaient une formulation « facile et rapide ». Au début des années 2000 (*Décision européenne n° 2003/549/CE ; Cf. Pour en savoir plus*), les paraffines chlorées à chaînes courtes ont été interdites dans les fluides de coupe, et les contraintes environnementales imposées pour les rejets contenant des paraffines chlorées, quelle que soit la longueur de chaîne, ont poussé le formulateur à les remplacer par d'autres additifs moins dangereux pour la santé et pour l'environnement, tout en conservant des performances similaires pour ses produits finis. Ainsi, les paraffines chlorées, qui entraient dans la composition de la majorité des fluides entiers, ont été pratiquement supprimées en l'espace de vingt ans.

Si les fluides de coupe entiers ont évolué, ce sont les fluides aqueux qui ont vu le plus de changements dans leur composition au cours de ces dernières années.



Des changements dictés par la réglementation

Le moteur de ce changement est de façon incontestable le règlement « Reach » (Cf. *Pour en savoir plus*) et les différentes évolutions des classifications qui y sont rattachées, mais également pour la France la recommandation R 451 de la Cnam (Cf. *Pour en savoir plus*), qui a aidé les utilisateurs dans leur choix de produits moins dangereux.

Un fluide soluble est toujours composé d'huile ou de polymères amenant la lubrification, d'émulgateurs qui permettent l'émulsion, d'additifs de performance, d'additifs anticorrosion, d'amines et d'acides gras. De nombreux fluides, afin de permettre leur conservation dans le temps, contiennent encore des produits biocides. Depuis la mise en place de la réglementation sur les produits biocides (BPR, Règlement européen entré en vigueur le 1^{er} septembre 2013 et remplaçant la directive européenne n° 98/8/CE ; Cf. *Pour en savoir plus*), le nombre de molécules biocides disponibles pour les fluides de coupe a été drastiquement réduit et ne restent à disposition du formateur que quelques-unes d'entre elles. En effet, pour être utilisées dans les fluides de travail des métaux, ces molécules doivent avoir été approuvées au niveau européen pour cette catégorie d'usage (22 catégories sont prévues par la réglementation). Il n'est pas possible d'utiliser un biocide enregistré dans une autre catégorie. Pendant très longtemps, les bactéricides utilisés pour la protection des fluides étaient des « libérateurs de formaldéhyde ». Au fil du temps, le formaldéhyde contenu dans la molécule se libérait dans l'émulsion et limitait la prolifération bactérienne. Le classement du formaldéhyde comme cancérigène de catégorie 1B par l'Union européenne implique, pour l'utilisateur, l'application des règles de prévention pour les agents CMR (cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques)

conduit, et par conséquent, à un bannissement des libérateurs de formaldéhyde.

Reste à la disposition du formateur une famille : les isothiazolinones, molécules assez efficaces mais très allergisantes, et qui ont tendance à être proscrites ou mises sous surveillance par de nombreux utilisateurs de fluides de coupe, ce qui oblige le formateur à repenser la conception de son fluide. Le formateur ne « protège » plus le fluide des attaques bactériennes et fongiques, mais fait en sorte que, en utilisant des synergies, en repensant les équilibres entre certaines substances, les molécules contenues dans la composition du fluide soient aussi peu « attaquables » ou peu utilisables que possible par des micro-organismes, limitant ainsi leur prolifération et donc la dégradation du fluide.

Les amines, que l'on trouve encore en très grande majorité, sont les éthanolamines. Elles sont faciles à utiliser et surtout peu onéreuses. Elles sont facilement assimilables par les bactéries, mais dangereuses pour la santé des opérateurs. La diéthanolamine, qui est une éthanolamine secondaire, était encore très utilisée dans les années 1990 mais a progressivement été bannie, car il a été prouvé qu'elle générerait, en réaction avec les nitrites, des nitrosamines cancérigènes. Les nitrites ne sont plus utilisés depuis plus de 30 ans dans les fluides de coupe mais ils sont souvent présents dans les eaux industrielles utilisées pour la dilution des concentrés. Les amines secondaires ont été remplacées par des amines plus complexes, non génératrices de nitrosamines.

L'événement majeur pour l'évolution des fluides a été l'introduction de l'acide borique dans la liste des substances SVHC (liste des substances très préoccupantes) du règlement Reach (*Liste SHVC du 8 juin 2010 ; Cf. En savoir plus*). Dans les fluides de coupe, l'acide borique est neutralisé par une

POUR EN SAVOIR +

- Guide des bonnes pratiques pour une utilisation et une élimination sécurisée des fluides de travail des métaux de UKLA, traduit par la CSNIL : www.ukla.org.uk/wp-content/uploads/UKLA-HSE-Good-Practice-Guide-for-Safe-Handling-and-Disposal-of-Metalworking-Fluids.pdf (en anglais). Une version française sera disponible prochainement sur le site de la CSNIL.
- Recommandation R 451 de la Cnam (CTN A) du 19 mai 2015 : www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/31228/document/r451.pdf.

- Décision européenne n° 2003/549/CE : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32003D0549&from=en>.
- Règlement « Reach » : www.ecologie.gouv.fr/reglementation-reach.
- BPR, Règlement européen du 1^{er} septembre 2013 et remplaçant la directive européenne n° 98/8/CE : <https://echa.europa.eu/fr/regulations/biocidal-products-regulation/understanding-bpr>.
- Liste SVHC du 8 juin 2010 : <https://echa.europa.eu/fr/>

candidate-list-table.

- Directive n° 2003/53/CE : <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:178:0024:0027:FR:PDF>.
- Dossier Travail & sécurité sur les fluides de coupe : www.travail-et-securite.fr/ts/dossier/Des%20produits%20à%20ne%20pas%20mettre%20entre%20toutes%20les%20mains.html.
- Dossier INRS sur les fluides de coupe : www.inrs.fr/risques/fluides-coupe/demarche-prevention.html.

amine, formant un « borate d'amine » dont les propriétés sont multiples. Ce borate est surtout utilisé pour ses excellentes propriétés anticorrosion ; il apporte également de très bonnes propriétés biostatiques aux fluides ; si ce n'est pas un biocide, il joue un rôle important sur la régulation des contaminations bactériennes. Le borate d'amine apporte un pouvoir tampon important au fluide, permettant de neutraliser les métabolites acides rejetés par les micro-organismes. Les fluides solubles à base de borate d'amine sont encore très largement utilisés car ils sont performants, ont une bonne tenue dans le temps et sont économiquement intéressants. Néanmoins, la classification de l'acide borique, comme toxique pour la reproduction, et son inclusion dans la liste SVHC ainsi que les contraintes que cela impose, obligent les formulateurs à concevoir des fluides sans acide borique, donc sans borate. Ces fluides sans borate existent depuis longtemps mais, à l'origine, présentaient souvent le très gros inconvénient d'une faible résistance aux micro-organismes, entraînant une mauvaise tenue dans le temps. Désormais, de nouvelles compositions performantes de fluides, sans borate et sans biocides, sont à la disposition des utilisateurs.

Au début des années 2000, les nonylphénols ont été interdits dans les fluides de coupe (*Directive n° 2003/53/CE ; Cf. Pour en savoir plus*) ; il a fallu composer avec d'autres molécules éthoxylées, capables d'émulsionner efficacement huile et additifs de performance. Les alcools gras et autres éther-oxydes ont été introduits en remplacement des nonylphénols et sont toujours utilisés dans les formulations ; ils sont ajustés très précisément pour contrôler une mise en émulsion facile, sans déphasage, et pour permettre un contrôle efficace du moussage.

La contrainte pour le formulateur augmente donc : ne plus utiliser de biocides, ne plus utiliser de borates, ne plus utiliser d'éthanolamines, etc., tout en gardant les mêmes performances de stabilité dans le temps, de résistance aux micro-organismes, et en étant économiquement rentables.

Les formulations doivent être ajustées très précisément. Le formulateur remplace désormais les éthanolamines par des cocktails d'amines complexes liposolubles neutralisées *in situ* dans les mélanges par différents acides carboxyliques. Ces savons (du point de vue de la composition chimique), plus complexes que les précédents, sont difficilement attaquables par les micro-organismes et permettent d'obtenir des fluides sans biocides.

Les formulations deviennent plus complexes, elles ne comportent plus une dizaine de composants, mais souvent plus de 25, dont quatre ou cinq amines différentes, neutralisées avec autant d'acides carboxyliques.



© Gael Kerbaol pour l'INRS/2016

Le formulateur doit réaliser des études poussées et s'inspirer des molécules utilisées dans des secteurs comme la cosmétique, car les deux secteurs (cosmétiques et fluides de coupe) présentent souvent des contraintes proches alors que très peu de nouvelles molécules, présentant des propriétés physicochimiques intéressantes pour l'industrie, arrivent sur le marché.

Au fil du temps et de l'évolution des connaissances sur l'impact des substances sur la santé des utilisateurs, le cahier des charges du formulateur a donc très largement évolué ; le premier critère dans la formulation est désormais d'éviter d'utiliser des substances controversées, pouvant être visées à plus ou moins long terme par une interdiction ou pouvant entraîner des risques pour la santé des opérateurs.

Pour répondre aux questions que peuvent se poser les préventeurs sur ces mélanges de substances, souvent complexes, très utilisées dans l'industrie, le lecteur trouvera dans ce dossier les articles suivants :

- Expositions aux fluides de coupe et principaux effets sur la santé : une revue des études épidémiologiques (*Cf. Article pp. 24-32*) ;
- Méthodes d'évaluation des expositions aux fluides de coupes (*Cf. pp. 33-37*) ;
- Les déterminants de l'exposition appliqués aux brouillards de fluide de coupe (*Cf. pp. 38-44*) ;
- Prévention de l'exposition aux fluides de coupe : des solutions concrètes (*Cf. pp. 45-50*). ●

Usinage de pièces effectué sur des machines équipées d'enceintes de confinement.

EXPOSITIONS AUX FLUIDES DE COUPE ET PRINCIPAUX EFFETS SUR LA SANTÉ : UNE REVUE DES ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES

Peau qui démange, nez qui coule, gêne respiratoire, toux persistante dans un contexte de travail des métaux, voire suspicions de cancers... Les fluides de coupe peuvent être à l'origine d'un certain nombre d'effets sur la santé des travailleurs. Quels sont ces effets, connus ou suspectés, rapportés par les études épidémiologiques ?

ÈVE
BOURBKARD,
VALÉRIE
DEMANGE
INRS,
département
Épidémiologie
en entreprise

En 2017, près d'un million et demi de travailleurs étaient exposés aux fluides de coupe en France (fluides de coupe aqueux ou synthétiques, huiles minérales entières et huiles synthétiques) [Dares, 2020]¹. Ces fluides sont utilisés notamment au cours des étapes d'usinage des métaux, d'électro-érosion, ou de déformation des métaux. Le processus d'usinage de pièces métalliques génère un aérosol complexe, contenant des particules solides et/ou liquides en suspension dans un gaz. Cet aérosol, ou brouillard d'huile, peut rester en suspension dans l'air pendant plusieurs heures, souvent dans l'environnement respiratoire du travailleur. Son exposition aux fluides de coupe peut se produire par inhalation du brouillard d'huile, par contact cutané, direct ou *via* des vêtements souillés, et éventuellement par ingestion. Ainsi, les effets sur la santé les plus documentés concernent l'appareil respiratoire (pneumopathie d'hypersensibilité, asthme, symptômes respiratoires) et la peau (dermatites de contact et cancers). Outre la peau, d'autres localisations de cancer ont été étudiées. L'objectif de cet article est de faire le point sur les principales études épidémiologiques publiées.

Fluides de coupe et santé respiratoire

Dans son rapport sur les conséquences sur la santé des fluides de coupe paru en 2009, l'Afsset² identifie les pathologies du parenchyme pulmonaire et les symptômes et pathologies de l'arbre trachéobronchique.

Les pathologies du parenchyme pulmonaire comprennent la pneumopathie lipidique (publication

de cas), la pneumopathie et la fibrose dues à l'inhalation de particules de métaux durs (cobalt et carbure de tungstène : études transversales des années 1980 à 1990 [Sprince, 1988 ; Meyer-Bisch, 1989 ; Fischbein, 1992, in : Kennedy, 1995], la fièvre de Pontiac (publication d'une épidémie dans une usine de construction automobile [Herwaldt, 1984], pas d'autre publication depuis) et la pneumopathie d'hypersensibilité (PH). Encore appelée « alvéolite allergique extrinsèque », cette pathologie est une inflammation du parenchyme pulmonaire par mécanisme immunologique allergique humoral et cellulaire, en réaction à la présence d'antigènes et de facteurs favorisants, génétiques ou environnementaux [Spagnolo, 2015]. Les PH surviennent le plus souvent sous forme de « clusters » au sein d'une entreprise, faisant suite à la colonisation de réservoir de fluide de coupe aqueux par des micro-organismes [Afsset, 2009]. Le diagnostic clinique est difficile à poser et à relier avec certitude aux fluides de coupe utilisés. De 1990 à 2011, 27 clusters ont été rapportés dans la littérature [Rosenman, 2015], avec une diminution du nombre de publications à partir des années 2000 [Burton, 2012]. En Grande-Bretagne, les fluides de coupe sont devenus en vingt ans la première cause de PH d'origine professionnelle, représentant 35 % des causes de cette pathologie [Barber, 2017]. Une raison possible est le développement de l'utilisation des fluides aqueux. En France, l'analyse des données du Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P), entre 2001 et 2015, retrouve 10 cas de PH rapportés aux fluides de

coupe sur 186 cas de PH professionnelle [Paris, 2017]. De manière générale, de nombreux agents dans les fluides de coupe pourraient en être à l'origine : bactéries, mycobactéries, moisissures, biocides, émulsifiants, masqueurs d'odeurs, chrome et cobalt dissous [Burge, 2016]. Une revue de la littérature sur la période 1999-2019 a permis d'identifier les antigènes ayant causé cette pathologie et les contextes environnementaux qui y sont liés [Petnak, 2020]. Les micro-organismes associés aux fluides de coupe retrouvés étaient les suivants :

- **bactéries** : *Acinetobacter spp*, *Bacillus spp*, *Ochrobactrum spp*, *Saccharomonospora viridis*, *Thermoactinomyces vulgaris*, *Thermoactinomyces candidus* ;
- **moisissures** : *Aspergillus spp*, *Candida albicans*, *Penicillium spp*, *Fusarium solani*, *Fusarium spp* ;
- **mycobactéries** : *Mycobacterium immunogenum*.

Une étude récente a incriminé les fluides de coupe dans la genèse d'une nouvelle pathologie de l'appareil respiratoire associant bronchiolite, inflammation des canaux alvéolaires et emphyseme (en anglais, Bade : *bronchiolitis, alveolar ductitis and emphysema*). Deux fluides de coupe étaient

suspectés d'en être à l'origine : l'un était conçu pour promouvoir la croissance de *Pseudomonas Pseudoalcaligenes*, assurant la stabilité du fluide en inhibant la croissance d'autres micro-organismes pouvant dégrader le fluide ; l'autre était un fluide synthétique contenant des biocides et était utilisé dans une moindre mesure. Cinq travailleurs en production présentant des symptômes respiratoires d'aggravation progressive se sont révélés atteints par cette nouvelle pathologie. L'origine professionnelle de cette affection était probable du fait de l'absence d'antécédents personnels ou familiaux, de cas similaires dans les services de soins de leur environnement et du fait de l'amélioration des symptômes en dehors du travail et d'une nouvelle dégradation lors du retour au poste de travail. En ce qui concerne la ou les agents responsables, les auteurs évoquent le rôle possible des endotoxines, de même que de bactéries dont *Pseudomonas pseudoalcaligenes*, qui colonisait en grande quantité les fluides. Ils n'excluent cependant pas le rôle d'autres constituants des fluides de coupe, d'origine ou modifiés par les bactéries présentes [Cumings, 2019].

