

RAPPORT D'ÉTUDE
N° 75146C

22/12/2006

**Titre : Etat de l'art sur les ATEX brouillards –
Classement de zones et matériel adapté**

Etat de l'art sur les ATEX brouillards – Classement de zones et matériel adapté

DCE/LCMA

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

- Claire PETITFRERE (INERIS)

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Claire PETITFRERE	Bernard PIQUETTE	Christian MICHOT
Qualité	Ingénieur de la DCE	Directeur adjoint DCE	Directeur DCE
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION

Les normes harmonisées actuelles définissant les modes de protection des équipements ou les normes d'installation en atmosphères explosibles sont destinées aux matériels installés dans des atmosphères explosibles constituées de gaz, vapeurs ou poussières. Pourtant, la directive 94/9/CE concerne également les atmosphères de type brouillards inflammables pour lesquels aucune prescription n'existe.

Les risques de création de brouillards inflammables et de leur inflammation sont mal connus mais sont pourtant bien réels. L'Organisation Maritime Internationale considère par exemple que 65% des incendies dans les salles de machines de navires sont dus aux brouillards d'huile [1].

Le but de cette étude est donc de clarifier les risques de création et d'inflammation des atmosphères de type « brouillards » et de déterminer quelles prescriptions semblent pertinentes pour les matériels destinés à y être installés.

2. INFLAMMABILITÉ D'UN AEROSOL

2.1 GENERALITES

Il existe plusieurs termes dans la littérature pour désigner un ensemble de particules liquides en suspension dans un milieu gazeux. La directive 94/9/CE parle de « brouillards », alors que nous retrouverons dans plusieurs articles le terme d' « aérosol ».

Dr Holness [2] classe ce type d'atmosphères en 3 types :

- Celles constituées de très fines gouttelettes ($< 1 \mu\text{m}$) pour lesquels on trouve le terme anglais de « smoke » (fumée).
- Celles constituées de gouttelettes entre 1 et $10 \mu\text{m}$ pour lesquels on trouve le terme anglais de « mist » (brouillard).
- Celles constituées de gouttelettes supérieures à $50 \mu\text{m}$ pour lesquels on trouve le terme anglais de « spray ».

Nous assimilerons donc ici les termes de brouillards et d'aérosols, même si le terme « brouillard » sous-entend parfois que les gouttelettes sont créées par condensation et non de manière mécanique.

Les aérosols peuvent en effet être créés de deux manières :

- Soit par la condensation d'une vapeur par abaissement de la température jusqu'à la température de rosée. La taille des gouttelettes est alors d'environ $10 \mu\text{m}$, ou moins.

- Soit par la pulvérisation d'un jet de liquide dans une buse sous forme de gouttelettes de dimensions variables. Comme elles sont soumises à la gravitation, elles retombent à des vitesses variables, les plus fines étant celles qui se maintiennent en suspension dans l'air le plus longtemps.

Si le liquide constituant les gouttes est inflammable, l'aérosol se présente alors comme un mélange combustible/comburant et il peut, sous certaines conditions, être enflammé.

Dans l'aérosol, le produit combustible se trouve à la fois sous forme de gouttelettes liquides et sous forme de vapeur, la proportion de vapeur étant d'autant plus grande que le liquide est plus volatil. L'inflammabilité de l'aérosol n'est pas liée à la valeur du point d'éclair du liquide : il peut être inflammable même si ce point d'éclair est nettement supérieur à la température ambiante. **Tous les combustibles liquides sont susceptibles de s'enflammer dans un aérosol, même ceux qui sont très peu volatils.**

Eichhorn [3] a été un des premiers à faire la distinction entre l'inflammabilité des vapeurs et celles des aérosols. La figure 1 représente un diagramme schématique qu'il a réalisé : les limites inférieure (LIE) et supérieure (LSE) d'inflammabilité de la phase vapeur sont bien délimitées et déterminées par des méthodes d'essai normalisées. Le domaine d'inflammabilité du liquide sous forme d'aérosol à gauche de la courbe du point de rosée est délimitée par des courbes floues car les limites d'inflammabilité des aérosols sont inconnues.

