



Les mélanges explosifs
1. Gaz et vapeurs

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

Dans le domaine de la prévention des risques professionnels, l'INRS est un organisme scientifique et technique qui travaille, au plan institutionnel, avec la CNAMTS, les Carsat, Cramif, CGSS et plus ponctuellement pour les services de l'État ainsi que pour tout autre organisme s'occupant de prévention des risques professionnels.

Il développe un ensemble de savoir-faire pluridisciplinaires qu'il met à la disposition de tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, médecin du travail, CHSCT, salariés. Face à la complexité des problèmes, l'Institut dispose de compétences scientifiques, techniques et médicales couvrant une très grande variété de disciplines, toutes au service de la maîtrise des risques professionnels.

Ainsi, l'INRS élabore et diffuse des documents intéressant l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, multimédias, site Internet... Les publications de l'INRS sont distribuées par les Carsat. Pour les obtenir, adressez-vous au service Prévention de la caisse régionale ou de la caisse générale de votre circonscription, dont l'adresse est mentionnée en fin de brochure.

L'INRS est une association sans but lucratif (loi 1901) constituée sous l'égide de la CNAMTS et soumise au contrôle financier de l'État. Géré par un conseil d'administration constitué à parité d'un collègue représentant les employeurs et d'un collègue représentant les salariés, il est présidé alternativement par un représentant de chacun des deux collèges. Son financement est assuré en quasi-totalité par le Fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat), la caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France (Cramif) et les caisses générales de sécurité sociale (CGSS)

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail, la caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France et les caisses générales de sécurité sociale disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service Prévention composé d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité. Spécifiquement formés aux disciplines de la prévention des risques professionnels et s'appuyant sur l'expérience quotidienne de l'entreprise, ils sont en mesure de conseiller et, sous certaines conditions, de soutenir les acteurs de l'entreprise (direction, médecin du travail, CHSCT, etc.) dans la mise en œuvre des démarches et outils de prévention les mieux adaptés à chaque situation. Ils assurent la mise à disposition de tous les documents édités par l'INRS.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite.

Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle). La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de deux ans et d'une amende de 150 000 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

Les mélanges explosifs

Partie 1 : gaz et vapeurs

Jean-Michel Petit
Jean-Louis Poyard

Sommaire

Sommaire

CHAPITRE 1		CHAPITRE 2	
Caractéristiques des mélanges explosifs	7	Caractéristiques et effets des explosions	33
1. Définitions	7	1. Grandeurs caractéristiques de la violence des explosions	33
1.1. Gaz et vapeurs		1.1. Pression maximale d'explosion P_{\max}	33
1.2. Concentrations limites d'inflammabilité dans l'air		1.2. Vitesse d'accroissement de la pression $\frac{dP}{dt} \max$	34
1.3. La température d'auto-inflammation		2. Facteurs influant sur le régime et la violence de l'explosion	34
1.4. Le point d'éclair		2.1. Concentration du gaz inflammable dans l'atmosphère	34
1.5. Énergie d'inflammation		2.2. Énergie de la source d'inflammation	35
1.6. Interstice expérimental maximal de sécurité		2.3. Volume et forme de l'enceinte	35
2. Classification des gaz et vapeurs inflammables	21	2.4. Turbulence de l'atmosphère	36
3. Conditions d'inflammabilité et d'explosivité	27	2.5. Pression initiale de l'atmosphère	36
4. Facteurs influant sur l'inflammabilité	27	3. Effets pratiques des explosions et évaluation des dommages potentiels résultant d'une explosion de mélange gazeux dans une installation	36
4.1. Influence de la pression sur les limites d'inflammabilité des gaz	27		
4.2. Influence de la température sur les limites d'inflammabilité des gaz	28		
4.3. Influence de la pression et de la température sur les limites d'inflammabilité de vapeurs (en présence de liquide)	29	CHAPITRE 3	
4.4. Influence d'une atmosphère enrichie en oxygène sur les caractéristiques d'inflammabilité	29	Évaluation des risques d'explosion	39
4.5. Influence d'une atmosphère appauvrie en oxygène sur les caractéristiques d'inflammabilité	29	1. Démarche préventive	39
4.6. Limites d'inflammabilité de mélanges de gaz ou vapeurs inflammables	30	2. Analyse et mesure des risques d'explosion	40
		3. Zones de danger	40
		3.1. Délimitation des zones	41
		3.2. Modifications des zones	43
		3.3. Exemples de délimitation des zones	43
		4. Surveillance de l'explosivité d'une atmosphère - Explosimètres	50

SOMMAIRE

CHAPITRES 4, 5 ET 6

MESURES EMPÊCHANT L'EXPLOSION DE SE PRODUIRE

CHAPITRE 4

Prévention des explosions par action sur les gaz et vapeurs inflammables

1. Diminution de la concentration de gaz ou vapeurs inflammables par la ventilation ou l'aération	51
2. Maintien de la proportion de gaz ou vapeurs inflammables au-dessus de la LSE	52
3. Prévention des explosions par action sur les propriétés comburantes de l'atmosphère. Mise à l'état inerte ou « inertage »	52
3.1. Inflammabilité d'un mélange en fonction des proportions d'oxygène et de gaz ou vapeur combustible	53
3.2. Inflammabilité d'un mélange en fonction des proportions de gaz inerte ajouté et de gaz ou vapeur combustible	54
3.3. Inflammabilité d'un mélange ternaire en fonction de proportions des trois composants - gaz ou vapeur combustible, oxygène ou air, gaz inerte - par un diagramme triangulaire	58

CHAPITRE 5

Prévention des explosions par suppression des sources d'inflammation

1. Flammes et feux nus	61
2. Surfaces chaudes et compression	61
3. Étincelles d'origine mécanique	65
4. Étincelles provenant de décharge d'électricité statique	66
5. Étincelles et échauffements dus aux matériels électriques	67
6. Ondes électromagnétiques	68

CHAPITRE 6

Appareils utilisables en atmosphères explosibles

1. Généralités	69
2. Matériels électriques de sûreté	72
2.1. Règles de réalisation des installations électriques	72
2.2. Matériel de sûreté	75
2.3. Choix du matériel	79
2.4. Choix des canalisations	81
3. Matériel non électrique de sûreté	83

CHAPITRE 7

Mesures limitant les effets des explosions

1. Mesures constructives permettant aux récipients de résister aux effets d'une explosion primaire	85
2. Décharge de la pression d'explosion	86
3. Systèmes d'isolement de l'explosion	86
3.1. Arrête-flammes	86
3.2. Autres systèmes d'isolement de l'explosion (découplage)	88
4. Protection contre des effets d'explosion, par éloignement ou séparation	89

Conclusion	91
------------	----

Bibliographie	93
---------------	----

Introduction

Introduction

Des explosions accidentelles sont provoquées, sur les lieux de travail, par des gaz, des vapeurs, des poussières et certaines substances instables et fortement réactives, des matières explosives par destination.

En règle générale, les explosions comptent peu dans le nombre total des accidents du travail. Toutefois, leurs conséquences humaines sont lourdes et justifient à elles seules des mesures de prévention et de protection qui peuvent être importantes.

Les statistiques pour les années 1995, 2000 et 2001 de la Direction des risques professionnels de la Caisse nationale d'assurance maladie des travailleurs salariés (CNAMTS), regroupées dans le *tableau 1*, confir-

ment ces assertions, en soulignant que les moyennes plus élevées de l'année 2001 sont liées à un accident important dans la région de Toulouse.

On trouvera dans cette brochure les informations générales nécessaires pour prendre les mesures de prévention et de protection contre les explosions de gaz et de vapeurs. En effet, une connaissance accrue de leur déclenchement doit permettre d'éviter que des accidents occasionnels ne se transforment en drame humain.

Plusieurs unités de pression pouvant être mentionnées dans la présente brochure, le lecteur trouvera dans le *tableau 2* la conversion des unités.

Tableau 1 • Statistiques de la CNAMTS.

Années	Tous accidents d'explosion			Accidents graves			Décès		
	1995	2000	2001	1995	2000	2001	1995	2000	2001
Nombres	329	291	1497	66	47	34	5	2	25
% par rapport à l'ensemble des accidents du travail	0,05 %	0,04 %	0,20 %	0,11 %	0,10 %	0,08 %	0,70 %	0,27 %	3,42 %

Tableau 2 • Conversion des unités de pression.

	Pascal	Bar	Atmosphère	mmHg
Pascal		10^{-5}	$9,869 \cdot 10^{-6}$	$7,501 \cdot 10^{-3}$
Bar	10^5		$9,869 \cdot 10^{-1}$	$7,501 \cdot 10^2$
Atmosphère	$1,013 \cdot 10^5$	1,013		760
mmHg	$1,333 \cdot 10^2$	$1,333 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$	

Caractéristiques des mélanges explosifs

Une explosion est la « transformation rapide d'un système matériel donnant lieu à une forte émission de gaz, accompagnée éventuellement d'une émission de chaleur importante ».

Il existe divers types d'explosions (pneumatiques, nucléaires, chimiques, ...). Cette brochure se cantonnera uniquement à la seule explosion chimique de gaz ou vapeurs non explosifs par destination. Cette explosion s'apparente à une combustion, caractérisée par sa violence et sa soudaineté, qui met en œuvre des réactions chimiques et des phénomènes dynamiques, créant une expansion rapide des mélanges dans un milieu confiné ou non.

1. Définitions

1.1. Gaz et vapeurs

L'**état gazeux** se caractérise par une liaison entre les molécules du gaz quasiment nulle, un gaz occupant ainsi tout le volume du récipient qui le contient.

L'**évaporation** est le passage de l'état liquide à l'état gazeux qui s'effectue à la surface du liquide sans ébullition.

Une **substance inflammable** est une substance sous forme de gaz, de vapeur, de liquide, de solide ou de leurs mélanges, capable de subir une réaction exothermique avec l'air après inflammation.

1.2. Concentrations limites d'inflammabilité dans l'air

La plupart des gaz ou vapeurs inflammables en mélange avec l'air sont susceptibles d'exploser en s'enflammant dans certaines conditions.

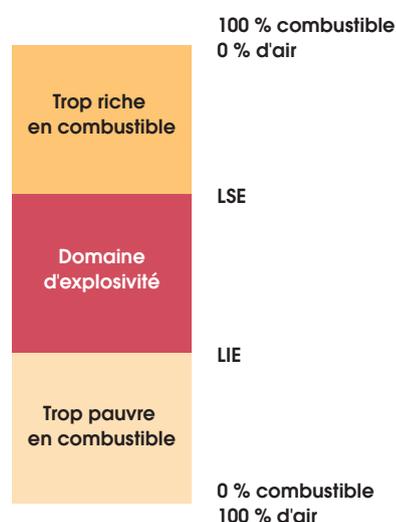


Figure 1 • Domaine d'explosivité.

Une ATmosphère EXplosive (ou ATEX) est un mélange avec l'air⁽¹⁾ de substances inflammables, sous forme de gaz, vapeurs, etc., dans lequel, après que l'inflammation s'est produite, la combustion se propage à l'ensemble du mélange non brûlé.

Les concentrations limites d'inflammabilité définies ci-dessus constituent les limites du domaine d'explosivité de chaque gaz ou vapeur (figure 1).

Pour cette raison, on les désigne souvent – il en sera ainsi dans ce volume – comme limites inférieure ou supérieure d'explosivité.

La **limite inférieure d'explosivité ou d'inflammabilité** (LIE⁽²⁾ ou LII) d'un gaz ou d'une vapeur dans l'air est la

(1) L'air contient environ 21 % d'oxygène, 78 % d'azote et 1 % de gaz rares.

(2) Dans la pratique, les limites d'inflammabilité sont assimilées aux limites d'explosivité. Dans l'ensemble du document, seuls les termes LIE et LSE seront d'ailleurs utilisés.

concentration minimale en volume dans le mélange au-dessus de laquelle il peut être enflammé. On peut lui faire correspondre une température limite inférieure d'inflammabilité (figure 2).

La **limite supérieure d'explosivité ou d'inflammabilité** (LSE ou LSI) d'un gaz ou d'une vapeur dans l'air est la concentration maximale en volume dans le mélange au-dessus de laquelle il peut être enflammé. On peut lui faire correspondre une température limite supérieure d'inflammabilité (figure 2).

La LIE et la LSE peuvent être aussi exprimées en poids de vapeur par litre ou mètre cube de mélange.

Ces limites varient en fonction de la température et de la pression (chap. 1 - § 4.2).

La norme NF EN 1839 spécifie deux méthodes d'essai pour déterminer les limites d'explosivité dans l'air des gaz, des vapeurs et de leurs mélanges. Toutefois, les limites inférieure et supérieure d'inflammabilité déterminées dans d'autres conditions courantes de pression et de température peuvent différer légèrement selon les conditions de mesure (nature et énergie des

sources d'inflammation, dimensions du récipient d'essai, sens de propagation de la flamme).

Les LIE et LSE sont données dans le *tableau 3* pour un grand nombre de gaz ou vapeurs. Ces chiffres supposent que les mélanges sont homogènes.

La **concentration stœchiométrique** est celle qui permet une combustion complète sans excès d'air (par exemple, pour l'hydrogène dans un mélange avec l'air, 29 %).

1.3. La température d'auto-inflammation

La température d'auto-inflammation (*ignition temperature* en anglais) d'un gaz ou d'une vapeur – expression qui a le sens « température d'inflammation » – est la température la plus basse d'une surface chaude à laquelle, dans des conditions spécifiées, l'inflammation d'une atmosphère explosive peut se produire (figure 2). Pratiquement, cette température est communiquée par des parois chaudes de récipients, fours, étuves. Les températures d'inflammation indiquées par les auteurs peuvent différer sensiblement selon les conditions de détermination (dimensions, nature de l'enceinte et des parois, concentration du gaz ou de la vapeur). Le *tableau 3* indique les températures d'inflammation de nombreux gaz et vapeurs. Celles-ci sont le plus souvent comprises entre 250 °C et 650 °C, bien qu'elles soient plus faibles pour quelques substances (oxyde de diéthyle : 160 °C ; disulfure de carbone : 90 °C).

1.4. Le point d'éclair (figure 2)

Pour les vapeurs – donc en présence du liquide qui leur donne naissance –, on détermine le point d'éclair (*flash point* en anglais). Ce point est la température minimale à laquelle un mélange de vapeurs et d'air dans les conditions normales de pression peut être enflammé. Le point d'éclair est voisin de la température à laquelle la pression de vapeur saturante permet d'atteindre, dans son mélange avec l'air, la concentration LIE.

Le point d'éclair n'est pas toujours rigoureusement la température à partir de laquelle la flamme produite dans un mélange persiste et se propage ; cette dernière température est dite « point de flamme » ou « point de feu » (*fire point* en anglais) et n'est supérieure en général que de quelques degrés au point d'éclair. En matière de sécurité, la nuance entre point de flamme ou point d'éclair n'est pas faite et l'on considère pratiquement qu'une vapeur est susceptible de s'enflammer et de donner lieu à un incendie ou une explosion dès qu'elle est portée au point d'éclair.

Les points d'éclair de nombreuses vapeurs de corps

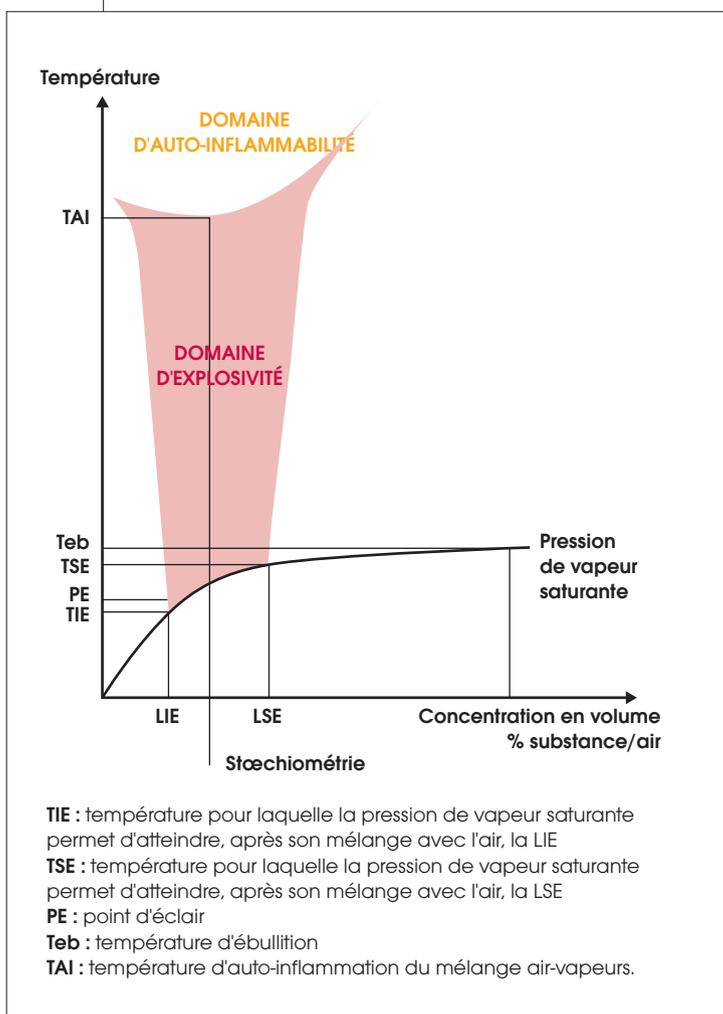


Figure 2 • Domaine d'inflammabilité des vapeurs émises par un liquide inflammable.

Tableau 3

Tables des points d'éclair - températures d'(auto)-inflammation - limites d'inflammabilité dans l'air de gaz et vapeurs usuels (essentiellement d'après le code NFPA 325-1994).

La flèche (→) renvoie vers le synonyme où figurent les caractéristiques.

N.B. : Les caractéristiques d'inflammabilité des gaz et vapeurs - concentrations limites, points d'éclair, température d'inflammation - diffèrent selon les modes de leur détermination. On pourra donc trouver des valeurs différant légèrement (points d'éclair, limites d'inflammabilité) ou sensiblement (températures d'inflammation) de celles données dans cette table. Les points d'éclair ont été déterminés en coupelle fermée, sauf indication contraire (C.O.).

Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde de diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
Acétanilide	CH ₃ CONHC ₆ H ₅	169 C.O.	530	-	-	306	4,6	1,2	-	-
Acétate de n-amyle →Acétate de n-pentyle										
Acétate de benzyle	CH ₃ COOCH ₂ C ₆ H ₅	90	460	-	-	214	-	1,1	faible	-
Acétate de n-butyle	CH ₃ COOC ₄ H ₉	22	420	1,7	7,6	127	4,0	0,9	faible	14
Acétate de cyclohexyle	CH ₃ COOC ₆ H ₁₁	57	330	-	-	177	4,9	1,0	N	-
Acétate de 2-éthoxyéthyle	CH ₃ COOCH ₂ CH ₂ OC ₂ H ₅	47	380	1,7	-	156	4,6	1,0	O	60
Acétate d'éthylglycol →Acétate de 2-éthoxyéthyle										
Acétate d'éthyle	CH ₃ COOC ₂ H ₅	- 4	425	2,0	11,5	77	3	0,9	faible	3
Acétate d'isobutyle	CH ₃ COOCH ₂ CH(CH ₃) ₂	17	420	1,3	10,5	118	4	0,9	N	7,7
Acétate d'isopentyle	CH ₃ COO(CH ₂) ₂ CH(CH ₃) ₂	25	360	1 à 100 °C	7,5	143	4,5	0,9	faible	-
Acétate d'isopropyle	CH ₃ COOCH(CH ₃) ₂	2	460	1,8	8	90	3,5	0,9	faible	4
Acétate de méthyle	CH ₃ COOCH ₃	- 10	454	3,1	16	60	2,8	0,9	O	2
Acétate d'octyle	CH ₃ COOCH ₂ CH(C ₂ H ₅)C ₄ H ₉	71	268	0,7	8	199	5,9	0,9	N	-
Acétate de n-pentyle	CH ₃ COOC ₅ H ₁₁	16	360	1,1	7,5	149	4,5	0,9	faible	13
Acétate de n-propyle	CH ₃ COOC ₃ H ₇	13	450	1,7 à 100 °C	8	102	3,5	0,9	faible	6
Acétate de vinyle	CH ₂ COOCHCH ₂	- 8	402	2,6	13,4	72	3	0,9	faible	3
Acétone	CH ₃ COCH ₃	- 20	465	2,6	13	56	2	0,8	O	2
Acétonitrile	CH ₃ CN	2	520	3	16	82	1,4	0,8	O	-
Acétonylacétone →2,5-Hexanedione										
Acétophénone →1-Phényléthanone										
Acétylène	C ₂ H ₂	gaz	300	2,5	81	- 83	0,9	-	N	-
Acide acétique	CH ₃ COOH	39	463	4,0	20	118	2,1	1	O	24
Acide acrylique	CH ₂ CHCOOH	49 C.O.	438	2,4	8,0	141	2,5	1,1	O	-
Acide adipique	HOOC(CH ₂) ₄ COOH	196	420	-	-	265	5	1,4	N	-
Acide benzoïque	C ₆ H ₅ COOH	121	570	-	-	250	4,2	1,3	faible	-
Acide butyrique	CH ₃ (CH ₂) ₂ COOH	72	443	2	10	164	3	1	O	-
Acide caproïque →Acide hexanoïque										
Acide crotonique	CH ₃ CHCHCOOH	87 C.O.	396	-	-	188	3	1	O	-
Acide formique	HCOOH	46,5	480	14,3	34	100	1,6	-	O	55
Acide hexanoïque	CH ₃ (CH ₂) ₄ COOH	101	380	-	-	204	-	0,9	N	-
Acide 2-hydroxybenzoïque	HO-C ₆ H ₄ -COOH	157	540	1,1 à 200 °C	-	sublim. > 76	4,8	1,5	N	-
Acide propionique	CH ₃ CH ₂ COOH	52	465	2,9	12,1	147	2,5	1	O	-
Acide salicylique →Acide 2-hydroxybenzoïque										
Acide stéarique	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	196	395	-	-	385	-	0,8	N	-
Acide tartrique	(CHOHCOOH) ₂	210 C.O.	425	-	-	-	5,2	1,7	-	-
Acroléine	CH ₂ CHCHO	- 26	220	2,8	31	52	1,9	0,8	O	-
Acrylate d'éthyle	CH ₂ CHCOOC ₂ H ₅	9	372	1,4	14	99	3,5	0,9	faible	-
Acrylate de méthyle	CH ₂ CHCOOCH ₃	- 3	468	2,8	25	80	3	1	très faible	-