En 2020, une étude a reposé sur les prélèvements réalisés lors de l'étude citée ci-dessus, dans

Fabrication de pièces en titane, aluminium ou inconel pour l'industrie aéronautique. Les machines d'usinages sont dotées d'un système d'aspiration des brouillards d'huile générés par l'utilisation de fluides lubrifiants.



© Vincent Nguyen pour l'INRS/2020



Spécialisée dans la maintenance de pièces métalliques, l'entreprise a mis en place des améliorations dans ses ateliers, et notamment installé des capteurs de brouillards d'huile.

l'atmosphère des ateliers de l'usine et dans les fluides de coupe [Wu, 2020]. De plus, les biopsies pulmonaires de quatre travailleurs atteints de BADE ont été comparées à celles de 16 patients hospitaliers n'ayant jamais travaillé dans l'usine. La composition microbienne des biopsies pulmonaires des travailleurs malades était plus proche de celle des fluides de coupe que ne l'était celle des biopsies des patients hospitaliers. Enfin, des écouvillonnages du nez, de la peau et de la cavité buccale à visée exploratoire ont été réalisés auprès de 302 travailleurs de l'usine, situés dans trois zones différentes : administration, magasin et assemblage. Les prélèvements des travailleurs de ces deux dernières zones, exposant aux fluides de coupe, avaient une composition microbienne plus proche de celles des fluides de coupe que les prélèvements des travailleurs de l'administration. Cela suggère une transmission des micro-organismes des fluides de coupe vers les travailleurs exposés [Wu, 2020]. Concernant les pathologies de l'arbre trachéo-bronchique, l'asthme, de mécanisme allergique ou irritatif, est associé, dans plusieurs études, à l'exposition aux brouillards de fluides de coupe, mais la substance responsable de cet asthme est

rarement identifiée avec certitude [Afsset, 2009]. Le nombre enregistré de cas d'asthme, en lien avec le travail, causés par les fluides de coupe apparaît en diminution après 2005 au Michigan et au Royaume-Uni, d'après les systèmes de surveillance Sensor et Shield respectivement [Rosenman, 2015]. En France également, une tendance à la baisse du nombre de cas d'asthmes en relation avec le travail enregistrés dans le RNV3P a été mise en évidence dans le secteur de la manufacture de produits métalliques sur la période 2001-2009 [Paris, 2012]. Les centres pour le contrôle et la prévention des maladies (*Centers for Disease Control* : CDC) américains ont publié en 2019 une évaluation de risque quantitative concernant l'exposition aux fluides de coupe et les maladies respiratoires [Park, 2019]. Elle portait sur des études publiées et des évaluations de risque faites par l'Institut national pour la sécurité et la santé professionnelles (*National institute for occupational safety and health* : Niosh) dans des entreprises à la demande de travailleurs ou d'employeurs. Cela concernait des utilisations de fluides de coupe antérieures aux années 2000. Le type de fluides de coupe n'était pas distingué et les risques d'asthme



© Vincent Nguyen pour l'INRS/2021

et de PH étaient évalués ensemble. Le risque global au cours de la vie professionnelle était estimé à 3 %, lors d'une exposition des travailleurs à une concentration de fluides de coupe de 0,1 mg/m³, si la prévalence de contamination des fluides de coupe susceptible de générer un cluster était de 5 % [Park, 2019]. Ilgaz et *al.* ont évalué l'efficacité d'appareils de protection respiratoire individuels utilisés par des travailleurs présentant un asthme professionnel aux fluides de coupe et continuant de travailler dans cet environnement [Ilgaz, 2019]. Les appareils permettaient de réduire l'obstruction des voies aériennes des travailleurs (élément de surveillance du souffle des asthmatiques) mais sans la supprimer complètement.

Parmi les conséquences sur la santé respiratoire de l'exposition aux fluides de coupe, les symptômes respiratoires sont plus fréquents que l'asthme et la PH [Rosenman, 2015]. Il s'agit de toux chronique, expectorations chroniques, bronchite chronique, dyspnée, et symptômes de rhinite (rhinorrhée, prurit nasal, gêne nasale) [Afsset, 2009 ; Rosenman, 2015 ; Park, 2008]. Les substances responsables ne sont pas identifiées [Afsset, 2009]. Ces symptômes seraient apparus à partir de l'utilisation de fluides de coupe à composante aqueuse [Rosenman, 2015]. Cependant, des études transversales ont mis en évidence une association entre exposition à des huiles entières et symptômes respiratoires (toux chronique [Ameille, 1995], expectorations, sifflements et dyspnée [Greaves, 1997]). La fonction ventilatoire peut être altérée par l'exposition aux brouillards de fluides de coupe comme le rapportent plusieurs études qui montrent une diminution peu importante, essentiellement du volume expiratoire maximal par seconde (VEMS). Cette altération de la fonction ventilatoire est observée pour des niveaux d'exposition fréquemment retrouvés en entreprise et pour tous les types de fluides de coupe [Afsset, 2009]. Une relation dose-réponse entre la baisse du VEMS à court terme (entre le début et la fin de poste ou le début et la fin de semaine de travail) et l'exposition aux fluides de coupe tous fluides confondus, ou uniquement huiles entières respectivement, a été mise en évidence [Kennedy, 1989 ; Kriebel, 1997 in : Afsset, 2009]. Toutefois, une récente étude norvégienne, menée parmi des travailleurs de forage sur des plateformes pétrolières *off-shore*, n'a pas révélé d'association en faveur d'un rôle de l'exposition professionnelle sur une baisse éventuelle du VEMS [Kirkhus, 2018].

Fluides de coupe et peau

Outre l'appareil respiratoire, la peau est souvent atteinte lors de l'exposition aux fluides de coupe. Ainsi, les dermatites de contact (encore appe-

lées eczémas) sont fréquentes parmi les travailleurs exposés [Afsset, 2009]. Une étude menée en Suisse a décrit les maladies professionnelles attribuées aux fluides de coupe sur la période 2004-2013 [Koller, 2016]. Sur 1385 maladies professionnelles, 92 % concernaient la peau. Parmi celles-ci, le diagnostic prédominant était la dermatite de contact (98 %). Dans cette étude, une analyse de tendance fait ressortir que la prévalence des maladies cutanées liées aux fluides de coupe diminuait sur la période étudiée. En 2019, Park et *al.* ont mis en évidence que la prévalence de symptômes cutanés était de 0,10 à 0,85 pour 1000 dans les études mises en place, suite à la découverte de clusters de pathologies respiratoires dues aux fluides de coupe, illustrant la coexistence des atteintes respiratoire et cutanée dans ce contexte d'exposition professionnelle. Sur la vie entière, la prévalence de l'eczéma des mains parmi les métallurgistes est évaluée, selon les études, entre 30% et 63 %. L'eczéma des mains en relation avec le travail débute fréquemment pendant l'apprentissage [Reich, 2020]. Les dermatites de contact sont considérées comme de mauvais pronostic, car elles peuvent persister même après l'arrêt de l'exposition aux fluides de coupe [Afsset, 2009]. Cependant, des études sur l'efficacité de mesures de prévention (enseignement sur la maladie, conseils médicaux adaptés) dans cette population, lors de l'apprentissage ou plus tard dans la vie professionnelle, montrent qu'elles mènent à une diminution de l'incidence [Reich, 2020] ou une diminution de la sévérité de l'atteinte [Wilke, 2018].

La dermatite de contact peut être d'origine irritative ou allergique. L'origine irritative est prédominante parmi les travailleurs exposés aux fluides de coupe, représentant 50% à 80 % des dermatites de contact [Afsset, 2009]. En Amérique du Nord, l'étude rétrospective de 39331 tests de sensibilisation (*patch tests*) sur la période 1998-2014, réalisés auprès de patients adressés pour suspicion de dermatite, a mis en évidence que les travailleurs en production avaient des prévalences de dermatite de contact d'irritation et allergique plus élevées que les travailleurs n'étant pas en production. Parmi les travailleurs en production, 6,8 % des *patch tests* étaient positifs pour les fluides de coupe [Warshaw, 2017]. Du fait du grand nombre de produits chimiques intervenant dans la composition des fluides de coupe, l'identification des irritants ou allergènes responsables peut être difficile [Afsset, 2009 ; Schubert, 2020 ; Nett, 2021]. Une mise à jour de la littérature depuis 2015 a permis de répertorier des publications de cas de dermatite de contact allergique impliquant le *N*-butyl-1,2-benzisothiazolin-3-one, le 2-butyl-1,2-benzisothiazol-3(2H)-one,



le 2-amino-2-méthyl-1-propanol, la colophane et la méthyl-chloroisothiazolinone/méthyliso-thiazolinone [Nett, 2021]. Une étude épidémiologique en Allemagne a conduit à décrire, sur la période 2012-2017, les expositions professionnelles et les composés auxquels étaient sensibilisés 230 métallurgistes, pour qui une dermatite professionnelle était suspectée [Schubert, 2020]. Les sensibilisations les plus fréquemment observées concernaient le formaldéhyde et les produits en libérant, l'acide abiétique, la colophane et la monoéthanolamine. La sensibilisation à la méthylisothiazolinone était fréquente. Fluides de coupe et produits de soins pour la peau représentaient les expositions professionnelles les plus fréquentes. La même étude, menée à plus grande échelle par la même équipe, a conduit à exploiter les résultats de tests de sensibilisations, sur la période 2010-2018, de 804 travailleurs utilisant quotidiennement des fluides de coupe et présentant un diagnostic de dermatite professionnelle. En plus des sensibilisations aux substances précédentes, celle au butylcarbamate-iodopropynyl était fréquente [Schubert, 2020b]. D'autres affections cutanées, en lien avec l'exposition aux fluides de coupe, moins fréquentes que les dermatites de contact, ont été rapportées. Pour les huiles entières, il s'agit des folliculites et acnés, ainsi que des kératoses, lésions précancéreuses cutanées, devenues rares avec l'amélioration du raffinage des huiles. Pour les fluides aqueux, il s'agit des hyperpigmentations dues aux parfums et des leucodermies dues aux phénols, devenues exceptionnelles. Les granulomes suite à la pénétration accidentelle sous pression d'huile dans la peau sont également rares [Afsset, 2009] (Cf. Encadré 1).

Fluides de coupe et cancers

Les auteurs des études épidémiologiques s'intéressant à la cancérogénicité potentielle des fluides de coupe sont confrontés à plusieurs difficultés. En effet, l'exposition aux fluides de coupe est difficilement caractérisable en raison de la présence de nombreux éléments chimiques, de l'évolution de la composition des fluides de coupe au cours du temps et lors de leur utilisation. De plus, l'étude des cancers, en raison de leur survenue relativement rare et potentiellement retardée depuis le début de l'exposition, entraîne la mise en place d'une méthodologie épidémiologique ne permettant pas une quantification précise des expositions. Enfin, ces études ne tiennent pas nécessairement compte des caractéristiques individuelles de chaque sujet pouvant influencer la relation entre l'exposition aux fluides de coupe et la survenue du cancer (consommation de tabac et d'alcool, autres expositions professionnelles...).

La littérature épidémiologique permettant d'évaluer le risque potentiel de cancer associé à des fluides de coupe est relativement limitée. Cette revue des études épidémiologiques synthétise les résultats obtenus par localisation de cancer. Tout d'abord, sont présentées les localisations pour lesquelles des études rapportent une forte association (cancers cutanés et du scrotum). Ensuite, sont proposées les localisations pour lesquelles les résultats sont en faveur d'une association (vessie, rectum et larynx). Puis, sont indiquées les localisations pour lesquelles les résultats des études épidémiologiques sont discordants (poumon, pancréas, sein). Enfin, sont présentées les localisations qui ne semblent pas être associées à des expositions aux fluides de coupe (estomac, foie et voies biliaires, œsophage, prostate, côlon).

ENCADRÉ 1

LISTE NON EXHAUSTIVE D'IRRITANTS ET D'ALLERGÈNES DANS LES FLUIDES DE COUPE [AFSSET, 2009]

Les agents irritants sont surtout liés aux fluides aqueux :

- le pH alcalin des fluides aqueux ;
- les additifs émulsifiants (acide abiétique, diéthanolamides, acide oléique...) ;
- les additifs anticorrosifs (triéthanolamine, mercaptobenzothiazole, sulfate d'hydrazine, chromates...) ;
- les additifs biocides (formaldéhyde et libérateurs de formaldéhyde, isothiazolinones, phénols, morpholines, éthylènediamine...) ;
- les lésions de la barrière cutanée dues aux traumatismes mécaniques.

Les agents pouvant être responsables de dermatites de contact allergiques :

- les biocides (formaldéhyde et libérateurs de formaldéhyde, morpholines, éthylènediamine, isothiazolinones...) ;
- les métaux (chrome, cobalt, nickel) dont la concentration augmente dans les fluides de coupe usagés ;
- les additifs émulsifiants (acide abiétique contenu dans la colophane, diglycolamine) ;
- les additifs anticorrosion (borates d'alkanolamines, monoéthanolamine, diéthanolamine, triéthanolamine) ;
- les parfums (baume du Pérou).

Cancers cutanés et du scrotum

Les huiles minérales (issues du pétrole brut) utilisées dans différentes activités professionnelles comme l'usinage des métaux, ont fortement et régulièrement été associées avec les cancers épidermoïdes de la peau, et en particulier du scrotum. Au cours de la période 1910-1975, près d'une trentaine d'études, menées dans différents pays, ont été publiées. Elles concernent l'analyse des séries de cas de cancers du scrotum et d'autres localisations de la peau, associées à des expositions professionnelles aux huiles minérales. Dans les années 1970, des études épidémiologiques ont mis en évidence un risque de cancer du scrotum parmi des travailleurs sur machines-outils. Ainsi, en 1984, les experts du Centre international de recherche sur le cancer (Circ) ont considéré qu'il y avait « suffisamment de preuves à partir d'études réalisées chez l'homme » pour classer « les huiles minérales (contenant des additifs et des impuretés) utilisées pour les activités d'usinage des métaux, de traitement du jute et de filature, cancérigènes pour l'Homme » (groupe 1) [Circ, 1984]. Cependant, les processus de production de ces huiles ont évolué au cours du temps et les méthodes de fabrication plus récentes ont permis d'obtenir des produits hautement raffinés qui contiennent de plus petites quantités de contaminants, tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). C'est pourquoi les experts du Circ ont affiné leur conclusion en 1987, en classant les huiles minérales (issues du pétrole brut) selon leur degré de raffinage : non ou légèrement traitées dans le groupe 1 (cancérogènes pour l'Homme) et hautement raffinées dans le groupe 3 (ne peuvent pas être classées quant à la cancérogénicité pour l'homme) [Circ, 1987]. Sur la base de nouvelles études épidémiologiques publiées [Zhao, 2005], les experts ont confirmé en 2012 la cancérogénicité pour la peau (notamment au niveau du scrotum) des huiles minérales non ou légèrement traitées [Circ, 2012]. En raison des changements survenus dans la composition des huiles minérales au cours des dernières décennies, les expositions actuelles aux fluides de coupe pourraient être associées à un risque plus faible de ces cancers.

Cancer de la vessie

À partir des années 1970, plusieurs études épidémiologiques cas-témoins ont été conduites en population générale, avec pour objectif de rechercher une éventuelle association entre des intitulés d'emploi et le cancer de la vessie. La plupart de ces études ont rapporté un risque de cancer de la vessie associé à certains emplois, au cours desquels des fluides de coupe avaient pu être utilisés : opérateurs de machine-outil [Steenland, 1987 ; Silverman, 1989 ; Band, 2005], opérateurs



© Vincent Nguyen pour l'INRS/2020

de machines à mouler le métal ou le plastique [Zheng, 2002 ; Colt, 2004 ; Colt, 2011], tourneurs sur métaux [Schiffler, 1987 ; Claude, 1988], opérateurs de perçage des métaux, ajusteurs [Vineis, 1983 ; Silverman, 1989 ; Gonzalez, 1989]. D'autres études cas-témoins menées en France ont mis en évidence un risque de cancer de vessie, en lien avec une exposition à des fluides de coupe, estimée sur la base des intitulés d'emploi, et d'une évaluation semi-quantitative de l'exposition [Cordier, 1993 ; Hours, 1994]. Par la suite, plusieurs études de mortalité ont été conduites au sein de cohortes de salariés employés, au cours de la période 1950-1997, dans différentes industries appartenant aux secteurs de l'industrie automobile [Park, 1996 ; Delzell, 2003 ; Costello, 2020], de la métallurgie [Jarvholm, 1987 ; Rotimi, 1993], de la sidérurgie [Bourgkard, 2009] ou de l'aérospatiale [Zhao, 2005]. Parmi celles-ci, seule l'étude, menée dans la sidérurgie en France, a montré un excès de décès par cancer de la vessie, en relation avec des expositions professionnelles aux brouillards d'huile [Bourgkard, 2009]. Les auteurs de travaux publiés plus récemment se sont intéressés au risque de cancer de vessie en fonction des

Machines d'usinage dotées d'un système d'aspiration des brouillards d'huile générés par l'utilisation de fluides lubrifiants.





