



Conditions de formation d'une atmosphère explosive lors de la mise en oeuvre d'un liquide inflammable

Jacques Chaineaux, Agnès Janes, Benoît Salle, Jean-Michel Petit

► To cite this version:

Jacques Chaineaux, Agnès Janes, Benoît Salle, Jean-Michel Petit. Conditions de formation d'une atmosphère explosive lors de la mise en oeuvre d'un liquide inflammable. Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, 2009, pp.23-31. <ineris-00961944>

HAL Id: ineris-00961944

<https://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00961944>

Submitted on 20 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ND

06/03/2009

**Conditions de formation d'une atmosphère explosive lors
de la mise en œuvre d'un liquide inflammable**

Jacques CHAINEAUX – INERIS

Agnès JANES – INERIS

Benoît SALLÉ - INRS

Jean-Michel PETIT - INRS

SOMMAIRE

- 1. INTRODUCTION**
- 2. CONDITIONS NÉCESSAIRES À LA FORMATION D'UNE ATMOSPHÈRE EXPLOSIVE**
 - 2.1 - Conditions propres au liquide
 - 2.1.1 - Point d'éclair du liquide
 - 2.1.2 - Température ambiante du liquide
 - 2.2 - Conditions liées à l'environnement
 - 2.2.1 - Équilibre liquide-vapeur
 - 2.2.2 - Absence d'équilibre liquide-vapeur
- 3. DIMENSIONNEMENT DU VOLUME DE L' ATMOSPHÈRE EXPLOSIVE FORMÉE**
- 4. APPLICATION AUX LIEUX DE TRAVAIL**
- 5. CONCLUSION**
- 6. BIBLIOGRAPHIE**

1. INTRODUCTION

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 demandera, 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 (ce peut être 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 dont dépend la 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 dépendront également du débit d'évaporation du liquide.

2. 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.

2.1 CONDITIONS PROPRES AU LIQUIDE

2.1.1 - Point d'éclair du liquide

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

Selon la norme EN 1127-1 (2006) [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".

On constate que, pour un même liquide, 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.

Ceci provient du fait que, 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 ci-après 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).

Liquide	Point d'éclair P _E (°C)	Liquide	Point d'éclair P _E (°C)
Oxyde de diéthyle (éther diéthylique)	- 45	Toluène	4
<i>n</i> -Pentane	- 40	Méthanol	11
<i>n</i> -Hexane	- 21	Ethanol	12
Acétone	- 17	1-Propanol	15
Cyclohexane	- 20	Acétate de <i>n</i> -butyle	22
Benzène	- 11	1-Butanol	29
Acétate d'éthyle	- 4	<i>o</i> -, <i>m</i> -, <i>p</i> - Xylène	32, 27, 27

Tableau 1 : Points d'éclair de liquides inflammables courants en coupelle fermée

2.1.2.– 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 :

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

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.

2.2 – 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 continûment à la surface du liquide, sous forme d'un flux qui se mélange avec le flux des vapeurs émises par le liquide.

2.1.2 Équilibre liquide-vapeur

Pour qu'un équilibre thermodynamique puisse s'établir entre un liquide et la vapeur qu'il émet, les 2 conditions suivantes doivent être remplies simultanément :

1. le liquide doit être contenu dans un récipient fermé,
2. 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 » et 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 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 :

$$C_v = 100 \times \frac{P_{\text{sat}}}{P_{\text{atm}}} \quad (2)$$

où P_{atm} est la pression atmosphérique.

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 température 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 abscisses, la teneur volumique en vapeur du mélange vapeur-air,
- § en ordonnées, la température du mélange vapeur-air,

Sur la figure 1 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 lorsque la température croît et inversement la LSE augmentera.
- § 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.