CHAPITRE 1

Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde de diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
Acrylonitrile	CH ₂ CHCN	0 C.O.	480	3	17	77	1,8	0,8	O	-
Alcool allylique → 2-Propène-1-ol										
Alcool amylique → 1-Pentanol										
Alcool benzyle	C ₆ H ₅ CH ₂ OH	93	435	-	-	206	-	1	faible	1 750
Alcool éthylique → Éthanol										
Alcool furfurylique	O(CH ₂) ₃ CH ₂ OH	65	490	1,8	16,3	170	3,4	1,1	O	443
Alcool isopropylique → 2-Propanol										
Alcool propylique → 1-Propanol										
Aldéhyde acétique	CH ₃ CHO	- 37	175	4,0	60	21	1,5	0,8	O	
Aldéhyde crotonique	CH ₃ CHCHCHO	12	230	2,1	15,5	102	2,4	0,9	faible	-
Aldéhyde formique	HCHO	gaz	424	7	73	- 19	1	-	O	-
Amylamine → Pentylamine										
2-Aminoéthanol	HOCH ₂ CH ₂ NH ₂	85	410	-	-	171	2,1	1	O	-
Ammoniac	NH ₃	gaz	650 (*)	15	28	- 33	0,6	0,7 à - 33 °C	O	-
Anhydride acétique	(CH ₃ CO) ₂ O	49	315	2,7	10,3	140	3,5	1,1	O	31
Anhydride maléique	(CHCO) ₂ O	102	475	1,4	7,1	202	-	0,9	faible	-
Anhydride phtalique	C ₆ H ₄ (CO) ₂ O	151	570	1,7	10,5	284	-	1,5	N	-
Anhydride propionique	(CH ₃ CH ₂ CO) ₂ O	63	285	1,3	9,5	169	4,5	1	décomp.	-
Aniline	C ₆ H ₅ NH ₂	70	615	1,3	11	184	3,2	1	faible	env. 200
Anisol → Méthoxybenzène										
Anthracène	C ₆ H ₄ (CH) ₂ C ₆ H ₄	121	540	0,6	-	340	6,1	1,2	-	-
Anthraquinone	C ₆ H ₄ (CO) ₂ C ₆ H ₄	185	-	-	-	380	7,1	1,4	N	-
Arachide (Huile)		282	445	-	-	-	-	0,9	N	-
3-Azapentane-1,5-diamine	(NH ₂ CH ₂ CH ₂) ₂ NH	98	358	2	6,7	206	3,6	1	O	-
Benzaldéhyde	C ₆ H ₅ CHO	63	190	-	-	179	3,7	1,1	N	-
Benzène	C ₆ H ₆	- 11	498	1,3	7,9	80	2,8	0,9	N	3
1,3-Benzène diol	C ₆ H ₄ (OH) ₂	127	608	1,4	-	277	3,8	1,3	-	-
				à 200 °C						
1,4-Benzène diol	C ₆ H ₄ (OH) ₂	165	515	-	-	285	3,8	1,4	-	-
Biphényle	(C ₆ H ₅) ₂	112	540	0,6	5,8	254	-	1,2	N	-
				à 111 °C	à 155 °C					
1-Bromobutane	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ Br	18	265	2,6	6,6	102	4,7	1,3	N	-
				à 100 °C	à 100 °C					
1-Bromopentane	CH ₃ (CH ₂) ₃ CH ₂ Br	32	-	-	-	128	-	1,2	N	-
3-Bromo-1-propène	CH ₂ CHCH ₂ Br	- 1	295	4	7,3	71	4,2	1,4	N	-
Bromobenzène	C ₆ H ₅ Br	51	565	-	-	155	5,4	1,5	N	-
Bromoéthane	CH ₃ CH ₂ Br	diff. infl.	510	6,7	11	38	3,8	1,4	faible	-
Bromométhane	CH ₃ Br	diff. infl.	535	10	16	4	3,3	1,7	N	-
Bromure d'allyle → 3-Bromo-1-propène										
Bromure de butyle → 1-Bromobutane										
Bromure d'éthyle → Bromoéthane										

(*) S'enflamme difficilement et seulement à haute température.

Caractéristiques des mélanges explosifs

Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
Bromure de méthyle →Bromométhane										
1,3-Butadiène	CH ₂ CHCHCH ₂	gaz	420	2	12	- 4	1,9	-	N	-
Butane	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₃	gaz	287	1,8	8,4	- 1	2	0,6	N	-
1-Butanol	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ OH	29	343	1,4	11,2	117	2,6	0,8	O	33
2-Butanone	CH ₃ COC ₂ H ₅	- 9	404	1,4 à 93 °C	11,4 à 93 °C	80	2,5	0,8	O	2,8
1-Butène	CH ₃ CH ₂ CHCH ₂	gaz	380	1,6	10	- 6	1,9	-	N	-
2-Butène	CH ₃ CHCHCH ₃	gaz	320	1,7	9	4	1,9	0,6	-	-
2-Butène-1-ol	CH ₃ CHCHCH ₂ OH	27	349	4,2	35,3	112	2,5	0,8	O	-
3-Butène-2-one	CH ₃ COCHCH ₂	- 7	491	2,1	15,6	81	2,4	-	-	-
Butylamine	C ₄ H ₉ NH ₂	- 12	310	1,7	9,8	77	2,5	0,9	O	-
Butylbenzène	C ₄ H ₉ C ₆ H ₅	71 C.O.	410	0,8	5,8	180	4,6	0,9	N	-
Butyraldéhyde	CH ₃ (CH ₂) ₂ CHO	- 22	218	1,9	12,5	76	2,5	0,8	N	-
Butyrate d'éthyle	CH ₃ (CH ₂) ₂ COOC ₂ H ₅	24	460	-	-	120	4	0,9	N	-
Butyrate de méthyle	CH ₃ (CH ₂) ₂ COOCH ₃	13	-	-	-	102	3,5	0,9	faible	-
Butyrate de vinyle	CH ₃ (CH ₂) ₂ COOCHCH ₂	20 C.O.	-	1,4	8,8	117	4	0,9	faible	-
Camphre (Huile)		47	-	-	-	176 - 200	-	0,9	N	-
Carburacteur JP1 (TR0)		38	255	0,67	4,96	-	-	-	-	-
Carburacteur JP3 (TR3)		- 20	251	0,9	6,15	-	-	-	-	-
Carburacteur JP4 (TR4)		- 20	249	0,8	5,63	-	-	-	-	-
CarburacteurJP5 (TR5)		58	246	0,6	4,53	-	-	-	-	-
Chlorobenzène	C ₆ H ₅ Cl	28	593	1,3	9,6	132	3,9	1,1	N	12,5
2-Chloro-1,3-butadiène	CH ₂ ClCHCH ₂	- 20	-	4	20	59	3	1	faible	-
1-Chlorobutane	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ Cl	- 9	240	1,8	10,1	76	3,2	0,9	N	-
2-Chloro-2-butène	CH ₃ CClCHCH ₃	- 19	-	2,3	9,3	62	3,1	0,9	très faible	-
2-Chloro-1,1-diméthoxyéthane	ClCH ₂ CH(OCH ₃) ₂	43	232	-	-	126	-	1	-	-
Chlorodinitrobenzène	C ₆ H ₃ Cl(NO ₂) ₂	194	-	2	22	315	-	1,7	N	-
1-Chloro-2,3-époxypropane	CH ₂ CHOCH ₂ Cl	31 C.O.	411	3,8	21	115	3,2	1,2	O	13
Chloroéthane	CH ₃ CH ₂ Cl	- 50	515	3,8	15,4	12	2,2	0,9	faible	-
2-Chloroéthanol	CH ₂ ClCH ₂ OH	60	425	4,9	15,9	128	2,8	1,2	O	-
Chlorométhane	CH ₃ Cl	gaz (- 50)	630	8,1	17,4	- 25	1,8	-	faible	-
1-Chloro-2-méthylpropane	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ Cl	< 21	-	2	8,8	69	3,2	0,9	-	-
1-Chloro-4-nitrobenzène	C ₆ H ₄ ClNO ₂	127	-	-	-	242	5,44	1,37	N	-
1-Chloropentane	CH ₃ (CH ₂) ₃ CH ₂ Cl	12,8 C.O.	260	1,6	8,6	105	3,7	0,9	N	-
2-Chlorophénol	ClC ₆ H ₄ OH	64	-	-	-	175	-	1,3	faible	-
1-Chloropropane	CH ₃ CH ₂ CH ₂ Cl	< - 18	520	2,6	11,1	46	2,7	0,9	très faible	-
2-Chloropropane	(CH ₃) ₂ CHCl	- 32	590	2,8	10,7	35	2,7	0,9	très faible	-
1-Chloropropène	CH ₃ CHCHCl	< - 6	-	4,5	16	35	-	0,9	-	-
3-Chloropropène	CH ₂ CHCH ₂ Cl	- 32	485	2,9	11,1	45	2,6	0,9	N	-
1-Chloro-1,2,2-trifluoroéthylène	FCFClF ₂	gaz	-	8,4	16	- 28	4,0	1,3	-	-
Chlorure d'acétyle	CH ₃ COCl	4	390	-	-	51	2,7	1,1	décomp.	-
Chlorure d'allyle →3-Chloropropène										
Chlorure d'amyle →1-Chloropentane										
Chlorure de benzoyle	C ₆ H ₅ COCl	72	-	-	-	197	4,9	1,2	décomp.	-
Chlorure de benzyle	C ₆ H ₅ CH ₂ Cl	67	585	1,1	-	179	4,4	1,1	N	48
Chlorure de butyle →1-Chlorobutane										
Chlorure d'éthyle →Chloroéthane										

CHAPITRE 1

Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde de diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
Chlorure d'éthylène →1,2-Dichloroéthane										
Chlorure de méthyle →Chlorométhane										
Chlorure de méthylène →Dichlorométhane										
Chlorure de propionyle	CH ₃ CH ₂ COCl	12	-	-	-	80	3,2	1,1	décomp.	-
Chlorure de propyle →1-Chloropropane										
Chlorure de soufre →Dichlorure de disoufre										
Chlorure de vinyle	CH ₂ CHCl	gaz	470	3,6	33	- 14	2,2	0,9	N	-
o-Crésol	CH ₃ C ₆ H ₄ OH	81	595	1,4	-	191	3,7	1	N	-
m- ou p-Crésol	CH ₃ C ₆ H ₄ OH	86	555	1,1	-	201	-	1	N	-
Cumène	C ₆ H ₅ CH(CH ₃) ₂	36	424	0,9	6,5	152	4,1	0,9	N	-
Cyanogène	(CN) ₂	gaz	-	6,6	32	- 21	1,8	-	-	-
Cyanure d'hydrogène	HCN	- 17	535	6	41	26	0,9	0,7	O	-
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	- 20	245	1,3	8	82	2,9	0,8	N	3,5
Cyclohexanol	C ₆ H ₁₁ OH	67	300	-	-	160	3,5	1	faible	400
Cyclohexanone	C ₆ H ₁₀ O	43	420	1,1	9,4	155	3,4	0,9	faible	40
Cyclohexène	CH ₂ (CH ₂) ₄ CH=CH	< - 7	244	-	-	83	2,8	0,8	N	-
Cyclohexylamine	C ₆ H ₁₁ NH ₂	31	290	-	-	134	3,4	0,9	O	-
Cyclopentane	C ₅ H ₁₀	< - 7	361	1,5	-	49	2,4	0,7	N	-
Cyclopentanone	C ₅ H ₈ O	26	-	-	-	130	2,3	0,9	faible	-
Cyclopropane	C ₃ H ₆	gaz	495	2,4	10,4	- 28	1,5	-	N	-
p-Cymène →p-Isopropyltoluène										
Décahydronaphtalène	C ₁₀ H ₁₈	57	250	0,7	4,9	194	4,8	0,9	N	-
n-Décane	CH ₃ (CH ₂) ₈ CH ₃	46	205	0,8	5,4	174	4,9	0,7	N	-
Deutérium	D ₂	gaz	-	5	75	-	-	-	-	-
Diacétone-alcool →4-Hydroxy-4-méthyl-2-pentanone										
1,2-Diaminopropane	CH ₃ CH(NH ₂)CH ₂ NH ₂	33 C.O.	416	-	-	119	2,6	0,9	O	-
1,3-Diaminopropane	NH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ NH ₂	24 C.O.	-	-	-	136	2,6	0,9	O	-
3,6-Diazoctane-1,8-diamine	(CH ₂ NHCH ₂ CH ₂ NH ₂) ₂	135	335	-	-	278	-	1	O	-
1,2-Dichlorobenzène	C ₆ H ₄ Cl ₂	66	645	2,2	9,2	180	5,1	1,3	N	57
1,4-Dichlorobenzène	C ₆ H ₄ Cl ₂	65	-	-	-	174	5,1	1,5	N	-
1,1-Dichloroéthane	CH ₃ CHCl ₂	- 6	-	5,6	-	57	-	1,2	faible	-
1,2-Dichloroéthane	CH ₂ ClCH ₂ Cl	13	410	6,2	16	84	3,4	1,3	N	4,1
1,1-Dichloroéthylène	CH ₂ Cl ₂	- 28	565	6,5	15,5	32	3,4	1,2	N	-
1,2-Dichloroéthylène	CHClCHCl	2	460	5,6	12,8	48	3,4	1,3	N	-
1,2-Dichloropropane	CH ₃ CHClCH ₂ Cl	15	555	3,4	14,5	96	3,9	1,2	N	-
Dichlorométhane	CH ₂ Cl ₂	diffic. inflam.	556	13	22	40	2,9	1,3	faible	1,8
Dichlorure de disoufre	S ₂ Cl ₂	118	230	-	-	138	-	1,7	décomp.	-
Diéthanolamine →2,2'-Iminodiéthanol										

Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde de diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
1,1-Diéthoxyéthane	CH ₃ CH(OC ₂ H ₅) ₂	- 21	230	1,6	10,4	102	4,1	0,8	faible	-
Diéthylacétaldéhyde	(C ₂ H ₅)CHCHO	21 C.O.	-	1,2	7,7	117	3,5	0,8	N	-
Diéthylamine	(C ₂ H ₅) ₂ NH	- 23	310	1,8	10,1	57	2,5	0,7	O	-
N,N-Diéthylaniline	C ₆ H ₅ N(C ₂ H ₅) ₂	85	630	-	-	214	5	1	faible	-
Diéthylcétone →3-Pentanone										
Diéthylcyclohexane	(C ₂ H ₅) ₂ C ₆ H ₁₀	48	240	0,8 à 60 °C	6 à 110 °C	173	-	0,8	-	-
Diéthylène glycol →Oxyde de bis (2-hydroxyéthyle)										
Diéthylène triamine →3-Azapentane - 1,5-diamine										
Diisobutylcétone →2,6-Diméthyl-4-heptanone										
2,4-Diisocyanate de toluylène	CH ₂ C ₆ H ₃ (NCO) ₂	127	-	0,9	9,5	251	6,0	1,2	N	-
Diisopropylbenzène	((CH ₃) ₂ CH) ₂ C ₆ H ₄	76 C.O.	445	0,9	5,6	205	5,6	0,9	N	-
Diméthoxyméthane	CH ₃ OCH ₂ OCH ₃	- 32 C.O.	235	2,2	13,8	44	2,6	0,9	O	-
Diméthylamine	(CH ₃) ₂ NH	gaz	400	2,8	14,4	7	1,6	-	O	-
N,N-Diméthylaniline	C ₆ H ₅ N(CH ₃) ₂	62	370	-	-	193	4,2	1	faible	-
2,2-Diméthylbutane	(CH ₃) ₂ CCH ₂ CH ₃	- 47	405	1,2	7	50	3	0,6	N	-
2,3-Diméthylbutane	(CH ₃) ₂ CHCH(CH ₃) ₂	- 29	405	1,2	7	58	3	0,7	N	-
N,N-Diméthylformamide	HCON(CH ₃) ₂	57	445	2,2 à 100 °C	15,2	152	2,5	0,9	O	100
2,6-Diméthyl- 2,5 heptadiène-4-one	(CH ₃) ₂ CCHCOCHC(CH ₃) ₂	85 C.O.	-	-	-	198	4,8	0,9	N	-
2,6-Diméthyl-4-heptanol	((CH ₃) ₂ CHCH ₂) ₂ CHOH	74	-	0,8 à 100 °C	6,1 à 100 °C	178	5	0,8	N	-
2,6-Diméthyl-4-heptanone	((CH ₃) ₂ CHCH ₂) ₂ CO	49	396	0,8 à 93 °C	7,1 à 93 °C	168	4,9	0,8	N	-
2,3-Diméthylhexane	(CH ₃) ₂ CHCH(CH ₃)CH ₂ CH ₂ CH ₃	7 C.O.	435	-	-	114	3,9	0,7	N	-
2,4-Diméthylhexane	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CH(CH ₃)C ₂ H ₅	10 C.O.	-	-	-	109	3,9	0,7	N	-
1,1-Diméthylhydrazine	(CH ₃) ₂ NNH ₂	- 15	249	2	95	63	2	0,8	O	-
2,3-Diméthylpentane	(CH ₃) ₂ CHCH(CH ₃)CH ₂ CH ₃	< - 7	335	1,1	6,7	90	3,5	0,7	N	-
2,4-Diméthylpentane	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CH(CH ₃) ₂	- 12	-	-	-	81	3,5	0,7	N	-
2,2-Diméthylpropane	(CH ₃) ₄ C	gaz	450	1,4	7,5	9	2,5	-	N	-
Diméthylsulfoxyde	(CH ₃) ₂ SO	95 C.O.	215	2,6	42	189	-	1,1	O	-
1,4-Dioxanne	<u>Q</u> CH ₂ CH ₂ OCH ₂ CH ₂	12	180	2	22	101	3	1	O	7,3
1,3-Dioxolanne	<u>Q</u> CH ₂ CH ₂ OCH ₂	1 C.O.	-	-	-	74	2,6	1,1	O	-
Dipentène →Limonène										
Diphénylamine	(C ₆ H ₅) ₂ NH	152	630	-	-	302	-	1,2	N	-
Diphényle →Biphényle										
Diphénylméthane	(C ₆ H ₅) ₂ CH ₂	130	485	-	-	264	-	1	N	-
Dipropylamine	(C ₃ H ₇) ₂ NH	17 C.O.	299	-	-	109	3,5	0,7	N	-
Disulfure de carbone	CS ₂	- 30	90	1,3	50	46	2,6	1,3	N	1,8
Divinylbenzène	C ₆ H ₄ (CHCH ₂) ₂	76 C.O.	-	1,1	6,2	200	-	0,9	N	-
Dodécane	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ CH ₃	73	203	0,6	-	216	5,9	0,8	N	-
Épichlorhydrine →1-Chloro-2,3-époxypropane										

CHAPITRE 1

Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde de diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
Essence (Indice d'octane 50 à 60)		- 43	280	1,4	7,6	38 - 204	3 à 4	0,8	N	-
Essence (indice d'octane 100)		- 38	456	1,4	7,4	-	-	-	N	-
Essence aviation (indice d'octane 115 à 145)		- 46	440	1,2	7,1	-	-	-	-	-
Essence A		< 0	230 - 240	1	6,5	40 - 100	~ 3	0,7	N	-
Essence B		< 0	245	1	6,5	60 - 80	~ 3	0,7	N	-
Essence C		< 0	230 - 260	1	6,5	70 - 100	~ 3	0,7	-	-
Essence E		< 0	230 - 260	1	6,5	100 - 130	~ 3	0,7	-	-
Essence F		< 0	230 - 260	1	6,5	100 - 160	~ 3	0,7	-	-
Essence G (éther de pétrole)		< 0	245	1	6,5	30 - 75	2,5	0,6	-	-
Essence H		< 0	230 - 260	1	6,5	40 - 210	-	0,7	-	-
Essence de térébenthine		35	250	0,8	-	149	-	< 1	N	-
Éthane	CH ₃ CH ₃	gaz	472	3	12,5	- 89	1	-	N	-
Éthanethiol	C ₂ H ₅ SH	< - 18	295	2,8	18	35	2,1	0,8	N	-
Éthanol	CH ₃ CH ₂ OH	12	363	3,3	19	78	1,6	0,8	O	8,3
en mélange avec l'eau (95 % d'alcool)		17	-	-	-	-	-	-	-	-
en mélange avec l'eau (80 % d'alcool)		20	-	-	-	-	-	-	-	-
en mélange avec l'eau (70 % d'alcool)		21	-	-	-	-	-	-	-	-
en mélange avec l'eau (60 % d'alcool)		22	-	-	-	-	-	-	-	-
en mélange avec l'eau (50 % d'alcool)		24	-	-	-	-	-	-	-	-
en mélange avec l'eau (40 % d'alcool)		26	-	-	-	-	-	-	-	-
en mélange avec l'eau (30 % d'alcool)		29	-	-	-	-	-	-	-	-
en mélange avec l'eau (20 % d'alcool)		36	-	-	-	-	-	-	-	-
en mélange avec l'eau (10 % d'alcool)		49	-	-	-	-	-	-	-	-
en mélange avec l'eau (5 % d'alcool)		62	-	-	-	-	-	-	-	-
Éthanolamine → 2-Aminoéthanol										
Éther amylique → Oxyde de dipentyle										
Éther butylique → Oxyde de dibutyle										
Éther éthylique → Oxyde de diéthyle										
Éther méthylique → Oxyde de diméthyle										
Éther propylique → Oxyde de dipropyle										
2-Éthoxyéthanol	C ₂ H ₅ OCH ₂ CH ₂ OH	43	235	1,7 à 93 °C	15,6 à 93 °C	135	3	0,9	O	43
Éthylamine	C ₂ H ₅ NH ₂	< - 18	380	3,5	14	16	1,6	0,8	O	-

Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde de diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
Éthylbenzène	$C_2H_5C_6H_5$	15	430	1	6,7	136	3,7	0,9	N	14
Éthylcyclobutane	$C_2H_5C_4H_7$	< - 16	210	1,2	7,7	71	2,9	-	N	-
Éthylcyclohexane	$C_2H_5C_6H_{11}$	35	238	0,9	6,6	132	3,9	0,8	N	-
Éthylcyclopentane	$C_2H_5C_5H_9$	< 21	260	1,1	6,7	103	3,4	0,8	-	-
Éthylène	H_2CCH_2	gaz	450	2,7	36	- 104	1	-	O	-
Éthylèneglycol	CH_2OHCH_2OH	111	398	3,2	28	197	-	1,1	O	~ 600
Éthyglycol →2-Éthoxyéthanol										
Ethylmercaptan →Éthanethiol										
Formamide	$HCONH_2$	154 C.O.	-	-	-	210 (décomp.)	-	1,1	O	-
Formiate de n-butyle	$HCOOC_4H_9$	17	320	1,7	8,2	107	3,5	0,9	O	-
Formiate d'éthyle	$HCOOC_2H_5$	- 20	455	2,8	16	54	2,6	0,9	N	-
Formiate d'isopropyle	$HCOOCH(CH_3)_2$	- 6	485	-	-	67	3	0,9	faible	-
Formiate de méthyle	$HCOOCH_3$	- 19	449	4,5	23	32	2,1	1	O	-
Formiate de n-propyle	$HCOOC_3H_7$	- 3	455	-	-	81	3	0,9	faible	-
Fuels distillant entre 175 °C et 275 °C		> 70	254	0,58	4,45	-	-	-	N	-
Fuels distillant entre 185 °C et 330 °C		> 70	259	0,52	4,09	-	-	-	N	-
Fuels distillant entre 210 °C et 365 °C		> 70	263	0,45	3,71	-	-	-	N	-
Furanne	$O(CH_2)_3CH$	< 0	-	2,3	14,3	31	2,3	0,9	N	-
2-Furaldéhyde	$O(CH_2)_3CHCHO$	60	315	2,1	19,3	161	3,3	1,2	faible	75
Gasole		70-120	250 - 280	0,6	-	150 - 300	-	0,8 - 0,9	N	-
Glycérine →1,2,3-Propanetriol										
Glycérol →1,2,3-Propanetriol										
n-Heptane	$CH_3(CH_2)_5CH_3$	- 5	204	1,05	6,7	96	3,5	0,7	N	-
4-Heptanone	$(C_3H_7)_2CO$	49	-	-	-	143	3,9	0,8	N	-
n-Hexane	$CH_3(CH_2)_4CH_3$	- 22	223	1,2	7,4	69	3	0,7	N	1,4
2,5-Hexanedione	$(CH_2COCH_3)_2$	78	499	-	-	192	3,9	1	O	-
2-Hexanone	$CH_3CO(CH_2)_3CH_3$	25	423	-	8	128	3,5	0,8	faible	8,1
3-Hexanone	$C_2H_5COC_3H_7$	35 C.O.	-	~ 1	~ 8	123	3,5	0,8	-	-
1-Hexène	$CH_2CH(CH_2)_3CH_3$	< - 7	253	-	-	63	3	0,7	N	-
Huile de graissage		150 - 225	260 - 370	-	-	360	-	≤ 1	N	-
Hydrazine	H_2NNH_2	38	23 - 270 (*)	2,9	100	113	1,1	1	O	-
Hydrogène	H_2	gaz	500	4	75	- 252	0,1	-	faible	-
Hydrogène sulfuré →Sulfure d'hydrogène										
Hydroquinone →1,4-Benzènediol										
4-Hydroxy-4-méthyl-2-pentanone	$CH_3COCH_2C(CH_3)_2OH$	64	600	1,8	6,9	164	4	0,9	O	135
2,2'-Iminodiéthanol	$(HOCH_2CH_2)_2NH$	172 C.O.	660	-	-	268	-	1,1	O	-
Isobutane	$(CH_3)_2CH$	gaz	460	1,8	9,8	- 12	2	-	N	-
Isobutanol	$(CH_3)_2CHCH_2OH$	27	415	1,7 à 51 °C	10,6 à 94 °C	94	2,6	0,8	O	24
Isobutylamine	$(CH_3)_2CHCH_2NH_2$	- 9	375	-	-	66	2,5	0,7	O	-
Isobutylbenzène	$(CH_3)_2CHCH_2C_6H_5$	55	425	0,8	6	172	4,6	0,9	N	-

(*) Selon matière chaude au contact.

CHAPITRE 1

Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde de diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
Isobutylène →2-Méthyl-1-propène										
Isoheptane →2-Méthylhexane										
Isohexane →2-Méthylpentane										
Isopentane →2-Méthylbutane										
Isopentanol	$(CH_3)_2CHCH_2CH_2OH$	42	345	1,2	9	132	3	0,8	faible	62
				à 100 °C						
Isophorone →3,5,5-Triméthyl-2-cyclo-										
hexène-1-one										
Isoprène →2-Méthyl-1,3-butadiène										
Isopropylamine	$(CH_3)_2CHNH_2$	- 37 C.O.	400	-	-	32	2	0,7	O	2
p-Isopropyltoluène	$CH_3C_6H_4CH(CH_3)_2$	47	435	0,7	5,6	176	4,6	0,9	N	-
				à 100 °C						
Kérosène (pétrole lampant)		43 - 72	210	0,7	5	150 - 300	-	< 1	N	-
Lactate d'éthyle	$CH_3CHOHCOOC_2H_5$	46	400	1,5	-	154	4,1	1	O	80
				à 100 °C						
Lactate de méthyle	$CH_3CHOHCOOCH_3$	49	385	2,2	-	145	3,6	1,1	O (décomp.)	-
				à 100 °C						
Limonène	$C_{10}H_{16}$	45	235	0,7	6,1	170	4,7	0,9	N	-
				à 150 °C à 150 °C						
Lin (Huile)		220	340	-	-	315	-	0,9	N	-
Méthacrylate de méthyle	$CH_2C(CH_3)COOCH_3$	10 C.O.	-	1,7	8,2	100	3,6	0,9	très faible	-
Méthane	CH_4	gaz	535	5	15	- 162	0,6	-	N	-
Méthanol	CH_3OH	11	385	6,7	36	64	1,1	0,8	O	6,3
Méthoxybenzène	$C_6H_5OCH_3$	52 C.O.	475	-	-	153	3,7	1	N	-
2-Méthylacrylaldéhyde	$CH_2C(CH_3)CHO$	1 C.O.	-	-	-	68	2,4	0,8	O	-
Méthylal →Diméthoxyméthane										
Méthylamine	CH_3NH_2	gaz	430	4,9	20,7	- 6	1	-	O	-
2-Méthyl-1,3-butadiène	$CH_2C(CH_3)CHCH_2$	- 54	395	1,5	8,9	34	2,4	0,7	N	-
2-Méthylbutane	$(CH_3)_2CHCH_2CH_3$	< - 51	420	1,4	7,6	28	-	0,6	N	-
3-Méthyl-1-butène	$(CH_3)_2CHCHCH_2$	< - 7	365	1,5	9,1	20	2,4	0,6	N	-
Méthylbutylcétone →2-Hexanone										
Méthylcyclohexane	$CH_2(CH_2)_4CHCH_3$	- 4	250	1,2	6,7	101	3,4	0,8	N	-
Méthylcyclopentadiène	C_6H_8	48	445	1,3	7,6	73	-	0,9	-	-
				à 100 °C à 100 °C						
Méthylcyclopentane	C_6H_{12}	< - 7	258	1	8,3	72	2,9	0,8	N	-
Méthylchlorosilane	CH_3HSiCl_2	- 9	316	6	55	41	4	1,1	O	2
Méthyléthylcétone →2-Butanone										
2-Méthylfuranne	C_4H_8O	- 30	-	-	-	62	-	0,9	N	-
2-Méthylhexane	$(CH_3)_2CHC_4H_9$	< - 18	-	1	6	90	3,4	0,7	N	-
Méthylhydrazine	CH_3NHNH_2	- 8	194	2,5	92	88	1,6	0,9	faible	-
Méthylisobutylcétone →4-Méthyl-2-pentanone										
4-Méthyl-1,3-pentadiène	$CH_2CHCH_2C(CH_3)_2$	- 34	-	-	-	76	-	0,7	N	-
2-Méthyl-1-pentanal	$C_6H_{12}O$	20 C.O.	-	-	-	117	3,5	0,8	très faible	-

Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde de diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
2-Méthylpentane	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}(\text{CH}_2)_2\text{CH}_3$	< - 29	264	1,0	7	57	-	0,7	N	-
4-Méthyl-2-pentanol	$\text{CH}_3\text{CHOHCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	41	-	1,0	5,5	130	3	0,8	faible	-
4-Méthyl-2-pentanone	$\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	16	448	1,2 à 93 °C	8 à 93 °C	118	3,5	0,8	faible	10
2-Méthylpropanal	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCHO}$	- 18	196	1,6	10,6	61	2,5	0,8	faible	-
2-Méthylpropène	$(\text{CH}_3)_2\text{CCH}_2$	gaz	465	1,8	9,6	- 7	1,9	~	N	-
Méthylpropylcétone →2-Pentanone										
2-Méthylpyridine	$\text{CH}_2\text{C}_4\text{H}_7\text{N}$	38 C.O.	535	-	-	128	3,2	1	N	-
4-Méthylpyridine	$\text{CH}_3\text{C}_4\text{H}_7\text{N}$	56 C.O.	-	-	-	144	3,2	1	O	-
Méthylstyrène →2-Phénylpropène										
Méthylvinylcétone →3-Butène-2-one										
Morpholine	$\text{OC}_2\text{H}_4\text{NHCH}_2\text{CH}_2$	37 C.O.	290	1,4	11,2	128	3	1	O	26
Naphtalène	C_{10}H_8	78	525	0,9	5,9	217	4,4	1,1	N	-
β-Naphtol →2-Naphtol										
2-Naphtol	$\text{C}_{10}\text{H}_7\text{OH}$	152	-	-	-	284	5	1,2	-	-
1-Naphtylamine	$\text{C}_{10}\text{H}_7\text{NH}_2$	157	-	-	-	300	-	1,2	N	-
Nicotine	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2$	-	240	0,7	4	245	5,6	1	O	-
Nitrate de n-propyle	$\text{NO}_3\text{C}_3\text{H}_7$	20	175	2	100	110	-	1,1	faible	-
2,2'-Nitrilotriéthanol	$(\text{HOCH}_2\text{CH}_2)_3\text{N}$	196	-	-	-	343	5,1	1,1	O	-
Nitrite d'éthyle	$\text{C}_2\text{H}_5\text{ONO}$	- 35	90 (décomp.)	4	50	17	2,6	0,9	N	-
Nitrobenzène	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	87	480	1,8 à 93 °C	-	210	4,3	1,2	N	-
Nitroéthane	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NO}_2$	27	414	3,4	-	114	2,6	1,1	faible	-
Nitrométhane	CH_3NO_2	35	415	7,3	-	101	2,1	1,1	faible	63
1-Nitropropane	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{NO}_2$	36	420	2,2	-	131	3,1	1	faible	-
2-Nitropropane	$\text{CH}_3\text{CHNO}_2\text{CH}_3$	24	428	2,6	11,0	120	3,1	1	faible	-
4-Nitrotoluène	$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{NO}_2$	106	-	-	-	238	-	1,3	N	-
Nonane	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3$	31	205	0,8	2,9	150	4,4	0,7	N	-
Octane	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{CH}_3$	13	206	1	6,5	126	3,9	0,7	N	-
2-Octanone	$\text{CH}_3\text{CO}(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$	52	-	-	-	170	4,4	0,8	N	-
1-Octène	$\text{CH}_2\text{C}_7\text{H}_{14}$	21 C.O.	230	-	-	121	3,9	0,7	N	-
Olive (Huile)		225	340	-	-	-	-	0,9	N	-
Oxyde d'allyle et de vinyle	$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}$	< 20 C.O.	-	-	-	67	-	0,8	très faible	-
Oxyde de bis (2-hydroxyéthyle)	$\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_2$	123	224	-	-	244	-	1,1	O	-
Oxyde de butyle et de vinyle	$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{OCHCH}_2$	- 9 C.O.	255	-	-	94	3,5	0,8	faible	-
Oxyde de carbone	CO	gaz	605	12,5	74	- 190	1	-	faible	-
Oxyde de diallyle	$(\text{CH}_2\text{CHCH}_2)_2\text{O}$	- 7 C.O.	-	-	-	95	3,4	0,8	faible	-
Oxyde de dibutyle	$(\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{O}$	25	194	1,5	7,6	141	4,5	0,8	N	19
Oxyde de dichlore	Cl_2O	gaz	-	23,5	100	4 (explose)	-	-	O	-
Oxyde de diéthyle	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$	- 45	160	1,9	36	35	2,6	0,7	faible	1
Oxyde de diisopropyle	$((\text{CH}_3)_2\text{CH})_2\text{O}$	- 28	440	1,4	7,9	69	3,5	0,7	très faible	-
Oxyde de diméthyle	$(\text{CH}_3)_2\text{O}$	gaz	350	3,4	27	- 24	1,6	-	O	-
Oxyde de dipentyle	$(\text{C}_5\text{H}_{11})_2\text{O}$	57	170	-	-	190	5,5	0,8	N	-
Oxyde de diphényle	$(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{O}$	112	615	0,8	1,5	258	-	1,1	N	-
Oxyde de dipropyle	$(\text{C}_3\text{H}_7)_2\text{O}$	21	188	1,3	7	90	3,5	0,7	-	-
Oxyde de divinyle	$(\text{CH}_2\text{CH})_2\text{O}$	< - 30	360	1,7	27	39	2,4	0,8	N	-
Oxyde d'éthyle et de méthyle	$\text{CH}_3\text{OC}_2\text{H}_5$	- 37	190	2	10,1	10	2,1	0,7	O	-

CHAPITRE 1

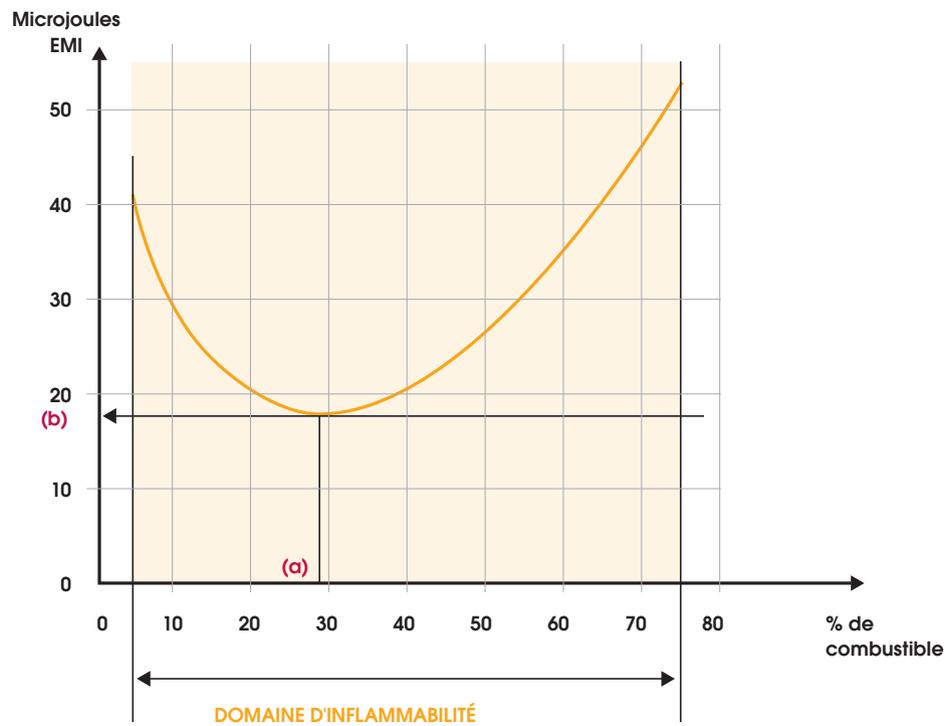
Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde de diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
Oxyde d'éthyle et de propényle	$C_2H_5OCHCHCH_3$	< - 7C.O.	-	-	-	70	1,3	0,8	-	-
Oxyde d'éthyle et de vinyle	$CH_2CHOC_2H_5$	< - 46	200	1,7	28	35	2,5	0,8	N	-
Oxyde d'éthylène	CH_2OCH_2	- 17,8 C.O.	425	3,0	100	10	1,5	0,9	O	-
Oxyde d'isopropyle et de vinyle	$CH_2CHOCH(CH_3)_2$	- 32	270	-	-	56	3	-	-	-
Oxyde de mésityle	$(CH_3)_2CCHCOCH_3$	30	344	1,4	7,2	130	3,4	0,9	faible	16
Oxyde de propylène	OCH_2CHCH_3	- 37	449	2,3	37	35	2	0,8	O	-
Oxysulfure de carbone	COS	gaz	-	12	29	- 50	2,1	-	-	-
Paraformaldéhyde	$HO(CH_2O)_nH$	70	300	7	73	-	-	-	faible	-
Paraldéhyde →2,4,6-Triméthyl-1,3,5-trioxanne										
Pentaborane (9)	B_5H_9	s'enflamme à l'air	0,4	-	60	2,2	0,6	-	-	-
Pentanal	$CH_3(CH_2)_4CHO$	12 C.O.	222	-	-	103	3	0,8	N	-
Pentane	$CH_3(CH_2)_4CH_3$	< - 40	260	1,5	7,8	36	2,5	0,6	N	-
2,4-Pentanedione	$CH_3COCH_2COCH_3$	33	340	-	-	140	3,5	1	O	-
1-Pentanol	$CH_3(CH_2)_4CH_2OH$	32	300	1,2	10 à 100 °C	138	3	0,8	O	-
2-Pentanone	$CH_3COC_4H_9$	7	452	1,5	8,2	102	3	0,8	faible	-
3-Pentanone	$C_2H_5COC_2H_5$	12	450	1,6	-	103	3	0,8	faible	-
1-Pentène	$CH_3(CH_2)_3CHCH_2$	- 18 C.O.	275	1,5	8,7	30	2,4	0,7	-	-
Pentylamine	$C_5H_{11}NH_2$	- 1	-	2,2	22	99	3	0,8	O	-
Phénol	C_6H_5OH	79	715	1,8	-	181	3,2	1,1	O	-
1-Phényléthanone	$C_6H_5COCH_3$	77	570	-	-	202	4,1	1,0	N	-
Phénylhydrazine	$C_6H_5NHNH_2$	88	-	-	-	décomp.	-	1,1	faible	-
Phorone →2,6-Diméthyl-2,5-heptadiène-4-one										
2-Phénylpropène	$CH_3C_6H_4CHCH_2$	58	489	0,7	11	168	4,1	0,9	N	-
Phosphate de tributyle	$PO_4(C_2H_5)_3$	146 C.O.	-	-	-	293	-	1	N	-
Phosphate de tri-o-crésyle →Phosphate de trio-o-tolyle										
Phosphate de triphényle	$PO_4(C_6H_5)_3$	220	-	-	-	399	-	1,3	N	-
Phosphate de tri-o-tolyle	$PO_4(C_6H_4CH_3)_3$	225	385	-	-	410 (décomp.)	-	1,2	N	-
Phtalate de dibutyle	$C_8H_{16}(CO_2C_4H_9)_2$	157	400	0,5 à 235 °C	-	340	-	1	N	-
Phtalate de diéthyle	$C_8H_{16}(CO_2C_2H_5)_2$	163 C.O.	-	-	-	296	-	1,1	N	-
Phtalate de diméthyle	$C_8H_{16}(CO_2CH_3)_2$	146	490	0,9 à 180 °C	-	282	-	1,2	N	-
Phtalate de di(2-éthylhexyle)	$C_{16}H_{32}(CO_2C_6H_{13})_2$	215 C.O.	390	0,3 à 245 °C	-	386	13,5	1	N	-
Phtalate de dioctyle →Phtalate de di(2-éthylhexyle)										
2-Picoline →2-Méthylpyridine										
4-Picoline →4-Méthylpyridine										
Pinane	$C_{10}H_{18}$	-	273	0,7 à 160 °C	7,2 à 160 °C	151	-	0,8	-	-
α-Pinène	$C_{10}H_{16}$	32	255	-	-	156	4,7	0,9	N	-
Pipéridine	$(CH_2)_5NH$	16	-	-	-	106	3	0,9	O	-

Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde de diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
Propanal	CH ₃ CH ₂ CHO	- 30	205	2,6	17	49	2	0,8	faible	-
Propane	CH ₃ CH ₂ CH ₃	gaz	450	2,2	10	- 42	1,6	-	N	-
1,2-Propanediol	CH ₃ CHOHCH ₂ OH	98	370	2,6	12,5	188	2,6	1	O	-
1,2,3-Propanetriol	(HOCH ₂) ₂ CHOH	199	370	-	-	171	3,1	1,3	O	-
1-Propanol	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH	15	370	2,1	13,5	97	2,1	0,8	O	16
2-Propanol	(CH ₃) ₂ CHOH	11	395	2	12	83	2,1	0,8	O	21
Propène	CH ₃ CHCH ₃	gaz	455	2	11,1	- 47	1,5	-	O	-
2-Propène-1-ol	CH ₃ CHCH ₂ OH	21	375	2,5	18	97	2	0,9	O	-
2-Propénylamine	CH ₃ CHCH ₂ NH ₂	- 29	370	2,2	22	53	2	0,8	O	-
Propionate d'éthyle	C ₂ H ₅ COOC ₂ H ₅	12	440	1,9	11	99	3,5	0,9	N	-
Propionate de méthyle	C ₂ H ₅ COOCH ₃	- 2	465	2,5	13	80	3	0,9	N	-
Propionate de vinyle	C ₂ H ₅ COOCHCH ₂	1 C.O.	-	-	-	95	3,3	0,9	faible	-
Propylamine	CH ₃ (CH ₂) ₂ NH ₂	- 37	315	2	10,4	49	2	0,7	O	-
Propylbenzène	CH ₃ (CH ₂) ₂ C ₆ H ₅	30	450	0,8	6	159	4,1	0,9	N	-
Propylène										
→ Propène										
Propylènediamine										
→ 1,2-Diaminopropane										
Propylèneglycol										
→ 1,2-Propanediol										
Pyridine	CH(CHCH ₂) ₂ N	20	480	1,8	12,4	115	2,7	1	O	12,7
Résorcinol										
→ 1,3-Benzènediol										
Ricin (Huile)		229	445	-	-	313	-	1	N	-
Sébaçate de dibutyle	((CH ₂) ₄ COOC ₄ H ₉) ₂	178 C.O.	365	0,4	-	343	-	1	N	-
				à 243 °C						
Silane	SiH ₄	gaz	s'enflamme spontanément à faible concentration			- 169	1,3	-	faible	-
Soja (Huile)		280	440	-	-	-	-	0,9	N	-
Styrène	C ₆ H ₅ CHCH ₂	31	490	1,1	7,0	145	3,6	0,9	N	-
Sulfure de diméthyle	(CH ₃) ₂ S	< -18	205	2,2	19,7	37	2,1	0,8	faible	-
Sulfure d'hydrogène	H ₂ S	gaz	260	4	44	- 60	1,2	-	O	-
Tétradécane	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ CH ₃	100	200	0,5	-	252	-	0,8	N	-
Tétrahydrofurane	OCH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂	- 14	320	2	11,8	66	2,5	0,9	O	2,3
Tétrahydronaphtalène	C ₁₀ H ₁₂	71	380	0,8	5	206	4,6	1	N	190
				à 100 °C	à 150 °C					
Tétrahydropyranne	O(CH ₂) ₄ CH ₂	- 20	-	-	-	81	3	0,9	O	-
2,2,3,3-Tétraméthylpentane	(CH ₃) ₃ CC(CH ₃) ₂ CH ₂ CH ₃	< 21	430	0,8	4,9	134	4,4	0,7	-	-
Toluène	C ₆ H ₅ CH ₃	4	480	1,2	7,1	111	3,1	0,9	N	6,1
o-Toluidine	CH ₃ C ₆ H ₄ NH ₂	85	480	-	-	200	3,7	1	N	-
Triamylbenzène										
→ Tripentylbenzène										
Tributylamine	(C ₄ H ₉) ₃ N	86 C.O.	-	-	-	213	6,4	0,8	N	-
1,2,4-Trichlorobenzène	C ₆ H ₃ Cl ₃	105	571	2,5	6,6	212	-	1,5	N	-
				à 150 °C	à 150 °C					
1,1,1-Trichloroéthane	CH ₂ CCl ₃	diff. infl.(*)	537	7,5	12,5	74	4,6	1,3	N	2,5
Trichloroéthylène	CHClCCl ₂	diff. infl.(*)	410	8	10,5 (**)	87	4,5	1,5	N	3,8
				à 25 °C	à 25 °C					
Triéthanolamine										
→ 2,2',2''-Nitriolétriéthanol										
Triéthylamine	(C ₂ H ₅) ₃ N	- 7 C.O.	249	1,2	8	89	3,5	0,7	N	-
Triéthylèneglycol	(CH ₂ OCH ₂ CH ₂ OH) ₂	176 C.O.	370	0,9	9,2	286	5,2	1,1	O	-

(*) Par une source d'énergie puissante - (**) 78 et 52 à 100 °C.