© Vincent Nguyen pour l'INRS/2021

Fraisage de pièces pour l'industrie pétrolière.

différentes familles de fluides de coupe. Plusieurs études ont mis en évidence un risque de cancer de vessie en relation avec des expositions aux huiles entières. Il s'agit d'études conduites dans l'industrie automobile aux États-Unis [Friesen, 2009 ; Colt, 2014] et dans la sidérurgie en France [Colin, 2018]. Dans cette dernière étude, les résultats ont tenu compte des facteurs professionnels et extra-professionnels du cancer de la vessie. Aucune association n'a été observée avec les expositions aux fluides solubles et les expositions aux fluides synthétiques.

Cancer du rectum

Plusieurs études épidémiologiques ont rapporté un risque de cancer du rectum associé à des expositions aux fluides de coupe, et plus particulièrement, aux huiles entières. Ces études ont été conduites parmi des travailleurs employés dans des usines de fabrication de roulement à billes [Park, 1988], de construction automobile [Tolbert, 1992 ; Gerhardsson de Verdier, 1992 ; Eisen, 2001 ; Malloy, 2007] aux États-Unis, ou en population générale au Québec [Siemiatycki, 1987]. Une des études recensées fait également apparaître un risque de cancer du rectum plus marqué parmi les travailleurs employés avant 1970 [Eisen, 2001], ce qui pourrait être en faveur d'une diminution du risque avec le temps. Une

mise à jour de la mortalité de cette cohorte de travailleurs de l'industrie automobile n'a pas montré d'association entre une exposition aux huiles entières et la mortalité par cancer du rectum [Costello, 2020].

Cancer du larynx

Seules les études conduites dans une cohorte professionnelle de l'industrie automobile américaine ont rapporté des résultats concernant le risque de cancer du larynx. Ce risque a été observé parmi des travailleurs ayant été exposés, au cours de leur carrière professionnelle, à des huiles entières [Tolbert, 1992], ou exposés à des concentrations cumulées élevées d'huiles entières [Eisen 1994]. Une mise à jour du suivi de la mortalité de ces travailleurs, publiée en 2001, a montré un excès de risque de cancer du larynx pour des expositions à des concentrations élevées d'huiles entières, mais statistiquement non significatif [Eisen, 2001]. Cette étude a indiqué également un risque moins élevé parmi les travailleurs embauchés après 1970. Aucun risque de cancer du larynx n'a été observé dans la dernière mise à jour du suivi de la mortalité de ces travailleurs publiée en 2020 [Costello, 2020].

Ces différentes études n'ont pas révélé de risque de cancer du larynx associé à des expositions à des fluides solubles et à des fluides synthétiques.

Cancer du poumon

Les résultats des études épidémiologiques s'intéressant au risque de cancer du poumon sont très discordants et ne permettent pas de conclure. L'absence d'un excès de risque a pu être observé dans des études de cohorte menées dans des usines de fabrication de roulement à billes [Park, 1988 ; Silverstein, 1988] et dans l'industrie automobile [Tolbert, 1992 ; Park, 1996 ; Eisen, 2001 ; Friesen, 2009 ; Costello, 2020]. Une sous-mortalité par cancer du poumon a été rapportée dans une étude cas-témoins, menée au sein d'une cohorte de travailleurs de l'industrie automobile. En revanche, un excès de risque a été observé parmi des travailleurs de l'industrie automobile [Kazerouni, 2000 ; Delzell, 2003] et de l'aérospatiale [Zhao 2005]. Deux études cas-témoins de population générale conduites à Montréal [Siemiatycki, 1987] et en Angleterre [Coggon, 1984] ont mis en évidence un risque de cancer du poumon associé à une exposition à des fluides de coupe. Seuls, les résultats de l'étude québécoise ont été ajustés sur la consommation de tabac.

Cancer du pancréas

Plusieurs études de cohorte, menées dans différentes usines au cours des années 1990, ont révélé un excès de risque de cancer du pancréas parmi des travailleurs exposés à des fluides de coupe [Vena, 1985 ; Mallin, 1986 ; Tolbert, 1992 ; Bardin, 1997 ; Rotimi, 1993 ; Acquavella, 1993 ; Park, 1996]. C'est le cas notamment parmi des travailleurs embauchés entre 1950 et 1959 dans une usine métallurgique et ayant travaillé depuis au moins dix ans [Acquavella, 1993], parmi des travailleurs afro-américains de l'industrie automobile [Mallin, 1986] ou parmi des travailleurs employés avant 1950 dans une usine de fabrication de moteur ou ayant travaillé depuis plus de vingt ans dans cette usine [Vena, 1985]. D'autres études épidémiologiques se sont intéressées au risque de cancer du pancréas en fonction des différentes familles de fluide de coupe. Les quelques excès de risque observés ne concernent pas une famille particulière puisqu'ils ont été rapportés pour des expositions à des fluides synthétiques et en particulier, lors d'opérations de meulage [Bardin, 1997], pour des expositions à des huiles entières [Park, 1996] ou à des fluides solubles [Tolbert, 1992].

Cancer du sein

Peu d'études épidémiologiques ont rapporté des résultats sur le risque de cancer du sein, chez la femme, associé à des expositions à des fluides de coupe. Ce risque a cependant été étudié dans deux cohortes de travailleuses du secteur de la fabrication automobile [Delzell, 2003 ; Thompson, 2005 ;

Garcia, 2018 ; Costello, 2020]. Un excès de risque de cancer du sein a été mis en évidence dans une seule des deux cohortes. Cette cohorte a fait l'objet d'une première analyse, concluant à une association avec l'exposition cumulée aux fluides solubles [Thompson, 2005]. Cependant, plusieurs critiques ont été émises concernant la sélection des cas et la période d'exposition, incompatible avec la latence du cancer du sein. De nouvelles analyses de cette cohorte ont fait l'objet de plusieurs publications montrant un excès de risque parmi les femmes exposées à des huiles entières [Garcia, 2018 ; Costello, 2020]. Par ailleurs, aucune association n'a été retrouvée pour des expositions à des fluides solubles et des fluides synthétiques. Ces résultats sont à interpréter avec précaution, car ils ne tiennent pas compte des facteurs extraprofessionnels liés au cancer du sein, parmi lesquels la consommation de tabac et d'alcool et le statut socio-économique, notamment.

Cancer de l'estomac

À partir des années 1980, plusieurs études de mortalité ont été conduites, principalement aux États-Unis, sur des cohortes de travailleurs employés dans les secteurs de fabrication de pièces automobiles [Vena, 1985 ; Mallin, 1986 ; Park, 1996 ; Tolbert, 1992 ; Rotimi, 1993 ; Kazerouni, 2000 ; Sullivan, 2000 ; Eisen, 2001 ; Delzell, 2003 ; Costello, 2020], de roulements à billes [Park, 1988 ; Silverstein, 1988] et de l'aérospatiale [Zhao, 2005]. La majorité des études n'a pas mis en évidence d'excès de mortalité statistiquement significatifs par cancer de l'estomac. Lorsque ces excès étaient significatifs, ils étaient associés à des expositions différentes :

- des fluides aqueux (huiles émulsionnées principalement) utilisés lors des activités de meulage, parmi les travailleurs employés dans les usines de fabrication de roulement à billes [Park, 1988 ; Silverstein, 1988] ;
- des fluides de coupe, sans précision sur leur nature, parmi les travailleurs caucasiens de deux usines de fabrication de moteur [Rotimi, 1993] ;
- des huiles entières, parmi les travailleurs de trois usines de construction automobile [Costello, 2020].

Cancers du foie et des voies biliaires

Seules deux études ont rapporté un risque de décès par cancer du foie et des voies biliaires. Elles ont été conduites dans différentes usines automobiles aux États-Unis. Le risque observé dans la première étude concernait des travailleurs réalisant des tâches d'usinage de métaux, exposés à des niveaux élevés de brouillards d'huile, sans précision sur la nature du fluide de coupe utilisé [Kazerouni, 2000]. La seconde étude a montré un excès de risque de cancer





© Vincent Nguyen pour l'INRS/2020

Usine de construction mécanique : les machines d'usinage sont reliées à une unité centralisée d'aspiration des brouillards d'huile générés par des fluides lubrifiants.

du foie pour des expositions modérées à des fluides synthétiques [Eisen, 2001]. Cet excès est devenu statistiquement non significatif lors de la mise à jour des données sur la mortalité de cette cohorte [Costello, 2020]. Les résultats de ces études doivent être interprétés avec précaution, car ils ne tiennent pas compte de facteurs pouvant influencer le niveau de risque, comme la consommation d'alcool.

Autres localisations de cancers

Au cours de la période 1988-2020, plus d'une dizaine de publications ont rapporté des résultats concernant le cancer de l'œsophage parmi des travailleurs exposés aux fluides de coupe. Seule l'étude cas-témoins, menée par Sullivan *et al.* [1998] dans une cohorte de l'industrie automobile du Michigan, montrait un excès de risque, parmi les travailleurs exposés aux fluides synthétiques et aux fluides solubles lors des opérations de meulage. Les auteurs mettent également en évidence une association avec des expositions à des

nitrosamines et des biocides, éléments présents dans ces fluides aqueux.

Parmi la quinzaine d'études épidémiologiques rapportant des résultats sur le cancer de la prostate et publiées depuis 1985, seule l'étude cas-témoins menée en population générale à Montréal montre un excès de risque de ce cancer parmi les travailleurs ayant été exposés, au cours de leur carrière professionnelle, à des huiles lubrifiantes. Cependant, les résultats doivent être interprétés avec précaution, car ils ne tiennent pas compte d'autres expositions professionnelles [Siemiatycki, 1987].

Parmi les études épidémiologiques présentant des résultats sur le cancer du côlon, aucune ne montre d'excès de risque associé à des expositions aux fluides de coupe [Decouflé, 1978 ; Ronneberg, 1988 ; Gerhardsson de Verdier, 1992 ; Tolbert, 1992 ; Kazerouni, 2000 ; Eisen, 2001 ; Siemiatycki, 1987 ; Costello, 2020].

Conclusion

Les fluides de coupe peuvent être à l'origine de symptômes et de pathologies respiratoires et cutanées. Des cancers cutanés, en particulier du scrotum, sont associés à des expositions à des fluides de coupe non ou légèrement traités, classés par le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) comme cancérogènes pour l'homme. Parmi les nombreuses autres localisations étudiées, les études épidémiologiques rapportent des résultats en faveur d'une association entre les expositions aux huiles entières et des cancers localisés au niveau de la vessie, du rectum et du larynx.

Au vu de la littérature récente sur les effets sur la santé des fluides de coupe, une surveillance médicale des travailleurs exposés aux fluides de coupe est recommandée. Elle doit continuer même après la mise en place éventuelle d'utilisation d'appareils de protection respiratoire. Cette surveillance doit inclure une évaluation de l'état de santé respiratoire comprenant la fonction ventilatoire, sans oublier l'état cutané [Nett, 2021]. ●

1. La bibliographie, très abondante, de cette méta-étude, est disponible sur le site Internet de l'INRS, à la page réservée aux dossiers publiés dans la revue : www.inrs.fr/publications/hst/dossier.html.

2. L'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) a fusionné le 1^{er} juillet 2010 avec l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa) pour former l'Agence nationale chargée de la sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Lien : www.anses.fr.

POUR EN SAVOIR +

• La bibliographie complète de l'article est accessible en téléchargement avec le dossier sur la page : <https://www.inrs.fr/publications/hst/dossier.html>.

MÉTHODES D'ÉVALUATION DES EXPOSITIONS AUX FLUIDES DE COUPE

Les fluides d'usinage et de coupe sont constitués d'un mélange complexe de substances, potentiellement dangereuses pour la santé et susceptibles de provoquer parmi leurs utilisateurs des pathologies cutanées ou respiratoires. La diversité de ces fluides et leur complexité, ainsi que leurs multiples dangers, ont conduit aux développements de diverses méthodes complémentaires pour l'évaluation de l'exposition à ces fluides. Certaines de ces méthodes sont décrites ici.

**SOPHIE
TOMAZ**
INRS,
département
Métrologie
des polluants

**RONAN
LEVILLY**
INRS,
département
Ingénierie des
procédés

Description des fluides, de leurs dangers, des voies d'exposition

Les fluides d'usinage et de coupe sont constitués d'un mélange complexe de substances chimiques, potentiellement dangereuses pour la santé, et susceptibles de provoquer parmi leurs utilisateurs diverses pathologies cutanées ou respiratoires, voire pour certaines, de favoriser l'apparition de cancers (Cf. Article pp. 24-32). En fonction des exigences techniques pour lesquelles ces fluides ont été formulés, ils peuvent présenter des caractéristiques physicochimiques très différentes et être regroupés en deux grandes catégories, que sont les huiles entières comprenant les huiles minérales, les huiles synthétiques et semi-synthétiques ; et les fluides aqueux comprenant les huiles solubles, synthétiques ou semi-synthétiques.

L'évaluation des expositions aux fluides de coupe est nécessaire, mais s'avère techniquement délicate en raison de la complexité et variété de leur composition. En effet, ces fluides sont constitués d'un grand nombre de composés chimiques, dont les effets sur la santé ne sont pas nécessairement connus. De plus, leur composition évolue au cours de leur usage ; certains fluides peuvent ainsi s'enrichir en composants toxiques, tels que des métaux, le benzo[a]pyrène (BaP) ou des micro-organismes, en fonction de leurs conditions d'utilisation.

Par ailleurs, les dangers associés à ces fluides peuvent être de plusieurs natures, ce qui complexifie l'évaluation des risques associés. Au cours de l'usinage, le fluide de coupe entre en contact avec l'outil en rotation et cette action mécanique entraîne la formation et la dispersion de particules. L'échauffement de l'outil sur la pièce à travailler s'accompagne également de l'émission de composés sous forme gazeuse. Ainsi, les aérosols générés contiennent des particules solides et/ou liquides

en suspension dans un gaz. Plus précisément, un aérosol contient à la fois une fraction gazeuse et une fraction particulaire, ce mélange est généralement désigné par le terme « brouillard d'huile ». L'exposition des travailleurs peut donc se faire par inhalation mais également par contact cutané, car si les particules les plus fines restent en suspension dans l'air, celles de tailles plus importantes peuvent contaminer les surfaces et les outils de travail. La mise en œuvre des brouillards d'huile présente des risques de polyexpositions¹. En effet, au-delà de la prise en compte du risque chimique lié aux substances composant ces fluides, s'ajoute également le risque biologique dans le cas de l'utilisation des fluides aqueux, car ceux-ci constituent un milieu favorable pour le développement des micro-organismes (Cf. Article pp. 20-23).

Ainsi, les méthodes d'évaluation de l'exposition s'attacheront à la mesure de composés, par des prélèvements d'aérosols et des prélèvements surfaciques.

Devant la complexité technique liée à la réalisation de ces deux types d'évaluation, une approche complémentaire peut également être envisagée : elle consiste à prélever et mesurer directement dans les fluides des composés reconnus pour leur toxicité.