De nombreux paramètres influent en effet sur ces limites d'inflammabilité, notamment la taille des gouttes et il est très difficile de tous les contrôler simultanément dans le cas d'un aérosol.

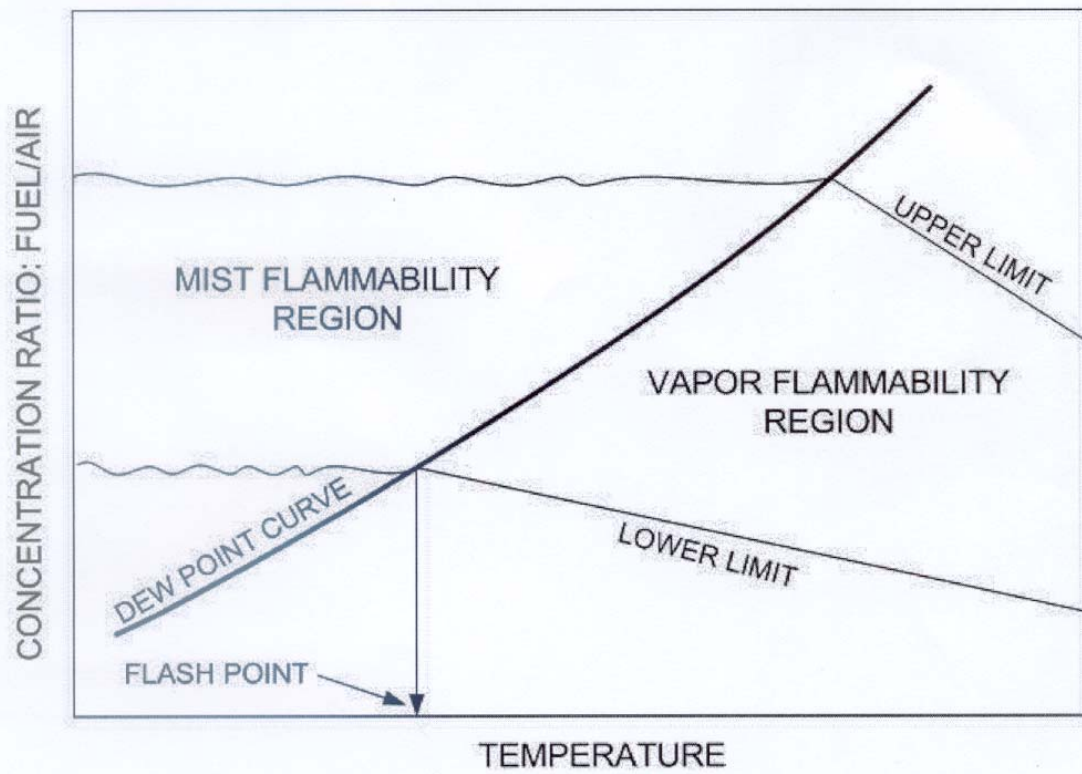


Figure 1 : Diagramme d'inflammabilité d'un aérosol (Eichhorn, 1955)

2.2 PRINCIPAUX FACTEURS CARACTÉRISANT L'INFLAMMABILITÉ DES AÉROSOLS

2.2.1 LA CONCENTRATION

Comme pour un combustible gazeux, il existe pour un aérosol les notions de limite inférieure d'inflammabilité (LIE) et supérieure d'inflammabilité (LSE).

- La 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 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 d'intérêt.

D'après Burgoyne [3], la LIE des aérosols formés gouttelettes inférieures à $10\mu\text{m}$ est sensiblement égale à celle du produit constituant l'aérosol, s'il se trouvait à l'état de vapeur. Pour les produits de type huiles ou hydrocarbure, elle est de l'ordre de 30 à 50 g/m^3 [1] tandis que la concentration du mélange qui conduit à la pression d'explosion la plus élevée est 2 à 3 fois supérieure.

En considérant le risque liés aux brouillards, le point éclair du produit n'a plus réellement de signification puisque des fuels lourds ou des huiles avec des points éclairs très élevés peuvent s'enflammer sous forme de brouillards. En revanche, un mélange d'eau/alcool comprenant une forte proportion d'eau et un alcool très volatil à point d'éclair très bas pourra s'enflammer en flaque mais pas sous forme de brouillard [4].