Substances	Formule chimique	Point d'éclair en °C	Température d'auto-inflammation en °C	Limites d'inflammabilité en volume % dans mélange avec air		Température d'ébullition sous pression atmosphérique (°C)	Densité de vapeur/air	Densité de liquide/eau	Solubilité dans l'eau O = oui N = Non	Indice d'évaporation (oxyde de diéthyle = 1)
				Inf.	Sup.					
Triéthylènetétramine →3,6-Diazaoctane-1,8-diamine										
Trihydruure de phosphore	PH ₃	gaz	100	2	-	-88	1,2	-	-	-
Triméthylamine	(CH ₃) ₃ N	gaz	190	2	11,6	3	2	-	O	-
1,2,4-Triméthylbenzène	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₃	44	500	0,9	6,4	165	4,1	0,9	N	-
3,5,5-Triméthyl-2-cyclohexène-1-one	C ₇ H ₁₄ O	84	460	0,8	3,8	215	-	0,9	faible	330
2,2,5-Triméthylhexane	(CH ₃) ₂ C(CH ₂) ₂ CH(CH ₃) ₂	13 C.O.	-	-	-	124	4,4	0,7	N	-
2,2,4-Triméthylpentane	(CH ₃) ₃ CCH ₂ CH(CH ₃) ₂	- 12	415	1,1	6	99	3,9	0,7	N	-
2,4,4-Triméthyl-1-pentène	CH ₂ CCH ₂ CH ₂ C(CH ₃) ₃	- 5	390	0,8	4,8	101	3,8	0,7	N	-
2,4,4-Triméthyl-2-pentène	CH ₃ CC(CH ₃)C(CH ₃) ₃	2 C.O.	305	-	-	105	3,8	0,7	N	-
2,4,6-Triméthyl-1,3,5-trioxanne	(CH ₂ CHO) ₃	35	235	1,3	-	124	4,5	1	faible	-
1,3,5-Trioxanne	OCH ₂ OCH ₂ OCH ₂	45 C.O.	414	3,6	29	115	-	-	faible	-
Triptylbenzène	(C ₆ H ₁₁) ₃ C ₆ H ₅	132 C.O.	-	-	-	302	-	0,9	N	-
Tripropylamine	(C ₃ H ₇) ₃ N	40	-	-	-	156	4,9	0,8	très faible	-
White spirit		30 - 65	230 - 260	1,1	6,5	135 - 205	-	0,8	N	-
o-Xylène	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	32	460	1	7	144	3,7	0,9	N	13,5
m-Xylène	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	27	525	1,1	7	139	3,7	0,9	N	13,5
p-Xylène	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	27	525	1,1	7	138	3,7	0,9	N	13,5

Figure 3 • Influence de la concentration d'hydrogène sur l'énergie minimale d'inflammation des mélanges hydrogène-air.



(a) Le mélange le plus susceptible d'exploser est sensiblement stœchiométrique

(b) Minimum de l'énergie minimale d'inflammation EMI_{min}

purs sont donnés dans le *tableau 3*. Comme pour les autres caractéristiques d'explosivité, les chiffres publiés par différents auteurs peuvent différer selon le mode de détermination (en coupelle ouverte ou en coupelle fermée, notamment).

Il existe plusieurs normes définissant les méthodes d'essais. Les points d'éclair de mélange de vapeurs de liquides purs, difficiles à déterminer, sont souvent connus avec imprécision ; en raison des caractéristiques et des conditions variables d'évaporation des différents composants de ces mélanges, on peut obtenir l'inflammation de leurs vapeurs à des températures inférieures aux points d'éclair publiés.

Lorsque le point d'éclair, PE (°C), d'une substance ne figure pas dans les données publiées, il est possible de l'évaluer approximativement à l'aide de formules empiriques, par exemple pour les hydrocarbures oléfiniques et paraffiniques : $PE = 350 - 660 n^{-1/3}$, n étant le nombre d'atomes de carbone de l'hydrocarbure.

1.5. Énergie d'inflammation

Lorsqu'un mélange inflammable n'est pas porté à sa température d'auto-inflammation, une petite quantité d'énergie, appelée énergie minimale d'inflammation EMI doit lui être fournie pour provoquer l'inflammation, sous forme d'une flamme ou d'une étincelle. Les mélanges de gaz ou de vapeurs avec l'air dans les proportions les plus favorables et dans les conditions habituelles de température et de pression s'enflamment sous l'action d'étincelles électriques de 17 µJ (hydrogène, acétylène) à 300 µJ (propane, butane, méthane).

Cette énergie dépend de la concentration en gaz ou vapeur du mélange ; elle présente un minimum appelé minimum de l'énergie minimale d'inflammation EMI_{min} correspondant au mélange le plus susceptible d'exploser (*figure 3*).

1.6. Interstice expérimental maximal de sécurité

L'interstice expérimental maximal de sécurité (IEMS ou MESG en anglais), exprimé en mm, est l'interstice maxi-

mal du joint entre les deux parties de la chambre interne d'un appareil d'essai qui, lorsque le mélange gazeux interne est enflammé et dans des conditions spécifiées, empêche l'inflammation d'un mélange gazeux externe à travers un joint de 25 mm de longueur.

L'IEMS est une propriété du gaz (ou du mélange de gaz) donné et caractérise la plus ou moins grande facilité d'une substance inflammable à propager l'inflammation entre l'intérieur et l'extérieur d'une enveloppe expérimentale dont les chemins de fuite sont connus ou réglables. Le *tableau 4* fournit pour quatre gaz caractéristiques les valeurs de leur IEMS.

2. Classification des gaz et vapeurs inflammables

Différents textes réglementaires ont établi des classifications des gaz et vapeurs inflammables : sur les lieux de travail, pour les stockages et la production de ces matières, pour les transports, pour les nuisances à l'environnement. Ces classifications s'appuient notamment sur les points d'éclair, les températures d'ébullition, la dangerosité. Elles sont résumées dans les *tableaux 5 à 10* qui présentent succinctement les classements auxquels se réfère chaque ministère.

- Les critères retenus dans les textes changent selon les ministères dont ils émanent :

Code du travail - classement des substances et préparations dangereuses (*ministère du Travail*)

- Point d'éclair
- Température d'ébullition

Réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement - nomenclature (*ministère de l'Environnement*)

- Point d'éclair
- Pression de vapeur

Règles d'aménagement et d'exploitation des dépôts d'hydrocarbures - classement des hydrocarbures (*ministère de l'Industrie*)

- Point d'éclair
- Pression de vapeur

Réglementation des transports - transports routiers, ferroviaires, maritimes et aériens - classes de danger (*ministère des Transports*)

- Point d'éclair
- Température critique
- Pression de vapeur

Tableau 4 • Valeurs IEMS.

Gaz de référence	IEMS en mm
Propane	0,92
Éthylène	0,65
Acétylène	0,37
Hydrogène	0,29

- Abréviations employées dans les tableaux :

PE = point d'éclair

PV = pression de vapeur

TE = température d'ébullition

TC = température critique

TT = température de transport

Tableau 5

Code du travail

Classement des substances et préparations dangereuses

Selon l'article R.231-51 du Code du travail, les substances et préparations dangereuses sont classées en quinze catégories de danger, en raison de leurs propriétés physico-chimiques, toxicologiques et écotoxicologiques.

Ne sont reprises ci-dessous que les catégories se rapportant au caractère inflammable.

EXTRÊMEMENT INFLAMMABLE



F+ - Extrêmement inflammable

Exemples :

- oxyde de diéthyle
- oxyde d'éthylène

Phrase de risque :

R12 - Extrêmement inflammable

Substances et préparations concernées :

- liquides de PE < 0 °C et TE ≤ 35 °C ;
- gazeuses, inflammables à l'air, à température et pression ambiantes.

FACILEMENT INFLAMMABLE



F - Inflammable

Exemples :

- acétone
- méthanol

Phrases de risque

R11 - Facilement inflammable.

R15 - Au contact de l'eau dégage des gaz extrêmement inflammables.

R17 - Spontanément inflammable à l'air.

Substances et préparations concernées :

- liquides de PE < 21 °C, mais qui ne sont pas extrêmement inflammables ;
- qui, au contact de l'eau ou de l'air humide, dégagent des gaz extrêmement inflammables à raison de 1 l/kg/h minimum ;
- susceptibles de s'échauffer et finalement de s'enflammer au contact de l'air à température ambiante et sans apport d'énergie.

INFLAMMABLE

Exemples :

- 1-butanol
- xylènes

Phrase de risque :

R10 - Inflammable.

Substances et préparations concernées :

- liquides tels que 21 °C ≤ PE ≤ 55 °C.

Les autres catégories de danger sont explicitées dans l'article «Classification, emballage et étiquetage des substances et préparations dangereuses» paru dans Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail (tiré à part, référence ND 1961).

Il est à noter que des produits gazeux ou liquides classés différemment (toxique, corrosif...) peuvent être combustibles.

Tableau 6

Ministère chargé de l'Environnement

Réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement

Nomenclature décret modifié du 20 mai 1953.
Rubriques n° 1412, 1430, 1520

Ne sont reprises ci-dessous que les rubriques se rapportant aux gaz combustibles liquéfiés et aux liquides inflammables.

GAZ INFLAMMABLES LIQUÉFIÉS (Rubrique n° 1412)

Définition :

À l'exception de ceux visés explicitement par d'autres rubriques de la nomenclature.

Exemple : hydrocarbures liquéfiés

LIQUIDES INFLAMMABLES (à l'exclusion des alcools de bouche, eaux-de-vie et autres boissons alcoolisées) (Rubrique n° 1430)

A : Liquides extrêmement inflammables (coef.10) : oxyde de diéthyle et tout liquide de PE < 0 °C et PV (35 °C) > 10⁵ Pa.

Exemples : disulfure de carbone, oxyde d'éthylène...

B : Liquides inflammables de 1^{re} catégorie (coef. 1) : tous liquides inflammables de PE < 55 °C et non extrêmement inflammables.

Exemples : acétone, toluène, xylènes...

C : Liquides inflammables de 2^e catégorie (coef. 1/5) : tous liquides tels que 55 °C ≤ PE < 100 °C, sauf les fiouls lourds.

Exemples : gazole, fioul léger, fioul domestique...

D : Liquides peu inflammables (coef. 1/15) : fiouls (ou mazout) lourds tels qu'ils sont définis par les spécifications administratives.

Les goudrons, asphaltes et les matières bitumineuses sont visés spécifiquement par la rubrique n° 1520.

Les liquides inflammables stockés dans la même cuvette de rétention ou manipulés dans le même atelier, sont assimilés à la catégorie la plus inflammable.

Hors les produits extrêmement inflammables, les liquides inflammables réchauffés dans leur masse à une température supérieure à leur point d'éclair sont assimilés à des liquides inflammables de 1^{re} catégorie.

Si des liquides sont contenus dans des réservoirs en fosse ou assimilés, les coefficients visés ci-dessus sont divisés par 5.

Régime de classement d'une installation

Il est fonction de la « capacité totale équivalente (CTE) » d'un liquide inflammable de la 1^{re} catégorie, selon la formule :

$$CTE = 10A + B + C/5 + D/15$$

chaque lettre correspond à une catégorie précédemment définie.

Il est à noter que des produits gazeux ou liquides classés différemment (toxique, corrosif...) peuvent être combustibles.

Tableau 7

Ministère chargé de l'Industrie

Règles d'aménagement et d'exploitation de dépôts d'hydrocarbures

(Arrêté du 9 novembre 1972 modifié)

Sont considérés comme hydrocarbures les produits repris aux tableaux B et C annexés à l'article 265 du code des douanes (mise à jour nov. 1995)

CATÉGORIE A Hydrocarbures liquéfiés de PV (15 °C) > 10⁵ Pa

Deux sous-catégories :

A1 : Hydrocarbures maintenus liquéfiés à une température inférieure à 0 °C.

Exemples : éthylène, propylène, butane, propane

A2 : Hydrocarbures liquéfiés dans d'autres conditions.

Exemples : butane, propane

CATÉGORIE B Hydrocarbures liquides de PE < 55 °C

Exemples : essence, pétrole brut

CATÉGORIE C Hydrocarbures liquides tels que 55 °C ≤ PE < 100 °C

Exemples : gazoles, fioul domestique, fioul léger...

Deux sous-catégories :

C1 : température de stockage ≥ PE ;

C2 : température de stockage < PE.

Remarque : les fiouls lourds, quel que soit leur point d'éclair, sont assimilés à des hydrocarbures de catégorie C2

CATÉGORIE D Hydrocarbures liquides de PE ≥ 100 °C

Exemples : fiouls lourds, bitumes

Deux sous-catégories

D1 : température de stockage ≥ PE ;

D2 : température de stockage < PE.

Tableau 8

Ministère chargé des Transports

Transport routier, ferroviaire et par voies de navigation intérieures

Arrêté « ADR », consolidé du 25/02/04 ; arrêté « RID » du 06/12/96 modifié ; arrêté « ADNR » du 12/03/98
Ne sont reprises ci-dessous que les classes se rapportant aux gaz et aux matières liquides inflammables.

CLASSE 2 : GAZ

Définition :

- les matières de PV (50 °C) > 300 kPa ;
- les matières complètement gazeuses à 20 °C, à la pression standard de 101,3 kPa.

Sept catégories dont :

Gaz comprimés : TC ≤ - 50 °C

Gaz liquéfiés : TC > - 50 °C

Gaz liquéfiés réfrigérés : lors du transport en partie liquide en raison de leur basse température

Gaz dissous sous pression : lors du transport sont dissous dans un solvant

Générateurs aérosols et récipients de faible capacité contenant du gaz (cartouches à gaz)

Autres objets contenant un gaz sous pression

Gaz non comprimés soumis à des prescriptions particulières (échantillon de gaz)

Neuf groupes de danger dont :

F : inflammable

TF : toxique et inflammable

TFC : toxique, inflammable et corrosif

- Seuls les groupes qui intéressent les gaz inflammables ont été repris

CLASSE 3 : LIQUIDES INFLAMMABLES

Définition :

- liquides de PV (50 °C) ≤ 300 kPa et PE ≤ 61 °C et non complètement gazeux à 101,3 kPa,
- liquides, ou solides à l'état fondu, tels que PE > 61 °C, remis au transport ou transportés à chaud, à une température ≥ PE,
- carburant diesel, gazole et huile de chauffe légère de PE > 61 °C.

Ne sont pas comprises :

- les matières non toxiques et non corrosives ayant un PE > 35 °C qui n'entretiennent pas la combustion, sauf si la TT ≥ PE,
- les liquides inflammables faisant l'objet d'un classement particulier,
- les liquides très toxiques à l'inhalation, de PE < 23 °C.

Les matières et objets de la classe 3 sont subdivisés comme suit :

F : Liquides inflammables, sans risque subsidiaire :

F1 : Liquides inflammables ayant un point d'éclair inférieur ou égal à 61 °C ;

F2 : Liquides inflammables ayant un point d'éclair supérieur à 61 °C, transportés ou remis au transport à une température égale ou supérieure à leur point d'éclair (matières transportées à chaud) ;

FT : Liquides inflammables, toxiques :

FT1 : Liquides inflammables toxiques ;

FT2 : Pesticides ;

FC : Liquides inflammables, corrosifs ;

FTC : Liquides inflammables, toxiques, corrosifs ;

D : Liquides explosibles désensibilisés.

Il est à noter que des produits gazeux ou liquides classés différemment (toxique, corrosif...) peuvent être combustibles.

Tableau 9

Transport maritime

Classe de danger (Arrêté du 23/11/87 modifié - Règlement sur la sécurité des navires)
Ne sont reprises ci-dessous que les classes se rapportant aux gaz comprimés, liquéfiés ou dissous sous pression et aux matières liquides inflammables.

CLASSE 2 : GAZ COMPRIMÉS, LIQUÉFIÉS OU DISSOUS SOUS PRESSION

Définition :

Sont considérées comme gazeuses les matières qui :

- à 50 °C exercent une pression de vapeur supérieure à 300 kPa ;
- ou sont entièrement gazeuses à 20 °C (à la pression normale de 101,3 kPa).

Sont visés :

- les gaz comprimés (qui sont entièrement gazeux à 20 °C)
- les gaz liquéfiés (qui sont en partie liquides à 20 °C)
- les gaz liquéfiés réfrigérés
- les gaz en solution (gaz comprimés dans un solvant)

Trois catégories dont :

2.1 : gaz inflammables

Exemples : chlorométhane, oxyde de diméthyle, propène...

- La densité de vapeur par rapport à l'air peut être aussi utilisée pour distinguer les gaz. Seule la catégorie qui intéresse les gaz inflammables a été reprise.

CLASSE 3 : LIQUIDES INFLAMMABLES

Définition :

Ce sont les liquides, mélanges de liquides, liquides contenant des matières solides en solution ou en suspension, qui dégagent des vapeurs inflammables à une température égale ou inférieure à 61 °C en creuset fermé (en vase clos).

Y sont également incluses les matières transportées, ou présentées au transport, à des températures élevées et émettant des vapeurs inflammables à une température égale ou inférieure à la température maximale de transport.

En sont exclus les liquides ayant un point d'éclair supérieur à 35 °C qui n'entretiennent pas la combustion, sauf si la température de transport est égale ou supérieure à leur point d'éclair.

Certains liquides inflammables peuvent être toxiques et/ou corrosifs, ce qui est indiqué sur la fiche individuelle de la matière.

Le classement des liquides inflammables en 3.1, 3.2 et 3.3 en fonction du point d'éclair en creuset fermé a été supprimé dans l'amendement 30-00 du Code IMDG.

Détermination du groupe d'emballage (en fonction du point d'éclair et du point d'ébullition)

Ces trois groupes correspondent à des niveaux d'épreuve auxquels doivent satisfaire les colis (chute, étanchéité, pression, gerbage).

Groupe d'emballage I : point initial d'ébullition ≤ 35 °C

Groupe d'emballage II : point d'éclair en creuset fermé < 23 °C ; point initial d'ébullition > 35 °C.

Groupe d'emballage III : point d'éclair en creuset fermé ≥ 23 °C et ≤ 61 °C ; point initial d'ébullition > 35 °C.

- Les matières visqueuses dont le point d'éclair est inférieur à 23 °C, peuvent être affectées au groupe d'emballage III sous certaines conditions.
- Les liquides inflammables transportés ou présentés au transport à une température élevée sont affectés au groupe d'emballage III.

Il est à noter que des produits gazeux ou liquides classés différemment (toxique, corrosif...) peuvent être combustibles.

Tableau 10

Transport aérien

Classes de danger (Instructions techniques de l'OACI pour la sécurité du transport aérien des marchandises dangereuses. Editions 97-98)

Ne sont reprises ci-dessous que les classes se rapportant aux gaz et aux matières liquides inflammables.