Prélèvements dans les bains d'huile

Le prélèvement et la mesure directe de composés connus pour leurs propriétés toxiques dans les bains de fluide de coupe permettent de juger du potentiel toxique de ces fluides. Cette méthode de prélèvement facile et rapide à mettre en œuvre est utilisée dans certains cas qui sont présentés ci-après.

→ Exposition aux nitrosamines

La présence conjointe dans un fluide aqueux de nitrites et d'amines secondaires peut conduire à



	APPLICATION	FRACTION	MATÉRIEL DE PRÉLEVEMENT	SUPPORT DE PRÉLEVEMENT	MESURE	SEUIL POUR L'EXTRACTION	SOLVANT D'EXTRACTION	VALEUR LIMITE OU RECOMMANDÉE
NIOSH 5 524 (USA)	Tous les fluides	Thoracique	Cassette + cyclone (1,6 L/min)	Filtre PTFE	Gravimétrique	0,4 à 0,5 mg/m ³	Dichlorométhane : méthanol : toluène (1:1:1) ou Méthanol : eau (1:1)	0,4 mg/m ³
		Inhalable	Cassette (2 L/min)					0,5 mg/m ³
MétroPol M-282 (France)	Tous les fluides	Inhalable	Cassette (2 L/min)	Filtre PTFE	Gravimétrique	0,5 mg/m ³	Dichlorométhane : méthanol : toluène (1:1:1)	0,5 mg/m ³
MDHS 84/2 (Royaume-Uni)	Huile minérale viscosité > 18 mm ² .s ⁻¹ (à 40 °C)	Inhalable	IOM (2 L/min)	Filtre GF/A ou ester de cellulose mixte	Gravimétrique	50 % de la valeur limite	Cyclohexane	1 mg/m ³ *

↑ TABLEAU 1
Méthodes gravimétriques mises en œuvre pour l'évaluation des expositions aux fluides de coupes.
* Cette valeur a depuis été supprimée.

↓ FIGURE 1
Les limites du prélèvement avec la méthode M-282 et Niosh 5 524. Pour limiter ce biais, la méthode MDHS 84/2 spécifie que celle-ci est uniquement applicable aux huiles minérales dont la viscosité est supérieure à 18 mm².s⁻¹ à 40 °C. En effet, ces huiles contiendraient un nombre limité de composés susceptibles de s'évaporer au cours de l'échantillonnage.

la formation de nitrosamines. Certaines nitrosamines sont toxiques. C'est par exemple le cas de la N-nitrosodiéthanolamine (NDELA) qui est classée comme un agent pouvant être cancérigène pour l'homme (de catégorie 2B selon le Circ) [1]. En l'absence de valeur limite française, la mesure de la NDELA dans les fluides aqueux peut être comparée à la valeur limite de 5 mg/kg fixée par la réglementation allemande [2,3].

→ Exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

En Europe, la mise sur le marché des huiles entières neuves est réglementée et impose l'évaluation de leur potentiel cancérigène, en utilisant la méthode IP 346, fixant une valeur seuil de 3 % de masse de résidu soluble dans le diméthylsulfoxyde (DMSO) [4]. En France, la recommandation R451 de la Cnam indique que l'estimation de ce potentiel cancérigène doit être réalisée par la mesure du benzo[a]pyrène (BaP), le seul HAP classé comme cancérigène avéré par le Circ [5,7]. Contrairement à la méthode IP 346, qui est uniquement applicable aux huiles entières

neuves, la mesure du BaP est applicable à tous les fluides. Aussi, des études ont montré qu'au cours de l'usinage, ces fluides peuvent s'enrichir en BaP, d'où la nécessité de suivre leurs concentrations au cours du temps [6]. Pour cela, un échantillon est prélevé et analysé, afin de déterminer la concentration en BaP. Il est alors recommandé, par la Cnam et l'INRS, que sa concentration ne dépasse pas 30 µg/kg dans les fluides neufs et 100 µg/kg dans les fluides usagés [7,8].

Évaluation des expositions

Les prélèvements atmosphériques

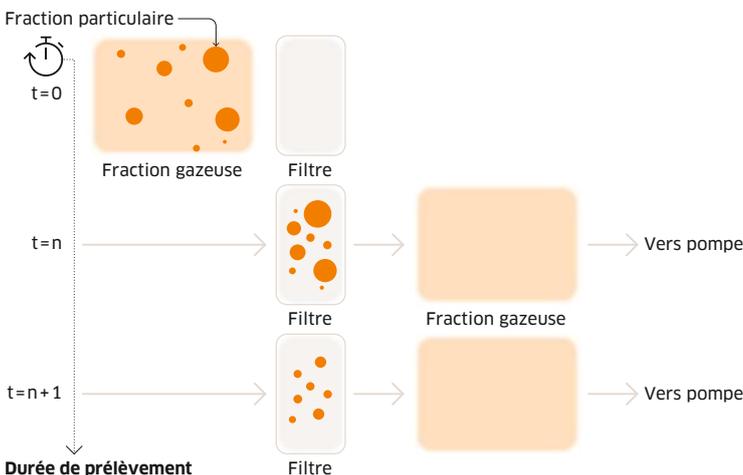
La diversité des fluides utilisés et leur complexité ont conduit au développement de nombreuses méthodes pour l'évaluation de l'exposition aux aérosols de fluides de coupe. Certaines de ces méthodes sont présentées dans les paragraphes suivants.

→ La mesure gravimétrique des composés prélevés sur filtre

Cette méthode de mesure globale est appliquée dans plusieurs pays comme en France [9], aux États-Unis [10] et au Royaume-Uni [11] (Cf. Tableau 1). Elle consiste à mesurer la masse de composés présents dans la fraction inhalable ou thoracique collectée sur un filtre. La masse obtenue est alors comparée à la valeur limite ou la valeur recommandée qui est fixée en France, par la Cnam, à 0,5 mg/m³ [7]. Si la masse de particules collectée sur le filtre se rapproche ou dépasse la valeur recommandée, une étape d'extraction à l'aide d'un solvant ou d'un mélange de solvants permet d'obtenir une mesure de la masse de composés solubles, supposée provenir spécifiquement de ces fluides. Cette méthode, simple à mettre en œuvre, est applicable à tous les fluides, dans le cadre des méthodes développées par le Niosh et par l'INRS (MétroPol) [9-10], mais présente deux inconvénients majeurs :

- la fraction gazeuse de l'aérosol générée au cours de l'usinage n'est pas piégée sur le filtre au cours

Aérosols semi-volatils



du prélèvement. Ainsi, la mesure de la seule fraction captée par le filtre sous-estimerait l'exposition à la totalité du brouillard d'huile ;

- il existe un biais au cours du prélèvement. En effet, des études ont montré que les composés semi-volatils présents dans les particules collectées sur le filtre s'évaporent au cours du prélèvement [12]. Ces composés vont donc être ré-entraînés par le flux d'air en dehors du dispositif de prélèvement, comme l'illustre la Figure 1. Ce biais entraîne une sous-estimation de l'exposition à la fraction particulaire de l'aérosol.

→ La mesure d'une fraction de ces aérosols

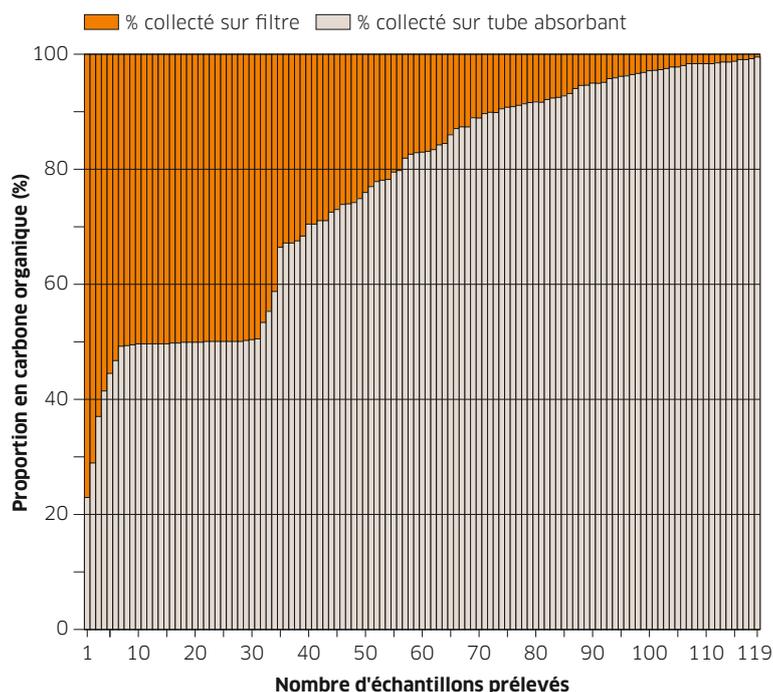
La mesure d'une fraction ou d'un groupe de composés présent dans les aérosols de fluide de coupe est déjà réalisée en Allemagne [13], en Suisse [14] et le sera prochainement en France via la méthode MétroPol M-440 (à paraître). Dans ces trois méthodes, le prélèvement est réalisé sur un dispositif combiné associant un filtre pour la collecte des particules et un support permettant de piéger la phase gazeuse, ainsi que la fraction des particules s'évaporant au cours du prélèvement. La Figure 2 présente le dispositif combiné utilisé pour la méthode MétroPol M-440.

La fraction inhalable est collectée sur des filtres en fibre de verre ou en PTFE (polytétrafluoroéthylène), alors qu'un tube adsorbant (de type Amberlite®, XAD-2) collecte ce qui n'est pas retenu par le filtre. Après prélèvement, les supports sont extraits à l'aide d'un solvant ou d'un mélange de solvants, puis les extraits sont analysés :

- en Allemagne, la mesure est réalisée par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, aux longueurs d'ondes caractéristiques des vibrations des liaisons moléculaires C-H aliphatiques, majoritaires dans les huiles entières (longueurs d'ondes comprises entre 3000 et 2800 cm^{-1}) [13]. Cette méthode est bien adaptée pour les fluides contenant une fraction d'huile minérale, mais elle reste difficile à mettre en œuvre pour les fluides aqueux exempts de ces composés ;
- les méthodes suisse et MétroPol M-440 consistent en une mesure de la totalité du carbone organique par GC-FID², en utilisant les chaînes carbonées en C15 ou C16 comme référence [14]. Notons que la méthode suisse procède aussi par une évaporation du solvant, suivie par une mesure de la masse de résidu obtenu. Au cours d'un projet récent, mené conjointement par l'INRS et Unisanté de Lausanne [15], 119 échantillons ont été prélevés dans diverses entreprises et analysés avec la méthode M-440. Les résultats, présentés sur la Figure 3, montrent que, selon les échantillons, la proportion de carbone organique va se répartir différemment entre le filtre et le tube adsorbant.



↑ FIGURE 2 Dispositif combiné pour le prélèvement d'un mélange de vapeurs et particules.



Dans plus de 70 % des cas, le carbone organique se retrouve majoritairement dans le tube adsorbant. Rappelons que cette mesure sur le tube adsorbant inclut la fraction gazeuse de l'aérosol passant au travers du filtre, mais également la fraction de particules qui s'évapore au cours du prélèvement. À cause de ce biais de prélèvement, les résultats obtenus sur chaque support de prélèvement ne permettent pas de conclure quant à la proportion réelle de composés présents en phase gazeuse et en phase particulaire. Il est communément admis que, pour l'interprétation des prélèvements de composés semi-volatils collectés sous les formes particulaires et gazeuses, seule la somme des concentrations obtenues sur les deux supports pourra être utilisée. Néanmoins, les résultats de cette étude démontrent que le prélèvement de la fraction particulaire seule n'est pas suffisant et soulignent l'intérêt de l'utilisation des dispositifs combinés, pour le prélèvement des aérosols émis au cours de l'usinage et l'évaluation des expositions.

↑ FIGURE 3 Proportion en carbone organique mesurée sur le filtre et le tube adsorbant avec la méthode MétroPol M-440 sur 119 échantillons prélevés en ambiance de travail dans des entreprises employant des fluides de coupe.





© Vincent Nguyen pour l'INRS/2021

Contrôle des dimensions d'une pièce après fraisage.

→ La mesure d'un marqueur spécifique

C'est le cas par exemple de la méthode britannique MDHS 95/3, utilisant les éléments bore, potassium ou sodium comme les marqueurs de l'exposition spécifique aux fluides aqueux [16]. L'utilisation de marqueurs spécifiques est peu répandue, car l'emploi d'un marqueur unique pour représenter une exposition multiple peut entraîner un biais dans l'évaluation de l'exposition. Au Royaume-Uni par exemple, des cas de pneumopathie d'hypersensibilité ont été rapportés, malgré le respect de la valeur guide associée à cette mesure [17]. Cette méthode a donc été remise en question notamment du fait de la réduction de l'utilisation du bore dans les fluides aqueux. En 2005, le Royaume-Uni a ainsi retiré la valeur guide fixée à 1 mg/m³ de bore dans les particules.

→ La mesure de composés toxiques

Lorsque la présence de composés, entités ou éléments toxiques est soupçonnée, la mesure de ces composés peut être ciblée. Par exemple, des

biocides sont utilisés dans les fluides aqueux, dans le but de limiter le développement des micro-organismes. Longtemps utilisé comme biocide, le formaldéhyde a été interdit de la composition des fluides, car il est classé comme cancérigène par l'Union européenne et par le Circ [18]. Toutefois, certains additifs utilisés dans les formulations ont la capacité de libérer du formaldéhyde lors de la mise en œuvre du fluide. La mesure du formaldéhyde en phase gazeuse peut alors être réalisée par prélèvement actif sur cartouche imprégnée et par analyse en HPLC-UV³, comme décrit dans la fiche MétroPol M-4 de l'INRS [19]. Une VLEP européenne fixe la valeur à ne pas dépasser à 0,37 mg/m³ sur 8 h. D'autres composés peuvent aussi être mesurés : c'est le cas des HAP dans les aérosols (M-332), des métaux, des micro-organismes (M-147)⁴, etc.

Les prélèvements surfaciques

Le prélèvement surfacique est une méthode permettant d'évaluer la contamination des surfaces par des agents chimiques ou biologiques en prenant en compte l'exposition cutanée, qui représente une voie d'exposition non négligeable. Ce prélèvement consiste à collecter, par essuyage ou aspiration, des agents chimiques présents sur les surfaces et de les analyser au laboratoire. Dans le cadre des fluides de coupe, des méthodes MétroPol existent pour la mesure du béryllium (M-308) [20] et une méthode pour les composés organiques sera publiée prochainement. Pour ces prélèvements, aucune valeur guide

POUR EN SAVOIR +

- Le site de l'INRS : www.inrs.fr/risques/fluides-coupe/ce-qu-il-faut-retenir.html.
- Le site de l'Anses : www.anses.fr/fr/content/fluides-de-coupe.

ou recommandation n'existent; néanmoins, cette approche est simple à mettre en œuvre et complète de manière pertinente l'évaluation de l'exposition des travailleurs. De plus, cette méthodologie permet de réaliser relativement rapidement la cartographie d'un atelier pour identifier les zones contaminées et en déduire les postes les plus exposés.

Conclusion

Du fait de la diversité et de la complexité des fluides utilisés au cours de l'usinage et de la variabilité des risques associés à leur utilisation, des travaux de recherche et de développement sont encore en cours afin d'améliorer et de fiabiliser l'évaluation de l'exposition à ces fluides.

