

→ J. Chaineau, INERIS,
60550 Verneuil-en-Halatte,
et A. Bouet, J.M. Petit,
Département Équipements de travail
et ergonomie, INRS, Paris

Étude de l'inflammabilité d'aérosols de white-spirit

lors d'opérations industrielles
de nettoyage de pièces mécaniques

→ J. Chaineau, INERIS,
60550 Verneuil-en-Halatte,
et A. Bouet, J.M. Petit,
Département Équipements de travail
et ergonomie, INRS, Paris

Étude de l'inflammabilité d'aérosols de white-spirit

lors d'opérations industrielles de nettoyage de pièces mécaniques

STUDY OF THE FLAMMABILITY OF PETROLEUM SPIRIT AEROSOLS

DURING THE INDUSTRIAL CLEANING
OF MECHANICAL PARTS

This aim of this study, undertaken with a view to drawing up safety recommendations, was to assess the risk of the formation and subsequent ignition of an explosive atmosphere during industrial cleaning of mechanical parts using machines which produce an air-free, high-pressure liquid jet when the cleaning product used is a flammable solvent.

The operation of the machine with a petroleum spirit with a flash point close to 60 °C revealed the formation of an aerosol in the entire atmosphere of the workplace. During the tests carried out using ignition sources of different natures, no ignition of the aerosol was obtained; liquid projections did however trigger a naked-flame fire. A second series of tests carried out with a petroleum spirit with a flash point close to 30 °C did not give conclusive results concerning flammability; this observation indicates that a further study should be conducted on solvents of this type.

These results indicate that flammable solvents should, as far as possible, not be used in this sort of cleaning machines.

● cleaning ● high pressure jet
● petroleum spirit ● aerosol
● flammability

Cette étude avait pour objectifs, en vue d'élaborer des recommandations de sécurité, d'apprécier le risque de formation, puis d'inflammation, d'une atmosphère explosive, au cours d'opérations industrielles de nettoyage de pièces mécaniques, au moyen de machines qui produisent un jet liquide sous haute pression sans air, lorsque le produit de nettoyage utilisé est un solvant inflammable.

Le fonctionnement de la machine avec un white-spirit ayant un point d'éclair proche de 60 °C a mis en évidence la formation d'un aérosol dans toute l'atmosphère du local. Au cours d'essais réalisés au moyen de sources d'inflammation de natures différentes, aucune inflammation de l'aérosol n'a été obtenue ; des projections liquides ont, elles, déclenché un incendie à la flamme nue. Une deuxième série d'essais, réalisée avec un white-spirit ayant un point d'éclair proche de 30 °C, ne donne pas de résultats concluants quant à l'inflammabilité ; ce constat indique qu'une étude complémentaire devrait être menée sur les solvants de ce type.

Ces résultats indiquent qu'il semble opportun de déconseiller, autant que possible, l'usage de solvants inflammables dans cette sorte de machines de nettoyage.

● nettoyage ● haute pression ● white-spirit ● aérosol ● inflammabilité

Les industriels complètent désormais leur gamme de procédés classiques de nettoyage par un système de pulvérisation sous haute pression sans air de solvants, dont certains sont susceptibles de s'enflammer. Une analyse des risques doit précéder toute mise en œuvre industrielle et nécessite la maîtrise de divers paramètres, notamment ceux relatifs à l'inflammabilité des produits. Il est donc nécessaire, pour le préventeur, de connaître les éléments d'appréciation de ces situations à risques. Pour cela, il lui faut pouvoir disposer de critères d'évaluation qui permettent :

- de préciser le niveau de risque de ce mode de nettoyage, en termes d'incendie et d'explosion, et
- d'apporter des solutions de prévention à ce problème, sur une base objective incluant des données métrologiques.

Pour ce faire, une étude a été menée à l'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques), en exécution

d'une convention signée entre cet organisme et l'INRS, afin d'appréhender pleinement ces risques de formation d'une atmosphère explosive et d'inflammation de celle-ci au cours d'opérations industrielles.

Le principe du nettoyage par un solvant sous haute pression est basé, entre autres, sur la capacité d'altération des matériaux lorsqu'ils sont soumis à l'action mécanique d'un jet du liquide à très grande vitesse. Il est réalisé au moyen d'équipements élevant la pression du liquide à un niveau très supérieur à la pression ambiante et forçant son passage au travers d'une buse, produisant un jet concentré et extrêmement puissant. La capacité d'érosion du jet est encore augmentée par l'effet de dissolution du solvant, ainsi que par l'effet d'abrasion des particules arrachées au dépôt présent sur la pièce et véhiculées par le liquide.

Ce document a pour but d'apprécier le risque de formation d'une atmosphère

explosive et d'inflammation de celle-ci. Mais, même s'il ne porte que sur ce thème, rappelons que l'évaluation des risques doit être globale et ne doit surtout pas être limitée à cet aspect précis ; elle doit prendre en compte les nombreux autres dangers, spécifiques ou non, liés à cette technique dont il importe d'estimer également l'importance :

- perforation et coupure par action du jet,
- traumatismes divers,
- bruit,
- brûlures thermiques,
- électrocution...