CLASSE 2 : GAZ

Définition :

Sont considérées comme gazeuses les matières de PV (50 °C) > 300 kPa et qui sont entièrement gazeuses à 20 °C et à 101,3 kPa :

- gaz comprimés qui, chargés sous pression pour le transport, sont entièrement gazeux à 20 °C ;
- gaz liquéfiés, liquides lorsqu'ils sont chargés pour le transport ;
- gaz en solution, qui sont des gaz comprimés, dissous dans un solvant.

Trois catégories dont :

2.1 : gaz inflammables, qui à 20 °C et à 101,3 kPa :

- sont inflammables en mélange à 13 % (en volume) ou moins avec l'air
- ou ont une plage d'inflammabilité avec l'air d'au moins 12 % (quelle que soit la limite inférieure d'inflammabilité)

- Seule la catégorie qui intéresse le gaz inflammables a été reprise.

CLASSE 3 : MATIÈRES ET LIQUIDES INFLAMMABLES

Définition :

Sont considérés comme matières et liquides inflammables les liquides, mélanges de liquides ou liquides contenant des matières solides en solution ou en suspension, dégageant des vapeurs inflammables à des températures ne dépassant pas 60,5 °C en creuset fermé, ou 65,6 °C en creuset ouvert (un liquide dont le point d'éclair est supérieur à 60,5 °C en creuset fermé n'est pas réglementé).

Sont également visés :

- les liquides présentés au transport à des températures égales ou supérieures à leur point d'éclair,
- les matières liquides (présentées ou transportées à des températures élevées) dégageant des vapeurs inflammables à une température égale ou supérieure à la température maximale de transport.

- Ne sont pas assujettis à la classe 3, les liquides de point d'éclair supérieur à 35 °C
 - n'entretenant pas la combustion,
 - ou de point d'inflammation supérieur à 100 °C
 - ou, pour les solutions miscibles, dont le contenu aqueux est supérieur à 90 %.

Détermination du groupe d'emballage (en fonction du point d'éclair et du point d'ébullition)

Ces trois groupes, qui sont fonction du danger que les marchandises représentent, correspondent à des niveaux d'épreuve différents auxquels doivent satisfaire les colis (chute, étanchéité, pression, gerbage)

Groupe d'emballage I : point initial d'ébullition ≤ 35 °C

Exemples : aldéhyde acétique, furanne...

Groupe d'emballage II : point d'éclair en creuset fermé < 23 °C et de point initial d'ébullition > 35 °C.

Exemples : acétone, acétate d'éthyle, toluène...

Groupe d'emballage III : 23 °C ≤ PE ≤ 60,5 °C et point initial d'ébullition > 35 °C.

Exemples : xylènes, lactate d'éthyle...

- Les matières visqueuses dont le point d'éclair est inférieur à 23 °C, peuvent être affectées au groupe d'emballage III sous certaines conditions.

Il est à noter que des produits gazeux ou liquides classés différemment (toxique, corrosif...) peuvent être combustibles.

3. Conditions d'inflammabilité et d'explosivité

L'inflammation – éventuellement explosive – d'une atmosphère contenant des gaz ou des vapeurs combustibles se produit lorsqu'ils sont mélangés à un gaz comburant (air, oxygène,...) en proportion convenable et qu'un apport d'énergie suffisant (étincelle, point chaud,...) permet d'amorcer la réaction de combustion. La libération d'énergie est suffisante pour propager la réaction de combustion à l'ensemble du mélange combustible/comburant.

Une atmosphère explosible est une atmosphère susceptible de devenir explosive par suite de conditions locales et opérationnelles.

La quantité d'énergie libérée par une explosion n'est pas nécessairement supérieure à celle d'une simple combustion, mais elle est libérée dans un temps très court et donc avec une grande puissance.

4. Facteurs influant sur l'inflammabilité

4.1. Influence de la pression sur les limites d'inflammabilité des gaz

Les tables de caractéristiques concernent des mélanges à la pression atmosphérique. L'étude de l'influence des variations de pression indique que :

1 - Les variations normales de la pression atmosphérique sont pratiquement sans effet sur les limites d'inflammabilité.

2 - L'effet des grandes variations n'est ni simple ni uniforme, mais est caractéristique du mélange.

3 - Si l'on diminue la pression au-dessous de la pression atmosphérique, la zone d'inflammabilité diminue par élévation de la limite inférieure et abaissement de la limite supérieure. Pour une certaine valeur de la pression, ces limites se rejoignent. À une pression inférieure, le mélange n'est plus inflammable. Ce point limite est difficile à préciser car il est parfois si bas qu'on ne peut plus, en laboratoire, trouver de source d'inflammation assez puissante.

4 - Les augmentations de pression n'écartent pas toujours les limites. Au contraire, la zone d'inflammabilité de certains mélanges est réduite par un accroissement de pression. Pour de tels mélanges, la limite inférieure peut passer par un maximum et la limite supérieure par un minimum à des pressions (pas nécessairement

les mêmes) égales ou supérieures à la pression atmosphérique.

Les courbes des figures 4 et 5 montrent ces phénomènes.

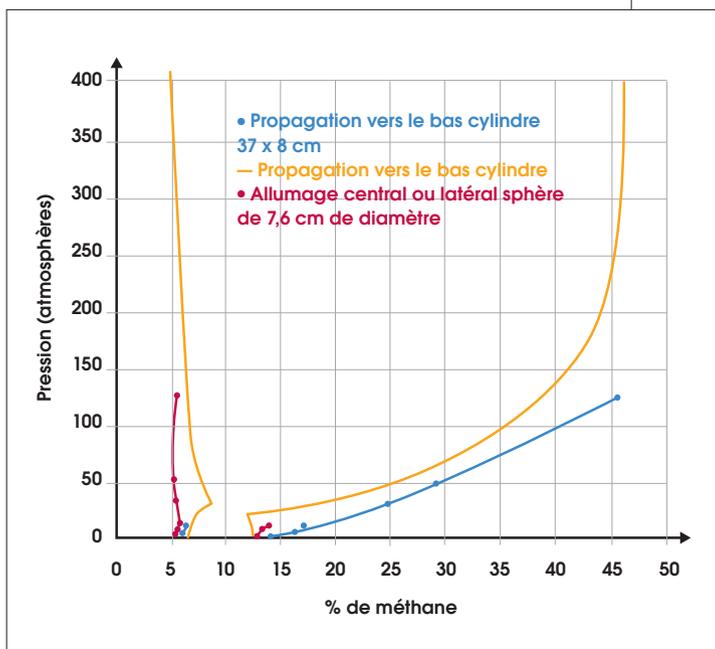


Figure 4 • Effet des pressions supérieures à la pression atmosphérique sur les limites d'inflammabilité du méthane dans l'air. ($1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$)

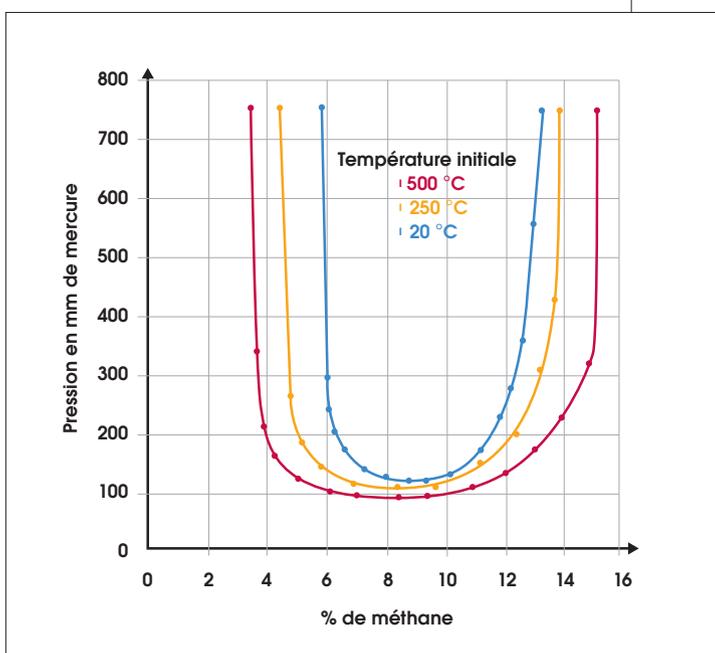


Figure 5 • Limites d'inflammabilité du méthane dans l'air. Influence de la pression (en dessous de la pression atmosphérique) et de la température. ($1 \text{ mmHg} = 1,333 \cdot 10^2 \text{ Pa}$)

4.2. Influence de la température sur les limites d'inflammabilité des gaz

Pour que la flamme se propage, la couche de gaz voisine de celle qui brûle doit être portée à une température telle qu'elle puisse prendre feu rapidement. Si le gaz non brûlé est à une température élevée, la quantité de chaleur à fournir par la couche en feu, est moindre. La LIE s'abaisse et la LSE s'élève lorsque la température initiale est plus élevée. L'expérience montre qu'il existe une relation linéaire entre les limites d'inflammabilité et la température initiale. Mais les variations de la température ambiante n'ont pas d'effet appréciable (figure 6).

La formule empirique suivante donne, en l'absence de données précises, une valeur de sécurité de la limite inférieure d'inflammabilité L à la température t ,

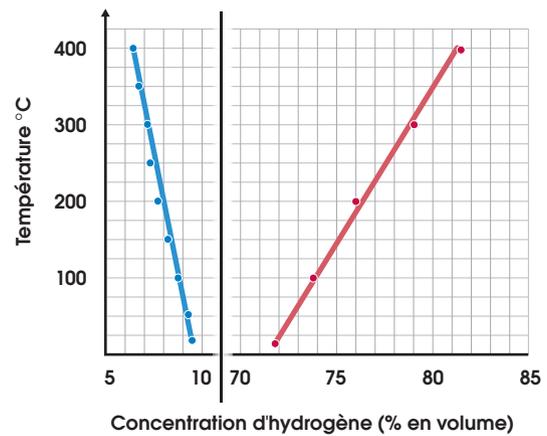
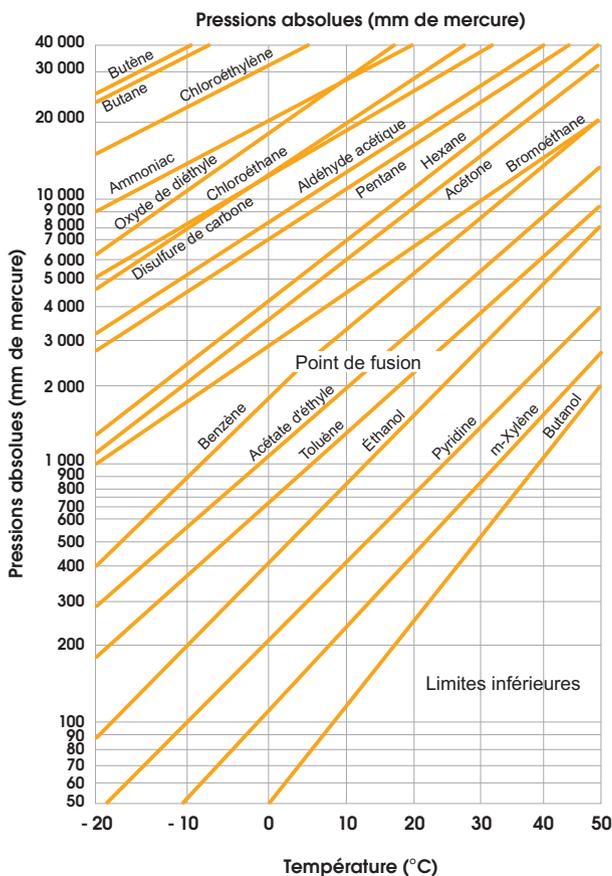
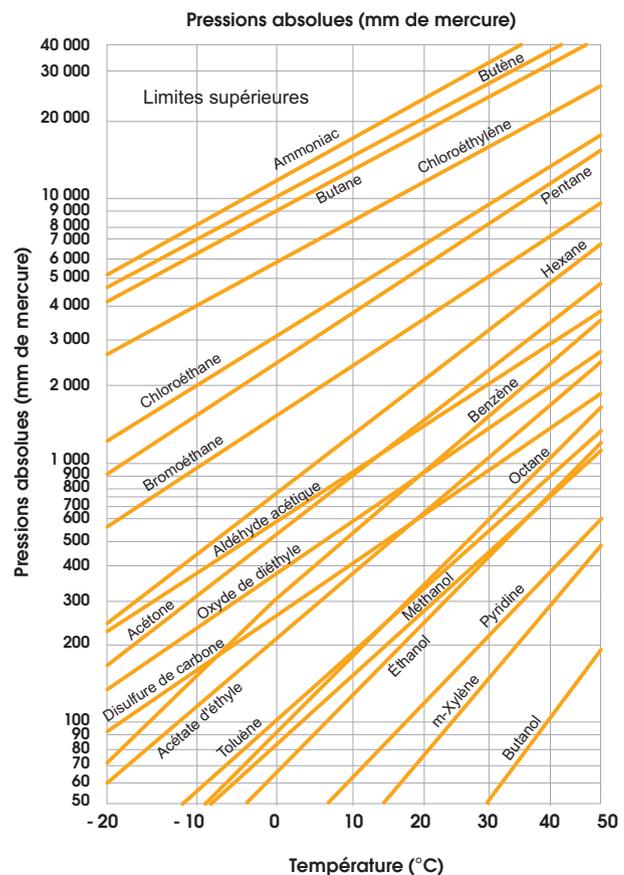


Figure 6 • Influence de la température sur les limites d'inflammabilité de l'hydrogène (propagation de la flamme vers le bas). (D'après Coward et Jones, U.S. Bureau of Mines).

Figure 7 • Variations avec la température et la pression dans une enceinte close. (1 mmHg = 1,333.10² Pa)



7a • Limites inférieures d'inflammabilité (les domaines d'inflammabilité sont au-dessous et à droite des courbes) de vapeurs (en présence de liquides) en mélange avec l'air (d'après la NFPA).



7b • Limites supérieures d'inflammabilité (les domaines d'inflammabilité sont au-dessus et à gauche des courbes) de vapeurs (en présence de liquides) en mélange avec l'air (d'après la NFPA).

quand on connaît la limite L_0 à la température t_0 de référence :

$$L = L_0 \left[1 - \frac{t - t_0}{600 - t_0} \right]$$

Il existe beaucoup d'autres formules concernant ces paramètres.

4.3. Influence de la pression et de la température sur les limites d'inflammabilité de vapeurs (en présence de liquide)

Cette influence peut se manifester dans des réservoirs ou des réacteurs clos. La pression partielle de la vapeur est celle de la vapeur saturante à la température donnée, quelle que soit la pression totale de l'atmosphère de l'enceinte. Lorsque cette pression totale augmente sans que varie la température, l'atmosphère s'appauvrit relativement en vapeur : si l'on est à la LIE, on s'en éloigne vers des valeurs de concentrations non inflammables ; si l'on est à la LSE, on s'en éloigne vers des concentrations inflammables (*courbes de la figure 7*).

4.4. Influence d'une atmosphère enrichie en oxygène sur les caractéristiques d'inflammabilité⁽³⁾

La comparaison des caractéristiques d'inflammabilité, pour des mélanges de gaz et vapeurs avec l'air et pour des mélanges avec l'oxygène, montre les variations suivantes du premier au deuxième cas :

- La température d'inflammation est peu diminuée.

- La LIE n'est pas changée ; il en est de même du point d'éclair.
- La LSE est augmentée de façon importante.
- L'énergie minimale d'inflammation est diminuée dans des rapports le plus souvent compris entre 50 et 200, ce qui laisse prévoir une inflammation quasi spontanée d'un mélange de gaz ou de vapeur combustible en proportion convenable avec de l'oxygène.
- L'IEMS diminue en présence d'oxydants tels que le chlore et l'oxygène (en particulier celui généré par les peroxydes).

Le *tableau 11* donne les valeurs des caractéristiques d'inflammabilité de quelques gaz et vapeurs en mélange dans l'air et dans l'oxygène.

4.5. Influence d'une atmosphère appauvrie en oxygène sur les caractéristiques d'inflammabilité

Si, dans un mélange air/gaz ou vapeur en proportion inflammable, on diminue la concentration d'oxygène, le domaine d'inflammabilité se rétrécit ; au-dessous d'une certaine valeur de la concentration du mélange en oxygène, particulière à chaque gaz, l'inflammation ne se produit plus. Cette valeur est appelée CMO (concentration maximum en oxygène) ou MOC (*maximum oxygene concentration*). Elle est en général comprise entre 10 et 15 %. La MOC est légèrement différente selon la qualité du gaz inerte (azote, dioxyde

(3) code NFPA 53 (1996).

Tableau 11 • Caractéristiques d'inflammabilité de quelques gaz et vapeurs dans l'air et dans l'oxygène.

Gaz et vapeurs	Température d'inflammation (°C)	Énergies minimales d'inflammation (μJ)	LIE %	LSE %
Acétone	-	1 150 / 2,4	2,6 / 2,6	13 / 60
Acétylène	305 / 295	17 / 0,2	2,5 / 2,5	81 / 93
Benzène	-	-	1,3 / 1,3	7,9 / 30
Butane	285 / 275	250 / 9	1,8 / 1,8	8,4 / 49
Essence 100/130	435 / 310	-	1,4 / 1,4	-
Éthane	510 / 500	250 / 2	3 / 3	12,5 / 66
Éthylène	485 / 480	70 / 1	2,7 / 2,9	36 / 80
Hexane	225 / 215	288 / 6	1,2 / 1,2	7,4 / 52
Hydrogène	545 / 540	17 / 1,2	4 / 4	75 / 95
Méthane	-	300 / 3	5 / 5	15 / 61
Méthanol	-	-	6,7 / 6,7	36 / 93
Oxyde de carbone	600 / 580	-	12,5 / 12,5	74 / 94
Oxyde de diéthyle	180 / 170	200 / 1,3	1,9 / 2	36 / 82
Propane	480 / 470	-	2,2 / 2,3	10 / 45

de carbone, argon, etc.), utilisé pour diminuer la teneur en oxygène du mélange. On trouvera, dans le *tableau 12*, les valeurs des concentrations en oxygène au-dessous desquelles l'inflammation de quelques gaz et vapeurs courants ne se produit plus, ainsi que les rapports au volume d'air des volumes d'azote ou de dioxyde de carbone, dont l'addition permet d'atteindre ces proportions inoffensives d'oxygène dans le mélange. Il est à noter que les valeurs pour un même gaz diffèrent selon le gaz d'inertage (cf. *tableau 12*).

4.6. Limites d'inflammabilité de mélanges de gaz ou vapeurs inflammables

Les mélanges gazeux auxquels on a souvent affaire comportent plusieurs éléments chimiques combustibles. La relation de Le Châtelier exprime par la formule suivante que la limite inférieure (ou supérieure) d'inflammabilité est atteinte si l'on a, par exemple, dans

le cas d'un mélange de trois gaz ou vapeurs inflammables :

$$\frac{n1}{N1} + \frac{n2}{N2} + \frac{n3}{N3} = 1$$

N1, N2, N3 sont les limites inférieures (ou supérieures) d'inflammabilité dans l'air de chacun des gaz pris isolément ; n1, n2, n3 sont les pourcentages de chacun des gaz dans le mélange gaz + air à étudier.

Cette formule exprime :

- que si l'on ajoute à un mélange gazeux, à limite inférieure (ou supérieure), un autre mélange lui aussi à limite inférieure (ou supérieure), le résultat final sera également un mélange à limite inférieure (ou supérieure) d'inflammabilité ;
- que, par exemple, un mélange d'air, d'oxyde de carbone et d'hydrogène qui contient 1/4 de la quantité nécessaire d'oxyde de carbone et 3/4 de la quantité

Tableau 12 • Concentrations maximales d'oxygène (% du volume) interdisant l'inflammation d'un mélange contenant des gaz ou des vapeurs inflammables, de l'air et de l'azote ou du dioxyde de carbone ajouté pour rendre inerte ce mélange (à températures et pressions ordinaires).

	INERTAGE PAR AZOTE		INERTAGE PAR CO ₂	
	% d'oxygène au-dessous duquel l'inflammation ne se produit pas	Rapport minimal du volume d'azote au volume d'air	% d'oxygène au-dessous duquel l'inflammation ne se produit pas	Rapport minimal du volume de CO ₂ au volume d'air
Acétone	11	0,91	13,5	0,56
Benzène	10,5	1	13	0,62
Butadiène	9,8	1,14	12	0,75
Butanes	10,7	0,96	13,2	0,59
Butènes	10,6	0,98	13,1	0,6
Carburant auto	11	0,91	13,5	0,56
Éthane	10,5	1	13	0,62
Éthanol	10	1,1	12,5	0,68
Éthylène	9,8	1,14	11,8	0,78
Heptanes	11	0,91	13,5	0,56
Hexanes	10,9	0,93	13,4	0,57
Hydrogène	4,5	3,7	7	2
Méthane	11,5	0,83	14	0,5
Méthanol	9,5	1,2	12	0,75
Oxyde de carbone	5,5	2,8	8,2	1,6
Oxyde de diéthyle	9,5	1,2	12	0,75
Pentanes	10,8	0,94	13,3	0,58
Propanes (cyclo inclus)	10,7	0,96	13,2	0,59
Propène	10,6	0,98	13,1	0,6
Disulfure de carbone	4,5	3,7	7	2
Sulfure d'hydrogène	7	2	10	1,1

d'hydrogène, pour former un mélange à la limite inférieure, sera lui-même un mélange à la limite inférieure.

On utilise souvent la loi de Le Châtelier sous la forme suivante :

$$L = \frac{100}{\frac{P1}{N1} + \frac{P2}{N2} + \frac{P3}{N3}}$$

L est la limite inférieure (ou supérieure) du mélange final en % ; P1, P2, P3 sont les proportions % de chacun des gaz combustibles présents dans le mélange de ceux-ci, sans air ni gaz inerte, de telle sorte que P1 + P2 + P3 = 100. N1, N2, N3 sont toujours les limites inférieures (ou supérieures) de chacun des constituants.