Pour la mesure de l'exposition aux aérosols de fluide de coupe, l'utilisation seule d'un dispositif de prélèvement de la fraction inhalable semble limitée. Afin de mieux appréhender l'exposition à ces fluides, l'utilisation d'un dispositif combiné pour la mesure complète des deux phases des brouillards d'huile est à privilégier. Dans l'état actuel des performances des dispositifs de prélèvement, l'interprétation des

données doit toutefois se faire avec la somme des deux fractions collectées. En effet, l'évaporation de la fraction particulaire collectée au cours du prélèvement introduit un doute sur la véritable nature physique de l'aérosol, lors du prélèvement. ●

1. L'INRS a mené de nombreux travaux concernant les risques de polyexpositions. Voir en particulier : www.inrs.fr/risques/polyexpositions/ce-qu-il-faut-retenir.html; et le dossier paru : www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2031.
2. Chromatographie en phase gazeuse, couplée à un détecteur à ionisation de flamme.
3. Chromatographie liquide haute performance, couplée à une détection par ultraviolets.
4. Fiches MétroPol accessibles sur : www.inrs.fr/publications/bdd/metropol.html.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement Nancy Hopf et Jean-Jacques Sauvain, Unisanté – Centre universitaire de médecine générale et santé publique (Lausanne, Suisse) pour l'aide apportée lors de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] IARC MONOGRAPHS ON THE EVALUATION OF CARCINOGENIC RISKS TO HUMANS – *Some industrial chemicals*. Lyon, Circ/Iarc, 2000, n° 77, p. 403-430.
- [2] COMMITTEE ON HAZARDOUS SUBSTANCES – *technical rules for hazardous substances. Restrictions on the use of anticorrosion agents whose use can lead to the formation of N-nitrosamines*. Technical Rule N° 615, 2007, 16 p.
- [3] AUSSCHUSS FÜR GEFAHRSTOFFE – *Technische Regeln für Gefahrstoffe, Verzeichnis Krebszeugender, Keimzellmutagener oder Reproduktionstoxischer Stoffe*. TRGS 905, 2016, 20 p. (en allemand).
- [4] RÉGLEMENT CE N° 1272/2008 du parlement européen et du conseil du 16 décembre 2008 modifié, relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges.
- [5] IARC MONOGRAPHS ON THE EVALUATION OF CARCINOGENIC RISKS TO HUMANS – *some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures*. Lyon, Circ/Iarc, 2010, vol. 92, p. 392-423.
- [6] APOSTOLI P., CRIPPA M., FRACASSO M.E. ET AL. – Increases in polycyclic aromatic hydrocarbon content and mutagenicity in a cutting fluid as a consequence of its use. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 1993, 64(7), pp. 473-477.
- [7] RECOMMANDATION DU COMITÉ TECHNIQUE NATIONAL DES INDUSTRIES DE LA MÉTALLURGIE – *Prévention des risques chimiques causés par les fluides de coupe dans les activités d'usinage de métaux*. Cnam, 2015, R451, 12 p. Accessible sur : www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/31228/document/r451.pdf.
- [8] CHAMPMARTIN C. – Estimation du potentiel cancérigène des huiles minérales régénérées. *Hygiène & sécurité du travail*, 2012, 227, ND 2356, pp. 3-10.
- [9] FICHE MÉTROPOL M-282 – *Fluides d'usinage*. INRS, août 2016. In : Base de données MétroPol de l'INRS. Accessible sur : www.inrs.fr/metropol.
- [10] METALWORKING FLUIDS. In : *NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM)*, 5^e Ed. Method 5524, issue 2, décembre 2014.
- [11] HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE – *Measurement of oil mist from mineral oil-based metalworking fluids*. HSE, 2014, MDHS 84/2, 5 p.
- [12] DRAGAN G.C., BREUER D., BLASKOWITZ M. ET AL. – An evaluation of the "GGP" personal samplers under semi-volatile aerosols: sampling losses and their implication on occupational risk assessment. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2015, 17, pp. 270-277.
- [13] BREUER D., BLASKOWITZ M., PANNWITZ K.H. – Cooling lubricants and other complex hydrocarbon mixtures, immiscible with water – Droplets and vapours. *The MAK Collection for Occupational Health and Safety*, janvier 2016, 1 (1), pp 383-400.
- [14] HUYNH C.-K., HERRERA H., PARRAT J. ET AL. – Occupational exposure to mineral oil metalworking fluid (MWFs) mist: development of new methodologies for mist sampling and analysis. Results from an inter-laboratory comparison. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 151.
- [15] HOPF N., BOURGKARD E., DEMANGE V. ET AL. – Early effect markers and exposure determinants of metalworking fluids among metal industry workers: protocol for a field study. *JMIR Res Protoc*, 2019, 8(8).
- [16] HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE – *Measurement of oil mist from mineral oil-based metalworking fluids*. HSE, 2014, MDHS 95/3, 16 p.
- [17] HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE – *Laboratory RR 1044. Consultation on monitoring of water-miscible metalworking fluid (MWF) mists*. HSE, 2015, 43 p.
- [18] IARC MONOGRAPHS ON THE EVALUATION OF CARCINOGENIC RISKS TO HUMANS – *Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol*. Lyon, Circ/Iarc, 2010, n° 88, 497 p.
- [19] FICHE MÉTROPOL M-4 – *Formaldéhyde*. INRS, juillet 2016. In : Base de données MétroPol de l'INRS. Accessible sur : www.inrs.fr/metropol.
- [20] FICHE MÉTROPOL M-308 – *Béryllium et ses composés*. INRS, 2016. In : Base de données MétroPol de l'INRS. Accessible sur : www.inrs.fr/metropol.

LES DÉTERMINANTS DE L'EXPOSITION APPLIQUÉS AUX BROUILLARDS DE FLUIDE DE COUPE

Les activités d'usinage des métaux sont génératrices de brouillards d'huile. Cependant, l'exposition des travailleurs est inégale d'une entreprise à l'autre et est fonction de nombreux paramètres associés soit aux procédés de production, soit à l'organisation du travail. Outre le risque lié à la fraction particulaire des brouillards, il apparaît que la fraction gazeuse de ces derniers peut également contribuer aux expositions, et de ce fait, nécessiter d'adapter l'évaluation et la prévention des risques en conséquence.

RONAN
LEVILLY
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

La problématique liée à l'exposition professionnelle aux fluides de coupe n'est pas récente. Initialement axée sur les huiles entières minérales, elle s'est élargie au cours des années vers les fluides de coupe aqueux. Mise en œuvre lors des opérations d'usinage des métaux afin de lubrifier, de refroidir les pièces, d'améliorer la coupe par le retrait des copeaux métalliques et d'accroître la durée de vie des outils, l'utilisation de ces fluides concerne la totalité des secteurs d'activité du travail des métaux, ainsi que l'industrie automobile. Les voies d'exposition aux fluides de coupe sont multiples pour les travailleurs : l'exposition peut survenir soit par inhalation des brouillards d'huile générés par l'usinage (composés d'une phase particulaire et d'une phase gazeuse), soit par contact cutané direct ou *via* des vêtements souillés, et éventuellement, par ingestion lors de contacts main-bouche par exemple.

Les fluides de coupe sont des produits manufacturés, composés d'une grande variété de substances chimiques, dont certaines peuvent être dangereuses pour l'homme. Ces substances peuvent être présentes initialement dans la composition du produit et/ou générées par le procédé dans l'environnement de travail lors de la vie du produit et font que les expositions aux brouillards d'huile présentent des risques pour la santé des salariés exposés (Cf. Article pp. 24-32).

La détermination du niveau d'exposition des travailleurs est indispensable, pour évaluer et quantifier les risques auxquels ils peuvent être confrontés. Les brouillards de fluide de coupe sont des mélanges complexes ; ils sont constitués d'une phase parti-

culaire et d'une phase gazeuse. Certaines molécules volatiles, initialement présentes dans la phase particulaire, peuvent migrer vers la phase gazeuse, en fonction des contraintes physicochimiques de l'atmosphère de travail. Il est donc difficile de disposer d'une méthode de prélèvement qui permette la collecte séparée de chacune des fractions du brouillard. Néanmoins, au-delà de l'aspect métrologique, il est tout aussi important d'orienter la stratégie d'échantillonnage et le déploiement précis des mesures, aussi bien dans le but d'évaluer les risques que pour collecter des données et des informations pour la prévention de ces derniers. Pour cela, il convient d'identifier et de comprendre les facteurs qui contribuent à augmenter ou à réduire ces niveaux d'exposition, afin de proposer, *in fine*, les solutions de prévention les plus adaptées possible. Une des voies d'étude et d'analyse, mise en œuvre par les hygiénistes industriels, est l'approche par « déterminants d'exposition » [1]. Il s'agit d'une méthode empirique, basée soit sur la collecte d'informations en entreprise au plus proche de la réalité des travailleurs, soit sur l'expérimentation (modélisation à partir des données de la littérature, ou à travers des tests en laboratoire sur certains paramètres). Cette méthodologie peut également s'appliquer aux études épidémiologiques. C'est sur cette base méthodologique qu'une étude a été initiée, portant sur l'exposition des salariés aux brouillards de fluides de coupe dans les industries. Deux axes ont été investigués conjointement :

- le premier a concerné la métrologie des brouillards de fluides de coupe ;
- le second s'est intéressé à la collecte des déterminants de l'exposition.

	TRAVAILLEUR EXPOSÉ		AMBIANCE ATELIER	
	M-282 (INRS)	Méthode suisse	M-282 (INRS)	Méthode suisse
	Particulaire	Brouillard total	Particulaire	Brouillard total
CONCENTRATIONS [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]				
Fluides solubles	168 [70 – 342] n = 62	498 [238 – 1119] n = 62	89 [39 – 173] n = 34	368 [170 – 1359] n = 34
Huiles entières	176 [102 – 322] n = 64	1718 [317 – 2654] n = 65	112 [12 – 249] n = 65	1423 [157 – 2681] n = 65

←TABLEAU 1 Concentrations en brouillard d'huile en fonction des méthodes de prélèvements et des types de fluide. Les statistiques présentées sont les médianes, les quartiles [IQR] et le nombre de mesures.

La finalité de la démarche était d'analyser les déterminants par la modélisation, en s'appuyant sur les résultats des mesures individuelles réalisées sur les travailleurs. L'objectif de cet article est de présenter une synthèse des résultats obtenus (métrologie et déterminants pertinents) et d'aborder les situations de travail problématiques en lien avec l'exposition aux brouillards d'huile.

La métrologie en entreprise

Des mesures de brouillards d'huile, particulaire et total (fraction particulaire et gazeuse), ont été menées en France et en Suisse. Elles sont issues pour ces deux pays d'huiles entières ou soluble. Elles ont concerné, au total, quinze entreprises issues de secteurs d'activité variés, tels que : fonderie, mécanique industrielle, fabrication de machines-outils, constructions aéronautique et spatiale, production de pièces d'horlogerie, de pièces médicales et de contacteurs électriques.

Deux méthodes de mesures ont été mises en œuvre dans le cadre des campagnes de prélèvements pour toutes les entreprises volontaires. Il s'agissait de la méthode MétroPol M-282 [2], qui est la référence en France pour la détermination de la fraction particulaire du brouillard d'huile ; et la méthode de référence suisse [3], qui permet d'estimer la fraction gazeuse du brouillard, mais surtout, la concentration totale du brouillard de fluide de coupe (gazeux et particulaire). Il convient de rappeler que la fraction gazeuse collectée avec la méthode présente deux composantes :

- d'une part, les composés volatils présents dans le brouillard au moment du prélèvement ;
- d'autre part, une quantité variable de composés (semi-volatils), présents dans la phase particulaire collectée (sur un filtre) qui ont été volatilisés sous l'effet du prélèvement et collectés sur un autre support (résine).

Comme il n'est pas possible en l'état d'estimer précisément la contribution des espèces semi-volatils dans les deux composantes prélevées, il est plus adapté de raisonner en concentration totale du

brouillard. Le *Tableau 1* présente la synthèse des résultats obtenus.

Le format de présentation des résultats qui a été retenu ne fait pas apparaître les valeurs maximales mesurées pour la fraction particulaire, fraction qui est prise en compte par la Cnam dans sa recommandation R 451 [4]. Il est néanmoins important de préciser que 10 % des mesures ont été supérieures à la valeur de 0,5 mg.m⁻³ recommandée par la Cnam. D'autre part, les résultats montrent que, pour la fraction particulaire des brouillards collectée, la distribution des résultats est non statistiquement différente entre les huiles entières et les huiles solubles et ceci, pour les deux techniques de prélèvement utilisées. En revanche, il apparaît nettement que les concentrations en brouillard total sont plus importantes pour les huiles entières que pour les fluides solubles et que la différence se fait essentiellement sur la fraction volatile collectée. Ce résultat peut s'expliquer par la composition des différents fluides. Les fluides solubles sont mis en œuvre en étant dilués dans l'eau, à des concentrations de l'ordre de 4 % à 10 % en volume. Par conséquent, lors du prélèvement, la quantité de composés semi-volatils potentiellement présents dans le brouillard prélevé est bien moindre que pour une huile entière, qui est utilisée pure.

La fraction gazeuse collectée doit être interprétée avec prudence, puisqu'elle comprend à la fois les composés volatils présents dans le brouillard au moment du prélèvement, et ceux présents dans la phase particulaire collectée (et qui sont volatilisés sous l'effet du prélèvement). En tout état de cause, ces résultats interrogent sur la fraction gazeuse réellement présente dans le brouillard d'huile et à laquelle l'opérateur est exposé. Il ressort de ces résultats que cette fraction est probablement non négligeable et que, dans certaines situations, elle contribue fortement à l'exposition des travailleurs aux brouillards de fluide de coupe. Bien que la valeur limite recommandée pour les brouillards de fluide de coupe ne concerne que la fraction particulaire du brouillard, il convient de prendre en



ORGANISATION DU TRAVAIL	RÉPONSES POSSIBLES
Tâches d'usinage	Réglage des machines (manuel ou numérique), supervision/usinage, changement d'outils, ouverture capotage machine, manipulation des pièces produites
Autres tâches	Nettoyage machine, finition/nettoyage des pièces, utilisation d'air comprimé, tâche manutention/logistique, tâche de maintenance, déplacement dans l'atelier, autres
Nombre de machines suivies	Unique, multiple
Position du travailleur	Statique, mobile
Utilisation de solvant (dégraissage, nettoyage, etc.)	Oui, non

PROCÉDÉS ET MACHINES	RÉPONSES POSSIBLES
Type de machine	CNC multi-outils, décolleteuse à cames, presse emboutisseuse, rectifieuse à meules
Vitesse moyenne de rotation de l'outil	
Type de métal usiné	
Cadence de production	
Âge de la machine	Années
Capotage de la machine	Oui, non, partiel
Aspiration à la source	Oui, non
Système d'épuration de l'air machine	Électrofiltre, média filtrant, filtration mécanique, rien
Rejet de l'air machine	À l'extérieur, recyclage

CARACTÉRISTIQUES DES FLUIDES DE COUPE	RÉPONSES POSSIBLES
Type de fluide	Huiles entières, huiles solubles
Gestion du fluide des machines	Centralisé, individuelle, pas de réservoir
Épuration du fluide	Oui, non
Dernière vidange du réservoir	En jours
Concentration du fluide	100 % pour les huiles entières, C % pour les fluides solubles
Viscosité du fluide	
Utilisation de fluide hydraulique	Oui, non

CARACTÉRISTIQUES ET CONDITIONS DE L'ATELIER	RÉPONSES POSSIBLES
Configuration	Atelier cloisonné ou hall industriel
Volume	< 5 000 m ³ , 5 000 – 10 000 m ³ , > 10 000 m ³
Ventilation générale	Naturelle, mécanique
Nombre de machines dans l'atelier	

→ TABLEAU 2
Items constituant
la grille de recueil
des déterminants
de l'exposition
dans le cadre de
l'usinage
des métaux.

compte également la notion de fraction gazeuse dans la démarche de prévention des risques.

Les déterminants de l'exposition

L'exposition des travailleurs est rarement uniforme et est liée à de nombreuses variables qui caractérisent le poste de travail. Ces variables peuvent être soit de nature organisationnelle (tâches et activités de travail), soit de nature technique (nettoyage des pièces usinées à l'air comprimé), ou bien encore liée à l'implantation des locaux (mobilité du personnel pendant son poste), climatique (saison, température, etc.), et contribuent différemment à caractériser l'exposition.