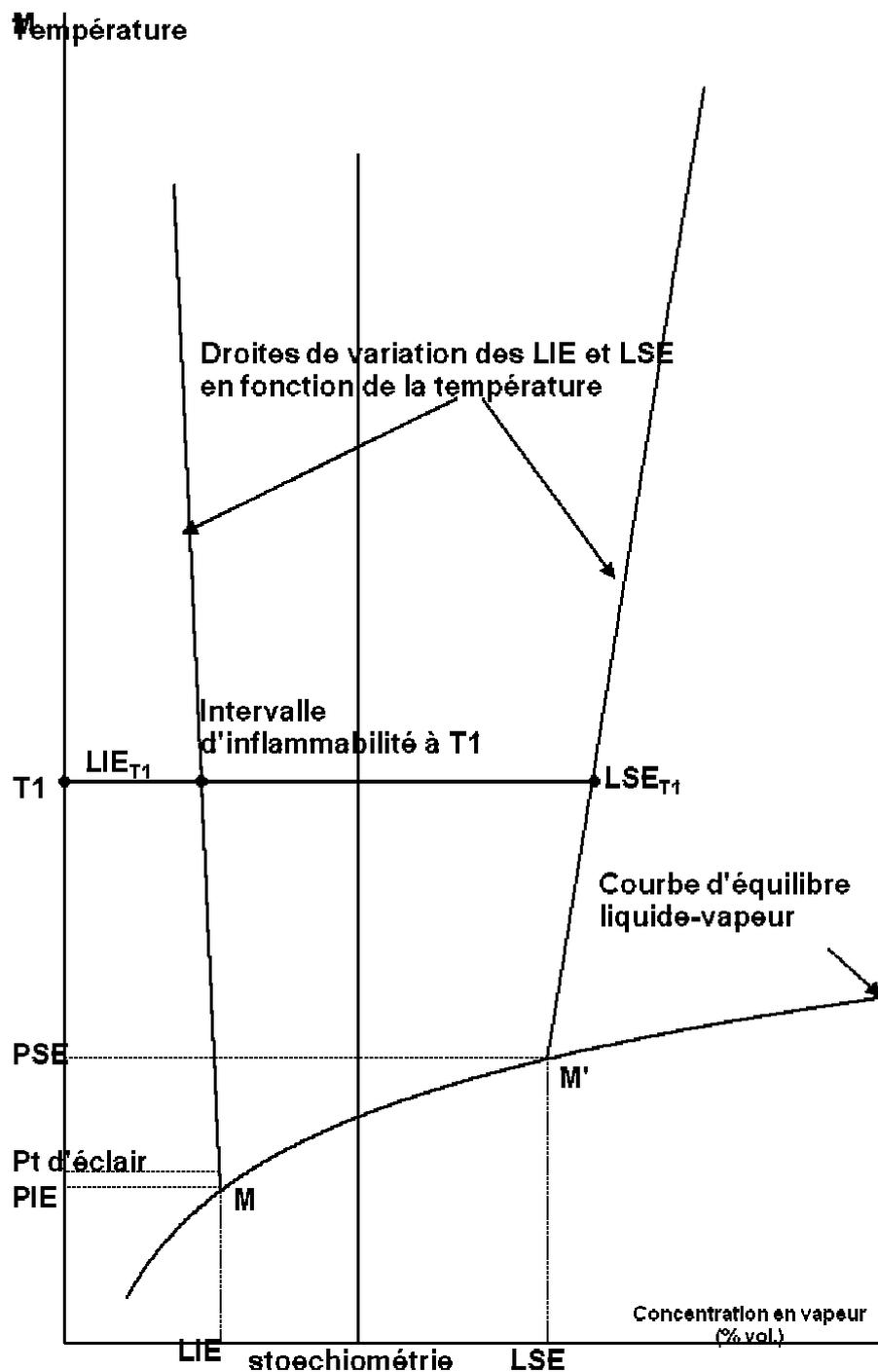


Figure 1 : Représentation graphique de l'influence de la température sur l'explosivité d'un liquide inflammable

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 pas se former d'atmosphère explosive dans des conditions de confinement. Dans l'intervalle de température compris entre PIE et P_E , la formation d'une atmosphère explosive dans toutes les conditions où un équilibre liquide-vapeur peut s'établir et donc en particulier lorsqu'un liquide se trouve confiné dans un récipient est possible.

2.1.3 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].

