

CONDITIONS DE FORMATION D'UNE ATMOSPHÈRE EXPLOSIVE LORS DE LA MISE EN ŒUVRE D'UN LIQUIDE INFLAMMABLE

Au cours de la mise en œuvre d'un liquide inflammable, les conditions de formation d'une atmosphère explosive (ATEX) dépendent au moins des caractéristiques du liquide (point d'éclair, température ambiante) ; dans le cas où le liquide se trouve en milieu ouvert, les conditions de formation d'une ATEX sont également liées au débit d'évaporation du liquide, lui-même associé aux conditions de renouvellement de l'air à sa surface.

Un modèle d'évaporation a été établi d'après les résultats d'une campagne de mesures effectuées sur des solvants volatils courants, au cours de laquelle le débit d'évaporation du liquide et la concentration en vapeur à proximité de sa surface ont été mesurés.

La connaissance de ces différents éléments permet une application précise et réaliste de la réglementation ATEX.

La réglementation relative aux atmosphères explosives doit être appliquée à toute situation de travail où une atmosphère explosive est susceptible de se former et tel est le cas lors de la mise en œuvre d'un liquide inflammable.

La prise en compte du risque explosion sur les lieux de travail s'inscrit dans la démarche globale de prévention des risques. Dans le cadre de la démarche méthodologique spécifique à ce risque, l'analyse fonctionnelle demande, afin d'identifier les atmosphères explosives potentielles, de connaître les caractéristiques physico-chimiques des produits combustibles présents.

Pour un liquide inflammable, cette connaissance est particulièrement indispensable à la définition des conditions

de formation d'une atmosphère explosive (ATEX) lors de sa mise en œuvre. Ceci constitue une étape-clé de l'application de la réglementation relative aux atmosphères explosives, quelle que soit la méthode utilisée (par exemple la méthode décrite dans le guide méthodologique de l'INRS [1]).

Une autre étape-clé de l'application de cette réglementation consiste à identifier les conditions de formation d'une atmosphère explosive. En milieu confiné, elles dépendent des caractéristiques du liquide (point d'éclair, température ambiante...). Dans le cas où le liquide se trouve en milieu ouvert, elles dépendent également du débit d'évaporation du liquide.

- Liquide inflammable
- Point éclair
- Modèle d'évaporation
- ATEX

► Jacques CHAINEAUX, Agnès JANES, INERIS, direction des risques accidentels

► Benoît SALLÉ, Jean-Michel PETIT, INRS, département Expertise et conseil technique

CONDITIONS FOR THE FORMATION OF AN EXPLOSIVE ATMOSPHERE WHEN USING A FLAMMABLE LIQUID

When employing a flammable liquid, the conditions in which an explosive atmosphere (ATEX) can form depend to a great extent on the liquid itself (flash point, temperature); if the liquid is in an open space, they are also linked to the evaporation flow rate, which in turn depends on the air renewal conditions at the surface of the liquid.

An evaporation model has been established from the results of a series of measurements carried out with volatile solvents, where the vaporization flow rate and the vapor concentration at the surface of the liquid were measured.

Knowledge of these different features permits the implementation of the ATEX regulations in a precise and realistic way.

- Flammable Liquid
- Flash Point
- Evaporation Model
- Atex

CONDITIONS NÉCESSAIRES À LA FORMATION D'UNE ATMOSPHÈRE EXPLOSIVE

Les conditions de formation d'une atmosphère explosive à partir des vapeurs émises par un liquide inflammable sont liées, d'une part, à la quantité des vapeurs émises par le liquide, qui est une caractéristique intrinsèque du liquide, et, d'autre part, à la façon dont ces vapeurs se mélangent à l'air, selon l'environnement du liquide.

CONDITIONS PROPRES AU LIQUIDE

Point d'éclair du liquide

Tout liquide inflammable est caractérisé par son point d'éclair P_E .

Selon la norme EN 1127-1 [2], le point d'éclair P_E d'un liquide inflammable est la température la plus faible pour laquelle « la présentation d'une flamme provoque l'inflammation des vapeurs émises par un échantillon du liquide, dans des conditions d'essai prescrites ».

Note : l'inflammation ayant lieu en phase gazeuse, c'est toujours la vapeur émise par le liquide qui est inflammable et non le liquide lui-même.

C'est sur la notion de point d'éclair que reposent principalement les diverses réglementations relatives aux liquides inflammables.

Le point d'éclair d'un liquide inflammable est une grandeur qui n'est accessible que par l'expérimentation.

La détermination expérimentale du point d'éclair d'un liquide consiste à chauffer régulièrement quelques centilitres de liquide contenus dans une coupelle, puis à approcher à intervalles réguliers de la surface du liquide la flamme d'un petit bec de gaz, jusqu'à observer l'occurrence d'un « éclair », c'est-à-dire d'une flamme qui apparaît et s'éteint aussitôt.

Il existe différentes méthodes de détermination du point d'éclair d'un liquide inflammable, celles dites « en coupelle ouverte » et celles dites « en coupelle fermée ».

Pour un même liquide, on constate que la valeur du point d'éclair mesurée selon une méthode en coupelle fermée est toujours inférieure de 2 ou 3 degrés à la valeur mesurée selon une méthode en coupelle ouverte.

En effet, lors du chauffage de l'échantillon dans une coupelle fermée, les vapeurs émises par le liquide ne se dispersent pas dans l'air comme elles peuvent le faire dans le cas d'une coupelle ouverte. Il en résulte que la température la plus faible pour laquelle on obtient l'inflammation de l'atmosphère qui surmonte le liquide correspond à une valeur un peu plus faible dans le cas d'une coupelle fermée que dans le cas d'une coupelle ouverte.