2.2.2 L'ÉNERGIE MINIMALE D'INFLAMMATION (EMI)

Comme tout système combustible/comburant, un aérosol nécessite un apport minimal d'énergie pour s'enflammer. L'énergie minimale d'inflammation (EMI) d'un produit à l'état d'aérosol est probablement supérieure à l'EMI du même produit pris à l'état vapeur [5] car l'énergie d'évaporation des gouttelettes doit d'abord être fournie au système pour amorcer sa combustion.

Il y a inflammation lorsque la surface de la goutte est proche du point d'ébullition. Cette caractéristique du produit est donc importante.

L'EMI d'un aérosol est comprise entre quelques millijoules et quelques joules, selon sa granulométrie, sa concentration et le rapport entre la quantité de vapeur et celle de liquide dans le mélange (dépendant donc de la volatilité du produit et appelé Ω).

Peu d'études ont été menées sur l'EMI des aérosols. La plupart de celles-ci présentent les résultats en terme de probabilité d'inflammation par rapport à un nombre défini de tentatives. Un test typique est celui décrit par Bowen [6] où le nombre d'inflammations effectives d'une série de 100 tentatives successives est comptabilisé : l'énergie de l'étincelle qui provoque l'inflammation d'un mélange plus de 50 fois est définie comme l'EMI.

L'influence sur l'EMI de la taille des gouttes sont représentées sur la Figure 2 dans le cas d'aérosols de Tetraline. D'après cette publication, l'EMI montre une dépendance cubique par rapport à la taille des gouttes.

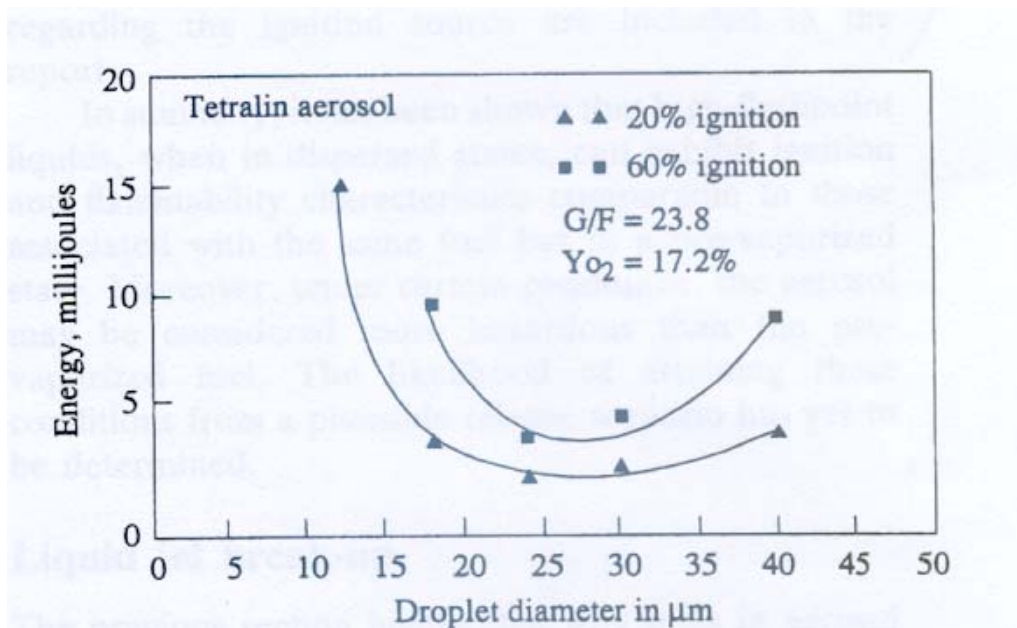


Figure 2 : Variation de l'EMI d'un aérosol de tetraline en fonction de la taille des gouttes (Bowen et al., 1994)

D'après ces résultats, l'EMI de l'aérosol de tetraline est largement dépendante de la taille des gouttes pour un rapport donné combustible/air.

Les auteurs ont extrapolé leurs résultats pour effectuer des comparaisons avec la vapeur du combustible et ont trouvé, contrairement à l'idée généralement acceptée, que pour des gouttes de taille inférieure à 30 μm, l'inflammation se produisait plus facilement que dans le cas de la vapeur correspondante.