L'étude a envisagé d'abord les aspects théoriques du problème, puis a abordé une phase expérimentale.

■ La phase théorique avait pour buts : de définir les conditions pour lesquelles une atmosphère explosive, du fait de la présence d'un aérosol, peut se former au cours d'une opération de nettoyage, et d'identifier les paramètres qui peuvent influencer sur les phénomènes en cause.

■ La phase expérimentale avait pour objectifs : d'une part, de déterminer les caractéristiques de granulométrie et de concentration de l'aérosol produit par une machine du commerce avec un solvant et d'autre part, de caractériser l'inflammabilité de cet aérosol.

Rappels théoriques - substances étudiées

L'aérosol

Un aérosol est un système dont le milieu de dispersion est un gaz, la phase dispersée pouvant être un solide (fumée) ou un liquide (brouillard). L'aérosol produit par les machines de nettoyage haute pression est dit *mécanique* ⁽¹⁾ : le jet se divise sous forme de gouttelettes, dont les plus grossières retombent rapidement sur le sol par effet de la gravité et dont les plus fines se dispersent dans l'air au voisinage du jet et s'y maintiennent en suspension, d'autant plus longtemps qu'elles sont de petite taille.

Si le liquide qui alimente le nettoyeur haute pression est inflammable, l'aérosol se présente alors comme un mélange combustible / comburant et il peut, sous certaines conditions, être enflammé.

L'inflammabilité d'un aérosol dépendra principalement des paramètres suivants :

■ **La granulométrie** : on admet que l'aérosol créé par la division du jet est formé de gouttelettes en suspension dont le diamètre est au moins égal à 20 µm, et que seules les gouttelettes dont le diamètre est compris entre 20 et 200 µm sont susceptibles de participer significativement à la propagation d'une flamme dans le milieu aérosol et donc, de permettre son inflammabilité. Sous l'effet de la gravité, les gouttelettes les plus grossières retombent rapidement vers le sol.

■ **La concentration** : comme pour un combustible gazeux, il existe pour un aérosol les notions de limites inférieure d'inflammabilité (LIE) et supérieure d'inflammabilité (LSE).

■ **La limite inférieure d'inflammabilité ou d'explosivité (LII ou LIE)** d'un gaz dans l'air est la concentration minimale en volume dans le mélange au-dessus de laquelle il peut être enflammé.

■ **La limite supérieure d'inflammabilité ou d'explosivité (LSI ou LSE)** d'un gaz dans l'air est la concentration maximale en volume dans le mélange au-dessous de laquelle il peut être enflammé.

La connaissance précise de la LSE, qui atteint le plus souvent plusieurs kilogrammes par mètre cube, ne présente pas grand intérêt. D'autre part, l'expérience montre que la LIE des aérosols formés de gouttelettes de diamètre inférieur à 40 µm est sensiblement égale à celle du produit constituant l'aérosol, s'il se trouvait à l'état de vapeur. Pour les produits de type hydrocarbures, elle est de l'ordre de 30 à 50 g/m³. En outre, pour un diamètre des gouttelettes supérieur à 40 µm, la LIE diminue lorsque le diamètre augmente.

■ **La volatilité du liquide dispersé** : en toute rigueur, dans l'aérosol, le produit combustible se trouve à la fois sous forme de gouttelettes liquides et sous forme de vapeur, la proportion de la phase vapeur étant d'autant plus grande que le liquide est plus volatil.

A cause de la présence de la phase liquide et pour des conditions de granulométrie et de concentration données, l'inflammabilité de l'aérosol n'est pas liée à la valeur du point d'éclair du liquide : l'aérosol peut donc être inflammable, même si ce point d'éclair est nettement supérieur à la température ambiante.

Par ailleurs, si le liquide est suffisamment volatil, la proportion de produit combustible à l'état vapeur peut ne pas être négligeable par rapport à celle sous forme d'aérosol et, en définitive, le milieu est dit « hybride », puisque le produit combustible existe à la fois sous forme de vapeur et sous forme de gouttelettes de liquide.

■ **Le point d'éclair** est la température minimale à partir de laquelle, dans des conditions d'essais spécifiées, un liquide dégage une quantité suffisante de gaz inflammable pour s'embraser au contact d'une source d'allumage.

■ **L'énergie d'inflammation** : comme tout système combustible/comburant, un aérosol nécessite un apport minimal d'énergie pour s'enflammer et il a été montré que l'énergie minimale d'inflammation (EMI) d'un produit à l'état d'aérosol est supérieure à l'EMI du même produit pris à l'état vapeur et qu'elle va de quelques millijoules à quelques joules, selon la granulométrie de l'aérosol, sa concentration et la répartition vapeur/liquide du produit.