Le récent règlement européen CLP (Règlement CE n°1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges) ne retient en définitive que les méthodes en « coupelle fermée ».

Le *Tableau 1* indique les valeurs de points d'éclair [3] mesurées en coupelle fermée pour quelques liquides inflammables couramment utilisés dans l'industrie (du plus volatil au moins volatil).

Température ambiante du liquide

Nous avons vu que l'existence d'un point d'éclair traduit l'aptitude d'un liquide à être inflammable, c'est-à-dire à émettre des vapeurs qui, mélangées à l'air, peuvent former une atmosphère explosive. Le point d'éclair est donc la première caractéristique à prendre en compte pour apprécier la possibilité de formation d'une atmosphère explosive à partir d'un liquide inflammable.

Toutefois, cette possibilité dépend aussi de la température à laquelle se trouve le liquide. En effet, un liquide émet d'autant plus de vapeurs qu'il est porté à une température plus élevée et la formation d'une atmosphère explosive à partir d'un liquide inflammable dépend en réalité de la différence entre la valeur du point éclair (P_E) et la température (T) à laquelle le liquide est mis en œuvre.

Une condition fondamentale pour qu'une atmosphère explosive puisse se former est donc que l'inéquation suivante soit satisfaite :

$$T \geq P_E \quad (1)$$

Dans l'inéquation (1), compte tenu de la différence entre la valeur d'un point d'éclair en coupelle fermée et celle d'un point d'éclair en coupelle ouverte, il est préférable, pour une plus grande sécurité, de prendre comme valeur du point d'éclair P_E celle mesurée en coupelle fermée.

CONDITIONS LIÉES À L'ENVIRONNEMENT DU LIQUIDE

C'est la façon dont les vapeurs émises par le liquide se mélangent avec l'air qui conditionne la formation de l'atmosphère explosive. En fait, la situation se résume à l'une des deux situations suivantes :

■ soit un équilibre liquide-vapeur peut s'établir,

■ soit aucun équilibre ne peut s'établir car l'air se renouvelle continuellement à la surface du liquide, sous forme d'un flux qui se mélange avec le flux des vapeurs émises par le liquide.

Équilibre liquide-vapeur

Pour qu'un équilibre thermodynamique puisse s'établir entre un liquide et la vapeur qu'il émet, les deux conditions suivantes doivent être remplies simultanément :

■ le liquide doit être contenu dans un récipient fermé,

■ la phase liquide doit coexister avec la phase vapeur (la vapeur est alors dite « saturante », alors qu'elle est dite « sèche » en absence de phase liquide).

Lorsqu'un équilibre liquide-vapeur est établi, la vapeur est caractérisée par sa pression P_{SAT} , dite « pression de vapeur saturante », qui ne dépend que de la température du liquide.

Un équilibre liquide-vapeur ne s'établit jamais instantanément car la diffusion des vapeurs dans l'espace qui est situé au-dessus de la surface du liquide et qui est isolé de l'extérieur d'après la première condition (cet espace est appelé « le ciel » du récipient) requiert un certain délai. Ce délai qui, en absence de

TABLEAU I

Points d'éclair de liquides inflammables courants en coupelle fermée

Liquide	Point d'éclair P _E (°C)	Liquide	Point d'éclair P _E (°C)
Oxyde de diéthyle (éther diéthylique)	- 45	Toluène	4
n-Pentane	- 40	Méthanol	11
n-Hexane	- 22	Éthanol	12
Acétone	- 20	1-Propanol	15
Cyclohexane	- 20	Acétate de n-butyle	22
Benzène	- 11	1-Butanol	29
Acétate d'éthyle	- 4	o-, m-, p- Xylène	32, 27, 27

tout effet de convection mécanique ou thermique, est régi par le phénomène de diffusion moléculaire, dépend à la fois du volume du ciel et de la volatilité du liquide, mais un équilibre liquide-vapeur finira toujours par s'établir si la quantité de liquide est suffisante pour saturer la vapeur dans l'ensemble du ciel.

À défaut de savoir si cette quantité est suffisante et pour une plus grande sécurité, il est toujours préférable de considérer qu'un équilibre est effectivement susceptible de s'établir.

L'atmosphère contenue dans le ciel d'un récipient où un équilibre liquide-vapeur est établi, est constituée d'un mélange de vapeur et d'air dont on peut admettre que la composition est homogène dans tout le volume du ciel et dont la concentration en vapeur C_v (exprimée indifféremment en % volume ou en % molaire) est égale à :

$$C_v = 100 \times P_{SAT} / P_{ATM} \quad (2)$$

où P_{ATM} est la pression atmosphérique.

Remarques

Une atmosphère saturante est une atmosphère explosive si la concentration en vapeur C_v appartient au domaine d'explosivité, qui est l'intervalle de concentration compris entre la limite inférieure d'explosivité (LIE) et la limite supérieure d'explosivité (LSE) de la vapeur dans l'air.

Par ailleurs, puisque C_v dépend de P_{SAT} et que P_{SAT} dépend de la tempéra-

ture du liquide, on conçoit qu'il existe une valeur remarquable de la température pour laquelle la vapeur émise par le liquide est en équilibre avec lui et juste à la LIE.

La norme NF EN 1127-1 [2] désigne cette valeur remarquable de la température par l'expression « Point inférieur d'explosion » ou PIE.

Note : cette expression correspond à la traduction de l'allemand « Zund Punkt » et elle est donc moins précise qu'une expression telle que « Température limite inférieure d'explosivité (TLIE) », qui fait référence explicitement à la notion de température ; quant à l'expression anglaise équivalente à « Point Inférieur d'Explosion », il s'agit de « Lower Explosion Point ».