D'autre part, en comparaison, la valeur d'énergie minimale d'inflammation définie pour des gaz ou vapeurs du groupe IIA est de 0,25 mJ.

2.2.3 VIOLENCE DE L'EXPLOSION

La taille des gouttes (la granulométrie) joue un rôle fondamental dans les processus de combustion.

La vitesse de flamme est la caractéristique qui a le plus d'influence sur la violence d'une explosion d'aérosol. Plusieurs modèles existent pour prédire les vitesses de flamme laminaires se propageant dans un aérosol.

Ils s'accordent tous sur le fait que, pour les tailles de particule supérieures à 30μm, la vitesse de combustion de l'aérosol ne peut pas dépasser la vitesse de combustion de la vapeur équivalente. Cette prédiction est validée par de nombreuses études à l'échelle de laboratoire.

Cependant, pour les aérosols constitués de particules comprises entre 7 et 15 μm , (appelé aussi le domaine de transition) Polypropoulos [7] considère que les explosions peuvent être plus dévastatrices que celles mettant en cause la vapeur du même produit car les vitesses de flamme sont plus importantes dans le mélange hétérogène. La densité énergétique est également plus importante dans la phase liquide de l'aérosol que dans le mélange homogène vapeur/air. D'après lui, les vitesses de propagation de flamme dans un aérosol sont alors beaucoup plus importantes que dans les mélanges vapeur/air pour ce domaine de granulométrie des gouttelettes spécifique.

Les petites gouttelettes en amont du front de flamme sont rapidement vaporisées à cause du rayonnement provenant de celui-ci : la combustion se produit alors en phase vapeur. La quantité de chaleur transférée par rayonnement dépend du rapport surface / volume des gouttelettes. Les petites gouttelettes ont des rapports surface / volume plus importants que les grosses et sont donc exposées à des flux de chaleur plus importants. La vaporisation des gouttelettes en amont du front de flamme est donc d'autant plus lente que ces gouttelettes sont grosses. Le débit de production de vapeur influence la vitesse de la flamme, l'absence de vapeur entraînant alors une vitesse de flamme nettement moins importante.

Dans le « domaine de transition », les gouttelettes sont assez petites pour produire un débit de vapeur important dû au rayonnement du front de flamme, mais sont également assez grosses pour rester à l'état de gouttelettes après leur évaporation partielle. La présence d'obstacles (gouttelettes) entraîne alors une accélération de la flamme. En plus de cette accélération, les gouttelettes finissent de se vaporiser très rapidement, si elles sont suffisamment petites. Elles peuvent ainsi s'enflammer directement et, à cause de la densité énergétique élevée du liquide, provoquer encore l'accélération du front de flamme [8]. L'évolution de la vitesse de flamme en fonction de la taille des gouttes dans le cas de cette théorie est présentée sur la *Figure 3* et présente un maximum dans le domaine de transition.

