

ÉVALUATION DES ÉMISSIONS LORS DE L'USINAGE DES MÉTAUX PAR ENLÈVEMENT DE COPEAUX SOUS MICROLUBRIFICATION

Traduction de l'article *Bestimmung und Beurteilung von Emissionen bei der spanenden Metallbearbeitung mit Minimalmengenschmierung*. In : *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, vol. 63, n° 10, octobre 2003, p. 417-424.

Une étude sur les émissions susceptibles de se produire lors de l'usinage des métaux sous microlubrification a été menée dans le cadre d'un projet piloté par la Süddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft (caisse d'assurance maladie professionnelle), en collaboration avec des fabricants de lubrifiants et des entreprises industrielles, et avec l'appui du BIA (Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz). La formation de produits de craquage et de pyrolyse a retenu plus particulièrement l'attention. Plusieurs lubrifiants ont été testés en laboratoire afin de déterminer les substances dangereuses potentiellement formées. Les émissions ont été déterminées sur banc d'essai pour différents paramètres de coupe et différents matériaux (acier, aluminium, fonte). Tous les essais ont présenté une concentration très faible en produits de pyrolyse. Du formaldéhyde était présent à la source, mais seulement à l'état de traces. Il est apparu que le choix du lubrifiant est déterminant pour assurer un faible niveau d'émission dans le cas de la microlubrification. Les huiles de synthèse à base d'esters et les alcools gras de viscosité élevée, non toxiques, présentant une faible perte par évaporation, un point éclair élevé, se sont particulièrement bien comportés dans la pratique.

INTRODUCTION

L'évolution permanente de la législation, le nombre croissant de cas de pathologies cutanées et respiratoires, tout comme la pression croissante sur les coûts ont conduit à l'apparition de nouvelles technologies dans l'usinage des métaux. Celles-ci sont en voie de supplanter la lubrification par arrosage : la microlubrification, de plus en plus utilisée au cours de ces dernières années, a désormais une place bien établie dans l'usinage par enlèvement de copeaux.

Contrairement au procédé conventionnel de lubrification par arrosage, la microlubrification se distingue par une réduction nette de la consommation de lubrifiants. La pulvérisation localisée au voisinage immédiat du point d'usinage entraîne la lubrification juste nécessaire des points de contact entre outil, pièce et copeau. Selon le procédé d'usinage, le matériau à usiner et les paramètres retenus, la consommation de lubrifiant, pour un réglage optimal, est ainsi nettement inférieure à 50 ml/h [1]. Du fait des très faibles quantités de lubrifiant mises en jeu, on s'attend donc, par comparaison avec la lubrification par arrosage, à des

- Métaux
- Usinage
- Vapeur
- Aérosol
- Lubrifiant
- Microlubrification
- Pyrolyse

► SEFRIN H.⁽¹⁾, KIECHLE A.⁽²⁾, WALKER G.⁽²⁾, ZIELASKO W.⁽²⁾, FREILER C.⁽³⁾, THOMAS F.⁽³⁾, PALM I.⁽⁴⁾, EISENBLÄTTER G.⁽⁴⁾, STÄBLER D.⁽⁵⁾, BREUER D.⁽⁶⁾, LICHTENSTEIN N.⁽⁶⁾, QUELLMALZ K.⁽⁶⁾, ROCKER M.⁽¹⁾, WOLF M.⁽¹⁾, TIGLER A.⁽¹⁾.

(1) Süddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft, Mainz

(2) DaimlerChrysler, Stuttgart

(3) Fuchs Europe Schmierstoffe, Mannheim

(4) Heidelberger Druckmaschinen, Wiesloch

(5) Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), Pfinztal

(6) Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz - BIA, Sankt Augustin

DETERMINING AND EVALUATING EMISSIONS FROM METAL CUTTING AND MACHINING WITH MINIMAL QUANTITY LUBRICATION

A study of emissions likely to be generated by machining metals using minimal quantity lubrication was conducted within the scope of a project led by Süddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft - SMBC (institution for statutory accident insurance and prevention in the metalworking industry in southern Germany) in cooperation with lubricant manufacturers and manufacturing companies, supported by Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz – BIA (BG institute for occupational health and safety). Special attention was given to the formation of cleavage and pyrolysis products. Several lubricants was tested in the laboratory to determine whether any potentially dangerous substances were emitted. Emissions were determined on a spindle lathe test bench for different cutting parameters and materials (steel, aluminium, cast metals). Pyrolysis product concentration was found to be very low in all tests. Formaldehyde was present at source, but only in trace amounts. Correct lubricant selection was found to be decisive for ensuring low level emission when using minimal quantity lubrication. Synthetic ester-based oils and high viscosity fatty alcohols with low evaporation loss and a high flash point behaved especially well in practice.

- Metals
- Machining
- Vapour
- Aerosol
- Lubricant
- Minimal quantity lubrication
- Pyrolysis

économies en termes de maintenance, d'entretien, de stockage et d'élimination, mais également à une réduction notable de la nocivité cutanée potentielle.

La question des émissions au poste de travail n'avait jusqu'à présent pas encore été étudiée dans le cas de la microlubrification. On ne savait pratiquement rien, notamment, quant à la formation de produits de craquage et de pyrolyse au cours de l'usinage [2]. Or, compte tenu des faibles quantités de lubrifiant mises en jeu, on pouvait supposer l'existence de contraintes thermiques élevées [3, 4].

PROJET "MICROLUBRIFICATION"

Dans ce contexte, un projet conjoint a été mené par la Süddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft. Il visait à évaluer les risques potentiels liés à la microlubrification. La société Fuchs (fabricant de lubrifiants), le Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) et les sociétés utilisatrices Heidelberger Druckmaschinen et DaimlerChrysler se sont associés afin d'étudier les émissions susceptibles de se produire lors de l'usinage des métaux sous microlubrification [5]. Les échantillons de lubrifiants ont été analysés au BIA.

Une première phase générale du projet a consisté à étudier, en laboratoire, la tendance des lubrifiants à former des produits de craquage et de pyrolyse. À cet effet, des lubrifiants ont été pyrolysés en air reconstitué et les composés volatils formés ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse et spectroscopie de masse [6].

Au cours d'une deuxième phase du projet, il s'agissait ensuite, en s'appuyant sur ces résultats, de procéder à des essais d'usinage dans des conditions proches de la pratique. Ces essais ont été réalisés sur un banc d'essai de l'ICT, avec un outil à microlubrification interne. On a ainsi, dans des conditions de reproductibilité, déterminé le comportement à l'émission de différents lubrifiants pour différents paramètres de coupe et différents matériaux (acier, aluminium et fonte). Les émissions ont pu être déterminées pendant l'usinage, à

proximité immédiate de la source, à l'intérieur du capotage du banc d'essai.

CHOIX DES LUBRIFIANTS

Le choix des lubrifiants à étudier s'est fait dans la perspective de la formation potentielle de produits de dégradation (craquage) au cours de l'usinage.