La norme NF EN 1127-1 [2] définit le PIE d'un liquide comme étant « la température à laquelle les vapeurs émises par le liquide et en équilibre thermodynamique avec lui forment, lorsqu'elles sont mélangées avec l'air sous la pression atmosphérique, une ATEX dont la composition est celle d'un mélange à la LIE ».

La Figure 1 propose une représentation graphique des conditions de concentration et de température pour lesquelles le mélange d'air et de la vapeur saturante d'un liquide inflammable contenu dans le ciel d'un récipient est explosif.

Les axes de coordonnées représentent respectivement :

■ en abscisse, la teneur volumique en vapeur du mélange vapeur-air,

■ en ordonnée, la température du mélange vapeur-air,

Sur cette figure, ont été portés :

■ la courbe d'équilibre liquide-vapeur dont chaque point est défini par :

- une ordonnée correspondant à une valeur T de la température,
- une abscisse égale à la concentration C_v, exprimée en % vol., de la vapeur dans le mélange air-vapeur (rappelons que, selon la relation (2), C_v est égale à la pression de vapeur saturante P_{sat} à la température T, rapportée à la pression totale du mélange air-vapeur, c'est-à-dire la pression atmosphérique P_{ATM}) ;

■ les droites de variation de la LIE et de la LSE en fonction de la température : selon la loi de Burgess-Wheeler [4], ces droites se caractérisent par une pente négative pour la LIE et une pente positive pour la LSE (en valeur absolue, chaque pente est voisine de 10 % relatifs par centaine de degrés de température) : elles traduisent le fait que la LIE d'une vapeur diminue linéairement de même que sa LSE augmente linéairement lorsque la température croît,

■ le point M, à l'intersection de la courbe d'équilibre liquide-vapeur avec la droite de variation de la LIE de la vapeur en fonction de la température : l'abscisse de M est égale à la valeur de la LIE de la vapeur et l'ordonnée de M est égale à la valeur de PIE.

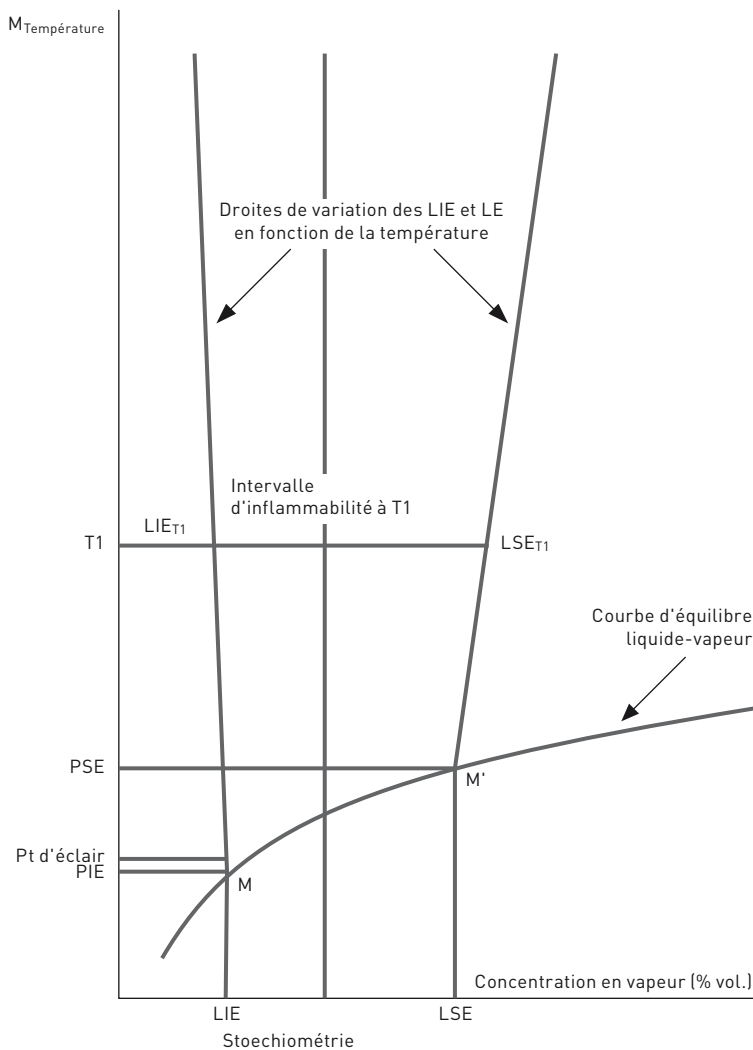
Comme nous l'avons rappelé précédemment, le point d'éclair P_E d'un liquide inflammable est la température la plus faible pour laquelle les vapeurs qu'il émet peuvent être enflammées, dans des conditions spécifiées, mais ces conditions ne correspondent pas à celles d'un équilibre liquide-vapeur. En effet, toutes les normes de détermination du point d'éclair prévoient un chauffage continu du liquide qui empêche l'établissement de tout équilibre thermodynamique.

La valeur de P_E est donc nécessairement supérieure à celle de PIE ; la différence est de 2 à 3°C pour un liquide pur mais elle peut atteindre jusqu'à 20°C ou plus pour un mélange de liquides de volatilités différentes (coupe pétrolière, par exemple).

C'est pourtant bien la valeur de PIE, et non celle de P_E, qui représente le seuil de température en deçà duquel il ne peut se former d'atmosphère explosive dans des conditions de confinement. Dans l'intervalle de température compris entre PIE et PE, la formation

FIGURE 1

Représentation graphique de l'influence de la température sur l'explosivité d'un liquide inflammable



d'une atmosphère explosive dans toutes les conditions où un équilibre liquide-vapeur peut s'établir, et en particulier lorsqu'un liquide se trouve confiné dans un récipient, est possible.