Par exemple, la limite inférieure d'inflammabilité d'un gaz naturel dont la composition est la suivante :

Méthane	80 %	LIE	5,3 %
Éthane	15 %	LIE	3,22 %
Propane	4 %	LIE	2,37 %
Butane	1 %	LIE	1,86 %

sera :

$$L = \frac{100}{\frac{80}{5,3} + \frac{15}{3,22} + \frac{4}{2,37} + \frac{1}{1,86}} = 4,55 \%$$

La loi de Le Châtelier s'applique avec une bonne approximation aux mélanges suivants :

- hydrogène, oxyde de carbone, méthane qu'ils soient pris par deux ou tous ensemble ;
- gaz à l'eau (mélange gazeux obtenu par réaction de la vapeur d'eau sur du coke chauffé), gaz d'éclairage (mélange gazeux produit par distillation de la houille) ;

(4) D. Dalmazzone ; J.C. Laforest ; J.M. Petit - Prédiction des limites inférieures d'explosivité dans l'air. Application de critères thermochimiques pour les gaz et vapeurs de substances organiques. Paris, INRS, ND 2048, 1997.

- École nationale supérieure de techniques avancées (ENSTA) - Centre de l'Yvette, Chemin de la Hunière, 91120 Palaiseau (tél. 01 69 31 99 99).

- mélanges d'hydrocarbures paraffiniques simples (de la forme C_nH_{2n+2}), y compris les gaz naturels ; toutefois les différences entre les valeurs calculées et les valeurs observées sont parfois importantes.

Les plus grandes différences sont observées lorsque l'un des constituants est une vapeur telle que l'oxyde de diéthyle, l'acétone, le disulfure de carbone.

En matière de prévention des explosions, il est intéressant de prédire la LIE d'un composé nouveau.

Une étude effectuée par l'École nationale supérieure de techniques avancées, dans le cadre d'une convention d'étude passée avec l'INRS⁽⁴⁾, a montré qu'on pouvait donner une approximation de la LIE à partir des critères de danger thermique du programme CHETAH (Chemical thermodynamic and energy hazard evaluation). Parmi les quatre critères de danger calculés par CHETAH, les critères C1 et C4 obtenus à partir de la chaleur dégagée par la réaction de combustion du mélange gazeux air-vapeur combustible donnent les meilleurs résultats sur une sélection de 214 hydrocarbures et dérivés oxygénés ou azotés.

Le critère C1 est directement l'enthalpie massique de combustion :

$$C1 = \frac{\Delta H_c^0}{m}$$

où m est la masse d'une mole de la composition gazeuse considérée et ΔH_c^0 l'enthalpie standard de combustion de cette même quantité de mélange. Les meilleures estimations sont obtenues en recherchant la concentration en combustible dans l'air telle que le mélange ait un critère C1 = - 0,345 kilocalorie par gramme.

Le critère C4 est obtenu par l'équation empirique :

$$C4 = 10 \cdot (\Delta H_c^0)^2 \cdot \frac{m}{n}$$

où n représente le nombre d'atomes grammes présents dans la masse m de mélange. Les meilleures estimations sont obtenues pour des compositions telles que C4 = 15,1.

Les grandeurs thermochimiques nécessaires au calcul peuvent être obtenues dans la plupart des cas par une méthode prédictive basée sur l'additivité des contributions de groupes de Benson. On obtient ainsi des prédictions de LIE, dans l'air et à 25 °C, légèrement sous-estimées dans la majorité des cas vérifiés expérimentalement.

Caractéristiques et effets des explosions

L'explosion d'un mélange gazeux enflammé peut prendre deux formes :

- la **déflagration**, caractérisée en milieu non confiné par un front de flamme se déplaçant à des vitesses de quelques mètres par seconde et, en milieu confiné, par une onde de pression se développant en avant du front de flamme à des vitesses de quelques mètres à quelques dizaines, voire quelques centaines de mètres par seconde. Les surpressions générées, dans un mélange confiné initialement à la pression atmosphérique, sont de l'ordre de 4.10^5 à 10^6 Pa ;
- la **détonation** s'observe presque exclusivement dans une tuyauterie ou un récipient très allongé. Après une phase de déflagration, elle se poursuit par une phase de détonation instable (*overdriven detonation* en anglais), caractérisée par une onde de choc liée au front de flamme, dont la pression dynamique a été mesurée à plusieurs dizaines de millions de pascals se propageant à des vitesses supersoniques. Elle se continue par une détonation stable dans laquelle le front de flamme est lié à une onde de choc se propageant à une vitesse élevée (supérieure à 1 000 m/s) ; les surpressions atteignent en un lieu 2.10^6 à 3.10^6 Pa, mais ne durent qu'un temps très court.

1. Grandeurs caractéristiques de la violence des explosions

1.1. Pression maximale d'explosion P_{max}

La pression développée par la déflagration d'un mélange gazeux dans une enceinte fermée, croît en fonction du temps jusqu'à une valeur maximale liée à la nature et à la concentration du gaz (figure 8).

Les tables de données présentées dans la littérature indiquent la pression maximale d'explosion du mélange qui, pour une substance donnée, génère la plus grande pression maximale d'explosion (figure 9).

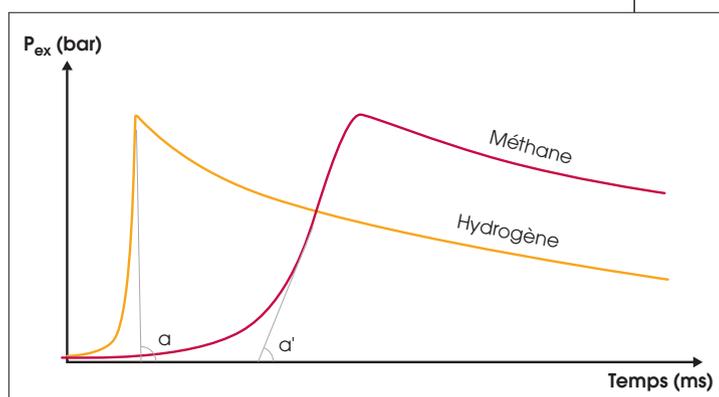


Figure 8 • Explosions d'hydrogène et de méthane dans la même enceinte fermée (1 bar = 10^5 Pa).

$\frac{dP}{dt} \text{ max} : \text{tg } \alpha \text{ ou } \text{tg } \alpha'$

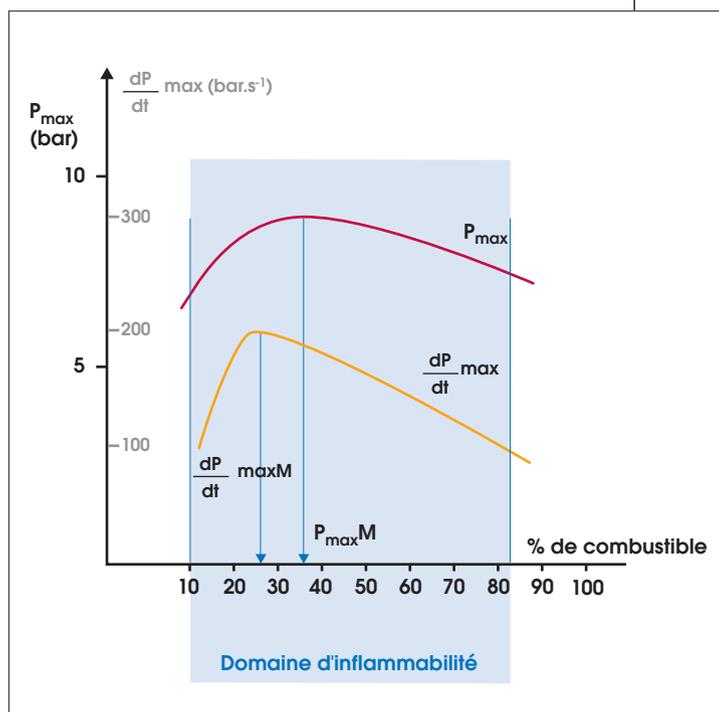


Figure 9 • Variations de P_{max} et $\frac{dP}{dt} \text{ max}$ en fonction de la concentration en combustible du mélange air-combustible (1 bar = 10^5 Pa).

1.2. Vitesse d'accroissement de la pression

$$\frac{dP}{dt} \text{ max}$$

Le temps mis pour atteindre la pression maximale lors d'une explosion est variable selon chaque gaz ou vapeur et selon le volume et la forme de l'enceinte où se déroule l'explosion. Dans deux enceintes géométriquement semblables, l'explosion du même mélange produit les mêmes pressions aux temps t et λt , λ étant le rapport de similitude.

La vitesse d'accroissement de la pression $\frac{dP}{dt}$ atteint une valeur maximale $\frac{dP}{dt} \text{ max}$ au cours de l'explosion. Mesurée dans des conditions identiques pour les différents gaz et vapeurs, elle est une caractéristique importante de la violence des explosions auxquelles peut donner lieu chaque gaz et vapeur (figure 8).

Les tables de données indiquent la vitesse maximale de montée en pression du mélange qui, pour une substance donnée, génère la plus grande valeur de cette caractéristique (figure 9).

Le tableau 13 donne, mesurées dans certaines conditions (chambre de 10 litres à 60 °C), les surpressions maximales d'explosion, les temps nécessaires pour les

atteindre, les vitesses maximales de montée en pression de quelques gaz et de vapeurs inflammables. On notera surtout les valeurs relatives des caractéristiques.

2. Facteurs influant sur le régime et la violence de l'explosion

2.1. Concentration du gaz inflammable dans l'atmosphère

La pression maximale P_{max} et la vitesse maximale de montée en pression de gaz $\frac{dP}{dt} \text{ max}$ ont leurs valeurs les plus élevées à des concentrations voisines de la concentration stœchiométrique (figure 10).

Pour certains gaz inflammables, on a déterminé expérimentalement les concentrations pour lesquelles la détonation peut avoir lieu. Par exemple :

- pour l'hydrogène (LIE et LSE : 4 et 74 %), entre 18 et 58 %,
- pour l'acétylène (LIE et LSE : 2,5 et 81 %), entre 4 et 51 %,
- pour l'oxyde de diéthyle (LIE et LSE : 1,9 et 48 %), entre 2 et 4,6 %,
- pour le propane (LIE et LSE : 2,2 et 10 %), entre 3 et 7 %.

Tableau 13 • Caractéristiques d'explosion de quelques gaz et vapeurs (d'après Eastman Kodak et Cie, publiées dans Chemical and process engineering, vol. 46, USA, 1965).

Gaz ou vapeur inflammable	Pression maximale d'explosion (déflagration) en bar (1 bar = 10 ⁵ Pa)	Temps nécessaire pour atteindre la pression maximale en milliseconde	Teneur du mélange donnant la pression maximale % en volume	Vitesse maximale de montée en pression dP/dt max. en bar/s (1 bar = 10 ⁵ Pa)
Acétone	7	70	6	140
Acétylène	10,5	14	13	850
Acrylonitrile	7,8	42	8	200
Benzène	7	60	4	160
Butane	7	57	4	160
Butanol	7,45	64	6	190
Cyclohexane	7,5	52	3	155
Éthane	7	47	7	180
Éthanol	7	60	12	170
Éthylène	8,5	18	8	600
Hexane	6,6	60	2,5	180
Hydrogène	7,3	10	35	800
Méthanol	6,5	60	15	230
Oxyde de diéthyle	7,5	51	5	210
Propane	7	56	5	180
2-propanol	6,5	72	6	135
Toluène	6,6	80	4	170

Si elle n'est pas détonante, l'inflammation d'un mélange donne lieu à une déflagration plus ou moins énergétique ; mais en matière de sécurité, on doit envisager la possibilité d'une explosion violente pour toutes les valeurs des concentrations comprises entre la LIE et la LSE.

2.2. Énergie de la source d'inflammation

L'énergie d'inflammation dépend notamment de la concentration de combustible dans le mélange. Elle passe par un minimum pour des concentrations voisines de la concentration stœchiométrique.

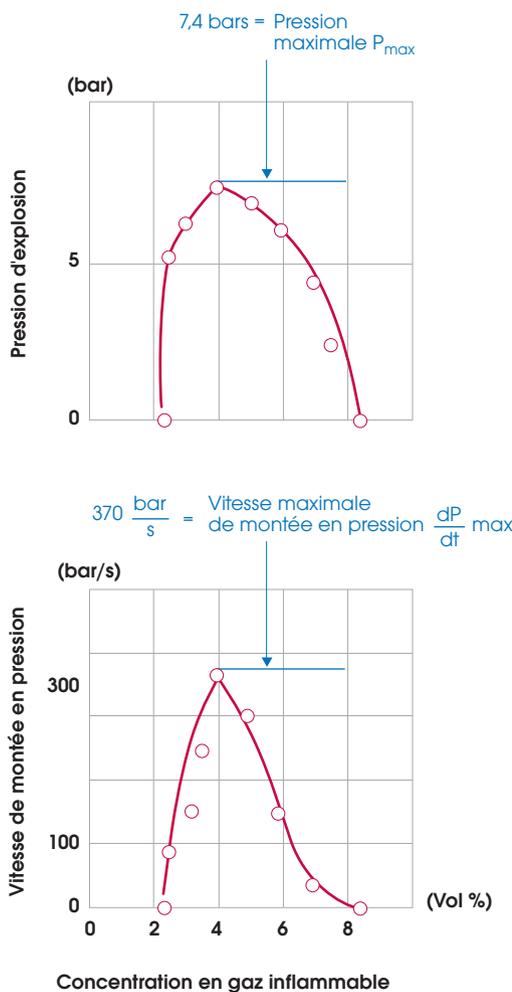


Figure 10 • Courbes caractéristiques d'explosion d'un gaz inflammable (1 bar = 10^5 Pa).

La violence de l'explosion d'un mélange inflammable croît généralement avec l'énergie de la source d'inflammation comme le montre à titre d'exemple le tableau 14.

Une détonation ne peut être initiée, en général, que par une source d'inflammation énergétique ou une déflagration se propageant dans des conditions particulières.

2.3. Volume et forme de l'enceinte

Dans une enceinte confinée, de forme approximativement cubique, de volume supérieur à 1 litre, la pression maximale d'explosion, pour un gaz ou une vapeur donnés, dépend peu du volume. En revanche, la vitesse maximale $\frac{dP}{dt} \max$ de montée en pression de l'explosion dépend du volume selon l'expression dite « loi cubique » (figure 11) :

$$\frac{dP}{dt} \max = K_g(V)^{-\frac{1}{3}}$$

K_g étant une constante caractéristique du gaz et de la forme de l'enceinte qui s'exprime en bar.m.s^{-1} .

Dans des canalisations ou des récipients de formes très allongées, la propagation de l'explosion peut être

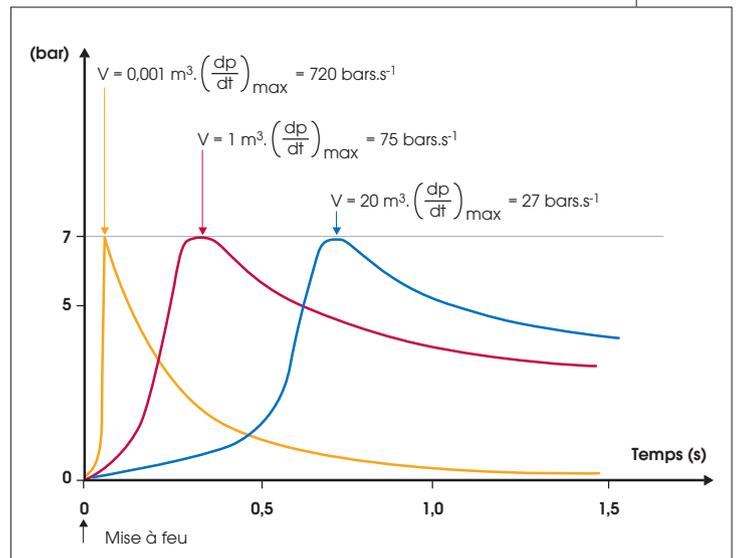


Figure 11 • Explosion d'un mélange de méthane et d'hydrogène dans les enceintes approximativement cubiques de différents volumes (d'après Bartknecht) (1 bar = 10^5 Pa).

Tableau 14 • Influence de la source d'inflammation sur la valeur de K_g du propane à l'état initial calme (1 bar = 10^5 Pa).

SOURCE D'INFLAMMATION		PARAMÈTRES D'EXPLOSION	
Type	Énergie (watt)	P_{max} (bar)	K_g (bar.m.s^{-1})
Étincelle électrique	10	7,5	75
Décharge de condensateur	100	9,5	750
Source pyrotechnique	10 000	9,5	280

beaucoup plus rapide que dans une enceinte de forme approximativement cubique. En cours de propagation, la surpression d'explosion s'accroît et le régime de détonation peut s'établir.

Dans des lieux ou des sites non confinés, à l'air libre notamment, l'explosion de gaz ou de vapeurs inflammables se mélangeant à l'air est plus rare, mais peut se produire, notamment à la sortie d'évents de réservoirs et dans le cas de fuites importantes (ruptures de canalisations, de réservoirs).

À la suite d'une perte de confinement, les gaz inflammables et les liquides inflammables à bas point d'ébullition peuvent former une nappe gazeuse. À partir de son point d'émission, cette nappe de gaz dérive au gré des conditions météorologiques et des obstacles qu'elle rencontre. Si le nuage dont la concentration en gaz inflammable est comprise dans les limites d'inflammabilité croise une source d'énergie, il s'enflammera et, si la combustion est suffisamment rapide, elle engendrera une déflagration.

2.4. Turbulence de l'atmosphère

La turbulence initiale d'une atmosphère inflammable accroît légèrement la pression et très fortement la vitesse de montée en pression et, par conséquent, la violence donc la constante caractéristique K_g du gaz ou de la vapeur.

Le *tableau 15* donne les valeurs de K_g pour quelques gaz enflammés par une étincelle électrique de 10 watts dans le cas d'un mélange initial calme ou turbulent.

Il n'existe pas de méthode de mesure de la turbulence existant dans les installations industrielles. Il est recommandé de s'adresser à des organismes spécialisés pour l'évaluer. Dans les conditions expérimentales, elle dépend du délai qui sépare l'introduction du mélange et sa mise à feu.

Tableau 15 • Influence de la turbulence sur la valeur K_g de quelques gaz ou vapeur calmes ou turbulents.

Gaz ou vapeur	Étincelle électrique (10 watts)	
	Kg du mélange calme	Kg du mélange turbulent
Méthane	55	460
Propane	75	500
Hydrogène	550	1 270
Acétate de n-propyle	40	
2-Butanone	56	
Toluène	56	
Méthanol	66	
Acétate d'éthyle	67	

2.5. Pression initiale de l'atmosphère

La surpression d'explosion est accrue lorsque la pression initiale dans l'enceinte où elle se produit est plus élevée et inversement. On observe une valeur sensiblement constante du rapport des pressions finale et initiale.

3. Effets pratiques des explosions et évaluation des dommages potentiels résultant d'une explosion de mélange gazeux dans une installation

Ces effets dépendent notamment des manifestations suivantes des explosions :

- la surpression maximale engendrée par la déflagration ou la détonation, la pression de cette dernière étant nettement plus élevée et les dégâts provoqués plus importants ;
- le souffle, au voisinage immédiat de l'explosion ;
- l'impulsion $\int P dt$, P étant la pression d'explosion ;
- la force de réaction engendrée par l'impact de l'onde de choc dans une tuyauterie lors d'un changement de direction ;
- les flammes : celles-ci peuvent envahir un volume 10 fois plus grand que celui de l'atmosphère explosive qui réagit ;
- la projection d'éclats.

Le *tableau 17* (page 38) indique quelques effets observés chez l'homme et les dégâts observés dans les constructions en regard des surpressions appliquées, bien que d'autres facteurs, l'impulsion notamment, jouent un rôle important dans les effets.

Toute évaluation des dommages potentiels résultant d'une explosion de mélange gazeux ne peut être qu'approximative. Différentes méthodes permettent d'évaluer les effets d'une onde de pression générée par une explosion.

L'approche empirique ne peut que s'appuyer sur l'analyse a posteriori des explosions réelles. Les observations relatives aux effets de l'explosion au TNT (2,4,6-trinitrotoluène ou toliste), sur l'homme ou les constructions, sont nombreuses et ont été bien analysées. Aussi, un des moyens simple, pratique et d'ailleurs le plus couramment utilisé, est de faire une corrélation entre les conséquences de l'explosion d'une masse de produit avec la masse de TNT ayant provoqué les mêmes effets aux mêmes distances.

Cette méthode, dite de l'« équivalent TNT », revient en fait à évaluer le rendement total de l'explosion considérée. Ce rendement est le rapport entre l'enthalpie de

la transformation explosive (ΔH_{TNT}) de la masse équivalente de TNT (m_{TNT}) et l'enthalpie de la transformation explosive (ΔH_{prod}) potentiellement disponible dans la masse de produit (m_{prod}).

Soit, ΔH_{TNT} valant 4 690 kJ/kg :

$$\alpha = \frac{m_{TNT} \times 4\,690}{m_{prod} \times \Delta H_{prod}}$$

Tableau 16 • Correspondance.

Rendement total de l'explosion	Probabilité d'observation
10 %	97 %
4 %	60 %
3 %	50 %

Ce « rendement » de l'explosion dont la valeur est comprise entre 0 et 1, est fonction de nombreux facteurs. Sur la base d'une étude statistique, a été établie la correspondance rapportée dans le *tableau 16*.

Bien que le choix de 10 % pour le rendement d'explosion soit quelque peu pénalisant, cette valeur est généralement adoptée par les industriels français, même si leurs homologues anglo-saxons retiennent celle de 3 %.

L'abaque (*figure 12*) le plus utilisé, obtenu à partir d'essais et donnant les valeurs de la surpression due à l'explosion en fonction de la distance réduite λ , est celui référencé TM5-1300⁽⁵⁾.

(5) Structures to resist the effects of accidental explosions - Washington, Departments of the Army, the Navy and the Air Force, TM5-1300/NAV-VAC, p. 397/A1FM 88, 22-juin 1969.