TABLEAU I

Propriétés des esters de base Basic ester properties

Ester N°	Viscosité à 40°C (mm ² /s)	Point éclair (°C)	Perte par évaporation (Noack) (250 °C - 1 h)
8	8,3	206	27,8
17	17	176	9,7
19	19	> 245	3,2
32	32	> 275	1,3
48	48,5	> 300	1
65	64,9	300	1
88	88	> 265	1
100	138	> 300	0,8

TABLEAU II

Propriétés des lubrifiants du marché Off-the-shelf ester properties

Lubrifiant N° (mm ² /s)	Viscosité à 40 °C	Point éclair (°C) de sécurité	Composition – désignation reprise des fiches de données
1	2,3	112	Huiles minérales hautement raffinées, additivées
2	10,4	174	Préparation à base d'esters, hautement biodégradable, correctement additivée
3	12	220	Mélange de glycérides d'acides gras végétaux
4	20	150	Composés polaires, alcools gras
5	20	> 190	Huile entière, constituée d'un mélange d'huiles végétales et d'esters d'acides gras
6	23	> 175	Préparation contenant des huiles de synthèse hydrocarbonées, avec corps gras dérivés et additifs spécifiques
7	27	180	Composés polaires, alcools gras
8	27	180	Composés polaires, alcools gras
9	30	> 275	Huile de base exempte d'huiles minérales, additivée
10	31	185	Préparation à base d'esters, hautement biodégradable, correctement additivée
11	32	190	Ester d'acide gras, additivé
12	39	> 200	Préparation à base d'huiles végétales
13	40	> 200	Préparation à base d'esters, hautement biodégradable, correctement additivée
14	47	265	Corps gras modifiés
15	50	165	Préparation contenant des huiles de synthèse hydrocarbonées, avec corps gras dérivés et additifs souffrés
16	100	214	Préparation à base d'huiles végétales

Deux groupes de lubrifiants ont été testés afin d'étudier à la fois l'influence d'huiles de base de propriétés différentes et celle d'additifs différents, et de pouvoir transposer par la suite les résultats aux applications pratiques.

Le premier groupe était constitué d'esters purs (ester de base) non additivés. Ce premier groupe a été retenu parce que les esters, à l'état modifié, sont fréquemment utilisés pour la microlubrification. Ils se caractérisent par de très bonnes propriétés lubrifiantes, un point éclair élevé et une faible tendance à l'évaporation ; on considère par ailleurs qu'ils ne présentent pas de risque dermatologique. Afin de caractériser l'influence de la viscosité des lubrifiants, les esters utilisés avaient des chaînes moléculaires de longueur différente (et donc des viscosités différentes). Le *Tableau I* présente les principales propriétés des huiles de base (esters) testées.

Le deuxième groupe comprenait différents lubrifiants du marché, déjà utilisés dans la pratique (*Tableau II*). Ces produits sont constitués de différentes huiles de base, auxquelles sont ajoutés des additifs spécifiques en fonction des applications.

Dans la pratique, les propriétés nécessaires des fluides de coupe, et par conséquent aussi les quantités de lubrifiant au point d'usinage, sont déterminées pour l'essentiel par les contraintes techniques de l'usinage.

PYROLYSE DES LUBRIFIANTS - ÉTUDE EN LABORATOIRE

La tendance à la pyrolyse des différents échantillons de lubrifiants a été étudiée au laboratoire du BIA. Il s'agissait d'identifier les substances dangereuses qui se forment en cas d'échauffement excessif. À cet effet, les lubrifiants utilisés pour la microlubrification ont été chauffés à 400° C et 800° C dans de l'air reconstitué, et pyrolysés ; les composants volatils ont été séparés par chromatographie en phase gazeuse et analysés par spectroscopie de masse [6].

L'analyse qualitative a mis en évidence, pour une température de pyrolyse de 400° C, des traces d'hydrocarbures saturés et insaturés, d'aldéhydes, de cétones, d'esters saturés et insaturés (C₁₆ à C₂₅) ainsi que d'alcools supérieurs (> C₁₅). Les mêmes composés ont été mis en évidence pour une température de pyrolyse de 800° C. On a pu toutefois constater un accroissement des produits de craquage volatils aux températures supérieures.

Pour certains lubrifiants du marché, on a en outre mis en évidence la présence, selon la composition de ces derniers, de traces de H₂S, de SO₂, de COS, de propène, de butène, d'isobutanol, de composés aromatiques (benzène, toluène) et de crésols. L'analyse ayant été uniquement qualitative, il n'a pas été possible de fournir des informations précises quant aux concentrations des substances ainsi mises en évidence.

Il est très difficile de dire dans quelle mesure cette approche analytique en laboratoire permet de reproduire les conditions de la pyrolyse au poste de travail. En laboratoire, la température, la durée de la pyrolyse, etc., peuvent être réglées de manière précise ; au poste de travail, les facteurs d'influence sont généralement beaucoup plus complexes et très difficiles à déterminer. Les résultats en laboratoire n'ont donc, en règle générale, qu'un caractère indicatif ; ils servent uniquement de point de repère pour des mesures ciblées des concentrations en

substances dangereuses aux postes de travail. Les résultats obtenus ici ont ainsi servi de référence pour les essais d'usinage ultérieurs.

ÉTUDE SUR BANC D'ESSAI

L'ICT a élaboré un banc d'essai spécifique afin d'évaluer la tendance à l'émission des lubrifiants utilisés en microlubrification interne. Ce banc d'essai est équipé d'un porte-outils HSK E-63 (Figure 1) et permet des vitesses allant jusqu'à 30 000 tours/min. Il comporte en outre une broche à grande

vitesse de coupe, avec conduit d'alimentation en lubrifiant, une table de translation et une plate-forme dynamométrique pour la détermination des efforts de coupe. Il permet la mesure des quantités de lubrifiant disponibles pour la lubrification à proximité immédiate du porte-outil ou de l'arête de coupe (Figure 2).

Pour un meilleur captage de l'air aux fins de l'analyse, le banc d'essai est entièrement capoté. Un dispositif d'avance permet de déplacer la pièce et autorise ainsi l'enchaînement de plusieurs phases d'usinage à la suite l'une de l'autre. Ce montage a permis de réaliser des séries de 20 perçages sans ouverture du capot.