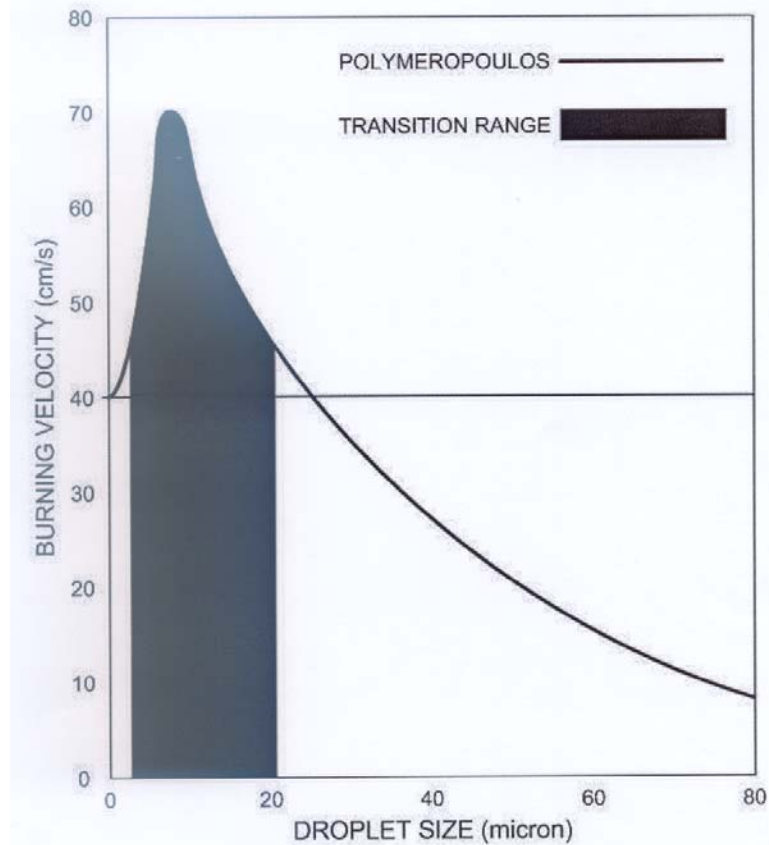


Figure 3 : Evolution de la vitesse de flamme en fonction de la taille des gouttes d'après Polypropoulos (1984)

La vitesse de propagation de la flamme dans un aérosol dépend aussi :

- de la richesse du mélange combustible/ air,
- de la volatilité du liquide qui influe sur la répartition du combustible entre vapeur et liquide (cette répartition peut être caractérisée par la grandeur $\Omega = \text{quantité de vapeur} / \text{quantité de liquide}$),
- la turbulence avant l'inflammation,
- l'homogénéité.

Contrairement à l'étude de l'inflammation des atmosphères en phase vapeur, qui ne nécessite que l'homogénéité du mélange et la connaissance de la concentration du combustible dans la phase vapeur, l'étude expérimentale de l'explosion des aérosols est très complexe à cause des nombreux paramètres qui définissent le système avant l'inflammation et à la nature hétérogène du système.

La difficulté de maîtriser simultanément tous ces paramètres expliquent le manque de résultats expérimentaux et l'absence de méthode d'étude reconnue et adoptée par tous au niveau international.

2.2.4 TEMPÉRATURE D'AUTO-INFLAMMATION

L. Yuan [9] a monté un banc d'essai permettant de vaporiser de l'huile avec des gouttes de 30 à 150 μm et de générer ce jet dans la direction d'une surface chaude.

Pour différentes huiles ou carburants diesel pulvérisés par un orifice de 0,5 mm sous 7 bar (ce qui crée des gouttelettes d'environ 50µm), il a trouvé des températures d'inflammation de l'ordre de 330-350 °C. Ces valeurs ne sont pas à comparer directement avec les températures d'auto-inflammation données dans les tableaux des gaz/vapeurs, puisque nous savons qu'il y a une marge entre les températures réelles d'inflammation par surface chaude et la température d'auto-inflammation mesurée en chauffant un mélange dans une sphère.

Lors de cette étude, il a par ailleurs constaté que le diesel, ayant un point éclair de 60°C, et l'huile AW 32, ayant un point éclair de 220°C, ont une température d'inflammation par surface chaude quasiment équivalente, ce qui confirme que le point éclair a peu d'effet sur la température d'inflammation du brouillard.

En doublant la pression de création du brouillard, il obtient des températures d'inflammation d'environ 30 °K inférieures pour certaines huiles, car il arrive plus de produit sur la surface chaude.

En utilisant un orifice de 1 mm, la température d'inflammation ne varie pas.

Enfin, la viscosité du fluide a une influence puisque une faible viscosité implique la formation de gouttelettes plus fines et cela le rend plus facile à enflammer.

2.3 INERTAGE D'UN AEROSOL PAR DE LA VAPEUR D'EAU

La vapeur d'eau joue un rôle inertant sur la combustion au même titre que d'autres gaz inertes comme l'azote (N₂) ou le dioxyde de carbone (CO₂).

Dans l'industrie automobile, de nombreuses installations de peinture électrostatiques automatiques sont utilisées. Par mesure de prévention et de protection contre les explosions et les incendies, les peintures utilisées sont de plus en plus souvent à base d'eau de manière à ne plus être inflammables. Ces peintures peuvent contenir des substances inflammables comme des solvants organiques solubles dans l'eau, des résines de polymères ou des pigments organiques.