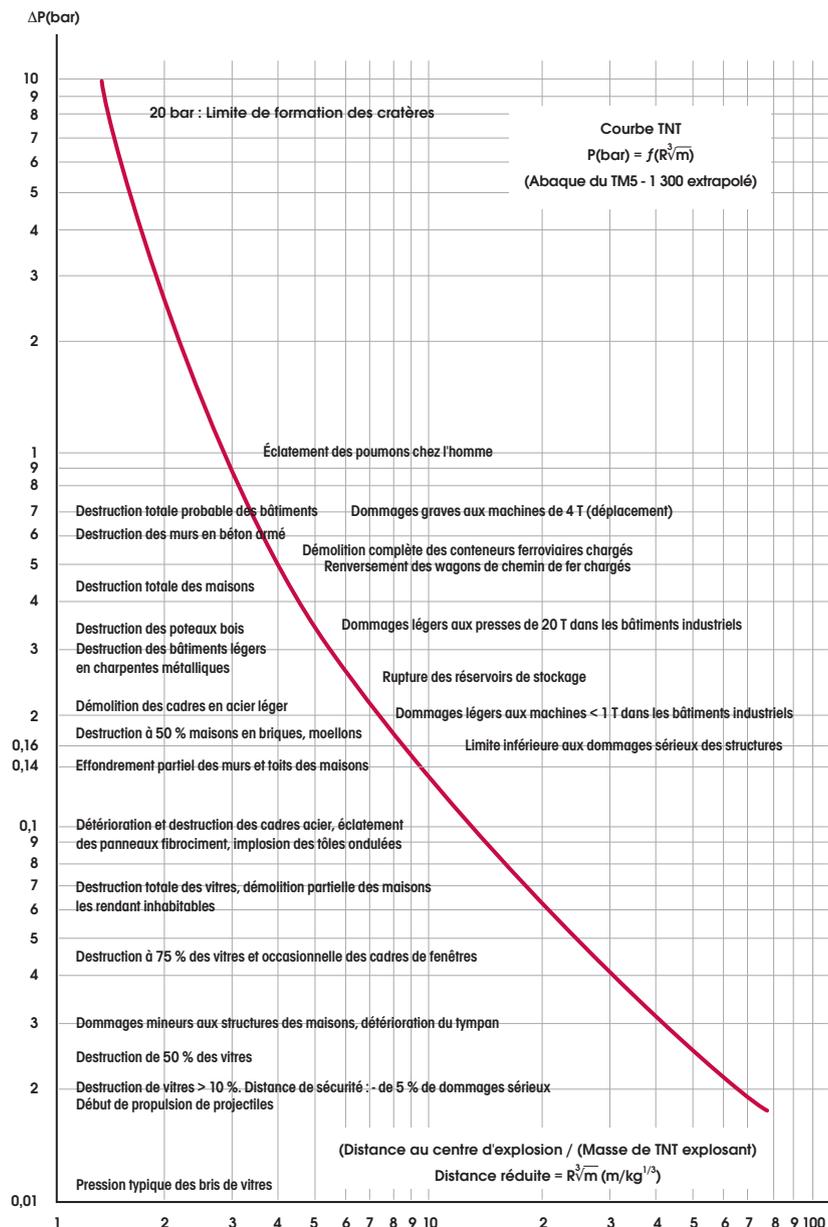


Figure 12 • Abaque TM5 - 1 300 (1 bar = 10^5 Pa).

La distance réduite λ est le rapport de la distance R (entre le point considéré et la source de l'explosion) sur la racine cubique de la masse m_{TNT} de TNT.

$$\alpha = \frac{R}{m_{\text{TNT}}^{1/3}}$$

La connaissance de la distance réduite λ , calculée à partir de la masse équivalente TNT et de la distance au centre d'explosion, permet de déterminer au moyen de l'abaque précité la surpression engendrée, puis à partir du *tableau 17* d'évaluer les dommages occasionnés.

La circulaire du 9 novembre 1989 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement

(dépôts de liquides inflammables) a retenu deux seuils : 170 mbars et 50 mbars (1 bar = 10^5 Pa).

Exemple :

Soit un réservoir de 15 tonnes de butane en phase liquide (le rendement a sera pris égal à 10 %) :

$$m_{\text{TNT}} = 10/100 \times 15\,000 \times \Delta H_{\text{butane}} / \Delta H_{\text{TNT}}$$

$$\Delta H_{\text{butane}} \approx 49\,000 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta H_{\text{TNT}} = 4\,690 \text{ kJ/kg}$$

$$m_{\text{TNT}} \approx 15\,800 \text{ kg}$$

En se reportant à l'abaque précité, on trouve, par exemple pour les deux seuils précédents :

Pour $\Delta P = 50 \text{ mb}$, $\lambda = 22$, soit $R = 22 \times 15\,800^{1/3} \approx 550 \text{ m}$.

Pour $\Delta P = 170 \text{ mb}$, $\lambda = 8,8$, soit $R = 8,8 \times 15\,800^{1/3} \approx 220 \text{ m}$.

Tableau 17 • Impacts associés à une onde de pression.

ΔP (bar)	Impacts sur les individus	Impacts sur les installations
0,017		Seuil de probabilité 1 % de bris de vitres ordinaires.
0,020		Limite pour les dégâts légers : 3 à 10 % de vitres brisées.
0,027		Déplacement des tuiles.
0,030	Grand bruit (143 dB)	
0,070	Personnes projetées au sol	90 % ou plus des vitres brisées, démolition partielle des maisons, rendues inhabitables. Panneaux ondulés en fibrociment éclatés, panneaux en tôle ondulée détachés de leurs ancrages et déformés. Volets en bois des maisons enfoncés.
0,100		Dommages possibles aux réservoirs d'hydrocarbure de grande dimension.
0,140		Effondrement partiel des murs et toits de maisons. Murs en agglomérés non armés détruits.
0,170		Maisons détruites à 50 %.
0,200		Bâtiment à charpente en acier déformé et sorti de ses fondations. Grands réservoirs de stockage sévèrement endommagés.
0,350	Probabilité de rupture des tympans = 1 %	Poteaux en bois détruits. Destruction pratiquement totale des maisons.
0,430	Probabilité de rupture des tympans = 50 %	
0,500		Retournement de wagons chargés.
0,700		Destruction pratiquement totale de tous les bâtiments.
0,840	Probabilité de rupture des tympans = 90 %	
1,000	Probabilité de décès par effet direct = 1 %	
1,400	Probabilité de décès par effet direct = 50 %	
1,750	Probabilité de décès par effet direct = 90 %	

Évaluation des risques d'explosion

1. Démarche préventive

Il est de la responsabilité du chef d'établissement de prendre « les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé des travailleurs de l'établissement, y compris les travailleurs temporaires. Ces mesures comprennent des actions de prévention des risques professionnels, d'information et de formation ainsi que la mise en place d'une organisation et de moyens adaptés. Il veille à l'adaptation de ces mesures pour tenir compte du changement des circonstances et tendre à l'amélioration des situations existantes. »

Le chef d'établissement s'assure qu'un document relatif à la protection contre les explosions est établi et tenu à jour. Celui-ci doit, en particulier, faire apparaître :

- que les emplacements à risque ont été limités par conception,
- que les risques d'explosion ont été déterminés et évalués,
- que des mesures adéquates seront prises,
- quels sont les emplacements classés en zones à risque,
- quels sont les emplacements auxquels s'appliquent les prescriptions,
- que les lieux et les équipements de travail, y compris les dispositifs d'alarme, sont conçus, utilisés et entretenus en tenant compte de la sécurité,
- que des dispositions ont été prises pour que l'utilisation des équipements de travail soit sûre.

Le chef d'établissement met en œuvre ces mesures, prévues sur la base des principes généraux de prévention :

- éviter les risques,
- évaluer les risques qui ne peuvent pas être évités,

- combattre les risques à la source,
- adapter le travail à l'homme,
- planifier la prévention,
- prendre les mesures de protection collective en leur donnant la priorité sur les mesures de protection individuelle,
- donner les instructions appropriées aux travailleurs.

Le chef d'établissement doit donc, en fonction de la nature de ses activités, évaluer les risques pour la sécurité et la santé des travailleurs ; à la suite de cette évaluation, les méthodes de travail ou de production mises en œuvre doivent garantir un meilleur niveau de protection de la sécurité et de la santé des travailleurs. Même si ce document ne porte que sur l'explosion, l'évaluation des risques doit être globale.

Cette évaluation est indispensable pour tout type d'ouvrages neufs ; elle devra servir en particulier à la constitution du dossier des interventions ultérieures sur ceux-ci. La prévention du risque d'explosion va nécessiter de développer des actions concernant les équipements industriels, les installations, les procédures de travail et la formation du personnel. La complexité des analyses à mener a conduit, entre autres, à proposer le présent document permettant de disposer d'informations nécessaires. Il ne prétend pas être exhaustif et doit être adapté pour prendre en compte les spécificités propres à chaque cas.

La démarche préventive va se décliner également lors de la conduite, la maintenance et l'entretien des diverses installations. C'est lors de ces opérations que l'on va utiliser le dossier des interventions ultérieures et la notice d'instructions qui doit être compréhensible par les utilisateurs.

2. Analyse et mesure des risques d'explosion

Les risques d'explosion de gaz ou de vapeurs doivent être analysés dans des installations de stockage, de transports en canalisations, de combustion (chaudières, fours, séchoirs, etc.), de traitement et de fabrication, d'utilisation (solvants, peintures, etc.), où sont présents des gaz combustibles ou des vapeurs de liquides inflammables. Cette analyse devra préciser la possibilité que se forme, dans un endroit donné, normalement ou dans des conditions accidentelles, une atmosphère explosive, c'est-à-dire contenant des gaz ou des vapeurs inflammables en proportion supérieure ou égale à la LIE.

Les risques seront appréciés en utilisant les éléments précédemment décrits, notamment les caractéristiques d'explosivité des produits combustibles présents (voir chapitre 1, tableau 3).

Ces données ne sont pas des constantes physiques mais dépendent de la nature du gaz ou de la vapeur, de la méthode de détermination utilisée, etc. Ces paramètres doivent être très précisément définis. Au besoin, il est nécessaire de passer par des laboratoires spécialisés afin de réaliser les tests qui permettront de déterminer les données manquantes.

La connaissance des risques d'explosion, pour le produit stocké ou fabriqué, est le premier stade de l'étude de la protection sur une installation. Les données techniques sont nécessaires pour la mise en œuvre pratique de mesures préventives. Le tableau 18 montre les mesures de prévention pouvant être adoptées en corrélation avec les caractéristiques d'inflammabilité des gaz ou des mélanges explosifs.

L'interprétation et l'utilisation des données techniques de sécurité relèvent de la compétence des experts.

Si l'analyse fait apparaître un risque d'explosion de gaz ou de vapeurs inflammables dans une installation industrielle, il convient pour protéger les personnes et les biens :

- de minimiser ce risque en limitant autant que possible les volumes explosibles potentiels,
- de pallier ce risque en empêchant l'explosion de se produire, en supprimant les causes d'inflammation d'un mélange dangereux,
- de limiter les conséquences d'une explosion par des moyens technologiques et/ou de protection.

Une combinaison de ces deux possibilités est souvent nécessaire. Elles seront régulièrement complétées par des mesures concernant l'organisation.

3. Zones de danger

L'un des principaux résultats de l'analyse des risques est la détermination des zones à risque d'explosion.

La réglementation précise les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives. Elle prévoit, entre autres, une classification des emplacements où des atmosphères explosives peuvent être présentes, ainsi que les conditions à respecter dans chaque zone. Le chef d'établissement devra définir les zones :

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

Tableau 18 • Mesures de préventions.

Paramètre qualitatif du risque	Mesures de prévention
Concentration maximale d'oxygène	Protection par gaz inerte
Température d'auto-inflammation	Élimination des sources d'inflammation
Énergie minimale d'inflammation	
LIE	Limitation des concentrations
Pression maximale d'explosion	Construction résistant à l'explosion
Vitesse maximale de montée en pression	Suppression de l'explosion
Pression maximale d'explosion	
Vitesse maximale de montée en pression	Détente de la pression d'explosion
Pression maximale d'explosion	
IEMS (Interstice expérimental maximal de sécurité)	Arrêt de la propagation d'une flamme

Zone 1 : Emplacement où une atmosphère explosive consistant en un mélange avec l'air de substances inflammables sous forme de gaz, de vapeur ou de brouillard est susceptible de se présenter occasionnellement en fonctionnement normal.

Zone 2 : Emplacement où une atmosphère explosive consistant en un mélange avec l'air de substances inflammables sous forme de gaz, de vapeur ou de brouillard n'est pas susceptible de se présenter en fonctionnement normal ou, si elle se présente néanmoins, n'est que de courte durée.

La connaissance de ces zones est indispensable pour le choix des équipements.

3.1. Délimitation des zones

La délimitation des zones à risques d'explosion répond à un double objectif :

- limiter l'étendue de ces zones,
- mettre en place et utiliser un matériel adapté au risque de la zone considérée.

Le chef d'établissement veille à ce que les prescriptions, visant à assurer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives, soient appliquées.



Les emplacements où des atmosphères explosives peuvent se présenter en quantités susceptibles de présenter un risque pour la santé et la sécurité des travailleurs sont signalés, au niveau de leurs accès respectifs, par le panneau d'avertissement ci-dessus.

Un document relatif à la protection contre les explosions doit être élaboré avant le commencement du travail et doit être révisé lorsque des modifications, des extensions ou des transformations notables sont appor-

tées notamment aux lieux, aux équipements de travail ou à l'organisation du travail.

Les différents facteurs à prendre en considération pour la délimitation des zones sont :

a) Les sources de dégagement

Ce sont les points d'émission des substances inflammables dans l'atmosphère. On distingue par exemple les sources de dégagement :

- à l'origine de la zone 0 :
 - intérieur de réservoirs de stockage fermés,
 - intérieur d'appareils de fabrication ou de mélange fermés,
 - etc.
- à l'origine de la zone 1 :
 - réservoirs ou conteneurs de stockage ouverts ou pouvant être ouverts,
 - appareils de fabrication ou de mélange ouverts ou pouvant être ouverts,
 - orifices de mise à l'air libre des gardes hydrauliques,
 - extrémité des bras articulés et des flexibles de chargement de citernes et conteneurs,
 - tampons de charge et vannes d'appareils,
 - vannes de prise d'échantillons ou de purge libre,
 - garnitures de pompes, de compresseurs,... où il subsiste des fuites,
 - fosses et caniveaux non étanches,
 - etc.
- à l'origine de la zone 2 :
 - brides, connexions, vannes et raccords de tuyauteries,
 - regards ou tubes de niveau en verre,
 - garnitures de pompes, de compresseurs,... conçues pour empêcher les fuites,
 - appareils en matériaux fragiles tels que le verre, céramique, graphite,...
 - orifices de respiration des membranes de détendeurs,
 - cuvettes de rétention,
 - etc.

b) Le procédé

Il s'agit de l'ensemble des moyens mis en œuvre (produits, équipements et procédures de travail) pour réaliser l'opération recherchée.

Les produits

Il faut prendre en considération :

- les caractéristiques d'inflammabilité des produits, notamment les points d'éclair et les températures

d'auto-inflammation des produits par rapport à la température de mise en œuvre ;

- les quantités de produits mises en jeu pour estimer la quantité maximale de gaz ou vapeurs inflammables susceptible de se dégager dans l'atmosphère en cas d'incident.

Les équipements

Il est nécessaire de prendre en compte non seulement les appareils de fabrication et de stockage mais aussi le matériel annexe :

- appareils équipés d'un système de chauffage ou de refroidissement,
- appareils munis d'un agitateur,
- dispositifs de remplissage et de vidange,
- équipements de ventilation générale naturelle,
- équipements de ventilation mécanique générale ou ponctuelle,
- matériels utilisés par les intervenants.

Les procédures de travail

La délimitation des zones est aussi fonction du procédé retenu. Chaque situation devra nécessiter une étude particulière.

E X E M P L E

Cas d'un produit obtenu en dissolvant un solide dans un liquide inflammable (opération réalisée dans une cuve agitée et en chauffant le mélange).

- S'il est prévu d'effectuer cette opération à une température nettement inférieure au point d'éclair du solvant, une atmosphère explosive ne peut pas apparaître en cours de fonctionnement normal de l'installation. Dans ce cas, il n'existe pas de **zone 0 ou 1**. Par contre, un dysfonctionnement du système de chauffage qui amènerait le solvant à une température supérieure à son point d'éclair doit être envisagé, ce qui crée une **zone 2**.
- Si le mode opératoire prévoit que la dissolution doit être effectuée à une température voisine ou supérieure au point d'éclair, il en résulte la création d'une **zone 0 ou 1**. L'étendue de cette **zone 0 ou 1** sera appréciée en fonction des autres paramètres décrits précédemment.

Cet exemple constitue un cas très simple. En pratique, le problème est généralement plus complexe. Les méthodes d'analyse de risques (qui conduisent à décomposer en phases élémentaires successives un

processus industriel global et à les analyser) permettent une étude plus rigoureuse des risques potentiels liés aux conditions d'exploitation.

c) Les conditions d'implantation

Pour une même unité de fabrication, la délimitation des zones sera différente s'il s'agit d'une unité implantée à l'intérieur d'un bâtiment ou en plein air (structure ouverte).

La délimitation des zones doit être effectuée en volume et non en plan, en tenant compte notamment :

- du volume et de la géométrie des installations,
- de la géométrie des ateliers (présence ou non de parois matérielles de séparation, atelier de grande hauteur, etc.),
- de la ventilation existante.

d) Les conditions climatiques

La délimitation des zones dépend aussi des conditions de diffusion et de dilution des gaz ou vapeurs émis dans l'atmosphère.

Cette délimitation devra tenir compte des conditions les plus défavorables. En particulier, dans le cas d'une installation en structure ouverte, il sera nécessaire d'étudier l'influence des vents.

Enfin, les conséquences que pourrait avoir la foudre sur les installations devront être examinées.

Des relations mathématiques ont été proposées pour déterminer les valeurs des concentrations en produit inflammable dans l'air en fonction des caractéristiques du produit émis, du débit d'émission, de la distance de la source de dégagement et de la vitesse du vent.

Ce document ne contient pas de formules mathématiques permettant, à partir des caractéristiques d'un gaz ou d'une vapeur inflammable et d'un type de source d'émission, de délimiter l'étendue théorique d'une zone à risque d'explosion. En effet, l'expérience industrielle montre que l'étendue d'une zone à risques d'explosion dépend rarement d'un seul facteur nettement défini dans le temps et dans l'espace ; une zone dangereuse résulte généralement de plusieurs paramètres :

- débit de la source d'émission,
- caractéristiques du gaz ou de la vapeur inflammable et notamment sa densité (plus lourd ou plus léger que l'air),
- localisation de la source d'émission⁽⁶⁾,
- conditions climatiques...

Leur incidence chiffrée sur l'étendue des zones ne peut être déterminée par le calcul avec une fiabilité suffisante. Cette étendue pourra toutefois être souvent appréciée par l'utilisation d'explosimètre.

3.2. Modifications des zones

La délimitation des zones d'un atelier ou d'une installation doit être systématiquement vérifiée si des modifications y sont apportées. Celles-ci peuvent être de type temporaire ou permanent.

3.2.1. Modifications temporaires

■ Résultant de fabrications ou de stockages différents

Une même installation peut être utilisée à des fabrications ou des stockages différents réalisés par campagnes, c'est-à-dire pendant des périodes successives nettement différenciées.

Il est possible que les procédés de fabrication correspondants (produits ou procédures de travail) induisent, selon les campagnes, un classement différent : zone 0, zone 1, zone 2 ou zone hors danger.

Si un matériel, notamment électrique, n'est pas adapté au type de zone et à la nature du produit, il doit être consigné pendant la durée du classement dans cette zone. En particulier, la consignation électrique doit être réalisée à l'origine du circuit.

Une signalisation de la zone provisoire, des appareils et installations consignés, doit être mise en place.

■ Résultant d'interventions sur les installations

L'exploitation d'une installation implique inévitablement des interventions de maintenance (vérifications, entretien, dépannages, réparations), qui nécessitent souvent l'utilisation de matériel non adapté à la zone considérée.

Suivant l'ampleur et la durée de ces interventions, des procédures spéciales rigoureuses doivent être mises en place : permis ou autorisation de travaux, de feux, de dégazages, de fouilles,...

Ces procédures préalables doivent avoir pour effet de rendre non dangereuses les zones d'intervention, par exemple lors d'un arrêt programmé pour travaux d'entretien et, si cela s'avère nécessaire, l'installation doit être vidangée, dégazée et lavée. Les parties de l'installation, qui ne peuvent faire l'objet de ces mesures, doivent être isolées au moyen de joints pleins ou de dispositifs équivalents.

(6) Quelques gaz combustibles sont plus légers que l'air à la même température. Ils tendent donc à s'accumuler dans les espaces fermés supérieurs. Ils peuvent s'échapper par les aérations hautes : hydrogène ($d = 0,07$) ; ammoniac ($d = 0,60$) ; méthane ($d = 0,55$).

D'autres gaz ou vapeurs ont une densité très proche de celle de l'air et se mélangent facilement à l'ensemble de l'atmosphère d'un espace fermé : éthane ($d = 1,03$) ; alcool méthylique ($d = 1,10$) ; oxyde de carbone ($d = 0,96$).

Mais la plupart des gaz et vapeurs sont plus lourds que l'air. En l'absence de ventilation, ils ont tendance à s'accumuler dans les zones basses (caniveaux, sous-sol, etc.). Ils peuvent s'échapper par les aérations basses.

La procédure de permis (ou d'autorisation) de travaux permet de s'assurer que toutes ces opérations préliminaires ont été correctement effectuées, y compris la délimitation matérielle des zones provisoires (panneaux, barrières, chaînes,...).

3.2.2. Modifications permanentes

Ces modifications peuvent concerner :

- les produits : par exemple pour un même produit fini, changement de solvant d'extraction, ou changement d'un composant de la réaction.
- l'équipement : par exemple remplacement d'un chauffage à la vapeur par un chauffage électrique (ce dernier présente un risque supplémentaire lié à une défaillance de la régulation du chauffage).
- la procédure de travail : par exemple opération réalisée à une température ou à une pression plus élevée, ou horaires de travail différents : journées ou équipes successives.
- l'augmentation des capacités de production.

Enfin, dans le cas d'installations géographiquement proches, il sera nécessaire de voir si une modification apportée à une installation donnée n'induit pas, parallèlement, une délimitation des zones différente sur les installations voisines.