FIGURE 1

Banc d'essai avec broche à grande vitesse de coupe pour microlubrification interne
Test bench with high speed cutting spindle lathe for internal minimal quantity lubrication

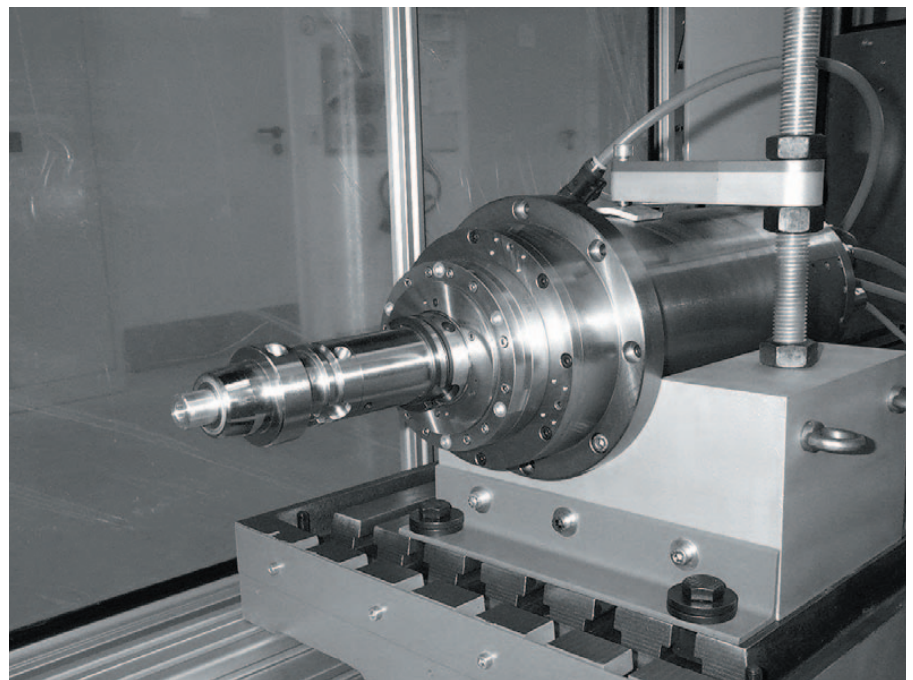
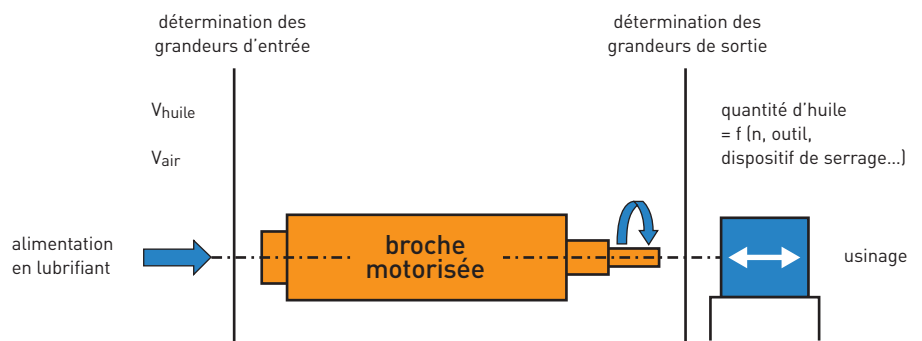


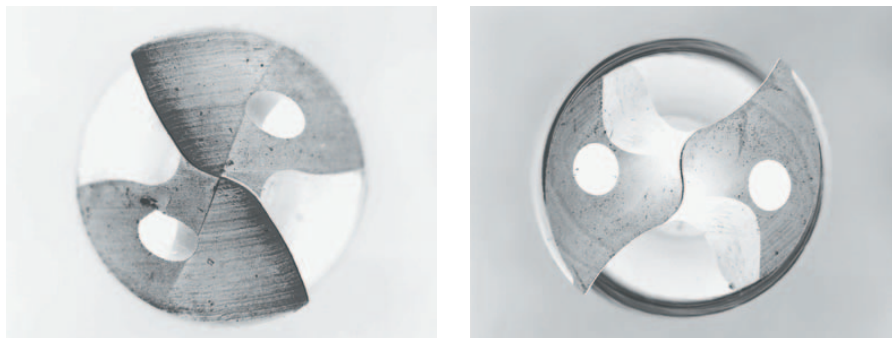
FIGURE 2

Points de prélèvement des aérosols et vapeurs d'huile, des produits de pyrolyse et des poussières sur le banc d'essai
Sampling points for aerosol, oil vapour, pyrolysis product and dust emissions on test bench



FIGURE 3

Forets hélicoïdaux utilisés pour l'usinage à sec, vus de face
Front view of helicoidal bits used for dry machining



Le procédé d'usinage retenu pour les essais a été le perçage car c'est le plus exigeant en matière de microlubrification. Les forets étaient des forets hélicoïdaux spéciaux pour microlubrification, à deux conduits (Figure 3). Les sections transversales des conduits étaient identiques pour les deux forets ; les conduits débouchaient à la pointe de l'outil, vers le logement de copeaux, par une section biaise supérieure.

Les concentrations en vapeurs et en aérosols d'huile à l'intérieur du banc d'essai ont été déterminées à l'aide

d'une tête de prélèvement du type GGP (poussières inhalables et gaz) associant un filtre en microfibres de verre pour la collecte de la phase aérosol et une résine adsorbante XAD-2 pour la collecte de la phase vapeur [7] (Figure 4). Le débit d'échantillonnage de ce dispositif était fixé à 3,5 l/min. L'échantillonnage a été suivi d'une analyse par spectrométrie infrarouge [8] avec, à chaque fois, étalonnage avec le lubrifiant utilisé [9].

Les pompes utilisées satisfaisaient aux exigences relatives aux pompes pour prélèvement d'échantillons de substances

dangereuses aux postes de travail, telles que définies en [10]. Les dispositifs utilisés pour le captage d'autres substances (aldéhydes et cétones, benzo[a]pyrène, poussière alvéolaire, poussière totale, etc.) étaient également conformes aux préconisations du BIA [11].

Deux appareils de mesure à affichage direct (photomètres TM Data et Respicon TM 3 F [12]) ont par ailleurs été utilisés afin d'apprécier la tendance à la formation d'aérosols lors de l'usinage. Cela a permis de déterminer à la fois la granulométrie de l'aérosol de lubrifiant formé ainsi que l'évolution dans le temps de la concentration particulaire à l'intérieur du banc d'essai au cours de l'usinage.

PROGRAMME D'ESSAI

Des essais d'usinage sous microlubrification ont été réalisés sur le banc d'essai afin de déterminer la tendance à l'émission des lubrifiants dans des conditions proches de la pratique réelle. En faisant varier, dans des conditions de reproductibilité, les paramètres de coupe et les matériaux à usiner, on a ainsi pu déterminer et comparer le comportement à l'émission de différents lubrifiants.

Le matériau utilisé pour les essais d'usinage était un acier de traitement thermique Ck 45k. À la demande des sociétés participant au projet, des essais complémentaires ont été effectués pour un alliage d'aluminium AlSi9Cu3 et pour deux fontes d'acier GG 20 (EN-GJL 200) et GGG 40 (EN-GJS 400), avec des lubrifiants du marché.

Les paramètres d'usinage pour les essais en conditions normales et en conditions extrêmes sont donnés dans le Tableau III.