Les solvants utilisés

Les deux solvants utilisés pour l'étude sont des white-spirit, constitués d'hydrocarbures aliphatiques et exempts d'hydrocarbures aromatiques et de dérivés chlorés ⁽²⁾.

Le premier, noté **WS 1**, a un point d'éclair compris entre 60 et 63 °C (cette valeur caractérise une volatilité moyenne qui nous conduit à penser que la fraction gazeuse du produit sera faible à température ambiante). Le second, noté **WS 2**, a un point d'éclair compris entre 30 et 32 °C et est nettement plus volatil que le premier.

La description, les caractéristiques et les applications de ces deux coupes pétrolières sont rassemblées en *annexes I et II*.

⁽¹⁾ Cet aérosol est dit « mécanique » par opposition à un aérosol dit « physique » ou « de condensation », qui se forme par refroidissement d'une vapeur saturante.

⁽²⁾ L'INRS a publié une fiche toxicologique spécifique sur ces produits : FT 94 - White-spirit. Paris, INRS, 1998, 5 p. (disponible également sur le Cédérom CD 613 « Fiches toxicologiques de l'INRS ») (ndlr).

Matériels et méthode

Le dispositif expérimental, réalisé dans le but de caractériser l'inflammabilité de l'aérosol formé au cours d'essais de simulation d'une opération de nettoyage, au moyen d'une machine du commerce utilisée dans les conditions prévues par son fabricant, c'est-à-dire en particulier à la température ambiante, comprend essentiellement :

- la machine de nettoyage proprement dite,
- le local où a été implantée la pièce à nettoyer (*fig. 1*),
- le granulomètre.

La machine de nettoyage

Le groupe surpresseur utilisé pour cette étude est de type SHD-R3000 LM de marque Kärcher®, doté des caractéristiques suivantes (*fig. 2*) :

- débit : 3 000 l/h,
- pression maximale : 50 bars,
- alimentation électrique : 380 V, 50 Hz, courant triphasé, démarrage direct,
- type de protection : antidéflagrant, classification ϵ ex e II T3,
- monté sur châssis fixe et équipé d'une soupape de sécurité limitant la pression,
- pièces en contact avec le fluide de nettoyage : acier inox, bronze ou Téflon®,
- joints resserrables,
- équipé d'un flexible d'aspiration et d'un flexible de refoulement HP DN 13, composé d'un tube polytétrafluoroéthylène et d'une gaine inox.

La machine est alimentée par un fût de 200 litres de solvant (*fig. 3*). Elle est équipée, à l'extrémité du flexible HP, d'une poignée pistolet prolongée par une lance, au bout de laquelle se trouve la buse de projection. Pour tous les essais, la lance était équipée d'une buse à angle de 40°.

Le fonctionnement de la machine, en particulier la décharge du jet, était télécommandé à partir d'une salle de contrôle située derrière la casemate. La poignée pistolet du porte-lance a été remplacée par une vanne électro-pneumatique pilotée ; l'ensemble vanne/lance a été fixé à un support capable de résister à la force de réaction qui s'exerce lors de la décharge du jet, à environ 1 m du sol, soit une hauteur correspondant à l'utilisation manuelle de la lance (*fig. 4*).

Fig. 1. Vue d'ensemble de l'installation d'essais

- Overall view of test facility



Fig. 2. Vue de la pompe de la machine de nettoyage

- View of the pump unit of the cleaning machine



Fig. 3. Vue de la machine de nettoyage alimentée par un fût de solvant

- View of the cleaning machine fed by a solvent drum



La casemate

La pièce à nettoyer, ainsi que la lance de la machine, ont été disposées dans une casemate carrée en béton armé, de 4 m de côté et 3,5 m de hauteur, fermée sur trois murs et un toit.

Cette casemate dispose d'un sol en pente, de sorte que les liquides répandus s'écoulent vers un caniveau à l'aplomb de la face ouverte, puis sont recueillis dans une cuve de 1 m³ reliée au caniveau et installée sous le niveau du sol. L'immersion du flexible d'aspiration de la machine dans la cuve de recueil des liquides permet son fonctionnement continu.

Le granulomètre

La granulométrie de l'aérosol a été mesurée et sa concentration évaluée au moyen d'un granulomètre de type Malvern® 2600 SB.0D, équipé d'une optique de 300 mm de longueur focale.

L'appareil comprend :

- Une source émettrice d'un faisceau laser, ainsi qu'une optique permettant l'émergence de ce faisceau rendu monochromatique, dans une longueur d'onde du spectre visible (vert), et ayant une section circulaire de quelques centimètres de diamètre ;

- Une optique réceptrice associée à un tube photomultiplicateur, permettant l'analyse spectrale de la lumière qui est diffractée lorsque le faisceau traverse l'aérosol.

Le granulomètre est entièrement capoté pour être à l'abri des vapeurs de solvant et l'atmosphère chargée d'aérosol est aspirée dans le local au moyen d'une pompe et amenée sur le trajet du faisceau laser, avant d'être réintroduite dans le local.