Absence d'équilibre liquide-vapeur

Une atmosphère explosive peut se former par mélange de l'air et de la vapeur émise par un liquide inflammable, en absence de tout équilibre liquide-vapeur.

Ces situations sont nombreuses, puisque ce sont toutes celles où un liquide inflammable volatil est mis en œuvre :

- soit dans une installation confinée ou semi-confinée sous ventilation d'air contrôlée,

- soit en milieu totalement ouvert, en présence d'une ventilation naturelle ou contrôlée.

Dans de telles situations, il est possible d'affirmer que :

- le liquide s'évapore de manière continue,
- la vapeur qu'il émet diffuse dans l'air ambiant en se diluant,
- la dilution par l'air de la vapeur émise par le liquide dépend du rapport entre le débit d'air et le débit d'évaporation du liquide et influe donc sur les conditions de formation d'une atmosphère explosive.

Il est indispensable de connaître la relation qui existe entre le débit d'évaporation et les différents paramètres dont dépend l'évaporation du liquide.

À partir de cette relation (ou modèle d'évaporation), il est alors possible :

- de déterminer les conditions de formation d'une atmosphère explosive à proximité de la surface du liquide,
- d'évaluer le volume de l'atmosphère explosive formée.

La littérature propose de nombreux modèles d'évaporation d'un liquide. Il s'agit de modèles empiriques dont les domaines de validité ne sont pas toujours indiqués avec précision [5, 6, 7].

DIMENSIONNEMENT DU VOLUME DE L'ATMOSPHÈRE EXPLOSIVE FORMÉE

Pour évaluer précisément la formation d'une atmosphère explosive (et, éventuellement, les effets de son explosion) en milieu semi-confiné, par exemple par suite de l'épandage accidentel d'un liquide inflammable dans un local sous forme d'une flaque, il est indispensable de disposer d'un modèle simple et fiable qui permette de dimensionner son volume.

Une étude expérimentale relative à l'évaporation de liquides volatils au travers d'une surface libre laissée au contact avec l'air [8] a été menée par l'INERIS dans le cadre d'une convention signée avec l'INRS. Elle porte notamment sur la détermination simultanée de la vitesse d'évaporation de solvants inflammables courants et des concentrations atteintes dans l'atmosphère, pour des valeurs de vitesses d'air représentatives de celles rencontrées sur les lieux de travail.

Cette étude a consisté :

- à déterminer la vitesse d'évaporation de liquides organiques volatils contenus dans un bac carré de 1 m² disposé sur le sol d'une galerie ventilée (cf. Figure 2), en fonction de différents paramètres liés aux liquides eux-mêmes (volatilité) et à certaines conditions géométriques (hauteur de liquide par rapport au bord du bac) et environnementales (vitesse locale de l'air et température),
- à mesurer la concentration en vapeur sous le vent du bac.