Von Pidoll [4] a étudié l'inflammabilité de plus de 120 peintures électrostatiques pulvérisées à base d'eau. Il en a déduit que la peinture pouvait être considérée comme ininflammable lorsqu'elle était pulvérisée, si la teneur en eau (en masse) était supérieure à la valeur suivante :

$$[\% \text{ eau}] > A [\% \text{ composé 1}] + B [\% \text{ composé 2}] + C [\% \text{ composé 3}] \dots$$

où :

- les termes entre crochets désignent des fractions massiques du composé relatifs à la masse totale de la substance,
- les préfacteurs A, B, C.. correspondent à la limite d'inflammabilité du sous-système binaire du composant n avec de l'eau, c'est à dire à la teneur en eau divisée par la teneur du composant à la limite d'inflammabilité.

Il a également travaillé sur la fraction massique minimum d'eau pour empêcher la combustion de systèmes binaires eau/aérosol de solvant dans l'air. Ces systèmes peuvent être inflammables jusqu'à une teneur en eau de 77 %. Il considère également que la taille des gouttes n'a qu'un effet limité sur la limite d'inflammabilité du système.

3. FACTEURS INFLUENÇANT L'ÉVALUATION DES MATÉRIELS DESTINÉS AUX ATEX

Les atmosphères de type brouillards doivent faire l'objet d'un classement de zones et il peut être difficile d'estimer l'étendue de la zone lors d'un brouillard créé par une fuite sous pression par exemple. Concernant le type de zone (0, 1, ou 2), on pourra peut-être trouver des zones 0 à l'intérieur de certains équipements générateurs de brouillards mais elles seront plus probablement des zones 1 ou 2, dans des cas de fuites sous pression. On notera d'ailleurs qu'il existe des détecteurs optiques de brouillards d'huile permettant de limiter les durées des fuites.

Dans tous les cas, il vaut mieux d'abord éviter la création de la zone, en limitant ces cas de fuites sous pression ou en couvrant les parties susceptibles de fuir par des caches permettant aux gouttelettes de se regrouper ou de se condenser pour former une fuite liquide. Il existe d'autre part des détecteurs.

Si cela n'est pas possible, il faut alors choisir du matériel adapté.

Les modes de protection normalisés pour la protection des équipements en atmosphères explosibles utilisent les moyens suivants :

- Limitation de la température de surface de l'équipement (tous)
- Eviter la création d'étincelles (sécurité augmentée en électrique, précaution vis à vis du risque électrostatique)
- Limitation de l'énergie de l'étincelle générée (sécurité intrinsèque)
- Résistance à la pression d'explosion et non transmission (enveloppe antidéflagrante)
- Eviter la pénétration de l'ATEX au contact de la source d'inflammation (enveloppe pressurisée, encapsulage, étanchéité pour les atmosphères poussiéreuses)

Chacun de ces éléments est relié à un paramètre de l'atmosphère explosible :

- La température de surface est reliée à la température d'auto-inflammation de l'ATEX concernée
- La création ou limitation d'étincelles est reliée à l'énergie minimale d'inflammation
- La résistance à la pression est reliée à la violence de l'explosion générée par l'ATEX
- L'étanchéité est liée à la taille des particules (la norme EN 60529 utilisée impose du talc de granulométrie maximale de 75 microns pour l'essai d'étanchéité)

- Les modes encapsulage et enveloppe pressurisée n'ont aucune liaison spécifique avec les paramètres de l'ATEX (si ce n'est la température d'auto-inflammation puisque les matériels sont également classés en fonction de leur température de surface).

En ce qui concerne les modes de protection liés à la limitation de l'énergie de l'étincelle, les matériels prévus pour gaz et vapeurs du groupe IIA peuvent convenir aux atmosphères composées de brouillards puisque les études ont montré que les EMI sont a priori supérieures aux 0,25 mJ caractérisant le groupe IIA.

Même s'il n'existe pas de base de données de températures d'auto-inflammation pour les brouillards, quelques huiles et carburants ont été testés par Yuan [9] et peuvent servir pour le choix des matériels concernés. Des matériels T2 pourraient convenir pour ces brouillards. Pour d'autres fluides inflammables, il faudrait conduire de nouveaux essais de caractérisation.