3. 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 (photo 1), 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.

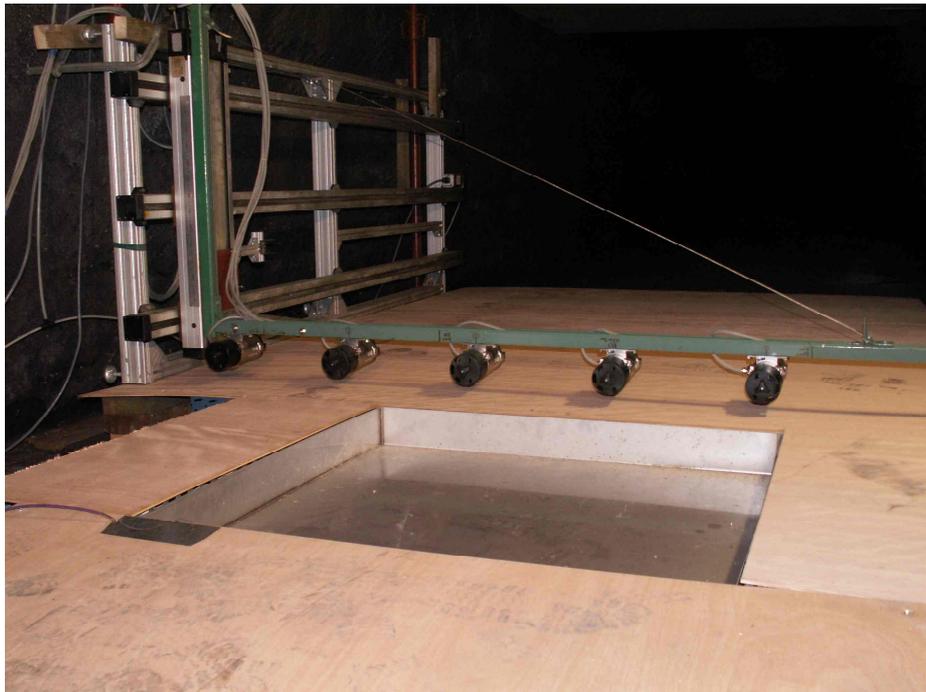


Photo 1

L'étude a porté sur les trois liquides dont les caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 2 :

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	24500
<i>n</i> -Hexane	86,2	- 21	1,2	16100
Ethanol	46,1	12	3,3	5800

Tableau 2 : Caractéristiques des 3 liquides étudiés

Toute évaporation d'un liquide est un phénomène endothermique qui se traduit par une perte de masse et par une diminution simultanée de la température du liquide, plus importante à la surface du bac qu'au fond de bac ; ces résultats apparaissent sur la figure 2 dont l'exploitation permet également d'accéder au débit d'évaporation du liquide.