FIGURE 2

Bac servant à l'étude sur l'évaporation de solvants courants

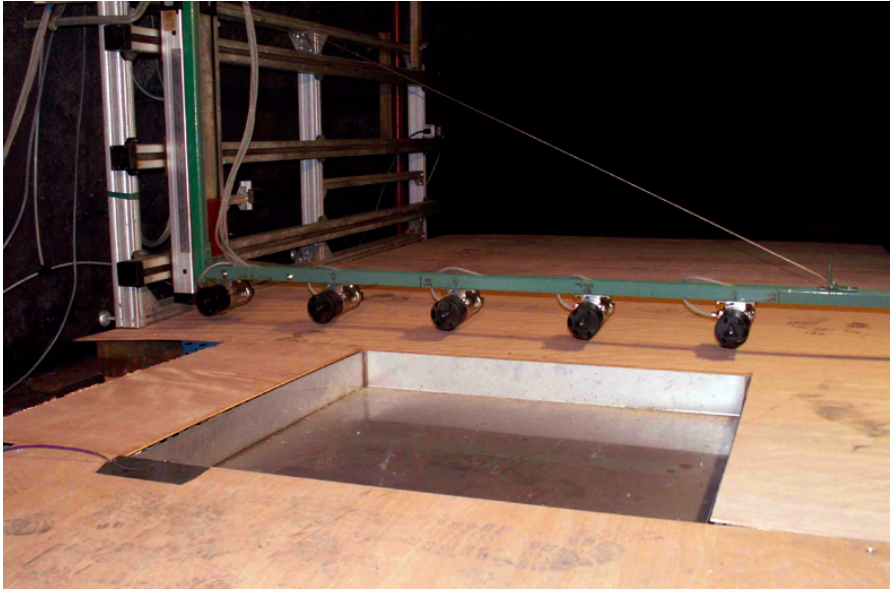


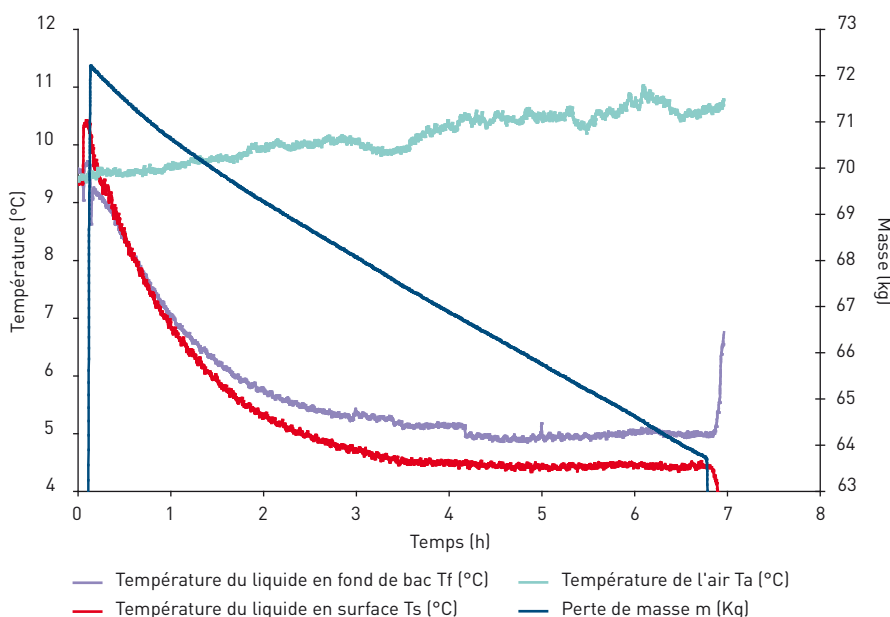
TABLEAU II

Caractéristiques des 3 liquides étudiés

Liquide	Masse molaire (g/mol)	Point d'éclair (°C)	LIE (% vol.)	Pression de vapeur saturante à 20°C (Pa)
Acétone	58,1	- 17	2,6	24 500
n-Hexane	86,2	- 21	1,2	16 100
Éthanol	46,1	12	3,3	5 800

FIGURE 3

Variation temporelle des températures du liquide, en surface T_s et au fond du bac T_f , et de l'air au-dessus du liquide T_a , ainsi que de la masse m du liquide, au cours d'un essai réalisé avec l'acétone, pour $0,9 \text{ m.s}^{-1}$ de vitesse d'air



L'étude a porté sur les trois liquides dont les caractéristiques sont rassemblées dans le *Tableau II* :

Toute évaporation d'un liquide est un phénomène endothermique qui se traduit par une perte de masse et une diminution simultanée de la température du liquide, plus importante à la surface du bac qu'au fond de bac. L'exploitation de ces résultats (cf. *Figure 3*) permet également d'accéder au débit d'évaporation du liquide.

La vitesse d'évaporation d'un liquide répandu sur une surface (sol, paille...) sous la forme d'une flaque et soumis à un flux d'air de vitesse U est obtenu à partir de la relation (3). Cette relation peut également s'appliquer en première approche au cas où un liquide est contenu dans un récipient ouvert :

$$V = 22,01 \times S \times U \times M^{0,4} \times \frac{F(T_s)}{P_{\text{atm}}} \quad (3)$$

V est la vitesse d'évaporation du liquide en g.s^{-1} .

S est la surface d'évaporation en contact avec l'air en m^2 .

M est la masse molaire en Kg.mol^{-1} .

U est la vitesse de l'air au niveau de la surface en m.s^{-1} .

F est la pression de vapeur du liquide à la température de surface (T_s) en Pa.

P_{ATM} est la pression atmosphérique en Pa.

La relation (3) ne doit être appliquée que pour :

■ des valeurs de U comprises entre $0,3$ et 1 m.s^{-1} ,

■ des valeurs de T_s nettement inférieures à la température d'ébullition du liquide,

■ en ce qui concerne les valeurs de S , la relation a été établie pour des valeurs comprises entre $0,2$ et 1 m^2 , mais nous admettons qu'elle peut s'appliquer à des valeurs de S supérieures, jusqu'à plusieurs dizaines de m^2 .

NB : Il convient enfin de rappeler que cette formule ne peut être considérée comme valable que si le niveau du liquide demeure très voisin des bords supérieurs du récipient et si l'agitation de l'air est suffisante pour ne pas laisser se créer un « bouchon » de vapeurs au-dessus de la surface du liquide. Les raisons de ces restrictions sont exposées en détail dans l'encadré 1.

ENCADRÉ 1

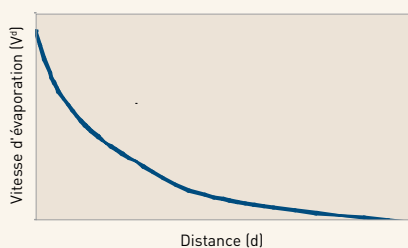
RELATION ENTRE LA VITESSE D'ÉVAPORATION ET LE NIVEAU DU LIQUIDE DANS LE RÉCIPIENT

Lorsque le liquide en cours d'évaporation est contenu dans un récipient, un fût par exemple, le niveau baisse peu à peu et, même si toutes les conditions générales restent constantes, en particulier la vitesse de l'air U et la vitesse d'évaporation V_i diminue progressivement.

Pour un récipient cylindrique de surface S et de hauteur totale h , si l'on appelle d la distance entre le niveau du liquide et le bord supérieur du récipient et V^0 la vitesse d'évaporation au niveau du bord supérieur, la vitesse d'évaporation V^d au niveau de d est donnée par la formule empirique suivante :

$$V_d = V_0 \cdot \frac{1}{\frac{10 \cdot d}{\sqrt{S}} + 1}$$

La courbe représentative est une portion d'hyperbole. Pour une baisse de niveau faible, la variation de V^d est grande.



CAS PARTICULIER DE L'ABSENCE DE MOUVEMENT D'AIR AU-DESSUS DU LIQUIDE

À noter également que, lorsqu'on mesure la vitesse d'évaporation V_i dans un air parfaitement calme, la valeur trouvée peut être très différente de la valeur calculée, la couche de vapeurs au-dessus de la surface du liquide jouant le rôle de « bouchon » (la plupart des substances organiques volatiles ont une densité de vapeur par rapport à l'air supérieure à 1).