En ce qui concerne les enveloppes étanches aux poussières uniquement, l'essai avec les particules de talc de 75 μ m peut ne pas être représentatif de l'exposition éventuelle à un brouillard de fluide inflammable sous pression dirigé sur l'enveloppe puisque les gouttelettes générées risquent d'être plus fines. Il faudrait utiliser une enveloppe étanche à l'eau, à condition que les moyens d'étanchéité utilisés résistent aux agressions chimiques éventuelles des fluides concernés.

Le mode de protection par enveloppe antidéflagrante n'est en revanche pas adapté car le brouillard peut se déposer sur les parois antidéflagrantes (dans les interstices) et transmettre l'inflammation) à l'extérieur de l'enveloppe.

Pour le dimensionnement des systèmes de protection (panneaux de rupture ...), il est généralement admis de baser les calculs sur le groupe IIA (propane), même s'il faudrait plus d'éléments sur l'hypothèse selon laquelle l'explosion est plus violente que pour la vapeur équivalente dans le domaine de transition des gouttelettes de taille 7-15 μ m.

4. CONCLUSION

Notre étude nous a permis de synthétiser les connaissances actuelles sur le comportement des atmosphères de type « brouillard ».

Sous forme d'aérosol, les fluides inflammables peuvent créer des atmosphères explosibles à des températures bien plus faibles que leur point éclair.

La limite inférieure d'inflammabilité des brouillards est mal connue mais rejoint celle du mélange air/vapeur pour des gouttelettes fines.

L'énergie minimale d'inflammation diminue en fonction de la taille des gouttelettes.

Les températures d'inflammation ont été peu mesurées mais sont plutôt de l'ordre de 300°C pour des huiles de moteurs ou compresseurs et du carburant diesel,

même si l'Organisation Maritime Internationale parle d'une température d'inflammation à 150°C pour des particules d'huiles de quelques microns [1].

Concernant les matériels destinés à ce type d'atmosphères, le plus adapté est sans doute l'étanchéité à l'eau à condition que les moyens d'étanchéité utilisés résistent aux agressions chimiques éventuelles des fluides concernés.

Les modes de protection limitant l'énergie de l'étincelle (sécurité intrinsèque) peuvent également être utilisés.

Les modes pressurisation ou encapsulage peuvent être adaptés à condition de vérifier la température d'inflammation du brouillard et de bien choisir la classe de température du matériel.

En revanche, les enveloppes antidéflagrantes ne sont pas du tout adaptées aux brouillards puisque le fluide peut se déposer sur les joints et transmettre l'inflammation.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] « Code of practice for atmospheric oil mist detectors », International Maritime Organization , MSC/Circ. 1086, 18/06/2003.
- [2] Holness MH, « Oil mist and machinery space fires », Quality Monitoring Instruments, June 1995.
- [3] Burgoyne J.H. and Cohen L. "The Effect of Droplet Size on Flame Propagation of Liquid Aerosols". Proceedings of the Royal Society, A225, 375 (1954)
- [4] Von Pidoll, U. « The ignition of clouds of sprays, powders and fibers by flames and electric sparks ». Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.14, 103-109, 2001
- [5] Eichhorn, J.. "Careful! Mist can explode", Petroleum Refiner, 34(11), 194-196 (1955).
- [6] Bowen P.J and Shirvill L.C. « Combustion hazards posed by the pressurized atomization of high-flashpoint liquids », J. Loss. Prevention Process Ind. , 1994, Vol. 7, n°3.
- [7] Polymeropoulos C.E. « Flame propagation in aerosols of fuel droplets, fuel vapor and air ». Combustion science and technology, Vol. 40, 217-232, 1984.
- [8] Kiran Krishna, William J. Rogers, M. Sam Mannan, « The use of aerosol formation, flammability, and explosion information for heat-transfer fluid selection », Journal of Hazardous Materials, 104, 2003, 215-226.
- [9] Liming Yuan, « Ignition of hydraulic fluid sprays by open flames and hot surfaces », J. Loss Prevention Process Ind., 2005, 1-9.