Mode opératoire

Dans un premier temps, le jet a d'abord été dirigé perpendiculairement au mur de la casemate qui est opposé à l'entrée, de façon à limiter les projections de liquide vers l'extérieur de la casemate ; puis, dans un deuxième temps, afin de simuler le nettoyage d'une pièce, le jet a été dirigé vers un subjectile (bloc-moteur).

La machine a d'abord été alimentée à partir d'un fût de 200 litres. La pression de décharge était voisine de 35 bars. Puis, au cours des essais suivants, le solvant était soutiré dans une cuve placée sous le niveau du sol, au moyen d'une pompe à air comprimé (dans ce cas, la pression de décharge était voisine de 30 bars). Le solvant déchargé ruisselait sur les murs de la cellule, puis sur le sol légèrement en pente vers un caniveau relié à la cuve, de sorte que le solvant était recyclé, permettant le fonctionnement continu de la machine.

Fig. 4. Vue de la lance et de son support - - *View of the lance and its support*



Fig. 5. Vue du jet produit par la machine - - *View of the jet produced by the machine*

La décharge était commandée au moyen d'une vanne électro-pneumatique pilotée, remplaçant la vanne qui équipe normalement la poignée du porte-lance et que l'opérateur actionne manuellement ; cette vanne et la lance étaient fixées sur un support qui a été déplacé dans le local au cours des essais (fig. 5). La lance est constituée de deux tronçons, faisant entre eux un angle de 160° environ ; elle était fixée à la vanne, de façon telle que ses deux tronçons soient contenus dans un plan vertical. Pour la plupart des essais, ce plan vertical était perpendiculaire au mur de face de la cellule, le point d'impact étant situé sur sa médiane verticale ; pour certains essais, le plan vertical n'était pas orthogonal au mur de face, le point d'impact du jet étant compris entre sa médiane verticale et son angle avec le mur latéral droit.

Tous les essais ont fait l'objet d'un enregistrement vidéo.

Résultats

Pour le solvant WS 1

Le fonctionnement de la machine provoque la formation d'un aérosol qui apparaît comme une zone plus ou moins opaque, de couleur blanchâtre (fig. 6 et 7).

L'aérosol remplit peu à peu tout le volume de la cellule, mais sa concentration est fluctuante, aussi bien dans le temps que dans l'espace.

Au moins une des raisons du caractère fluctuant de la concentration de l'aérosol est que le jet déchargé produit des turbulences, qui mettent l'aérosol en mouvement.

Ces turbulences semblent plus fortes lorsque le jet est déchargé de façon asymétrique et aussi lorsque la buse est plus proche du mur.

Par ailleurs, le vent extérieur affecte également l'aérosol, tout au moins dans le plan de l'ouverture de la cellule ; dans ce plan, la vitesse de l'aérosol peut atteindre une valeur de l'ordre de 1 m/s, mais elle est plus faible à l'intérieur de la cellule.

En ce qui concerne la répartition de l'aérosol dans la cellule à un instant

donné, elle n'est pas régulière, même lorsque le jet est déchargé perpendiculairement au mur de face, c'est-à-dire dans le plan de symétrie du local.

La concentration de l'aérosol augmente globalement au cours du temps et atteint un palier au bout de 1 minute environ : ceci ressort d'une évaluation de l'opacité de l'aérosol par la mesure de l'intensité lumineuse reçue par une photodiode située sur le trajet d'un rayon laser traversant l'aérosol.

Fig. 6. Vue de l'aérosol produit- -View of the aerosol produced

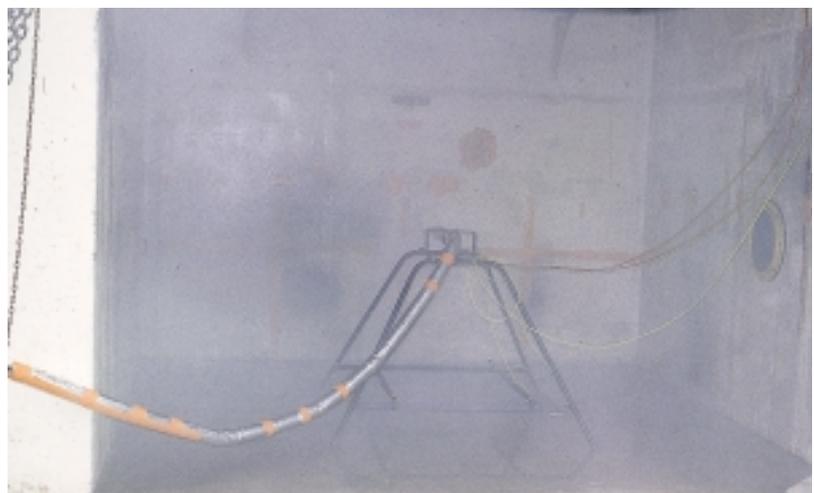


Fig. 7. Vue de la variation spatiale d'opacité de l'aérosol produit
- View of the spatial variation in the opacity of the aerosol produced

D'après des essais réalisés pour des distances de la buse au mur de 0,5 m, 1 m et 1,5 m, il semble que la concentration maximale atteinte soit d'autant plus élevée que la buse est plus éloignée du mur.