Pour évaluer les caractéristiques du poste qui prédisent le mieux les niveaux d'exposition, et dans l'optique de pouvoir prendre les mesures de prévention les mieux adaptées, une approche basée sur les déterminants d'exposition a été déployée, en parallèle des mesures de brouillards d'huile. Cette approche s'est appuyée sur une grille de recueil par questionnaires, afin de collecter directement les informations (déterminants) sur le poste de travail. Ce questionnaire a été renseigné, avec l'aide de chaque travailleur suivi et des responsables de production pour toutes les entreprises, et pour chaque journée de travail suivie. Les principaux items qui constituent cette grille de recueil



© Cédric Pasquini pour l'INRS/2020

concernent : l'organisation du travail de l'opérateur (les activités durant le poste, les informations sur la (les) machine(s) suivie(s) et le procédé), mais également les données sur la configuration de l'atelier, ainsi que les éléments de protections collectives et/ou individuelles déployés. Afin d'obtenir le maximum d'informations sur les activités journalières des opérateurs volontaires, un suivi de poste détaillé a été réalisé. Les principales activités qu'un opérateur peut réaliser durant son poste ont été identifiées et ont servi de base à ce travail (Cf. *Tableau 2*).

Toutes ces données, après avoir été recueillies en entreprises, ont été analysées quantitativement et qualitativement. Une première sélection des déterminants a été réalisée à ce niveau du traitement. En effet, certaines données n'ont pas pu être obtenues, ou ont été parcellaires. Les déterminants qui ont été conservés sont :

- le type de machine (à commande numérique – CNC, décolleteuse, rectifieuse par meules, presses emboutisseuses) ;
- les pourcentages d'activités ;
- la répartition temporelle des tâches ;
- les caractéristiques des machines (ventilation, capotage, épuration) ;

- le type d'huile et de sa gestion (réservoir par machine, centralisé ou non recyclé) ;
 - l'utilisation de solvants (interférents analytiques éventuels) ;
 - les huiles hydrauliques et la fréquence d'usage d'air comprimé ;
 - les caractéristiques de l'atelier (type d'atelier, volume, ventilation générale et rejet de l'air traité).
- Il a été nécessaire, pour obtenir une certaine représentativité et une significativité statistique, de regrouper les activités afin de former cinq clusters (association de tâches), en s'appuyant sur les activités dominantes.

À l'issue de cette sélection des déterminants, les variables d'exposition (fractions gazeuses et particulaires collectées) ont été log-transformées et une approche « *stepwise* »¹ pour une régression linéaire a été appliquée pour la sélection des déterminants cités précédemment.

La contribution des déterminants est différente entre les deux fractions du brouillard estimées (fraction particulaire et fraction « gazeuse » collectée) et les résultats de la modélisation sont présentés dans le *Tableau 3*. Il ressort que les déterminants les plus explicatifs pour l'exposition à la fraction particulaire du brouillard d'huile sont :

Entreprise ayant mis en place des mesures de prévention : substitution des produits les plus dangereux contenus dans le fluide, installation de ventilations pour capter à la source les brouillards d'huile et utilisation de procédés ne nécessitant pas de fluides de coupe.



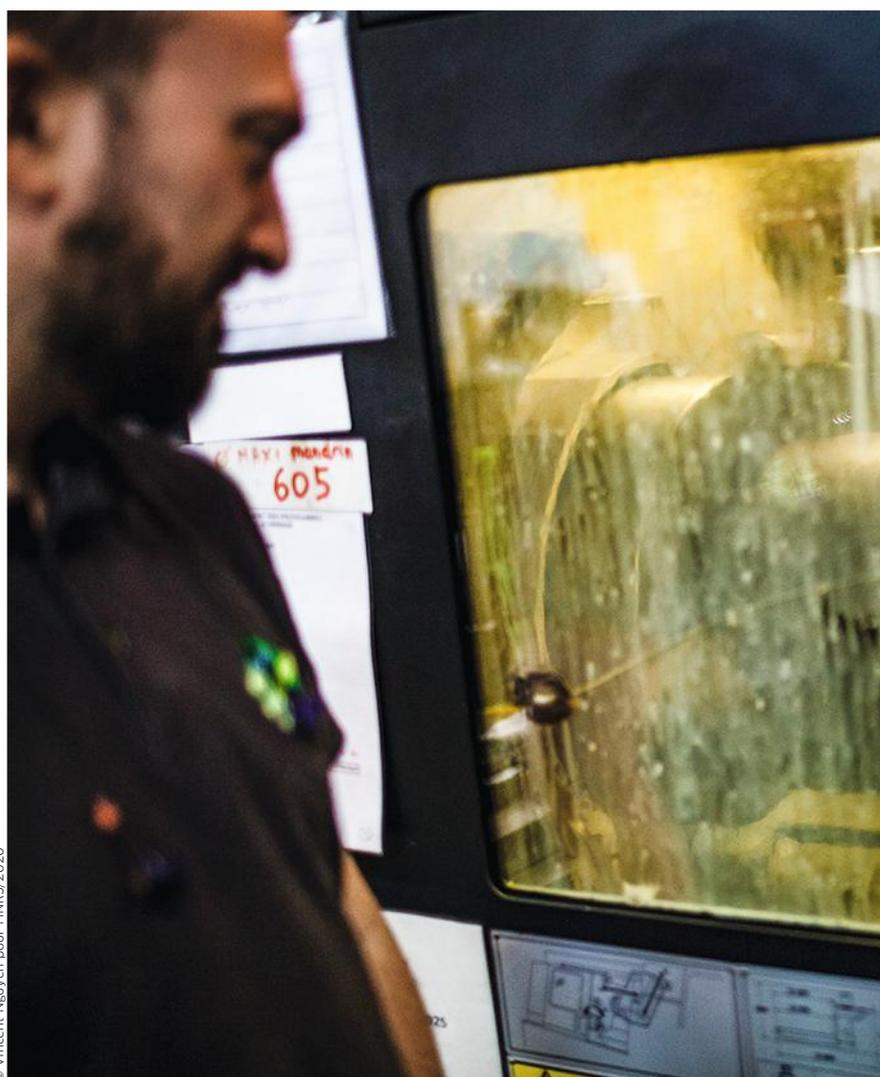
		FRACTION PARTICULAIRE ESTIMÉE DES BROUILLARDS D'HUILE		FRACTION GAZEUSE ESTIMÉE DES BROUILLARDS D'HUILE	
		COEF	P	COEF	P
CAPOTAGE			0,0002		0,058
	Oui	0,00		0,00	
	Non	0,42		0,31	
CLUSTER D'ACTIVITÉS			0,0000		0,0000
FRANCE	Usinage	0,00		0,00	
	Déplacements/réglages	0,13		0,07	
	Autres activités	0,32		0,22	
	Finition / nettoyage /manutention	0,73		0,19	
	Manutention/logistique	0,59		0,55	
SUISSE	Réglage / changement d'outils	-0,61		-0,52	
	Réglages	0,24		0,49	
	Réglages / usinage	0,09		-0,50	
	Maintenance	0,28		-0,68	
	Changement outils / finition / autres	0,02		-0,74	
CONFIGURATION ATELIER			0,0000		0,0000
	Atelier indépendant cloisonné	0,00		0,00	
	Hall industriel	0,78		1,17	
TRAITEMENT DES FLUIDES			0,0000		0,0000
	Non recyclés	0,00		0,00	
	Non épurés	0,42		0,70	
	Épuré réservoir machine	-0,20		0,01	
	Épuré centrale	-0,20		0,11	
UTILISATION DE SOLVANTS			0,0000		0,002
	Non	0,00		0,00	
	Oui	0,56		0,46	
TEMPÉRATURE ATELIER			0,003		
	19° - 21 °C	0,00			
	22° - 24 °C	-0,34			
	25 ° - 29 °C	-0,32			
TYPE D'USINAGE					0,0000
	CNC			0,00	
	Décolleteuse à cames			0,83	
	Rectification par meules			-0,23	
	Autres (presses)			-0,37	
UTILISATION D'HUILES HYDRAULIQUES					0,0091
	Non			0,00	
	Oui			0,28	
VARIANCE EXPLIQUÉE DU MODÈLE (R²)		66%		71%	

→ TABLEAU 3
Contribution
des différents
déterminants à la
construction du
modèle statistique
pour les deux
fractions estimées
des brouillards
d'huiles.

- l'absence de capotage des machines ;
- la configuration de l'atelier (hall industriel *versus* atelier indépendant cloisonné) ;
- le mode de gestion et de traitement des fluides d'usinage (non recyclés, non épurés, épurés avec réservoir machine, épurés réservoir central) ;
- la température de l'atelier ;
- et les « clusters d'activité ». Ce dernier facteur joue un rôle très important dans l'explication de la variance du modèle, suggérant qu'à circonstances égales, c'est le type d'activité qui prédit l'exposition du salarié. Tous ces facteurs expliquent 62 % de la variance (R^2) pour la fraction particulaire.

Pour la fraction « gazeuse » collectée, les déterminants les plus explicatifs sont : l'absence de capotage des machines, la configuration de l'atelier (hall industriel *versus* atelier indépendant cloisonné), le traitement des fluides (non recyclés, non épurés, épurés avec réservoir machine, épurés réservoir central), le type d'usinage mis en œuvre, l'utilisation d'huile hydraulique et les « clusters d'activité ». Tous ces facteurs expliquent 71 % de la variance (R^2) pour la fraction gazeuse. Les résultats de la modélisation donnent des indications pertinentes pour mieux comprendre les situations de travail. Toutefois, les déterminants sélectionnés ne sont pas suffisamment explicatifs des différences entre les entreprises étudiées. Y a-t-il des déterminants complémentaires à trouver, pour caractériser encore plus finement les expositions des travailleurs ?

L'analyse des déterminants de l'exposition a permis de mettre en évidence que certaines activités des opérateurs sont plus exposantes que d'autres. Ainsi, une attention accrue doit être portée lors des phases transitoires de production (réglage de machine, changement d'outils ou maintenance de premier niveau). L'opérateur d'usinage intervient dans la machine, capotage ouvert, et se retrouve en contact avec le fluide de coupe, en manipulant des éléments souillés de fluide. Ces manipulations peuvent exposer l'opérateur d'usinage, soit par inhalation de l'air chargé en brouillard d'huile encore présent dans la machine lors de l'ouverture du capotage, soit par contact avec des éléments souillés de fluide dans la machine. Pour limiter les risques d'exposition lors de ces phases spécifiques, les machines récentes peuvent disposer d'une temporisation à l'ouverture, pour permettre à l'aspiration d'éliminer la plus grande partie du brouillard. Pour les machines qui en sont dépourvues, il conviendrait, dans les bonnes pratiques, d'imposer à l'opérateur une attente de quelques secondes, la machine à l'arrêt, avant de procéder à l'ouverture du capotage. De plus, il serait également approprié de prendre en compte ses phases transitoires dans la stratégie de prélèvement lors de la réalisation des mesures pour la quantification des expositions.



© Vincent Nguyen pour l'INRS/2020

L'approche par les déterminants de l'exposition et la modélisation des variables apportent un éclairage complémentaire aux connaissances déjà disponibles, concernant l'exposition aux brouillards d'huiles et pour la prévention du risque. Toutefois, dans l'exemple traité ici, cette approche ne permet pas d'expliquer l'intégralité des situations de travail, et certaines observations de terrain réalisées par le biais des suivis de poste font apparaître des problématiques non mises en évidence par la modélisation. L'utilisation de la soufflette à air comprimé pour le nettoyage des pièces (retrait des copeaux et du fluide de coupe résiduels) en est un parfait exemple. Lorsque le nettoyage de la pièce est réalisé à l'intérieur de l'enceinte de la machine, si une aspiration à la source est en place sur la machine, l'opérateur se trouve faiblement exposé aux brouillards générés par l'action de nettoyage. Cependant, très souvent pour assurer la cadence de production, l'opérateur retire la pièce usinée de la machine pour relancer la production. Le nettoyage de la pièce produite est alors

Usinage de pièces pour moules en Inconel (alliage à base de nickel, chrome, vanadium...).



effectué en dehors de la machine, exposant l'opérateur à un brouillard de fluide de coupe provoqué par l'action de l'air comprimé sur le fluide de coupe couvrant encore la pièce. Néanmoins, des solutions existent pour atténuer l'impact de cette étape de nettoyage des pièces: le recours à un système de boîtes à gants ventilées ou encore l'utilisation de machine à laver d'atelier sont des options envisageables. La réduction de la pression d'utilisation de l'air comprimé peut paraître sur le papier une approche à envisager également, toutefois, elle entraîne l'allongement de l'opération de nettoyage et réduit le bénéfice de la mesure de protection.

L'autre point important, que l'approche par modélisation n'a mis en évidence que partiellement et qui peut avoir un impact sur le niveau de concentration du brouillard, concerne la captation et l'épuration de l'air des machines d'usinage. Le réseau prévention préconise depuis de nombreuses années la captation, l'épuration et le rejet extérieur de l'air des machines. Dans le cadre de nos campagnes de prélèvements, il est apparu que seulement un tiers des entreprises volontaires se trouvait dans cette configuration. Pour les entreprises restantes, le rejet de l'air des machines (épurés ou non en fonction des entreprises) est effectué dans l'atmosphère des ateliers. Qu'il s'agisse d'un épurateur à filtre, d'un électrofiltre ou d'un collecteur de brouillard d'huile mécanique, le modèle n'a pas mis en évidence de différence significative sur les concentrations en brouillards (particulaire et totale). Néanmoins, il faut garder à l'esprit que ces épurateurs doivent être entretenus et nettoyés pour rester efficaces. De plus, leur capacité d'épuration prouvée ne concerne que la fraction particulaire du brouillard ; ils sont inadaptés pour la collecte et l'épuration de la fraction gazeuse du brouillard, ce qui renforce l'intérêt du rejet canalisé extérieur dans le cadre de la prévention des expositions aux fluides de coupe.

Par ailleurs, les observations de terrain ont mis en évidence quelques mauvaises pratiques en termes d'hygiène. Il arrive encore, dans certaines situations, que des travailleurs consomment des denrées alimentaires sur le poste de travail, malgré la réglementation en vigueur. Entre les surfaces de travail potentiellement souillées par l'entreposage temporaire de pièces sur les établis, ou les éventuelles projections/éclaboussures de fluide de coupe de machines non ou partiellement capotées, le risque d'ingestion de fluides se trouve fortement accru.

La problématique liée à l'utilisation des fluides de coupe est complexe et les voies d'exposition des travailleurs à ces substances sont multiples. Bien que l'analyse des situations de travail apporte des éléments significatifs pour identifier les risques et proposer la prévention la mieux adaptée possible aux travailleurs, des interrogations subsistent et des investigations sont encore nécessaires. À titre d'exemple, la question de la contamination bactérienne des bains de fluides aqueux et les risques d'exposition aux bioaérosols constituent un axe d'étude qui reste encore à approfondir pour améliorer la protection des travailleurs.

Conclusion

L'étude réalisée sur les déterminants d'exposition montre qu'il subsiste encore, dans certaines entreprises, des expositions importantes (dépassements de la valeur recommandée) aux brouillards d'huile. Elle met également en avant la contribution non négligeable de la fraction gazeuse dans ces expositions, c'est-à-dire que l'estimation de la seule fraction particulaire des brouillards d'huile conduit à sous-estimer l'exposition réelle. L'approche par les déterminants a permis d'apporter un éclairage supplémentaire pour la compréhension des situations de travail dans les secteurs d'activité concernés et la prévention des risques liés à l'exposition aux brouillards d'huile. Il ressort que les phases transitoires de production doivent faire l'objet d'une attention accrue, car elles sont susceptibles d'être sources d'expositions pour les travailleurs de l'usinage. ●

1. L'approche « stepwise » consiste à construire une modélisation statistique en ajoutant la variable statistiquement la plus significative ou en retirant la variable la moins significative à chaque étape du modèle. Cette méthode permet d'identifier un sous-ensemble utile de prédicteurs.