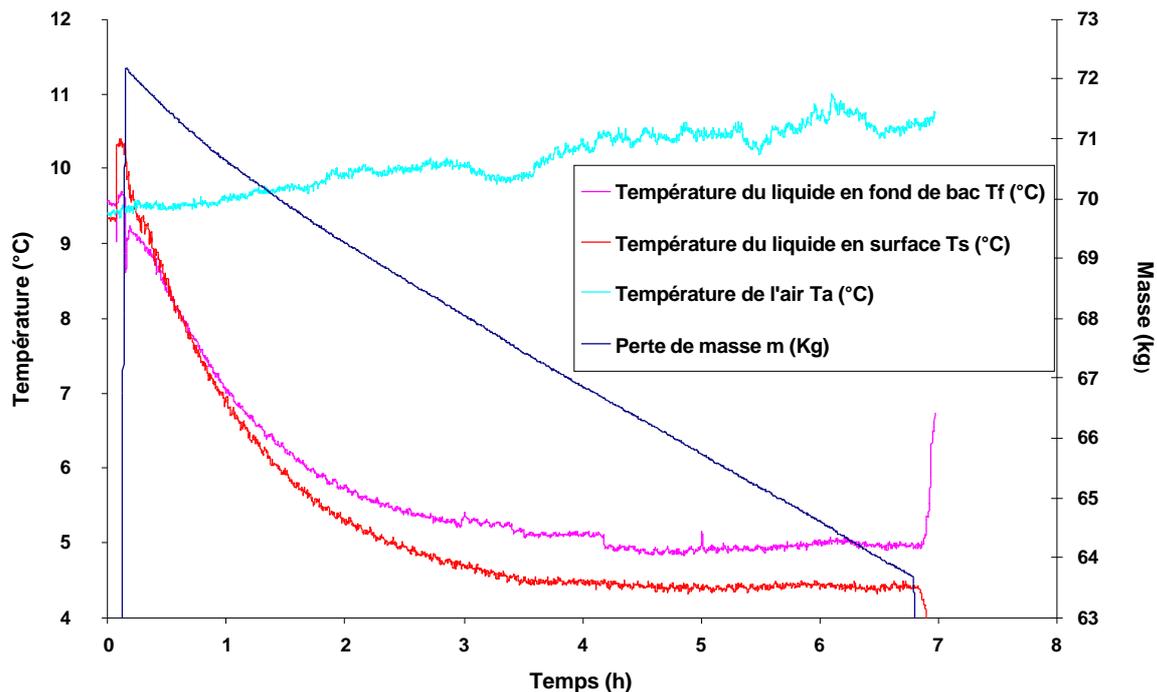


Figure 2 : Variation temporelle des températures du liquide, en surface T_s et au fond du bac T_f , et de l'air au-dessus du liquide T_a , ainsi que de

*la masse m du liquide, au cours d'un essai réalisé avec l'acétone, pour
0,9 m/s de vitesse d'air*

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 :

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

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,

§ 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, au-dessus de la surface du liquide, un "bouchon" de vapeurs. Les raisons de ces restrictions sont exposées en détail dans l'encadré 1.

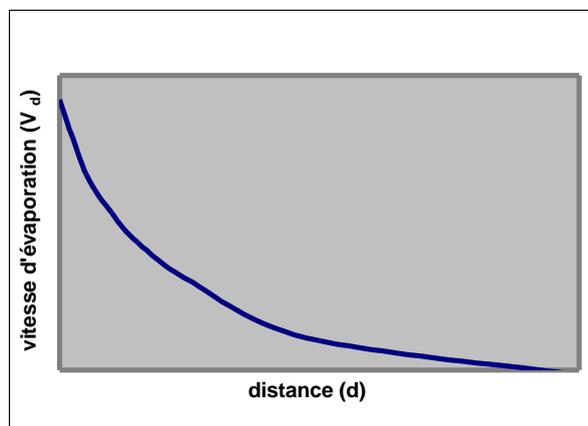
Encadré I - Relation entre la vitesse d'évaporation et le niveau du liquide dans le récipient

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

A 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).

À titre d'exemple, Le tableau 3 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 $U = 1 \text{ m/s}$.

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

Tableau 3 : 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, selon le modèle de l'INERIS

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 $U = 0,9 \text{ m/s}$ que pour $U = 0,3 \text{ m/s}$ (figure 3),
- § 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 $U = 0,9 \text{ m/s}$ (figure 3).