L'aérosol est généré par au moins deux phénomènes distincts : l'éjection au niveau de la buse (l'aérosol est plus abondant avec une buse à angle qu'avec un jet bâton) et l'impact du jet sur le mur (cf. les différents pics des spectres granulométriques).

Après l'arrêt de la machine, l'aérosol se dissipe en une dizaine de secondes, sans doute par effet de la gravité (chute des gouttelettes) et il paraît se dissiper un peu plus vite lorsque la buse est plus proche du mur ; ceci semblerait montrer que l'aérosol produit est plus grossier dans ce cas ; puisque l'aérosol produit par impact mécanique du jet sur le mur est a priori plus grossier que celui résultant de l'éjection, il en ressort que le fait d'éloigner la buse du mur favorise la formation de l'aérosol d'éjection.

Pour le solvant WS 2

Au cours de quelques essais réalisés avec le solvant WS 2, dans des conditions semblables à ceux réalisés sur le WS 1 (buse à angle de 40°, à 1,5 m du mur, jet déchargé pendant 1 minute dans un plan perpendiculaire au mur du fond du local), il a été constaté que l'aérosol formé a un aspect très différent de celui produit par le WS 1 : en effet, il n'est visible qu'à proximité immédiate du jet et sa concentration est sûrement bien plus faible, puisque l'atmosphère du local est nettement moins opaque.

Il peut être admis que cette différence de comportement des deux solvants est essentiellement due à l'importante différence de volatilité (la tension de vapeur saturante à 4 °C du WS 2 et du WS 1 valant respectivement 100 et 14 Pa) : l'aérosol se forme mais il ne peut s'accumuler car les gouttelettes s'évaporent au fur et à mesure de leur formation. Le phénomène de génération d'aérosol dépend également d'autres paramètres, comme par exemple la viscosité et la tension superficielle, mais il se trouve que, pour ces deux solvants, ces paramètres ont des valeurs très voisines.

Compte tenu de l'absence d'un aérosol visible avec le WS 2, il n'a pas été réalisé de mesures de granulométrie, ni d'essais

d'inflammabilité (voir ci-après). En effet, dans les conditions de l'expérience, les caractéristiques d'explosivité de la phase gazeuse du WS 2 sont connues. La LIE est de 0,6 % et la LSE de 7 %.

Mesure de la granulométrie et de la concentration de l'aérosol

Conditions expérimentales

Les mesures de la granulométrie de l'aérosol produit par la machine de nettoyage ont été effectuées au moyen du granulomètre précédemment décrit.

Le granulomètre était placé dans le local et l'orifice d'aspiration de l'atmosphère chargée d'aérosol était situé à 1,12 m de hauteur, à 1 m de l'axe du jet et à une distance de 0,7 ou 1,7 m du mur du fond du local ; ces emplacements étaient tels que l'orifice d'aspiration ne recevait pas de projections liquides.

Trois séries de mesure ont été réalisées : elles ont consisté à déterminer la répartition granulométrique des gouttelettes de l'aérosol, à différents instants pris au cours du fonctionnement de la machine.

Chaque instant a été choisi à l'intérieur d'un intervalle de temps compris entre 15 secondes et 5 minutes après le démarrage de la machine et qui comprenait donc le délai de 1 minute environ au bout duquel la concentration de l'aérosol semble atteindre un palier. La machine était alimentée avec du solvant WS 1 et le jet était dirigé perpendiculairement au mur du fond du local, la buse de 40° d'angle étant située à 1 m de ce mur.

Enfin, au moment des essais, la température ambiante était comprise entre 0 et 4 °C et l'hygrométrie était voisine de 60 % HR.

Résultats

La mesure a permis d'établir des histogrammes de la répartition granulométrique de l'aérosol ; les histogrammes ont été obtenus au cours de l'une des trois séries de mesure, pour chacune des 10 mesures effectuées toutes les 22 secondes environ, entre $t_1 = 120$ s et $t_2 = 320$ s après le démarrage de la machine, qui a par ailleurs été arrêtée à $t_3 = 240$ s.