BIBLIOGRAPHIE

[1] BURDORF A. – Identification of determinants of exposure: consequences for measurement and control strategies. *Occupational and Environmental Medicine*, 2005, 62(5), pp. 344-350.

[2] FICHE MÉTROPOL M-282 – Fluides d'usinage. INRS, août 2016. In : Base de données MetroPol de l'INRS. Accessible sur : www.inrs.fr/metropol.

[3] KHANH HUYNH C., HERRERA H., PARRAT J. ET AL. – Occupational exposure to mineral oil metalworking fluid (MWFs) mist: development of new methodologies for mist sampling and analysis. Results from an inter-laboratory comparison. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 151.

[4] RECOMMANDATION DU COMITÉ TECHNIQUE NATIONAL DES INDUSTRIES DE LA MÉTALLURGIE R 451 – Prévention des risques chimiques causés par les fluides de coupe dans les activités d'usinage de métaux. Cnam, 2015, 12 p. Accessible sur : www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/31228/document/r451.pdf.

Remerciements

L'auteur tient à remercier tout particulièrement Nancy Hopf et Jean-Jacques Sauvain, Unisanté – Centre universitaire de médecine générale et santé publique (Lausanne, Suisse) pour leur contribution à cette étude.

PRÉVENTION DE L'EXPOSITION AUX FLUIDES DE COUPE : DES SOLUTIONS CONCRÈTES

Cet article présente deux exemples de démarches de prévention des risques liés à l'exposition aux fluides de coupe, menées en entreprise avec le concours des Caisses d'assurance retraite et de santé au travail (Carsat). Dans la continuité de son programme relatif aux risques chimiques, un établissement a engagé, depuis plusieurs années, une démarche de substitution de ses huiles entières. Une autre entreprise a mené un projet de mise en place d'un système de captage. Des éléments importants sont à prendre en compte et à définir dans le cahier des charges, afin d'intégrer un futur système d'aspiration, à la fois performant et pérenne pour l'entreprise.

CHRISTOPHE BOUDY,
FABRICE LERAY
Carsat
Pays-de-la-Loire

FABRICE MARTINET
Carsat
Rhône-Alpes

Comme indiqué dans les précédents articles, les huiles entières, aqueuses et végétales sont composées de substances chimiques diverses. Certaines d'entre elles peuvent être dangereuses et susceptibles, après des expositions prolongées, de générer des affections cutanées et/ou respiratoires. Ces huiles peuvent aussi voir leur composition évoluer lors de leur utilisation et conduire à la formation de substances cancérigènes. Il convient donc pour l'entreprise de prendre les mesures de prévention les mieux appropriées.

Pour mettre en œuvre les bonnes mesures, elle doit s'appuyer sur les neuf principes généraux de prévention, définis à l'article L. 4121-2 du code du travail¹. Ils consistent, par ordre de priorité, à éviter l'ensemble des risques, voire à les supprimer si cela est techniquement possible, à les évaluer, à les combattre à la source, à remplacer ce qui est dangereux par ce qui ne l'est pas ou qui l'est moins (se référer au § 6.a : « Exemple de substitution »), à privilégier les mesures de protection collective aux mesures de protection individuelle (consulter le § 6.b : « Exemples de captage des aérosols de fluide de coupe »), à assurer la formation et l'information des travailleurs.

L'ensemble des préconisations spécifiques pour le choix et le suivi d'une huile et des mesures générales de prévention à appliquer en complément sont décrites dans la recommandation de la Cnam (pour le Comité technique national A - Métallurgie) R 451 (Cf. *Pour en savoir plus*).

Deux exemples de mise en œuvre de moyens de prévention sont présentés : le premier concerne la substitution de fluides de coupe à base d'huiles minérales par d'autres à base d'huiles végétales ;

le second détaille la réalisation d'une installation de ventilation, avec récupération d'énergie, dans un nouvel atelier.

Substitution de fluides de coupe à base d'huiles minérales par des fluides à base d'huiles végétales

L'établissement Howmet Fixations Simmonds SAS, situé à Saint-Cosme-en-Vairais (Sarthe), a ouvert ses portes en 1938, pour devenir aujourd'hui une entreprise reconnue dans l'aéronautique et l'industrie. Cet établissement de 500 salariés (28 000 m² de bâtiments) conçoit, développe et fabrique des solutions de fixations (plus de 5 000 références) pour les constructeurs et les équipementiers du monde entier. Son savoir-faire repose sur les métiers suivants :

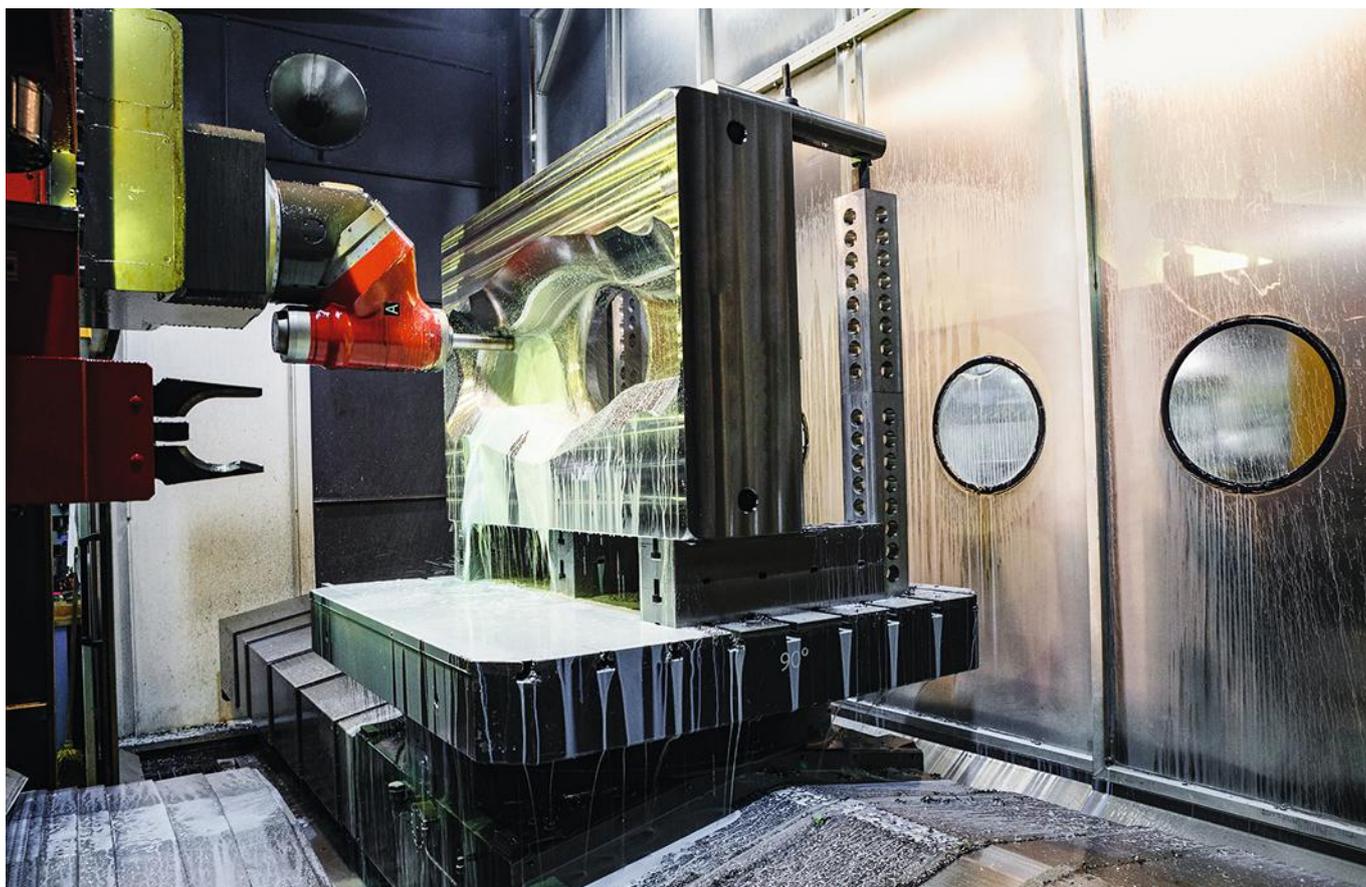
- forgeage, emboutissage : opérations primaires ;
- tournage, perçage, taraudage, serrage : opérations secondaires ;
- traitement thermique et traitement de surface : opérations finales.

L'établissement a mis en place des procédés qui respectent les normes de qualité, de sécurité et de protection de l'environnement. L'établissement est classé ICPE (Installation classée pour la protection de l'environnement).

Démarche d'évaluation et de prévention des risques chimiques

La culture de prévention des risques professionnels est ancrée dans l'établissement et se formalise par un engagement de la direction au travers de sa « politique santé et sécurité ». Elle s'appuie sur un service HSE, composé de cinq personnes. Celui-ci assure le pilotage et l'animation de la





© Vincent Nguyen pour l'INRS/2020

démarche prévention au quotidien, de concert avec les membres de la CSSCT², et l'encadrement de proximité.

Les exigences des clients, le degré de complexité des pièces fabriquées, etc., imposent d'utiliser des produits et des procédés susceptibles d'avoir un impact sur la santé des travailleurs et, bien évidemment, sur l'environnement.

Au cours de son évaluation des risques, l'établissement a réalisé un inventaire de ces produits, puis une recherche et une analyse de leurs dangers. L'établissement a logiquement exploité bon nombre de documents utiles comme les étiquettes des produits, les fiches de données de sécurité (FDS), la fiche d'entreprise établie par le médecin du travail, les rapports d'incidents, ou bien les comptes rendus de la CSSCT. Les émissions générées par les procédés, comme les fluides de coupe, ont pour leur part nécessité une recherche d'informations complémentaires, basées notamment sur les documents publiés par l'INRS (tels que le Guide pratique ED 972 par exemple ; Cf. *Pour en savoir plus*).

De manière à caractériser les expositions chimiques liées à chaque situation de travail, l'établissement a compilé de nombreuses données sur l'organisation du travail, la nature des procédés mis en œuvre, l'état des produits et leur volatilité, les modes d'émission (projection mécanique...), les

quantités, les voies d'exposition, les durées et fréquences d'exposition, l'efficacité des moyens de prévention existants (ventilation générale, captage localisé...). Le recueil de ces éléments a nécessité, de la part de l'établissement, une observation de l'activité réelle de chaque poste de travail et un questionnement des salariés.

Ces différentes informations renseignent une base de données spécifique groupe, calquée sur un modèle d'évaluation des risques de type Seirich (Système d'évaluation et d'information sur les risques chimiques en milieu professionnel ; Cf. *Pour en savoir plus*). Les résultats de cette évaluation sont exploités en collaboration avec le service de santé au travail de la Sarthe. Les avis communiqués par le médecin du travail sont intégrés au dossier médical, notamment dans le cadre du suivi individuel renforcé (SIR).

La priorité de l'établissement, concernant le risque chimique, est donnée à la suppression du risque, voire à la substitution du produit incriminé quand elle est techniquement possible (et que la suppression ne l'est pas). Chaque situation de travail étant unique, l'établissement mène au préalable une analyse technique qui prend en compte, non seulement les contraintes de fonctionnement et de production, mais aussi les conséquences de la

substitution envisagée. Les actions sont discutées lors des séances de la CSSCT.

Cette démarche peut conduire à des modifications aux postes de travail, à la mise en place de nouveaux équipements ou procédés, de mesures techniques (réseaux d'aspiration centralisés brouillards d'huile - poussières métalliques, filtrations), organisationnelles (entretien annuel des réseaux par sous-traitance, référent ventilation interne, suivis réglementaires des VLEP, campagnes de mesurages des rejets des fumées) et de formation aux postes. À ces mesures peut s'ajouter, pour les risques résiduels, la mise en place d'équipements de protection individuelle en adéquation avec la tâche à réaliser, en tenant compte des contraintes physiologiques associées.

La demande d'homologation d'un nouveau produit ou processus sur le site est soumise à l'accord préalable du responsable HSE, des essais jusqu'à la mise en production.

Pour éviter les écueils, l'établissement a institué une veille, notamment réglementaire, sur le risque chimique, et met régulièrement à jour sa documentation interne, comme les FDS.

Démarche de réduction des HAP dans les huiles entières

La publication de la recommandation Cnam R 451 (Cf. *Pour en savoir plus*) a été l'occasion pour l'établissement de refaire un point sur les risques associés aux huiles entières et solubles.

Un groupe de travail pluridisciplinaire, composé de membres du CHSCT³ et de représentants des services HSE, méthodes, production, achats, amélioration continue a été constitué début 2012, avec un pilotage assuré par la responsable du service HSE, et une animation par un alternant ingénieur mécanique et production dans le cadre de son apprentissage.

L'objectif du groupe a été, dans un premier temps, d'analyser et de décrypter la recommandation, puis d'établir un plan d'actions en considérant les aspects de santé, de qualité et de coûts.

La deuxième phase a porté sur l'intégration de la valeur de référence en benzo[a]pyrène (taux en BaP < 100 µg/kg) dans les paramètres de contrôle des huiles minérales, et sur la réalisation d'une cartographie du taux de BaP par secteur d'activité, à partir de l'inventaire des huiles :

- neuves pour le secteur aéronautique ;
- recyclées⁴ pour le secteur industrie.

Pour ce faire, un laboratoire externe a accompagné l'établissement dans le suivi de ses huiles. Des concentrations relativement élevées (> 30 µg/kg) ont été retrouvées dans certaines références d'huiles entières neuves. Une réflexion a donc été menée auprès des fournisseurs d'huiles, pour faire abaisser ce taux au plus bas que techniquement possible.

Concomitamment, les analyses réalisées, au secteur décolletage industrie, sur des huiles entières recyclées ont montré des dépassements de près de quatre fois la valeur de référence, et ont permis d'identifier non seulement une oxydation prématurée de ces huiles (« siccation⁵ »), mais aussi des pollutions accidentelles par des ajouts d'huiles de graissage.

Après échanges avec les fournisseurs, des indicateurs supplémentaires, autres que le taux de BaP, ont été pris en compte par le groupe de travail comme, à titre d'exemples :

- pour les huiles entières, la proportion de particules métalliques. L'usinage des métaux favorise l'enrichissement des huiles en particules métalliques potentiellement dangereuses (cobalt, nickel, chrome, béryllium...). Pour le limiter, une filtration magnétique en continu a été installée sur la plupart des machines ;
- pour les fluides aqueux, le pH, la teneur en micro-organismes, la présence d'amines « nitrosables », les taux de nitrites...

Pour procéder au choix des huiles à homologuer, la dangerosité des huiles et leurs potentiels impacts sur la santé ont été pris en compte dès la phase d'essai et, pour valider ce choix, leur homologation n'a été effective qu'après :

- vérification de la composition par un laboratoire externe ;
- avoir recueilli l'avis du médecin du travail.

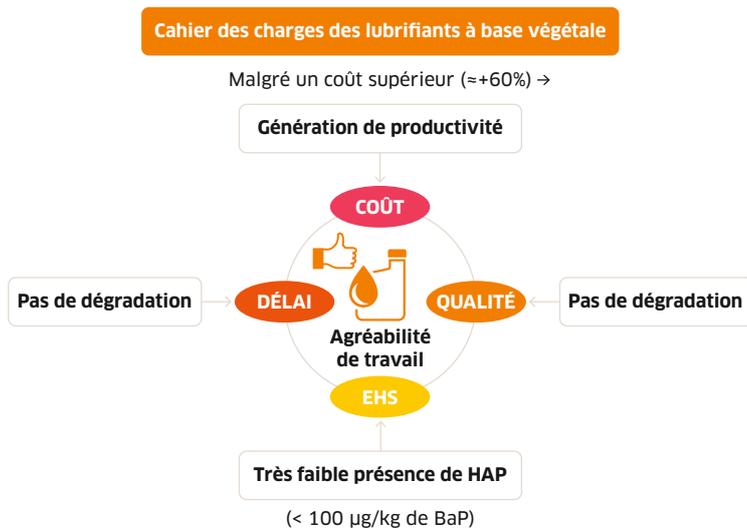
Les travaux avec les fournisseurs, jusqu'à début 2013, ont permis d'affiner les exigences techniques définies par les procédés d'usinage, comme, à titre d'exemples :

- limiter les élévations de température des outils ;
- atténuer les phénomènes de « siccation » des huiles ;
- conserver la qualité de l'usinage.