Les paramètres retenus pour les essais de perçage en conditions normales – vitesse de coupe $V_c = 148$ m/min, vitesse de broche $n = 4\ 000$ min⁻¹ et vitesses d'avance élevées $V_f = 800$ et $1\ 000$ mm/min – correspondent aux réglages utilisés couramment dans la pratique.

Des essais complémentaires ont également été effectués pour une vitesse d'avance minimale $V_f = 200$ mm/min

FIGURE 4

Détermination des émissions à la source lors du perçage

Determination of source emissions during drilling



TABLEAU III

Vitesses d'avance retenues

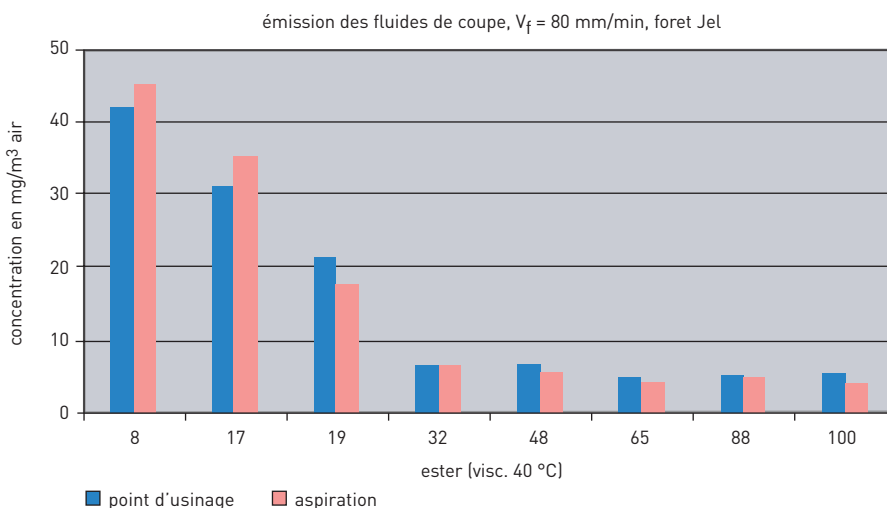
Feed rates used

Lubrifiant	Vitesse d'avance V_f (mm/min)		Matériau à usiner
	Conditions extrêmes	Conditions usuelles	
Esters	200	800	Ck 45k
Huiles du marché	200	1000	(GG2, GGG40, AlSi9Cu3)

FIGURE 5

Émissions d'aérosols et de vapeurs d'huile au point d'usinage et au niveau de l'ouverture de ventilation du banc d'essai pour le groupe des esters de base

Aerosol and oil vapour emissions at machining point and at test bench ventilation opening for basic ester group



afin de simuler des conditions d'usage défavorables (fausse manœuvre, incident). Le fait de maintenir une vitesse de coupe V_c constante pour une vitesse d'avance V_f minimale laisse présager une élévation importante de la température ; le lubrifiant serait donc soumis à des contraintes thermiques et mécaniques élevées au cours de l'usinage.

ÉMISSIONS LORS DU PERÇAGE DANS DES CONDITIONS NORMALES

La Figure 5 présente les concentrations en aérosols et en vapeurs d'huile mesurées pour les esters utilisés dans des conditions proches de la pratique (vitesse d'avance $V_f = 800$ mm/min). Les mesures, réalisées sur une durée de 15 minutes, ont été effectuées à proximité immédiate du point d'usinage et au niveau des ouvertures de ventilation du banc d'essai. Les esters de faible viscosité ($\eta < 32$ mm²/s) conduisent à des concentrations nettement supérieures à celles obtenues avec des fluides plus visqueux. Une formation importante de fumées et de brouillards a surtout été constatée dans le cas des esters de faible viscosité (< 10 mm²/s à 40 °C). Les esters plus visqueux ($\eta > 20$ mm²/s à 40 °C) font apparaître des concentrations nettement inférieures.

La concentration particulaire a été mesurée à l'aide d'un tyndallomètre. De manière générale, comparés aux fluides plus visqueux, les fluides à faible viscosité font apparaître une concentration particulaire supérieure, avec un accroissement plus rapide au cours de l'usinage.

À partir d'une viscosité de 32 mm²/s, la concentration particulaire devient minimale. Elle croît cependant au cours de l'usinage et ne diminue que lentement ensuite au cours du prélèvement. Du fait de la faible taille des particules, le temps de séjour dans l'air au repos dans l'espace de travail est élevé et la déposition observée (sédimentation) est par conséquent faible.

ESSAIS D'USINAGE DANS DES CONDITIONS EXTRÊMES

La vitesse d'avance a été modifiée afin d'étudier l'influence de conditions de coupe défavorables sur le comportement à l'émission des lubrifiants (contraintes mécaniques et thermiques élevées au niveau de l'arête de coupe).

FIGURE 6

Émissions d'aérosols et de vapeurs d'huile à deux vitesses d'avance pour le groupe des esters de base

Aerosol and oil vapour emissions at two feed rates for basic ester group

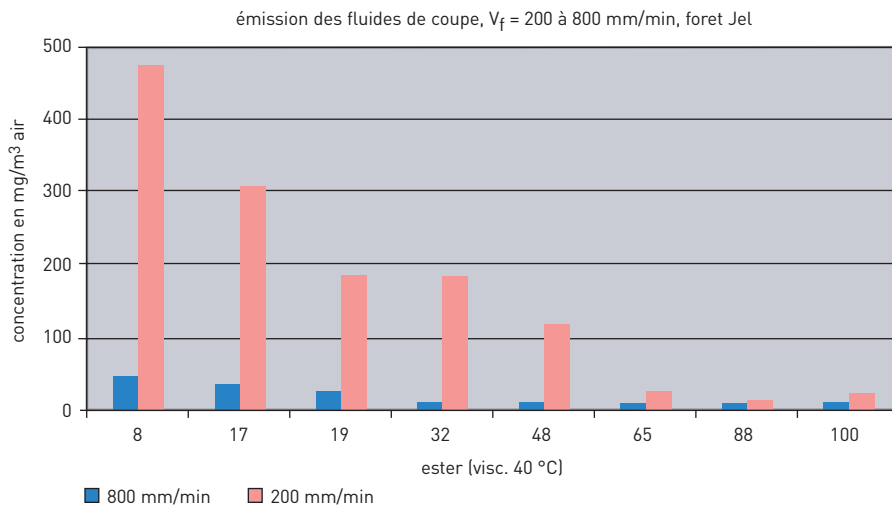
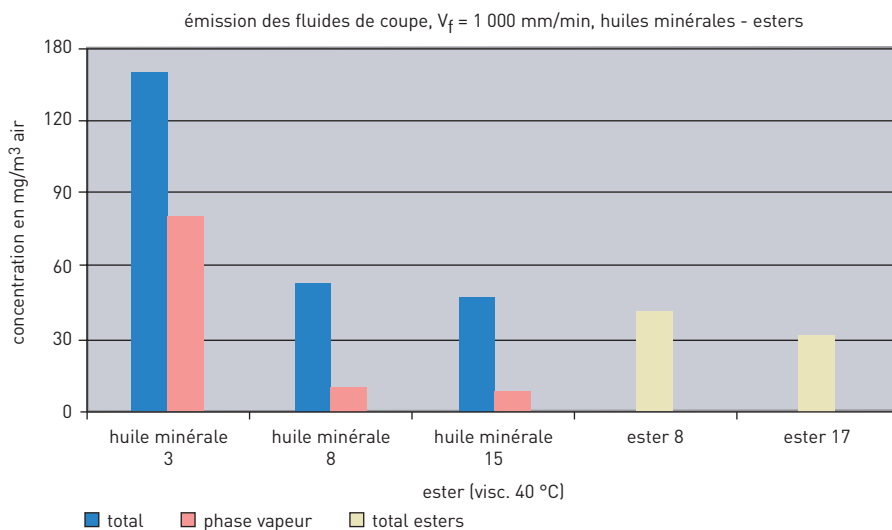