Il apparaît sur ces histogrammes, que :

- Lors de la première mesure, à $t_1 = 120$ s, la plupart des gouttelettes ont des diamètres compris entre 20 et 200 μm et la répartition n'est pas uniforme, puisqu'une proportion importante de gouttelettes ont un diamètre supérieur à 100 μm ; la concentration massique de l'aérosol est voisine de 50 g/m^3 (cette valeur se déduit de la celle de la concentration volumique, indiquée dans le tableau, soit 0,0066 % et de la masse volumique du WS 1, soit 0,79 g/cm^3);

- Au cours des mesures suivantes, la proportion de gouttelettes ayant un diamètre supérieur à 200 μm continue d'augmenter (l'appareil utilisé ne permet pas de détecter des gouttelettes ayant un diamètre supérieur à 564 μm , mais l'examen des histogrammes obtenus permet de penser que de telles gouttelettes sont présentes) ; simultanément, la concentration massique de l'aérosol augmente jusqu'à 100 g/m^3 ;

- Ces augmentations se produisent jusqu'à l'arrêt de la machine, qui intervient entre la 7^e et la 8^e mesure. La concentration de l'aérosol décroît dès l'arrêt de la machine, tandis que la proportion des gouttelettes ayant un diamètre supérieure à 200 μm continue d'augmenter.

Interprétation

L'analyse granulométrique effectuée confirme que les gouttelettes de l'aérosol sont relativement grossières, puisqu'elles ont toutes un diamètre supérieur à 20 μm et qu'une proportion importante a un diamètre supérieur à 100 μm . L'augmentation de cette proportion peut être due à un phénomène de coalescence des gouttelettes, qui reste prépondérant par rapport à celui d'une élimination des plus grosses gouttelettes par effet de la gravité.

La concentration évolue entre 50 et 100 g/m^3 , c'est-à-dire dans un domaine de valeurs qui est de l'ordre de grandeur ou même un peu supérieures à la valeur-type de la LIE d'un aérosol constitué d'un produit hydrocarboné. Ajoutons toutefois que la LIE d'un aérosol dépend de sa répartition granulométrique entre les gouttelettes les plus fines et les plus grossières, c'est-à-dire ayant des diamètres inférieurs ou supérieurs à 200 μm . Dans le cas présent, si l'on fait abstraction des gouttelettes les plus grossières, il apparaît que la concentration de l'aérosol en fines gouttelettes ne dépasse pas 70 g/m^3 .

Caractérisation de l'inflammabilité de l'aérosol

Trois sources d'inflammation différentes ont été mises en œuvre :

■ Un inflammateur électrique libérant 60 joules d'énergie (source 1) a d'abord été disposé en un point situé à 1 m du mur du fond, du mur latéral gauche et du sol du local, c'est-à-dire dans une zone où il semblait que l'aérosol était le plus dense. L'énergie fournie par cet inflammateur est libérée ponctuellement ;

■ Puis un inflammateur libérant une énergie de 5 000 joules (source 2) a été disposé au même endroit ; une telle énergie n'est pas libérée ponctuellement dans la mesure où, sur le film vidéo, la combustion de la charge s'accompagne d'une gerbe de particules incandescentes tombant sur le sol ;

■ Enfin, a été disposé sur le sol, à 1 m du mur du fond et du mur latéral gauche, un bec de gaz (source 3) dont la flamme se trouvait environ entre 10 et 20 cm au-dessus du sol et qui, au cours d'un essai, a été maintenu allumé tout au long du fonctionnement de la machine.

Une première série d'essais d'inflammabilité a été réalisée dans une configuration où la machine de nettoyage fonctionnait avec le solvant WS 1 et où, en l'absence de subjectile, le jet était dirigé vers le mur du fond du local.

Au bout d'environ 1 minute de fonctionnement de la machine, l'inflammation de l'aérosol a été tentée au moyen d'une source d'inflammation dont l'emplacement dans le local et l'énergie ont varié au cours des essais.

Respectivement 1, 6 et 5 essais ont été réalisés avec les sources 1, 2 et 3 (pour les sources 1 et 2, la source a été mise à feu après 1 minute de fonctionnement de la machine), mais jamais aucune inflammation de l'aérosol n'a été observée.

Une seconde série d'essais a été réalisée dans une configuration où le jet de solvant WS 1 frappait un subjectile (bloc-moteur) disposé devant le mur du fond du local.

A la différence du mur, la surface du bloc-moteur n'est pas plane et présente à la fois des zones convexes et concaves ; la géométrie particulière de cette surface aurait pu modifier les conditions de formation de l'aérosol et donc aussi l'évolution de sa concentration mais, au moins qualitativement, aucune variation significative de ce paramètre n'a été observée.

Au cours des essais d'inflammation, la source 3 (bec de gaz) a été utilisée, au même endroit que ci-dessus. Lors d'un premier essai, une inflammation a été obtenue dès les premières secondes de fonctionnement de la machine. Cependant, en analysant les images de l'enregistrement vidéo de l'essai, il est apparu que c'est le jet de liquide qui a été enflammé et non pas l'aérosol. En effet, du fait de la présence du bloc-moteur, il a été constaté que des projections de gouttes étaient diffusées avec une amplitude plus importante qu'avec le jet libre et davantage dispersées par rapport au plan de symétrie, en particulier vers le bec de gaz. Comme le solvant WS 1 a un point d'éclair nettement supérieur à la température ambiante, il y a trop peu de vapeur présente et, sur les premières images, il apparaît que le phénomène de combustion consécutif à la projection d'une goutte directement vers la flamme du bec reste très localisé (flamme de quelques cm) et ne se propage pas. Un peu plus tard au cours de l'essai, peut-être pour une série de gouttes plus rapprochées, le volume de flamme a augmenté et son rayonnement vers les autres gouttes a été suffisant pour que le phénomène s'emballe : un embrasement général s'est alors produit avec le développement d'une flamme de plusieurs m³ pendant quelques secondes, suivi de l'incendie du liquide recouvrant le bloc-moteur, incendie qui a dû être éteint au moyen d'un extincteur à dioxyde de carbone.