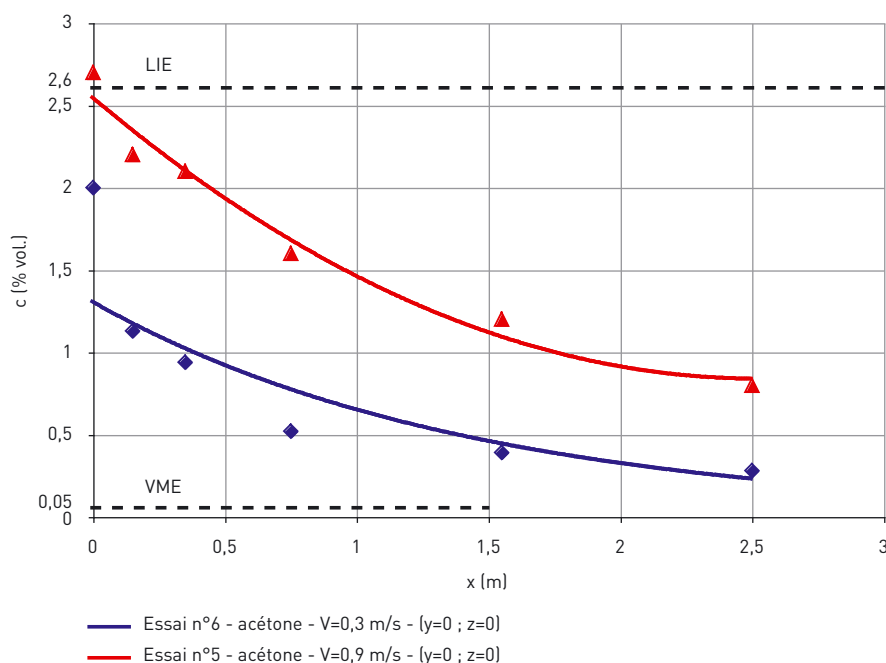
TABLEAU III

Valeurs calculées du débit d'évaporation de l'acétone, du *n*-hexane et de l'éthanol à 20°C pour une vitesse d'air à la surface du liquide de 1 m.s⁻¹, selon le modèle de l'INERIS

Nature du liquide	Débit d'évaporation calculé à 20°C, pour $U = 1 \text{ m.s}^{-1}$ selon le modèle de l'INERIS (g.s ⁻¹ .m ²)	Débit d'évaporation calculé à 20°C, pour $U = 1 \text{ m.s}^{-1}$ selon le modèle de l'INERIS (kg.h ⁻¹ .m ²)
Acétone	1,7	6,2
<i>n</i> -Hexane	1,3	4,8
Éthanol	0,4	1,3

FIGURE 4

Variation de la concentration en vapeur d'acétone mesurée sous le vent du bac, au niveau de son ouverture et sur sa médiane ($S = 1 \text{ m}^2$, $U = 0,9$ et $0,3 \text{ m.s}^{-1}$)



À titre d'exemple, le *Tableau III* fournit les valeurs calculées à partir de la relation (3) du débit d'évaporation de l'acétone, du *n*-hexane et de l'éthanol à 20°C, lorsque la surface du liquide est soumise à un flux d'air de vitesse $U = 1 \text{ m.s}^{-1}$.

L'exploitation des mesures de concentration a conduit aux résultats suivants :

■ les concentrations décroissent au fur et à mesure que le point de mesure s'éloigne du bac,

■ pour un même liquide, la concentration en un même point de l'espace est plus élevée pour $U = 0,9 \text{ m.s}^{-1}$ que pour $U = 0,3 \text{ m.s}^{-1}$ (cf. *Figure 4*),

■ les concentrations mesurées en un même point de l'espace pour une même valeur de U décroissent selon le même ordre que le débit d'évaporation des liquides étudiés, c'est-à-dire acétone > *n*-hexane > éthanol,

■ sur l'ensemble des liquides et valeurs de U étudiés, des concentrations supérieures à la LIE n'ont été mesurées qu'à proximité immédiate du milieu du bord du bac sous le vent, que pour l'acétone et que pour $U = 0,9 \text{ m.s}^{-1}$ (cf. *Figure 4*).

APPLICATION AUX LIEUX DE TRAVAIL

Nous traitons ici le cas où un liquide est mis en œuvre dans une installation qui peut être de nature très variée (récipient de stockage, mélangeur...) et qui est installée dans un local susceptible de constituer un lieu de travail :

■ si l'installation est complètement isolée de l'extérieur, il faut envisager que, suite à un dysfonctionnement, le liquide inflammable puisse être répandu accidentellement sur le sol du local, sous la forme d'une flaque,

■ si l'installation est constituée d'un récipient comportant un orifice (soupapes de respiration, regards, événements...), la vapeur émise par le liquide peut diffuser dans l'air du local à travers cet orifice.

Remarques

Le cas étudié ne s'applique pas aux gaz liquéfiés inflammables car, si de tels liquides se trouvaient mis accidentellement à l'atmosphère, le volume de l'atmosphère explosive formée dépendrait d'autres paramètres que ceux relatifs aux liquides inflammables :

- au cours de la fuite, une fraction du liquide se vaporise instantanément, tandis que la fraction complémentaire reste momentanément à l'état liquide,
- bien que, même pour un gaz liquéfié, le phénomène d'évaporation soit toujours endothermique, la phase liquide d'un gaz liquéfié a, par définition, une tension de vapeur saturante supérieure à 10⁵ Pa (1 bar) à 15°C, de sorte que le débit d'évaporation est toujours supérieur à ce qu'il serait pour un liquide ; il en résulte que, en cas de fuite, la fraction qui se répand sur le sol à l'état liquide se vaporise plus rapidement que s'il s'agissait d'un liquide.