FIGURE 7

Comparaison des émissions des esters et des produits à base d'huiles minérales

Comparison of ester and mineral oil-based product emissions



Si, dans la pratique, les paramètres d'usinage sont mal réglés ou si certains facteurs externes apparaissent, on doit s'attendre à des émissions importantes de vapeurs et d'aérosols.

L'influence des paramètres d'usinage sur le comportement à l'émission est représentée sur la Figure 6 pour le groupe des esters de base. On a, pour cela, réduit la vitesse d'avance de $V_f = 800$ mm/min (conditions normales)

à $V_f = 200$ mm/min (conditions extrêmes, défavorables).

Le perçage effectué avec des paramètres très défavorables conduit à un accroissement brutal des émissions de vapeur et d'aérosols d'huile. Cela est dû au temps de contact élevé du foret avec la pièce dans le cas d'une vitesse d'avance faible ainsi qu'à l'échauffement accru du lubrifiant.

Dans le cas de conditions d'usage défavorables, et pour les fluides de faible viscosité, la concentration en aérosols et en vapeurs d'huiles est, dans certains cas, multipliée par un facteur 10 par comparaison avec les conditions normales. Là aussi, les concentrations dépendent manifestement de la viscosité du fluide ; elles diminuent lorsque la viscosité augmente.

Du fait de leur plus grande stabilité à la température, les lubrifiants de viscosité élevée ($\eta > 50$ mm²/s à 40 °C) sont mieux à même de compenser de telles perturbations. Les émissions d'aérosols et de vapeurs mesurées à l'intérieur du capotage du banc d'essai peuvent être directement reliées à la vitesse d'avance.

COMPARAISON DU COMPORTEMENT À L'ÉMISSION DES ESTERS ET DES HUILES MINÉRALES

Le projet comportait également une étude comparative du comportement à l'émission des lubrifiants à base d'huiles minérales et des lubrifiants à base d'esters. À cet effet, des essais d'usinage ont été réalisés avec une vitesse d'avance $V_f = 1\ 000$ mm/min. Le résultat de la comparaison aux esters 8 et 17, de faible viscosité, est représenté sur la Figure 7. On a reporté à chaque fois la concentration totale et, pour les huiles minérales, la part de la phase vapeur.

Les lubrifiants à base d'huiles minérales étudiés ont conduit à des concentrations supérieures à celles des esters de viscosité comparable. La part de la phase vapeur est importante, notamment dans le cas de l'huile 3, de très faible viscosité, pour laquelle l'émission est globalement importante. Dans le cas des esters, aucune phase vapeur n'a pu être différenciée.

INFLUENCE DES PARAMÈTRES D'USINAGE SUR LE COMPORTEMENT À L'ÉMISSION

Les essais décrits ci-après montrent combien le choix d'un lubrifiant adapté et de paramètres d'usinage optimisés est déterminant pour qu'un usinage sous microlubrification conduise à de faibles niveaux d'émission. Un même lubrifiant a été utilisé pour trois vitesses d'avance différentes $V_f = 200, 800$ et $1\ 000$ mm/min. Les concentrations mesurées ainsi que les formes des copeaux obtenues lors du per-

FIGURE 8

Émissions à différentes vitesses d'avance pour un même lubrifiant (ester 8) et forme des copeaux correspondante
Emissions at different feed rates for the same lubricant (ester 8) and corresponding chip shape

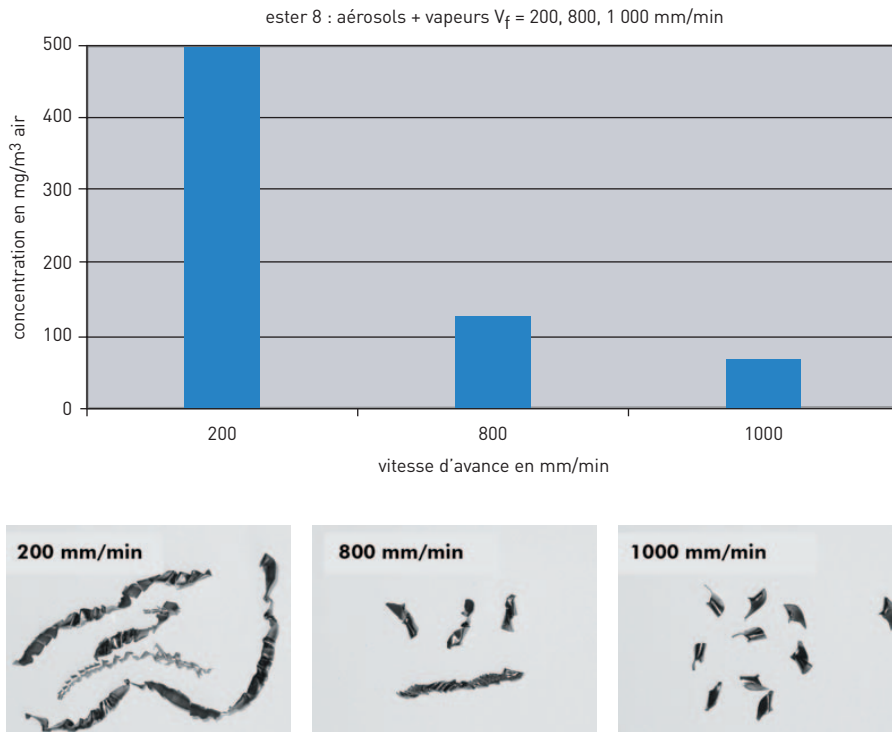
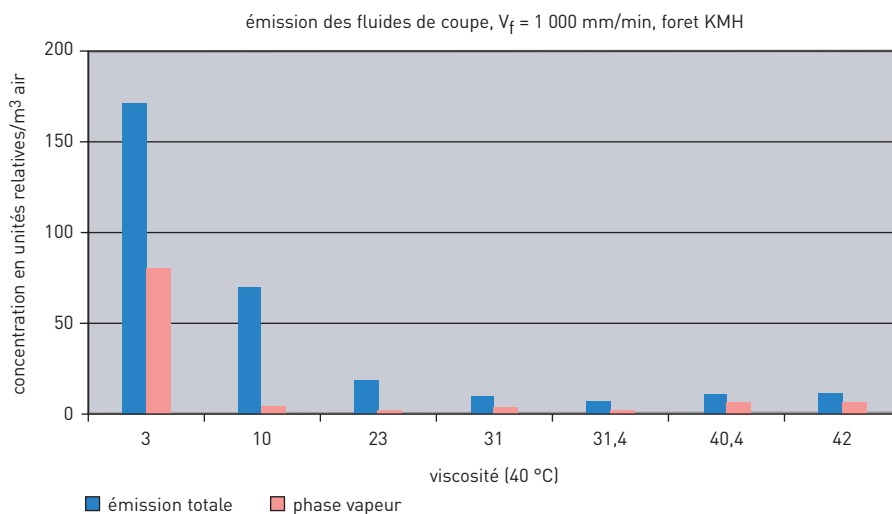