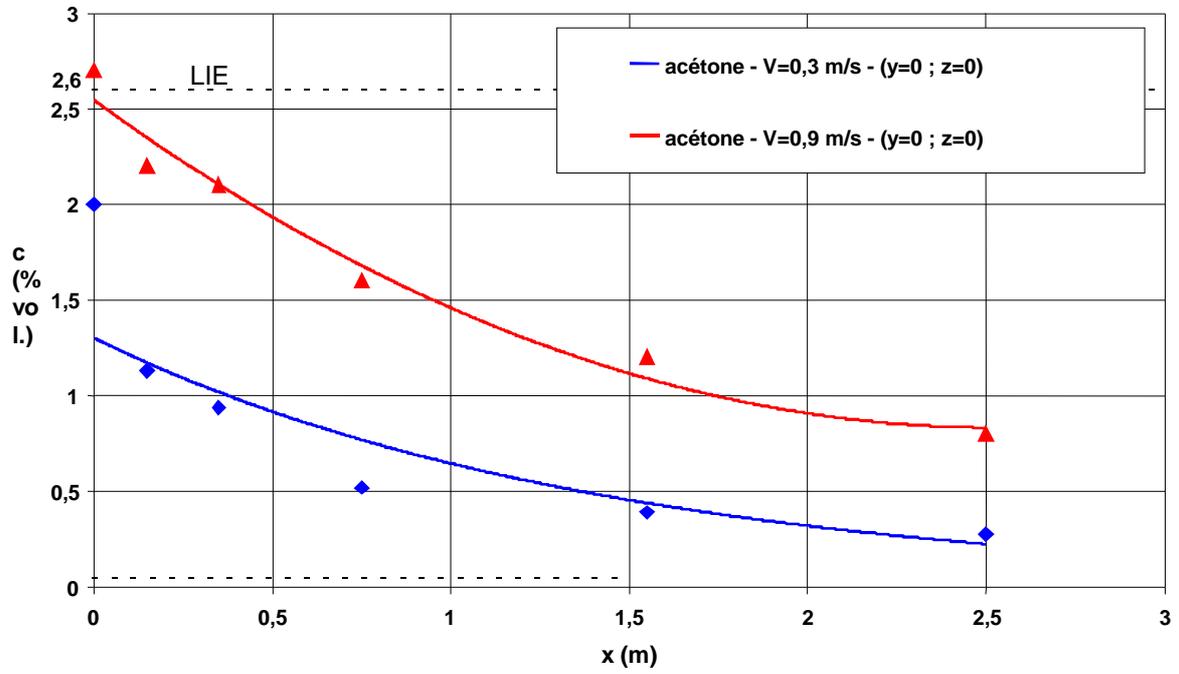


Figure 3 : Variation de la concentration en vapeur d'acétone mesurée sous le vent du bac, au niveau de son ouverture et sur sa médiane ($S=1$ m^2 , $U=0,9$ et $0,3$ $m.s^{-1}$)

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, évents...), la vapeur émise par le liquide peut diffuser dans l'air du local à travers cet orifice.

Remarque importante : 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 10^5 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) ci-dessous, 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,

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

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 Nm^3/h).

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 dm^3 pour 1 m^2 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 Nm^3/h) 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'équation (5) suivante :

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

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 V (en m/s) ; dans les locaux de travail, pour des raisons de confort des travailleurs, la vitesse de l'air ne dépasse guère $0,4 \text{ m/s}$. C'est cette valeur de V que nous proposons de considérer dans les calculs,
- calculer le débit massique d'évaporation q (en g/h) 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 ,
- calculer le débit minimal d'air neuf Q (en Nm^3/h) qui doit être extrait du local, en utilisant la relation (5) ci-dessus.

Application numérique

Considérons le cas d'un épandage accidentel d'acétone ($M = 58 \text{ g}$) à $T = 20^\circ\text{C}$, soit 293 K , sous forme d'une flaque de surface $S = 1$

m^2 soit $10\,000\text{ cm}^2$

Les tables de constante fournissent les valeurs suivantes :

à 20°C , $P_{\text{sat}} = 24500\text{ Pa}$

$P_{\text{atm}} = 101320\text{ Pa}$

$\text{LIE} = 2,6\%$

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

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

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.

Remarque 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.

5. CONCLUSION

La présente note documentaire 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, 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°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.

6. BIBLIOGRAPHIE*

- [1] Mise en œuvre de la réglementation relative aux atmosphères explosives, Guide méthodologique, INRS ED 945 (2005).
- [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 ED 911 (2004).
- [4] ZABETAKIS G. - Flammability characteristics of combustible gases and vapors - U S Bureau of Mines Bulletin 627 (1965) p. 22.
- [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. ND 2296. Cahiers de Notes Documentaires. 2008.
- [9] Norme NF EN 60079-10-1 Ed. 1.0 (2006) : Atmosphère explosives – Partie 10-1 : Classement des emplacements – Atmosphère explosives gazeuses.