L'analyse ci-dessus démontre en tout cas que le phénomène observé n'a pas résulté d'une inflammation de l'aérosol.

Deux essais ont permis de confirmer ce point : ils ont consisté à reproduire l'essai ci-dessus, mais en disposant la source d'inflammation dans une zone abritée des projections de liquide : au cours d'un essai avec la source 3 qui a été posée sur le sol, plus loin du mur du fond du local, aucune inflammation n'a été obtenue pendant 1 minute de fonctionnement de la machine ; de même aucune inflammation n'a été obtenue avec la source 2 disposée à proximité d'un mur latéral du local, à environ 1 m du sol.

En définitive, l'ensemble des résultats des essais d'inflammabilité permet de conclure au caractère ininflammable de l'aérosol produit par la machine de nettoyage, pour chacune des sources d'inflammation utilisées et donc en particulier pour des sources très énergétiques. Cette ininflammabilité est cohérente avec les caractéristiques physiques de l'aérosol, qui

est à la fois trop peu concentré et trop grossier pour pouvoir être enflammé.

Par contre, au moins en présence de sources d'inflammation très énergétiques, comme les flammes nues, le jet lui-même peut être enflammé, bien que le point d'éclair du solvant soit nettement supérieur à la température ambiante.

En ce qui concerne le solvant WS 2, des essais d'inflammabilité n'ont pas été réalisés puisque la formation d'un aérosol n'a pas été observée ; d'après la valeur du point d'éclair de ce produit, comprise entre 30 et 32 °C, on peut affirmer que, à la température ambiante, c'est-à-dire nettement inférieure à 30 °C, la concentration maximale de la vapeur est insuffisante pour rendre l'atmosphère inflammable, compte tenu des dimensions du local et de la durée de l'essai. D'autres conditions, comme celles que l'on rencontrerait éventuellement à des postes de travail (espace restreint, confinement,...), pourraient conduire à des dépassements de la LIE.

CONCLUSION

Cette étude avait pour objet de caractériser l'inflammabilité de l'aérosol produit par une machine de nettoyage à jet de liquide sous haute pression, alimenté par un solvant ayant un point d'éclair supérieur à la température ambiante. Ces travaux se devaient d'apporter des éléments en vue de l'élaboration de recommandations mais il est clair qu'ils sont largement insuffisants pour répondre à la question de savoir si les aérosols de solvants produits par les machines produisant un jet de liquide sous haute pression sans air constituent un danger d'incendie et d'explosion pour toutes les conditions dans lesquelles ils sont susceptibles de se créer.

Le fonctionnement de la machine avec un white-spirit ayant un point d'éclair proche de 60 °C a permis de mettre en évidence la formation d'un aérosol dans toute l'atmosphère du local. En revanche, aucun aérosol n'a pu être mis en évidence avec le solvant ayant un point d'éclair proche de 30 °C ; la concentration de l'aérosol produit par le premier white-spirit paraît varier à la fois dans le temps et dans l'espace et semble atteindre un palier après environ 1 minute de fonctionne-

ment de la machine. Il ressort des mesures de granulométrie et de concentration de l'aérosol réalisées que l'aérosol se caractérise par :

- une concentration en fines gouttelettes (≈ 10 à $100 \mu\text{m}$) de l'ordre de grandeur de la LIE pour des aérosols et donc, en théorie, susceptibles de donner lieu à des inflammations,
- une proportion importante de gouttelettes ayant un diamètre supérieur à $200 \mu\text{m}$ difficilement inflammables qui croît rapidement au cours du temps par évolution « naturelle » de l'aérosol.

Au cours d'essais d'inflammabilité réalisés au moyen de sources d'inflammation de différente nature et d'énergie variable (allumeurs électriques de 60 ou 5 000 joules et flamme nue), aucune inflammation de l'aérosol n'a été obtenue.

Par contre, des projections liquides du jet déchargé ont été enflammées par une flamme nue, malgré un point d'éclair du solvant nettement supérieur à la température ambiante et elles ont conduit à un incendie généralisé.