FIGURE 9

Émissions des lubrifiants du marché ; vitesse d'avance 1 000 mm/min
Off-the-shelf lubricant emissions: feed rate 1000 mm/min



çage de l'acier Ck 45k sont représentées sur la Figure 8.

Les essais ont montré qu'une variation des paramètres d'usinage, par

modification de la vitesse d'avance, influait très nettement sur l'importance des émissions de vapeurs et d'aérosols d'huiles. Les vitesses d'avance élevées ont eu un effet positif. Des conditions

d'usinage optimales, avec copeaux fragmentés courts, puissance de coupe élevée et durée de vie de l'outil importante ont conduit conjointement aux plus faibles émissions. Au contraire, les paramètres de coupe défavorables (vitesse d'avance extrêmement réduite) ont conduit à des émissions importantes, avec des conditions d'usinage défavorables (copeaux longs et usure importante de l'outil).

COMPORTEMENT À L'ÉMISSION DES LUBRIFIANTS DU MARCHÉ

Des essais de perçage sur banc d'essai ont également été réalisés dans le cadre du projet avec les lubrifiants du second groupe, les produits du marché. Ces produits sont constitués de différentes huiles de base, auxquelles sont ajoutés des additifs spécifiques en fonction des applications. Les différents constituants et additifs de ces produits ont pour effet de réduire les frottements ; ils influent également sur les émissions. Comme pour les esters purs, les mesures ont été effectuées à proximité immédiate de la source, à l'intérieur de la machine-outil.

Comme pour les esters, les concentrations variaient entre 10 mg/m³ et 30 mg/m³. Ces valeurs ne peuvent que difficilement être reliées à la viscosité des lubrifiants. Les valeurs maximales dans l'espace de travail, de l'ordre de 40 mg/m³, sont du même ordre de grandeur que dans le cas de l'ester 8, qui présentait les concentrations maximales pour le groupe des esters de base. Ces valeurs d'émission à la source peuvent être considérées comme faibles, ce qui est positif.

Depuis peu, dans l'industrie, on tend de plus en plus fréquemment à utiliser des produits très fluides, avec un point éclair faible, < 100 °C ; ces produits sont censés s'évaporer en laissant le moins de résidus possible après l'usinage. Afin de clarifier les effets du choix de ce type de lubrifiants sur les émissions, on a considéré séparément la formation de vapeurs et inclus dans les essais une huile du marché de très faible viscosité (3 mm²/s à 40 °C). Les résultats sont représentés sur la Figure 9.

Dans le cas de l'huile de faible viscosité, les émissions sont très supérieures aux valeurs obtenues avec les produits courants. L'effet négatif que les fluides à

FIGURE 10

Produits de pyrolyse, dans le cas de l'usinage avec des lubrifiants du marché, pour une vitesse d'avance $V_f = 800$ mm/min
 Pyrolysis products when machining with off-the-shelf lubricants: feed rate $V_f = 800$ mm/min

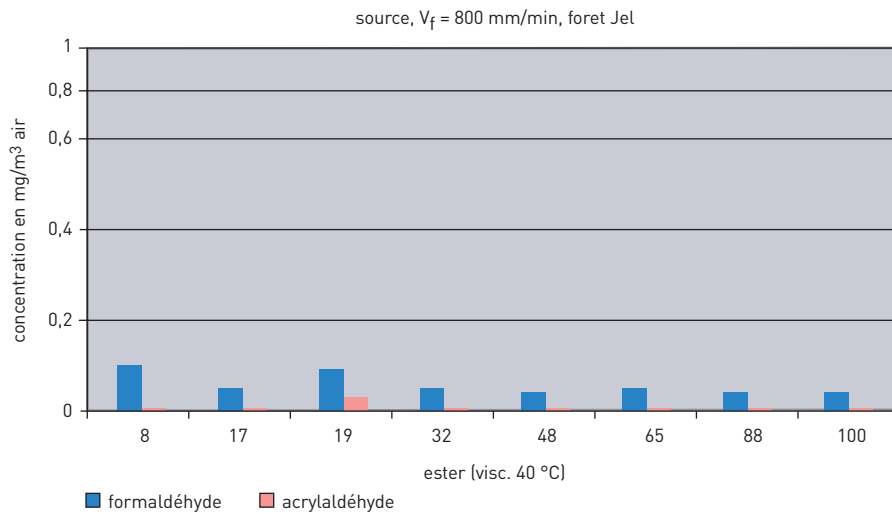


TABLEAU IV

Essais de perçage de fonte sur machine-outil sous microlubrification
 (a.cou. = nombre d'arêtes de coupe, cond./sans cond. = outil avec/sans conduit interne)
 Cast iron drilling tests using a machine-tool with minimal quantity lubrication
 (a.cou. = number of cutting edges, cond./sans cond. = tool with/without internal exhaust duct)

Essai N°	Matériau	Outil	Vitesse de rotation (trs/min)	Avance (mm/min)	Profondeur de perçage (mm)	V_{huile} (%)	Temps d'usinage (min)	Nombre de perçages	Pression dynamique (bar)
1	GG 20	Foret 3 a.cou., 19,8 mm, sans cond.	3230	250	35	-	5,52	20	-
2	GG 20	Alésoir 20H7	2390	470	30	100	2,25	20	-
3	GG 20	Foret 3 a.cou., 11,7 mm, sans cond.	4900	350	35	-	3,20	30	-
4	GG 20	Alésoir 12K7	2700	600	30	100	2,30	30	2,0
5	GG 20	Foret 3 a.cou., 11,7 mm, sans cond.	4900	350	débouchant	-	7,03	30	-
6	GG 20	Alésoir 12K7	2700	600	débouchant	100	3,44	30	2,0
7	GGG 40	Foret 2 a.cou., 19,8 mm, cond.	3230	250	35	100	6,02	30	2,0
8	GGG 40	Alésoir 20H7	2390	470	30	100	3,00	30	-
9	GGG 40	Foret 2 a.cou., 11,7 mm, cond.	4900	353	35	80	4,13	30	2,8
10	GGG 40	Alésoir 12K7	2700	600	30	100	2,24	30	2,0

très faible viscosité peuvent avoir sur la situation globale au poste de travail, du fait de leurs niveaux d'émission très élevés, notamment de la phase vapeur, apparaît ici clairement. On préférera donc les lubrifiants plus visqueux.