La recherche de formation d'atmosphères explosives lors de la mise en œuvre d'un liquide inflammable dans un local consiste à évaluer ou à prendre en compte successivement :

■ le débit d'évaporation du liquide, en fonction des paramètres qui apparaissent dans la relation (3) citée plus haut, à savoir :

- la température du liquide,
- la surface de la flaque,
- la vitesse de l'air à la surface de la flaque,

■ le débit de ventilation du local,

■ les caractéristiques de l'ATEX susceptible de se former, à savoir,

- son volume,
- son emplacement.

D'après le modèle d'évaporation introduit précédemment, la relation (3) permet de déterminer le débit d'évaporation q d'un liquide en fonction :

■ de sa température,

■ de la surface émettrice (surface d'une flaque répandue sur le sol ou surface de l'orifice d'un récipient ouvert),

■ de la vitesse de l'air à la surface du liquide ou au niveau de l'orifice d'un récipient ouvert. En ce qui concerne la température du liquide, rappelons que la relation (3) ne doit être appliquée que pour une valeur sensiblement inférieure à la température d'ébullition.

En ce qui concerne la surface d'une flaque, le débit d'évaporation du liquide lui étant proportionnel, il faut chercher à la diminuer autant que possible, par exemple au moyen de volumes de rétention ou d'un sol de local en pente associé à des avaloirs.

Enfin, en ce qui concerne la vitesse de l'air à la surface du liquide ou au niveau de l'orifice d'un récipient ouvert, elle correspond par hypothèse à celle d'un local de travail, soit quelques dizaines de centimètres par seconde.

Le local peut être ventilé de deux façons distinctes :

■ soit l'air du local est renouvelé de façon mécanique et donc dans des conditions de ventilation contrôlée,

■ soit l'air du local est renouvelé par une simple ventilation naturelle.

Que le local soit ventilé de façon mécanique ou naturelle, l'air du local peut être considéré comme renouvelé à un débit Q (en $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Si le liquide répandu se trouve à une température T supérieure à son point d'éclair, l'inéquation (1) est vérifiée et il est possible d'affirmer qu'une atmosphère explosive est certainement présente à proximité immédiate de la surface libre du liquide.

Cependant, la vapeur produite se mélange à l'air du local de sorte qu'un gradient de concentration s'établit et que, à une certaine distance du liquide répandu, le mélange de vapeur et d'air est trop dilué pour former une atmosphère explosive.

Les résultats des mesures qui ont conduit à l'élaboration de la relation (3) ont permis de montrer que, pour chacun des liquides étudiés, une atmosphère explosive n'est présente qu'à proximité immédiate du bord du bac sous le vent et que son volume reste inférieur à 1 dm³ pour 1 m² de surface émettrice.

Pour calculer la valeur du débit d'extraction Q qui permet d'empêcher que le mélange d'air et de vapeur véhiculé par la gaine d'extraction de l'air du local soit une atmosphère explosive, il suffit de considérer que c'est dans cette gaine que se mélangent de façon homogène l'air neuf de ventilation du local, caractérisé par le débit Q , et la vapeur émise par le liquide.

Ce mélange n'est pas une atmosphère explosive dès lors que l'inéquation (4) suivante est satisfaite :

$$Q > 100 \times q / \text{LIE} \quad (4)$$

où q est le débit d'évaporation du liquide (exprimé en $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) tiré de la relation (3) et où LIE est la LIE dans l'air (en % vol.) de la vapeur émise par le liquide.

Pour déterminer Q , il faut tenir compte des prescriptions de la circulaire ministérielle du 9 mai 1985, qui impose de limiter à 25 % de la LIE la concentration en vapeur dans les emplacements qui ne sont pas des locaux de travail ; ceci revient à appliquer un coefficient de sécurité égal à 4. Ce coefficient tient compte à la fois du fait qu'un détecteur chargé de mesurer l'augmentation de la concentration en vapeur a un certain temps de réponse et aussi du fait que l'atmosphère mise en œuvre n'est pas nécessairement homogène. Q est alors tiré de l'inéquation (5) suivante :

$$Q > 400 \times q / \text{LIE} \quad (5)$$

* Un volume de 1 Nm³ (1 Normo-m³) est un volume de 1 m³ de gaz mesuré dans les conditions normales de température et de pression (conditions NPT), c'est-à-dire à 0°C et sous la pression de 101 325 Pa.

Pour mener le calcul complet de Q , il faut :

■ se donner une valeur de surface de flaque S (en m^2) qui soit réaliste en fonction de la surface du local, et de l'existence éventuelle d'une pente et d'avaloirs vers lesquels un liquide répandu s'écoulerait,

■ se donner U (en $m.s^{-1}$) ; dans les locaux de travail, pour des raisons de confort des travailleurs, la vitesse de l'air ne dépasse guère $0,4 m.s^{-1}$. C'est cette valeur de U que nous proposons de considérer dans les calculs,

■ calculer le débit massique d'évaporation q (en $g.h^{-1}$) du liquide répandu, à partir des caractéristiques du liquide répandu (M et P_{SAT} à la température T) et de la relation (3),

■ exprimer le débit d'évaporation q en $Nm^3.h^{-1}$,

■ calculer le débit minimal d'air neuf Q (en $Nm^3.h^{-1}$) qui doit être extrait du local, en utilisant la relation (5) ci-dessus.

APPLICATION NUMÉRIQUE

Considérons le cas d'un épandage accidentel d'acétone ($M = 58 g$) à $T = 20^\circ C$, soit $293 K$, sous forme d'une flaque de surface $S = 1 m^2$ soit $10\ 000 cm^2$.