Une journée technique sur « *les risques liés aux fluides de coupe* », organisée en septembre 2012 par l'Union des industries et des métiers de la métallurgie (UIMM) de la Sarthe, en partenariat avec la Carsat des Pays-de-la-Loire et l'INRS, a été un tournant dans la démarche menée par l'établissement. En effet, cette journée lui a non seulement permis de présenter l'ensemble des actions engagées mais aussi de mettre en exergue leurs limites, le coût associé aux prestations externalisées, sa difficulté à trouver des laboratoires externes en capacité d'analyser des taux de BaP avec précision.

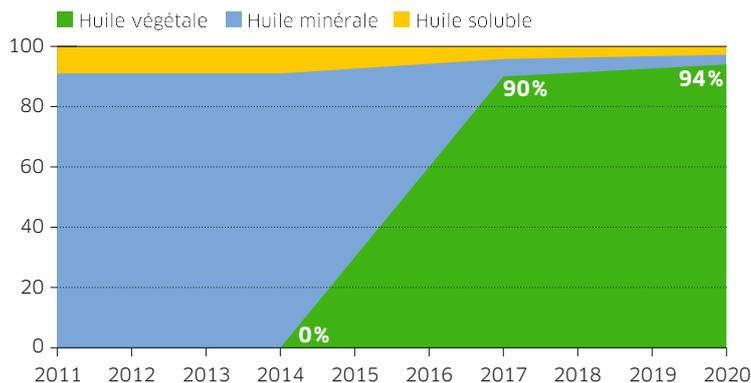
En toute transparence avec les fournisseurs, l'établissement a souhaité profiter de l'accompagnement proposé par le contrôleur de sécurité et de l'expertise du Laboratoire interrégional de chimie de l'Ouest (LICO) de la Carsat, pour poursuivre sa démarche de réduction du risque.





↑ FIGURE 1 Contenus du cahier des charges des lubrifiants à base végétale.

Évolution du type d'huile (en %) sur les process de HOWMET AEROSPACE Saint Cosme (72)



↑ FIGURE 2 Évolution des types de lubrifiants utilisés par l'entreprise au cours du temps.

Une fois les modalités d'accompagnement et les rôles de chacun précisés, les prélèvements réalisés début 2013 par le LICO ont permis de démontrer que les huiles usagées :

- étaient mesurées, dans le secteur aéronautique, à des concentrations en BaP inférieures à la valeur de référence ;
- étaient mesurées à l'inverse, dans le secteur industriel, à des concentrations en BaP au-delà du seuil de référence.

Un plan d'expérience a été défini, dans le secteur industrie, et a consisté à :

- vidanger complètement l'ensemble des tours d'usinage ;
- les alimenter en huiles neuves (TO de l'étude) ;
- recycler les huiles de coupe avec :
 - un essorage des copeaux et une filtration à 10 µm,
 - une vidange par mois ;
- réinjecter l'huile recyclée dans les tours en complétant si nécessaire avec une huile neuve ;
- réaliser des prélèvements mensuels des huiles de coupe sur chacun des tours.

Les résultats obtenus à la suite du plan d'expérience ont montré des teneurs non homogènes en BaP et parfois supérieures à la valeur de référence. L'établissement a donc fait le choix de suspendre l'étude sur les huiles minérales et de s'orienter vers une substitution par des huiles de coupe à base végétale. Les essais avec les nouvelles huiles ont été lancés en septembre 2013, après l'élaboration d'un cahier des charges cible et d'un plan d'actions (Cf. Figure 1).

Cette nouvelle période de tests s'est déroulée jusqu'à la fin de l'année 2015, avec un séquencage des travaux entre l'établissement et les fournisseurs (essais et résolution de problèmes techniques, ajustements des formulations ou propositions de nouvelles références d'huiles, étude des coûts), et l'analyse des échantillons par le laboratoire de la Carsat. Le déploiement des nouvelles références d'huiles végétales s'est fait progressivement sur l'ensemble des secteurs de l'établissement, jusqu'en 2016 (Cf. Figure 2).

Les objectifs fixés par l'établissement dans son cahier des charges ont été respectés :

- le passage à un lubrifiant industriel à bases végétales sur l'ensemble des secteurs du site de Saint-Cosme, malgré un coût d'achat plus élevé (≈ + 60 %) ;
- le changement a été approuvé par l'ensemble des acteurs de l'établissement ;
- des gains de productivité (outillage, volume) ont été observés sur certains process ;
- l'absence de dégradation de la qualité des pièces produites a été constatée.

Toutefois, l'utilisation d'une huile végétale a nécessité de la part de l'établissement de travailler sur une nouvelle filière de recyclage des huiles et sur un changement de produits dégraissants.

En résumé, la technologie végétale lui a permis d'atteindre son objectif initial de réduction du taux de HAP dans les huiles et, évidemment, bien en deçà du seuil de la recommandation de la Cnam R451 sur les fluides de coupe.

Pour l'établissement, ce seul critère reste insuffisant. L'entreprise a, depuis l'étude, intégré d'autres facteurs pour le suivi de ses fluides de coupe (huiles végétales, entières et solubles) comme la vérification de l'enrichissement en particules métalliques, la présence d'allergènes, d'irritants, ou encore d'amines « nitrosables » susceptibles de générer des composés cancérigènes, etc.

L'établissement reste en veille sur de nouveaux lubrifiants susceptibles de réduire les risques pour la santé, mais aussi les coûts associés.

Réalisation d'un réseau de captage des brouillards d'huile avec récupération d'énergie dans un atelier neuf

L'entreprise « USI+ », située à Ayse (Haute-Savoie), est spécialisée dans le décolletage et l'usinage de

pièces techniques et ouvragées. En 2018, cette entreprise de 62 salariés a intégré un nouveau site industriel. Dès la définition des besoins pour la conception de ce nouveau bâtiment, la mise en place de réseaux d'aspiration centralisés des aérosols de fluide de coupe a été intégrée au projet.

Le dirigeant, conscient de l'importance de protéger les salariés de l'entreprise des brouillards d'huile, a opté pour un système d'aspiration centralisé avec rejet de l'air filtré canalisé vers l'extérieur du bâtiment. Les 75 centres numériques de décolletage-usinage de l'atelier de production ont été reliés à ce système.

L'installateur avait intégré, selon le projet initial, le raccordement simple à l'aspiration des chambres d'usinage des machines (émission principale). Après plusieurs semaines de fonctionnement et des échanges avec l'entreprise, des raccordements supplémentaires, avec un débit d'aspiration de l'ordre de 300 m³/h par piquage, ont été réalisés au niveau des circuits d'évacuation des copeaux (émissions secondaires) de cinq machines, dont l'émission en brouillards d'huile était encore significative.

En lien avec l'utilisation d'une huile entière de lubrification (produit combustible, Cf. Encadré 1), chaque machine usinant du titane est équipée d'un système d'extinction incendie automatique et d'un clapet « coupe-feu » sur les gaines d'aspiration, afin d'éviter toute propagation d'un incendie vers l'ensemble du réseau d'aspiration.

Après une étude préalable du parc de machines à équiper (centres numériques récents, entièrement capotés), le fournisseur a proposé la mise en place de deux réseaux centralisés afin de relier l'ensemble des machines réparties dans l'atelier. Ces installations présentent les performances aérauliques suivantes :

- capacité d'aspiration totale : 20 000 m³/h par réseau soit 40 000 m³/h au total ;
- aspiration totale effective : 36 000 m³/h pour l'ensemble des machines ;
- débits unitaires par machine : 150 à 1 100 m³/h selon le type de machine (détermination empirique ou selon les données fabricants des machines) ;
- vitesses de transport dans les gaines : 4 à 12 m/s selon les branches.

Les centrales de filtration et les ventilateurs de 30 kW ont été placés dans des locaux techniques dédiés. La centrale, particulièrement adaptée aux aérosols de fluides de coupe, est composée de trois étages de filtration : deux étages de filtration à coalescence (autodrainant) et un étage de filtration (en finition) de qualité HEPA (de l'anglais *High Efficiency Particulate Air* : filtre à air à haute efficacité) de classe H 13 (taux d'efficacité de 99,95 % pour des particules de taille de 0,3 µm).

Un manomètre à pression différentielle (par unité de

filtration) permet de surveiller l'état de colmatage des filtres. Le système choisi présente également une faible incidence sur le niveau sonore de l'atelier et en environnement (limite de propriété), notamment grâce à la mise en place de silencieux.

L'atelier est également équipé de systèmes de réintroduction d'air neuf à diffusion basses vitesses (vitesses d'air soufflé inférieures à 0,4 m/s au niveau des postes de travail) à travers des gaines textiles, de diamètre 1 120 mm et de longueurs de

ENCADRÉ 1

UNE HUILE VÉGÉTALE INSATURÉE PEUT DÉCLENCHER UN INCENDIE

Un chiffon imbibé d'huile végétale au fond d'un seau peut chauffer suffisamment pour s'enflammer spontanément.

Les huiles végétales et le risque incendie

La substitution de produits dangereux est une obligation réglementaire (selon les décrets n^{os} 2003-1254 et 2001-97). Cela amène les entreprises à utiliser, dans certains cas, des huiles végétales. L'utilisation de ce type d'huile nécessite cependant une nouvelle évaluation du risque chimique.

En effet, la plupart des huiles végétales sont riches en acides gras insaturés, notamment les huiles de lin, de colza, de tournesol, de soja, d'olive, de maïs... Cette proportion en acides gras insaturés est moins importante dans les huiles de palme et de coco.

Ces différents corps gras végétaux peuvent s'oxyder au contact de l'air, les peroxydes formés sont instables et se décomposent très facilement. À titre d'exemple, les différents déchets ou outils souillés par des huiles végétales peuvent s'enflammer spontanément.

Cette réaction autocatalytique d'oxydation est complexe et dépend notamment de la proportion en acides gras insaturés, de la température, de la présence de catalyseurs et de l'absence d'inhibiteurs d'oxydation.

Les mesures de prévention à mettre en œuvre

Il est impératif pour l'ensemble des déchets (poussières, chiffons) et pour les outils (pinceaux, rouleaux, éponges) imbibés d'huiles végétales :

- de les rendre inertes par immersion dans de l'eau ou de les conserver dans un récipient métallique hermétiquement fermé,
- de limiter les quantités souillées ;
- d'éviter de les stocker au soleil ou à proximité d'une source de chaleur susceptible d'activer la réaction ;
- de bien refermer les bidons d'huile végétale après utilisation.

À noter : la texture microporeuse de certains chiffons augmente la surface d'échange avec l'air et favorise la réaction d'auto-échauffement.

L'inflammabilité de ces huiles n'apparaît pas forcément sur l'étiquetage ou la fiche de données de sécurité. Le risque d'inflammabilité doit, néanmoins, être pris en compte lors de leur utilisation car celles-ci demeurent inflammables.

En savoir plus : Dossier Incendie sur les lieux de travail : <https://www.inrs.fr/risques/incendie-explosion/introduction.html>.



ENCADRÉ 2

CONCEPTION DES INSTALLATIONS DE VENTILATION

L'objectif d'une installation de ventilation dans un atelier d'usinage est de diminuer la concentration des brouillards d'huile à un niveau aussi bas que possible, il est recommandé que l'exposition des opérateurs ne dépasse pas 0,5 mg/m³ (recommandation de la Cnam R 451). Pour cela, il est nécessaire de traiter toutes les sources d'émissions. Notamment l'utilisation de la soufflette pour le nettoyage des pièces usinées, lorsqu'elle s'avère nécessaire, constitue une source d'émission qu'il conviendra de traiter par la mise en œuvre de dispositifs de captage spécifiques. La conception et la réalisation d'une installation de ventilation doivent être réalisées par des entreprises spécialisées.

La conception des dispositifs de captage sur les machines et des capotages, qui est de la responsabilité de leurs fabricants, a une grande importance sur l'efficacité du captage des brouillards d'huile. Les fabricants de machines doivent également fournir les débits d'aspiration nécessaires pour un bon captage sur leurs machines et la perte de charge que ce débit entraîne. Ces données sont nécessaires pour que l'entreprise de ventilation puisse concevoir l'installation en déterminant notamment le débit global et la dépression que doit pouvoir fournir la centrale d'aspiration. Les diamètres des conduits de ventilation seront déterminés de façon à ne pas avoir de sédimentation significative des brouillards sans générer de niveau sonore trop important.

Le recyclage de l'air dans les locaux après filtration entraîne toujours une réintroduction d'une partie des polluants dans l'atelier, notamment à cause de la présence d'une phase vapeur dans les brouillards qui n'est pas filtrée (voir article sur Les déterminants de l'exposition appliqués aux brouillards de fluide de coupe). Il est fortement recommandé que le rejet de l'air capté se fasse à l'extérieur. La compensation de l'air extrait par la ventilation est également très importante pour le bon fonctionnement de l'installation. Les principes de conception d'une installation de captage des brouillards d'huile sont décrits dans le Guide ventilation n° 6 (ED 972).

28 à 35 m chacune, positionnées au plafond, afin de compenser les volumes d'air extraits. À partir des données du fournisseur du système d'aspiration, le prestataire en conditionnement d'air a installé en toiture quatre unités air – air compactes, intégrant des pompes à chaleur permettant de réchauffer ou de rafraîchir l'air neuf de compensation en utilisant, sans recyclage, l'air provenant des groupes de filtration des brouillards d'huile ou de l'air extérieur. Ce système compense les 36 000 m³/h d'air extrait, permet de limiter les déperditions en calories liées à l'extraction d'air vers l'extérieur en hiver et de réduire les besoins en rafraîchissement de l'atelier notamment par l'évacuation des calories produites par les machines en été. Afin de garantir la pérennité des performances aérauliques et de filtration des réseaux en place, l'installateur réalise une visite annuelle pour effectuer la maintenance préventive et les vérifications périodiques prévues par la réglementation (vérification de l'état des éléments de l'installation, mesurage des débits/vitesses d'air en des points caractéristiques des réseaux d'aspiration). Le prestataire réalise également des mesures, à l'aide d'un compteur de particules, pour vérifier le rendement de filtration (Cf. Encadré 2).

Conclusion

Ces deux exemples de réalisations montrent que les entreprises, notamment avec le soutien des unités techniques des Carsat (centres de mesure

physique et laboratoires de chimie), peuvent se saisir concrètement des questions posées par les risques liés à l'utilisation des fluides de coupe, afin d'y apporter des réponses précises en termes de mesures de prévention. ●

1. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr. Et voir dans ce même numéro pp. 115-120 : Veille et prospective – Industrie du futur et principes généraux de prévention.
2. Commission de santé, sécurité et conditions de travail, au sein du Comité social et économique (CSE) de l'entreprise. Voir : www.inrs.fr/demarche/cssct/ce-qu-il-faut-retenir.html.
3. Remplacé depuis par la CSSCT. Voir : <https://www.inrs.fr/demarche/cssct/ce-qu-il-faut-retenir.html>.
4. Les huiles du secteur aéronautique sont réutilisées dans le secteur industrie, après essorage et filtration à 10 µm.
5. La siccation est une oxydation des doubles liaisons des acides gras conduisant à une réticulation de l'huile.

POUR EN SAVOIR +

- R 451 – Prévention des risques chimiques causés par les fluides de coupe dans les activités d'usinage de métaux. Cnam, 2015. Accessible sur : www.ameli.fr.
- Captage et traitement des aérosols de fluides de coupe. INRS, 2005, coll. Guide pratique de ventilation n° 6, ED 972. Accessible sur : www.inrs.fr.
- Outil Seirich, accessible sur : www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil58.