FORMATION DE PRODUITS DE CRAQUAGE ET DE PYROLYSE LORS DU PERÇAGE

L'analyse des produits de craquage et de pyrolyse a été effectuée en référence aux essais de pyrolyse des lubri-

fifiants effectués en laboratoire. Le prélèvement a été réalisé à proximité immédiate de la source, à l'intérieur du banc d'essai. La Figure 10 montre le résultat de l'analyse des supports de prélèvement pour le groupe des esters, dans le cas d'une vitesse d'avance $V_f = 800$ mm/min.

On a pu mettre en évidence la présence, à très faibles concentrations, de formaldéhyde et d'acrylaldéhyde (ester 19). Les concentrations, y compris dans l'espace de travail, étaient au plus de l'ordre de $0,1$ mg/m³ ; elles peuvent

par conséquent être considérées comme non critiques. Dans des conditions d'usinage proches de la pratique réelle, seules des concentrations extrêmement faibles en produits de pyrolyse ont donc pu être mises en évidence.

Des essais spécifiques ont permis par ailleurs de déterminer les émissions dans le cas de contraintes thermiques élevées, qui devaient simuler le cas le plus défavorable (fausse manœuvre, incident) ; celui-ci, lorsqu'il se produit dans la réalité, est de courte durée seulement.

TABLEAU V

Concentrations en vapeurs et en aérosols d'huiles dans l'espace de travail de la machine-outil au cours d'essais d'usinage sous microlubrification
Oil aerosol and vapour concentrations in the machine-tool workspace during machining tests with minimal quantity lubrication

Essai	Opération / Outil	Matériau	Nombre de perçages	Concentration ¹ (mg/m ³)
1	Alésage/20H7	GG 20	20	8,9
2	Perçage /11,7	GGG 40	30	10,2
3	Alésage/12K7	GGG 40	30	8,1
4	Alésage/12K7	GG 20	30	5,2
5	Alésage/12K7	GG 20	30	12,2

¹ La concentration a été calculée comme la somme vapeurs + aérosols

Dans ce cas, les concentrations en produits de pyrolyse sont supérieures, d'où l'on en conclut à un échauffement accru du lubrifiant. Ici aussi, la tendance à la pyrolyse des lubrifiants à forte viscosité apparaît moins marquée que pour les produits à faible viscosité. Les concentrations, y compris dans l'espace de travail, sont toutefois au plus de l'ordre de 0,1 mg/m³ ; elles peuvent par conséquent être considérées comme non critiques. Le formaldéhyde apparaît comme un élément traceur potentiel pour les mesures au point d'usinage.

Contrairement à ce qui a ainsi été observé avec les esters de base, les mesures effectuées au cours de l'usinage avec des lubrifiants du marché pour une vitesse d'avance $V_f = 1\ 000$ mm/min n'ont pas fait apparaître de produits de pyrolyse et notamment pas de formaldéhyde.

Pour certains lubrifiants du marché, on a procédé à des essais d'usinage complémentaires pour des paramètres très défavorables – vitesse d'avance $V_f = 200$ mm/min. La concentration en produits de pyrolyse mesurée dans ces conditions extrêmes était également très faible.

En résumé, on peut dire que pour tous les lubrifiants testés, les concentrations en produits de pyrolyse mesurées étaient extrêmement faibles, y compris à la source, sur le banc d'essai, et dans des conditions extrêmes, sous contraintes thermiques élevées. La tendance à la formation de produits de pyrolyse peut par conséquent être considérée comme très faible dans le cas de la microlubrification.

ÉMISSIONS DANS LE CAS DU PERÇAGE ET DE L'ALÉSAGE DE LA FONTE MESURES SUR MACHINE-OUTIL

Afin de vérifier la possibilité de transposer les résultats des essais sur banc aux cas réels, des essais d'usinage ont été réalisés sur une machine-outil DMU 60 E à broche verticale, avec microlubrification interne. On a étudié le perçage et l'alésage de fonte GG 20 et GGG 40 avec des outils spéciaux pour usinage à sec.

Ces essais ont été réalisés avec le même système de microlubrification que sur le banc d'essai. Le *Tableau IV* récapitule les paramètres correspondants.

Comme pour les essais sur banc, les émissions de particules ont été déterminées au moyen d'un photomètre à l'intérieur du capotage de la machine et les concentrations en vapeurs et en aérosols d'huiles ont été déterminées par déposition sur des filtres. Le *Tableau V* récapitule les concentrations ainsi mesurées.

Les émissions se sont produites essentiellement sous forme d'aérosols ; il n'a pas été possible de mettre en évidence de fraction notable de vapeurs d'huile. Aucun produit de pyrolyse n'a pu non plus être mis en évidence au cours de l'usinage.

En résumé, ces essais sur machine-outil, avec microlubrification interne,

montrent que l'usinage de fonte GGG 40 conduit à une émission de particules légèrement supérieure à celle de l'usinage de fonte GG 20. L'usinage de trous débouchants a également entraîné des émissions de particules supérieures à celles accompagnant l'usinage de trous borgnes. Les concentrations en particules mises en évidence lors de l'alésage sont comparables ou légèrement supérieures à celles obtenues lors du perçage. Une section de conduit interne plus importante a conduit à une augmentation de la concentration particulaire.

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Le présent projet visait à évaluer les émissions aux postes de travail dans le cas de la microlubrification. Une première phase a permis, par des essais en laboratoire, de montrer que la pyrolyse des lubrifiants conduisait à la formation de traces d'hydrocarbures saturés et insaturés, d'aldéhydes, de cétones, d'esters saturés et insaturés (C₁₆ à C₂₅) et d'alcools (> C₁₅). Ces résultats ont servi de référence pour le choix de systèmes de prélèvement adaptés lors des essais d'usinage ultérieurs.

La seconde phase du projet a consisté à procéder à des essais sur banc en utilisant un système de microlubrification interne à conduit unique, afin de déterminer le comportement à l'émission de différents lubrifiants. Des essais de perçage dans de l'acier Ck 45k sous micropulvérisation localisée d'esters ont fait apparaître des concentrations faibles pour des viscosités moyennes à élevées de ces lubrifiants. Les lubrifiants à faible viscosité (< 15 mm²/min à 40 °C) ont conduit à des émissions d'aérosols supérieures, avec une phase vapeur peu importante. Ces essais ont confirmé l'influence marquée de la viscosité des lubrifiants sur leur comportement à l'émission.