Les tables de constante fournissent les valeurs suivantes :

■ à $20^\circ C$, $P_{SAT} = 24\ 500 Pa$

■ $P_{ATM} = 101\ 320 Pa$

■ $LIE = 2,6 \%$

Pour $V = 0,4 m/s$, la relation (3) conduit à $q = 2,5 kg.h^{-1}$, soit encore $q = 2,5 \times 24/58 = 1 Nm^3.h^{-1}$, où $24 dm^3$ est le volume d'une mole de vapeur à $20^\circ C$.

Avec $LIE = 2,6 \%$, la relation (5) conduit à $Q = 400/2,6 = 154 Nm^3.h^{-1}$

Il s'agit d'une valeur de débit d'air neuf peu élevée, par rapport au débit de ventilation courant d'un local de travail équipé d'une ventilation mécanique centralisée.

Remarque 1

L'application du modèle présente l'avantage de conduire à un débit nécessaire de ventilation du local qui est lié au débit réel d'évaporation du liquide inflammable mis en œuvre.

Remarques 2

Au cas où c'est un liquide inflammable dangereux (toxique, nocif, ...) qui est mis en œuvre, le débit de ventilation du local doit être fixé non seulement en vue de prendre en compte le risque « explosion » mais surtout celui pour la santé des travailleurs (respect des valeurs limites d'exposition). De plus, la mise en place d'un captage localisé à la source permet d'éviter d'augmenter de manière démesurée la ventilation générale du local.

CONCLUSION

Le présent article recense les paramètres dont dépend la formation d'une atmosphère explosive à partir d'un liquide inflammable, en milieu confiné comme en milieu ouvert :

■ en premier lieu, le point d'éclair P_E du liquide et plus précisément la différence de température entre P_E et la température où le liquide est mis en œuvre. Mieux que P_E , c'est le point inférieur d'explosion PIE qui doit être pris en compte chaque fois qu'un équilibre liquide-vapeur peut s'établir,

■ en second lieu, l'environnement du liquide, en particulier les conditions de ventilation de l'installation ou du local où il est mis en œuvre.

La présente publication présente également certains des résultats d'une étude réalisée par l'INERIS suite à une convention avec l'INRS [8], qui a porté sur les mesures simultanées :

■ de la vitesse d'évaporation de solvants inflammables courants contenus dans un bac carré de $1 m^2$ disposé sur le sol d'une galerie ventilée à une vitesse comprise entre $0,3$ et $0,9 m.s^{-1}$, c'est-à-dire représentative de celles rencontrées sur les lieux de travail,

■ et des concentrations atteintes dans l'atmosphère, sous le vent du bac.

Cette étude a permis d'élaborer un modèle d'évaporation d'un liquide et de montrer que le volume de l'atmosphère explosive qui se forme sous le vent du bac a un volume très faible.

Toutefois, si un liquide porté à une température voisine de son point d'ébullition (par exemple de l'acétone à $80^\circ C$) était répandu accidentellement dans un local, on sait (un accident s'est produit dans de telles conditions) qu'un volume d'atmosphère explosive significatif pourrait se former.

Le modèle établi permet aussi de déterminer le débit de ventilation qu'il faut assurer dans un local pour empêcher la formation d'un volume significatif d'atmosphère explosive en cas d'épandage accidentel d'un liquide inflammable.

Reçu le : 27/03/2009

Accepté le : 06/07/2009

POINTS À RETENIR

- La formation d'une atmosphère explosive (ATEX) à partir d'un liquide inflammable dépend de la différence entre son point d'éclair et sa température. En milieu ouvert, elle dépend également des conditions de renouvellement de l'air à la surface du liquide.
- Une étude expérimentale a porté sur des solvants volatils courants (acétone, n-hexane, éthanol) et a conduit à l'élaboration d'un modèle mathématique qui permet de :
 - déterminer le débit d'évaporation d'une flaque de liquide en fonction de différents paramètres, dont sa température et la vitesse de l'air à sa surface,
 - déterminer le débit d'air de ventilation qui permet de s'affranchir du risque d'accumulation de l'ATEX formée par évaporation du liquide.
- Des mesures de concentration ont montré que le volume de l'ATEX qui se forme sous le vent du liquide a un volume très faible, puisqu'il reste inférieur à 1 dm³ par mètre de largeur de flaque.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Mise en œuvre de la réglementation relative aux atmosphères explosives, Guide méthodologique, INRS, 2005, ED 945.

[2] Norme EN 1127-1 (2008) Atmosphères explosives, Prévention de l'explosion et protection contre l'explosion.

[3] Les mélanges explosifs – 1. Gaz et vapeurs, INRS, 2004, ED 911.

[4] ZABETAKIS G. – Flammability characteristics of combustible gases and vapors, US Bureau of Mines Bulletin 627, 1965, 22 p.

[5] BRAUN K. O., CAPLAN K.-J. – Evaporation rate of volatile liquids. Report n°EPA-744-R-92-001, NTIS-PB92-232305, Springfield, 1989.

[6] HUMMEL A. A., BRAUN K. O., FEHRENBACHER M. C. – Evaporation of a liquid in a flowing airstream. American Industrial Hygiene Association Journal, 1996, 57, pp. 519-525.

[7] US Environmental Protection Agency Report n°EPA-550-B-99-009, Appendix D, Washington, EPA, 1999.

[8] BRACONNIER R., CHAINEAUX J., TRIOLET J., FONTAINE J.-R., SALLE B. – Mesures du flux d'évaporation de liquides volatils dans des ambiances de travail. INRS, Hygiène et sécurité du travail, 212, 2008, ND 2296, pp. 61-71.

[9] Norme NF EN 60079-10-1 Éd. 1.0 (2006) : Atmosphères explosives – Partie 10-1 : Classement des emplacements – Atmosphères explosives gazeuses.