Compte tenu de ce phénomène et malgré le caractère non explosif de l'aérosol, dans les conditions d'essai, il apparaît opportun de déconseiller au maximum l'usage de solvants inflammables dans les machines de nettoyage de ce type, en particulier lors d'opérations manuelles. En effet, on ne peut pas exclure la formation d'une atmosphère permanente explosive pendant et quelques minutes après les opérations de pulvérisation, même avec des solvants à point d'éclair élevé (supérieur à $100 \text{ }^\circ\text{C}$).

Si néanmoins, aucune alternative ne peut être envisagée, il faut prohiber toute source d'ignition :

■ Classer l'aire de travail en zone 0 conformément à la Directive 1999/92/CE du 16 décembre 1999, concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives.

Zone 0 : Emplacement où une atmosphère explosive consistant en un mélange avec l'air de matières combustibles sous forme de gaz, de vapeur ou de brouillard est présente en permanence ou pendant de longues périodes ou fréquemment.

■ N'utiliser que du matériel, notamment électrique, adapté à la zone 0 ; il ne devra en particulier pas produire d'étincelles, et sera conçu de manière à exclure l'accès de l'aérosol aux parties susceptibles d'en produire.

■ Supprimer la production d'étincelles mécaniques et la présence de surfaces chaudes.

■ Effectuer ces opérations dans des zones largement dimensionnées et ventilées, de façon à éviter l'apparition de zones d'accumulation.

■ Ne jamais utiliser un équipement qui ne serait pas spécifiquement conçu pour projeter ce type de produit, comme par exemple un nettoyeur à haute pression traditionnel. Consulter la notice d'utilisation de l'équipement et, en cas de doute, demander un accord écrit du fabricant.

BIBLIOGRAPHIE

1. MÉDARD L. - Les explosifs occasionnels, 2^e éd. Paris, *Technique et Documentation*, 1987.
2. Travailler en sécurité avec l'eau à haute pression. Conseils aux opérateurs. Paris, INRS, ED 819, 1999.
2. Equipements à jets d'eau sous haute et très haute pression. Paris, INRS, ED 784, 1997.
3. Incendie et lieux de travail. Paris, INRS, ED 789, 1999.
4. DUVAL C., DUVAL R. - Dictionnaire de la chimie et de ses applications, 3^e éd. Paris, *Technique et Documentation*, 1978.
5. FÖRSTER H., HIRSCH W., HEMPEL D. - Fire and explosion hazard during spraying of industrial cleaning fluids in the work place. *Aerosol and Spray Report*, 1996, 35, 2.

ANNEXE I

SOLVANT DE NETTOYAGE A FROID WS 1
 - COLD CLEANING SOLVENT WS 1
DESCRIPTION

Liquide incolore constitué d'hydrocarbures aliphatiques, exempt d'hydrocarbures aromatiques et de dérivés chlorés. Il est destiné au dégraissage à froid de pièces mécaniques et électriques.

CARACTÉRISTIQUES

aspect	liquide
couleur	incolore
masse volumique à 15 °C	≈ 0,79 g/cm ³
point d'éclair (NFT 60-103)	≥ 60 °C
rigidité diélectrique (NF C 27-221)	> 30 KV

APPLICATIONS

Ce solvant s'emploie comme nettoyant/dégraissant des métaux :

- après usinage pour l'élimination des fluides de coupe (huile entière ou soluble) et mise en magasin ou expédition,
- après stockage pour l'élimination des produits de protection,
- avant peinture,
- en interopérations,
- pour l'entretien de matériels, etc.

Il n'agresse pas les vernis des moteurs électriques.

Il s'utilise tel quel au pinceau, au chiffon, au trempé,...

D'après la fiche technique du fabricant.

ANNEXE II

SOLVANT DE NETTOYAGE A FROID WS 2
 - COLD CLEANING SOLVENT WS 2
DESCRIPTION

Liquide incolore constitué d'hydrocarbures aliphatiques, exempt d'hydrocarbures aromatiques et de dérivés chlorés. Il est destiné au dégraissage à froid de pièces mécaniques et électriques.

CARACTÉRISTIQUES

aspect	liquide
couleur	incolore
masse volumique à 15°C	≈ 0,76 g/cm ³
point d'éclair (NFT 60-103)	≥ 30 °C
rigidité diélectrique (NF C 27-221)	> 30 KV

APPLICATIONS

Ce solvant s'emploie comme nettoyant/dégraissant des métaux :

- après usinage pour l'élimination des fluides de coupe (huile entière ou soluble) et mise en magasin ou expédition,
- après stockage pour l'élimination des produits de protection,
- avant peinture,
- en interopérations,
- pour l'entretien de matériels, etc.

Il n'agresse pas les vernis des moteurs électriques.

Il s'utilise tel quel au pinceau, au chiffon, au trempé,...

D'après la fiche technique du fabricant.

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ - 30, rue Olivier-Noyer, 75680 Paris cedex 14

Tiré à part des Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 2^e trimestre 2001, n° 183 - ND 2149 - 1 200 ex.
N° CPPAP 804/AD/PC/DC du 14-03-85. Directeur de la publication : J.L. MARIÉ. ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-1038-6