Les essais ont montré par ailleurs qu'une variation des paramètres d'usinage, par modification de la vitesse d'avance, influait nettement sur l'importance des émissions de vapeurs et d'aérosols d'huiles. Les vitesses d'avance élevées ont eu un effet positif. Des conditions d'usinage optimales, avec copeaux fragmentés courts, puissance de coupe élevée et durée de vie de l'outil

importante, ont conduit conjointement aux plus faibles émissions. Les paramètres d'usinage défavorables, obtenus dans les essais par une vitesse d'avance extrêmement réduite, ont conduit à des émissions importantes, avec des conditions d'usinage défavorables (copeaux longs et usure importante de l'outil).

Des essais comparatifs de lubrifiants de faible viscosité, à base d'huiles minérales, et de lubrifiants à base d'esters, de viscosité comparable, ont clairement fait apparaître des concentrations supérieures dans le premier cas. Dans le premier cas également, la part de la phase vapeur, rapportée à l'émission totale, était importante, alors qu'elle était faible pour les esters.

Pour tous les matériaux usinés, les essais effectués avec différents lubrifiants du marché ont conduit à des émissions faibles. Aucune influence marquée de la viscosité sur les concentrations n'a été constatée, comme cela était le cas pour les esters. Des concentrations

extrêmement élevées sont toutefois apparues pour les lubrifiants de très faible viscosité (3 mm²/min à 40 °C) avec, en même temps, une part importante de la phase vapeur.

Dans tous les essais, y compris dans le cas de mesures réalisées directement à la source, la concentration en produits de pyrolyse s'est révélée extrêmement faible, en particulier pour des conditions d'usinage correspondant à la pratique ; elles étaient légèrement supérieures dans le cas de contraintes thermiques élevées. Le formaldéhyde est apparu pouvoir servir d'élément traceur. Dans les conditions extrêmes, la concentration en produits de pyrolyse continue néanmoins à pouvoir être considérée comme très faible.

Contrairement à ce qui a été observé avec les esters de base, les mesures effectuées au cours de l'usinage avec des lubrifiants du marché, pour une vitesse d'avance $V_f = 1\ 000$ mm/min, n'ont pas fait apparaître de produits de pyrolyse, et notamment pas de formaldéhyde.

En s'alignant sur des conditions d'usinage réelles, on a procédé à des essais de perçage et d'alésage sur machine-outil ; les pièces étaient en fonte (GG 20, GGG 40). Les mesures des émissions de vapeurs et d'aérosols d'huiles ont montré que, dans la machine également, les concentrations sont faibles. Les émissions s'effectuaient pour l'essentiel sous forme d'aérosols. Aucun produit de pyrolyse n'a pu être mis en évidence au cours de l'usinage.

Des informations détaillées concernant le projet sont données dans le rapport [5]. On peut également se référer aux recommandations BG/BIA en ce qui concerne la surveillance des lieux de travail dans le cas de l'usinage des métaux sous microlubrification [13]. Enfin, une publication ultérieure portera sur les résultats d'évaluations de l'exposition sur les lieux de travail et sur les contenus des recommandations BG/BIA qui en résultent dans le cas de l'utilisation de la microlubrification.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] KLOCKE F., EISENBLÄTTER G. – Systeme, Werkzeuge und Medien für die Minimalmenge. Praxis der Trockenbearbeitung. VDI-Berichte 1458, p. 133-148. Düsseldorf : VDI 1999.
- [2] WURSTER B. – Wo steht die Minimalmengenschmierung ? Steinbeis Transferzentrum für Umwelttechnik Konstanz. dima - die Maschine (2000) Nr. 12, p. 34-35.
- [3] BLASZKEWICZ M., KLEBER M., FÖLLMANN W., LUCAS S – Methoden zur Erfassung der Expositionssituation von Menschen beim Umgang mit verschiedenen Kühlschmierstoffen. VDI Berichte 1458, S. xx. Düsseldorf : VDI 1999.
- [4] HÖRNER D. – Kühlschmierstoffe für die Minimalmengenschmierung. VDI-Berichte 1339, S. 203-240. Düsseldorf : VDI 1997.
- [5] STÄBLER D., SCHÖNWALD M., SEFRIN H., WOLF M. – Gefährdungsbeurteilung bei der Trockenbearbeitung metallischer Werkstoffe. Projekt-Abschlussbericht der Süddeutschen Metall-Berufsgenossenschaft, Mainz Mars 2003. www.smbg.de/Sites/downloads/MMS%20Projektbericht%20170403.pdf.
- [6] LICHTENSTEIN N., QUELLMALZ K. – Gasförmige Schadstoffe bei der thermischen Verarbeitung von Kunststoffen. Staub - Reinhalt. Luft 43 (1983) Nr. 9, S. 379-382.
- [7] Geräte zur Probenahme der einatembaren Staubfraktion (E-Staub) (Kennzahl 3010). In : BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 27. Lfg. X/01. Hrsg. : Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz - BIA, Sankt Augustin. Bielefeld : Erich Schmidt 1989 - Losebl.-Ausg.
- [8] Kühlschmierstoffe (Kennzahl 7750). In : BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 19. Lfg. XI/97. Hrsg. : Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz - BIA, Sankt Augustin. Bielefeld : Erich Schmidt 1989 - Losebl.-Ausg.
- [9] Kühlschmierstoffe - und andere komplexe kohlenwasserstoffhaltige Gemische, CD-ROM. 2. Aufl. Hamburg : Storck 2003.
- [10] Anforderungen an Pumpen für die Probenahme von Gefahrstoffen an Arbeitsplätzen (Kennzahl 0260). In : BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 27. Lfg. X/01. Hrsg. : Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz - BIA, Sankt Augustin. Bielefeld : Erich Schmidt 1989 - Losebl.-Ausg.
- [11] Messverfahren für Gefahrstoffe. In : BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen (Kennzahl 6009 ff). Hrsg. : Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz - BIA, Sankt Augustin. Bielefeld : Erich Schmidt 1989 - Losebl.-Ausg.
- [12] Empfehlungen vom Einsatz der Streulichtphotometrie im Rahmen der Arbeitsplatzüberwachung (Kennzahl 2600). Streulichtphotometrie zur Feinstaubmessung (Kennzahl 9080). In : BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 11. Lfg. X/93 und 9. Lfg. X/92. Hrsg. : Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz - BIA, Sankt Augustin. Bielefeld : Erich Schmidt 1989 - Losebl.-Ausg.
- [13] BG/BIA-Empfehlungen zur Überwachung von Arbeitsbereichen : Minimalmengenschmierung bei der Metallzerspanung (Kennzahl 1042). In : BIA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 31. Lfg. X/03. Hrsg. : Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz - BIA, Sankt Augustin. Bielefeld : Erich Schmidt 1989 - Losebl.-Ausg.