3.3. Exemples de délimitation des zones

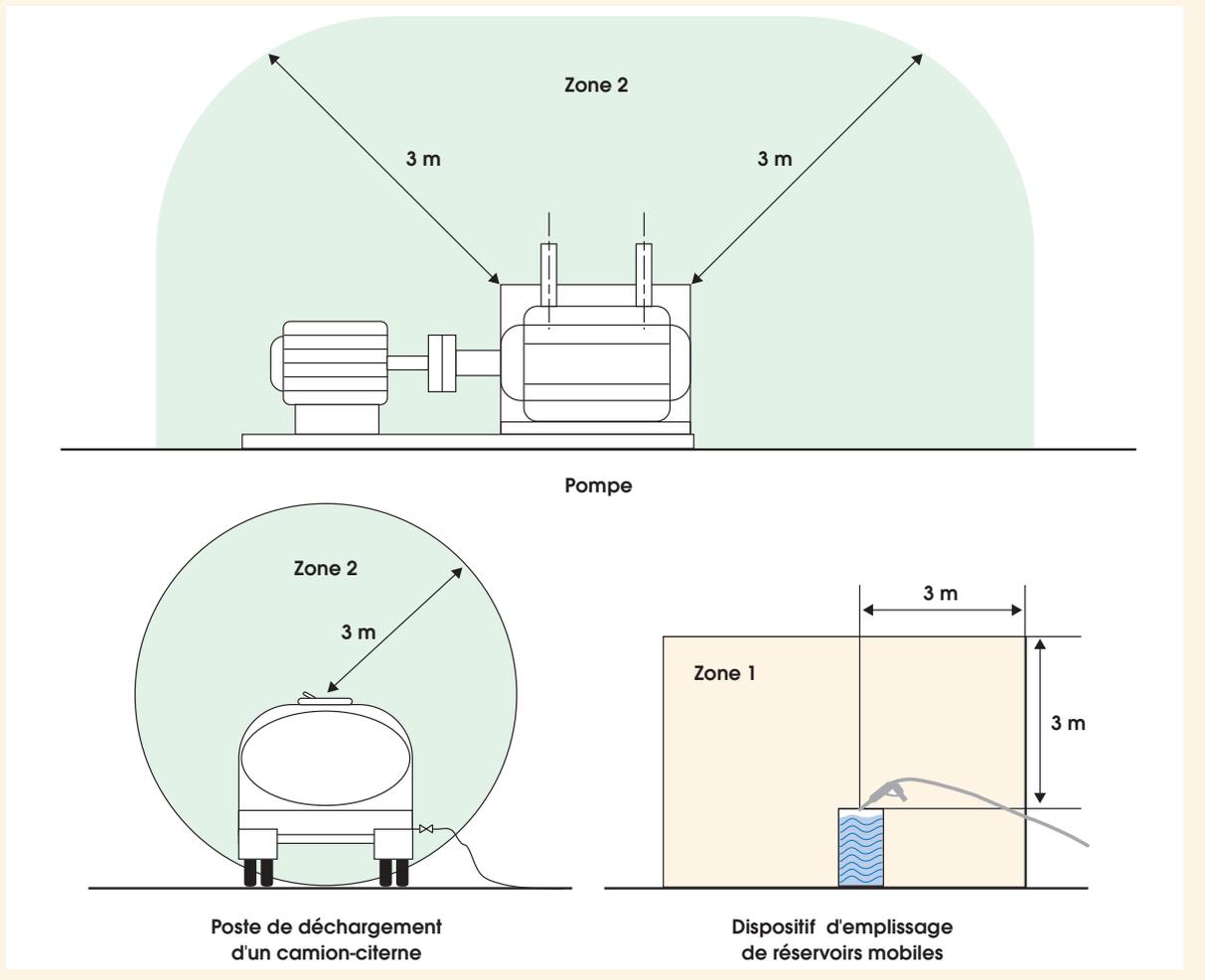
Afin d'expliciter les principes définis précédemment, plusieurs exemples sont présentés à titre indicatif (encadrés 1 à 4 pages suivantes).

Il s'agit :

- des exemples tirés de la réglementation française des dépôts d'hydrocarbures ;
- d'exemples tirés du code des assurances de l'industrie chimique allemande. En effet, certains schémas types de ce code, concernant l'étendue des zones, sont utilisables pour un grand nombre de configurations existant dans l'industrie ;
- du cas d'un atelier de mélange de produits liquides inflammables conçu de trois manières différentes ;
- du cas d'une usine d'épuration d'eaux résiduaires.

Encadré 1 • Exemples tirés de la réglementation française sur les dépôts d'hydrocarbures.

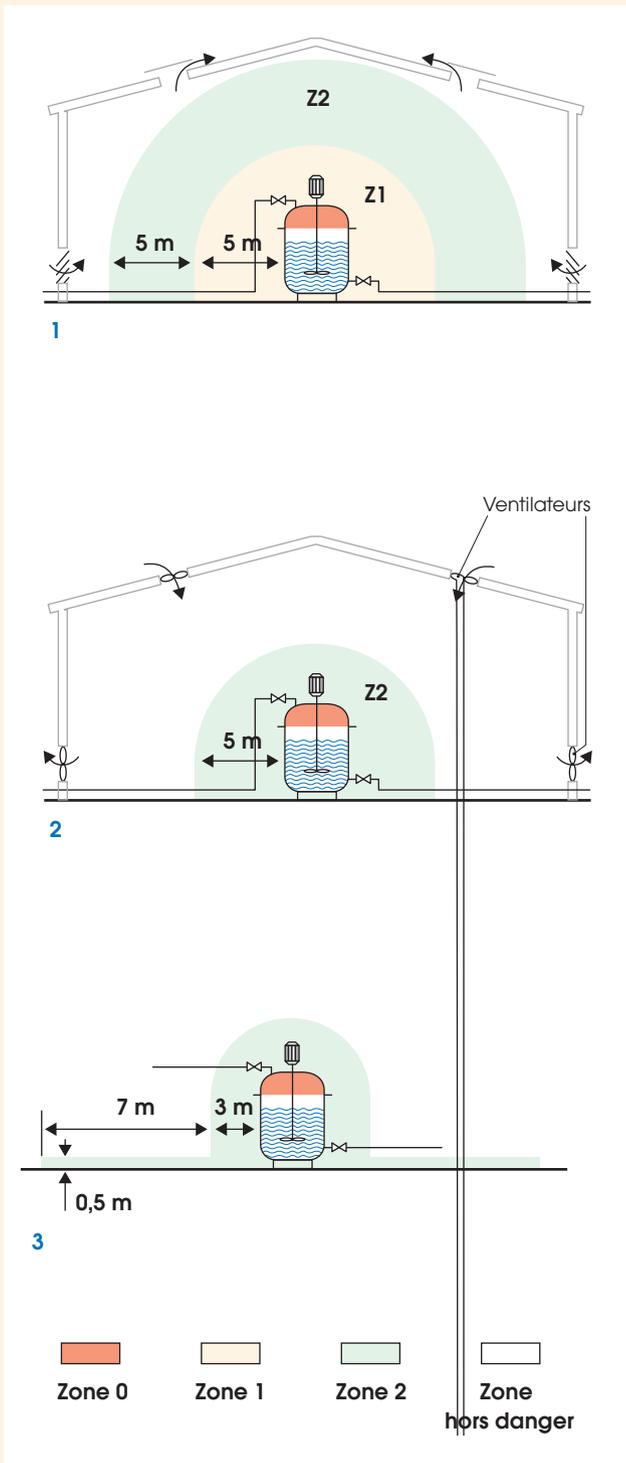
- **Application** : Hydrocarbures liquides de point d'éclair inférieur à 55 °C ou à une température supérieure à leur point d'éclair.



Encadré 2 • Exemples tirés du Code des assurances de l'industrie chimique allemande (*).

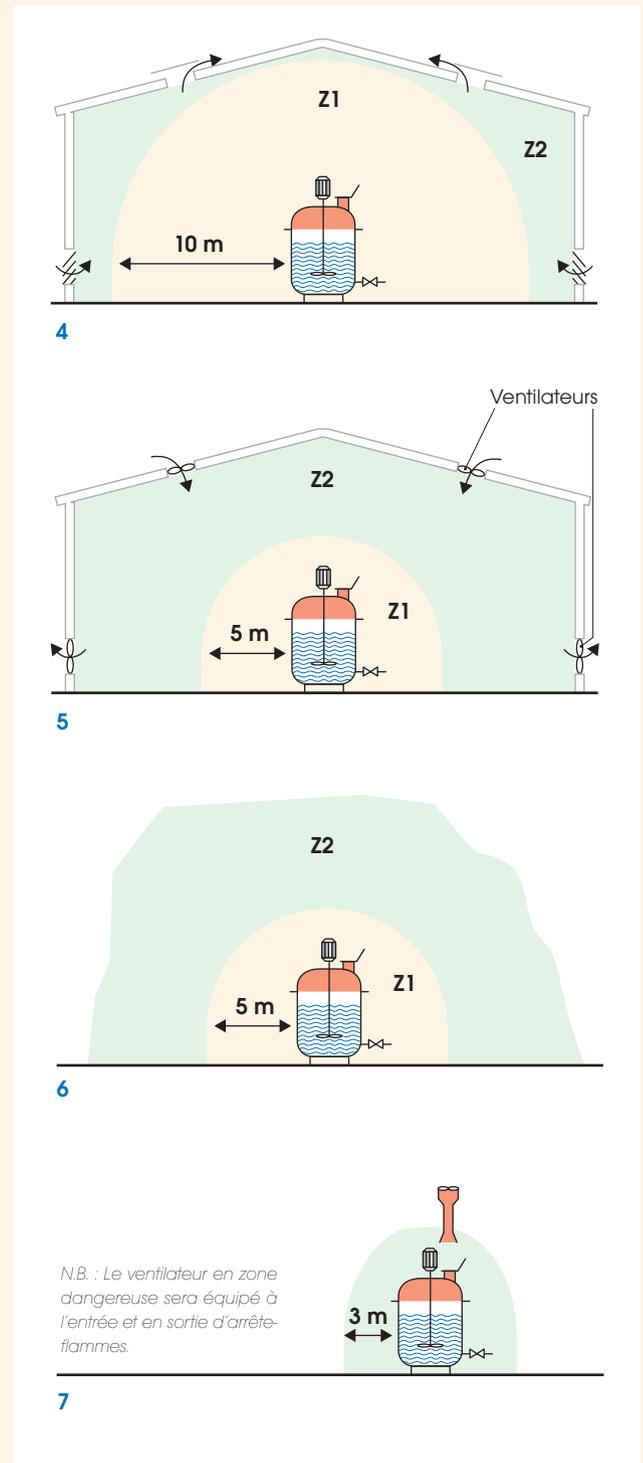
Appareils normalement clos (mais des fuites sont possibles)

• **Application :** Fabrication de produits chimiques où sont mis en œuvre des liquides inflammables de point d'éclair inférieur à 21 °C ou des liquides inflammables à une température supérieure à leur point d'éclair (1, 2, 3).



Appareils ouverts lors du remplissage et de la vidange

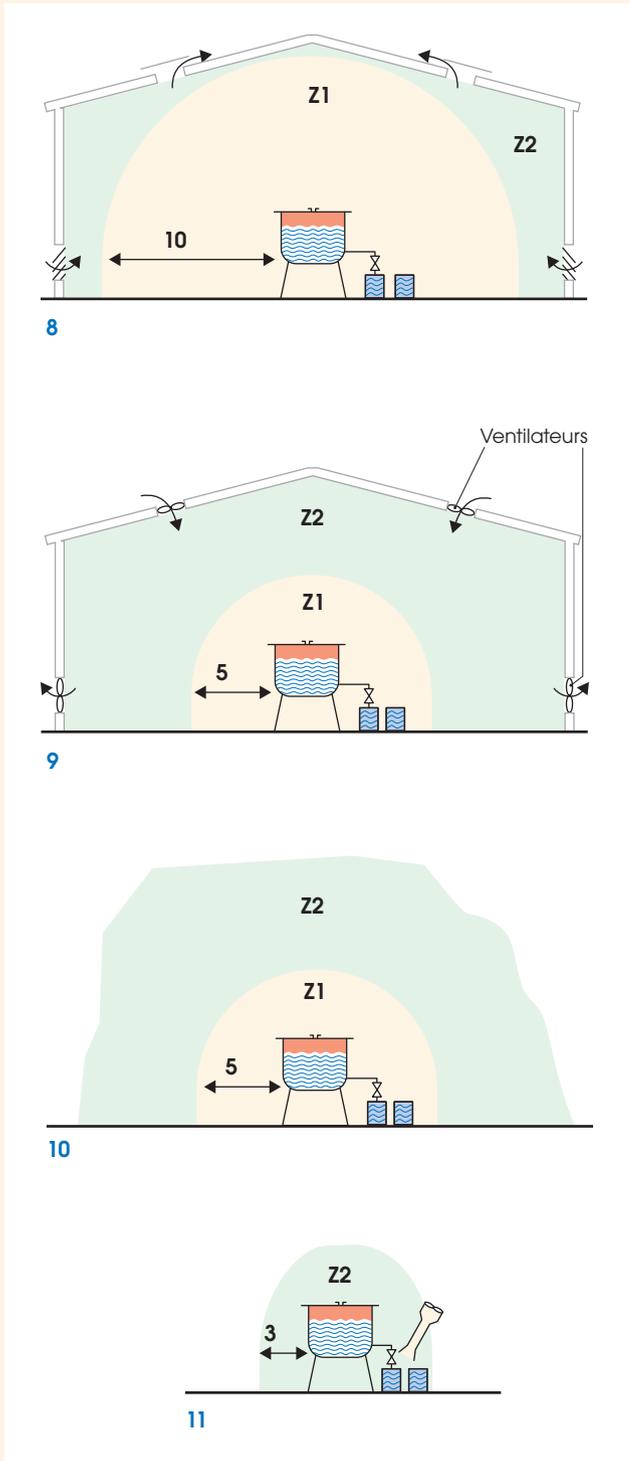
• **Application :** Fabrication de produits chimiques où sont mis en œuvre des liquides inflammables de point d'éclair inférieur à 21 °C ou des liquides inflammables à une température supérieure à leur point d'éclair (4, 5, 6, 7).



(*). Sauf cas particulier, la distance indiquée sur ces schémas correspond au rayon d'une sphère entourant la source qui est à l'origine de la zone.

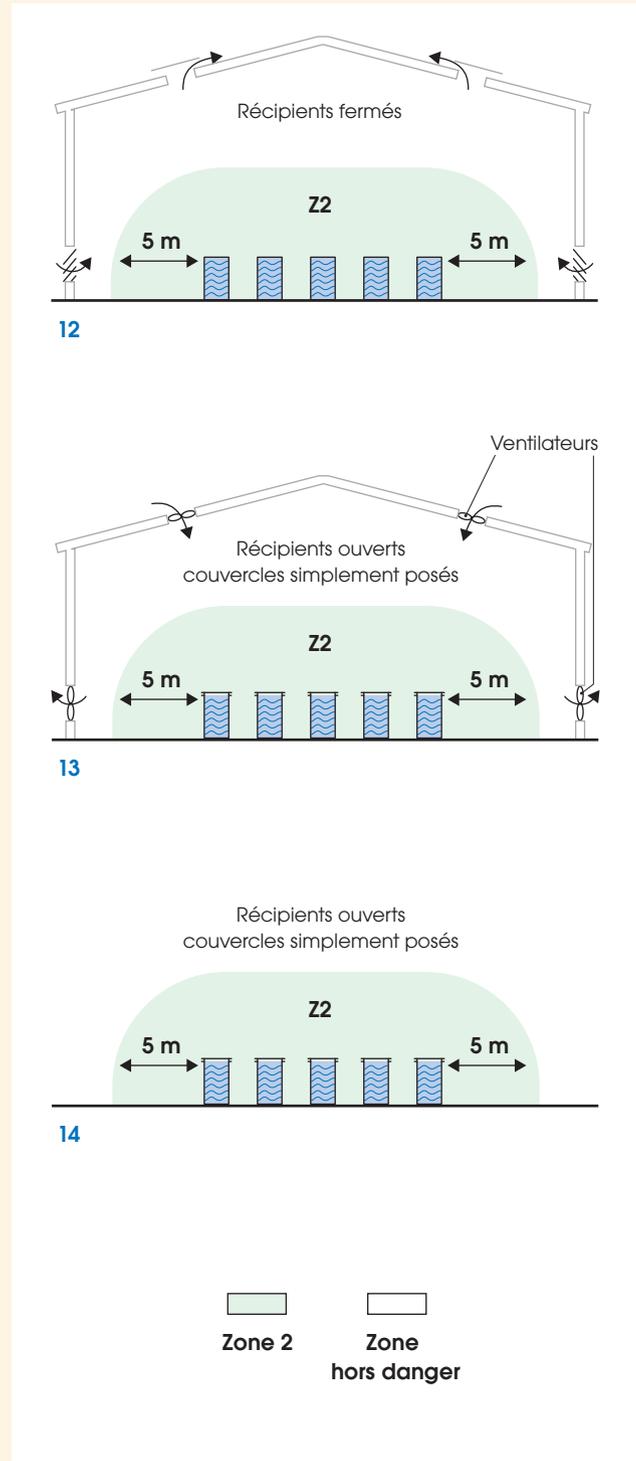
Soutirage de liquides

• **Application** : Soutirage de liquides inflammables de point d'éclair inférieur à 21 °C ou de liquides inflammables à une température supérieure à leur point d'éclair (8, 9, 10, 11).



Dépôt de fûts ou de récipients

• **Application** : Fabrication de produits d'entretien contenant des liquides inflammables de point d'éclair inférieur à 40 °C (12, 13, 14).



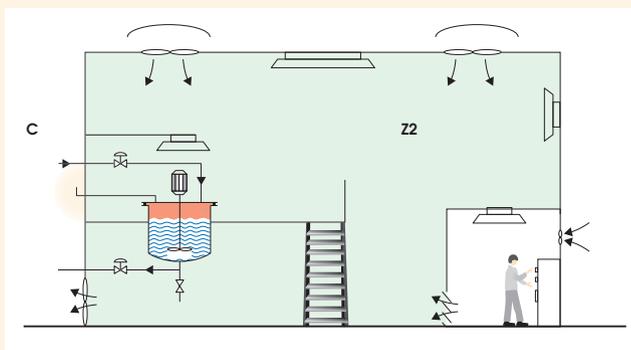
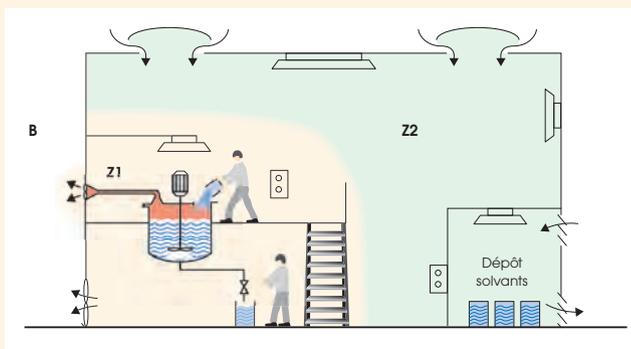
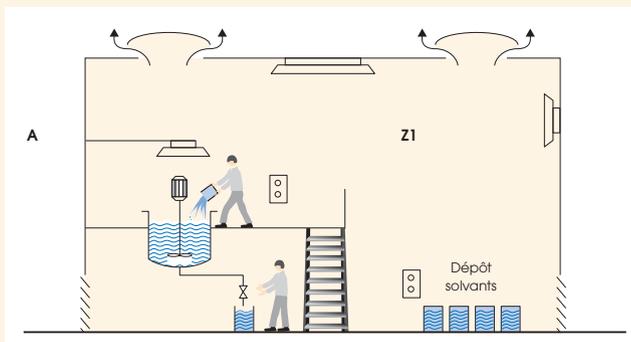
(* Sauf cas particulier, la distance indiquée sur ces schémas correspond au rayon d'une sphère entourant la source qui est à l'origine de la zone.

Encadré 3 • Cas d'un atelier de produits liquides inflammables.

Certains produits utilisés sont inflammables et ont un point d'éclair inférieur à la température ambiante. Les solvants sont mélangés dans une cuve munie d'un agitateur central mû par un moteur électrique. L'opération s'effectue à température ambiante en discontinu.

Il existe un éclairage ponctuel près de la cuve et un éclairage général en plafond et latéralement.

Nous indiquons ci-après, trois conceptions différentes d'un tel atelier en précisant, dans chacun des cas, la délimitation des zones correspondantes.



SOLUTIONS À ÉVITER (PRÉSENCE DE PERSONNEL DANS UNE ZONE À RISQUE)

Cas A

- les solvants sont stockés en bidons, à l'intérieur de l'atelier,
 - ils sont introduits manuellement dans la cuve,
 - la cuve n'est pas munie de couvercle,
 - en fin d'opération, le produit est conditionné manuellement dans des bidons (vidange par gravité),
 - il existe une ventilation générale naturelle.
- Tout l'atelier doit être considéré en zone 1.

Cas B

Par rapport au cas A, les modifications suivantes ont été apportées :

- une séparation matérielle a été réalisée pour isoler le dépôt de solvants de l'atelier de mélanges,
- la cuve est munie d'un couvercle,
- une captation à la source des gaz et vapeurs inflammables, par aspiration mécanique, a été prévue au-dessus de la cuve, ainsi qu'une ventilation mécanique au sol,
- les opérations de remplissage et de vidange de la cuve demeurent manuelles.

Dans ces conditions, il y a présence d'une zone 1 dans et autour de la cuve de mélange, l'étendue de cette zone dépend de l'efficacité de la captation à la source et de la ventilation générale.

Dans les conditions habituelles, le moteur de l'agitateur, l'éclairage situé au-dessus de la cuve, le dispositif de commande de l'agitateur et les moteurs des ventilateurs sont situés dans cette zone 1.

L'éclairage situé en plafond et sur la paroi latérale opposée est en zone 2 ainsi que le dépôt de solvants.

Cas C

Par rapport au cas A, les modifications suivantes ont été apportées :

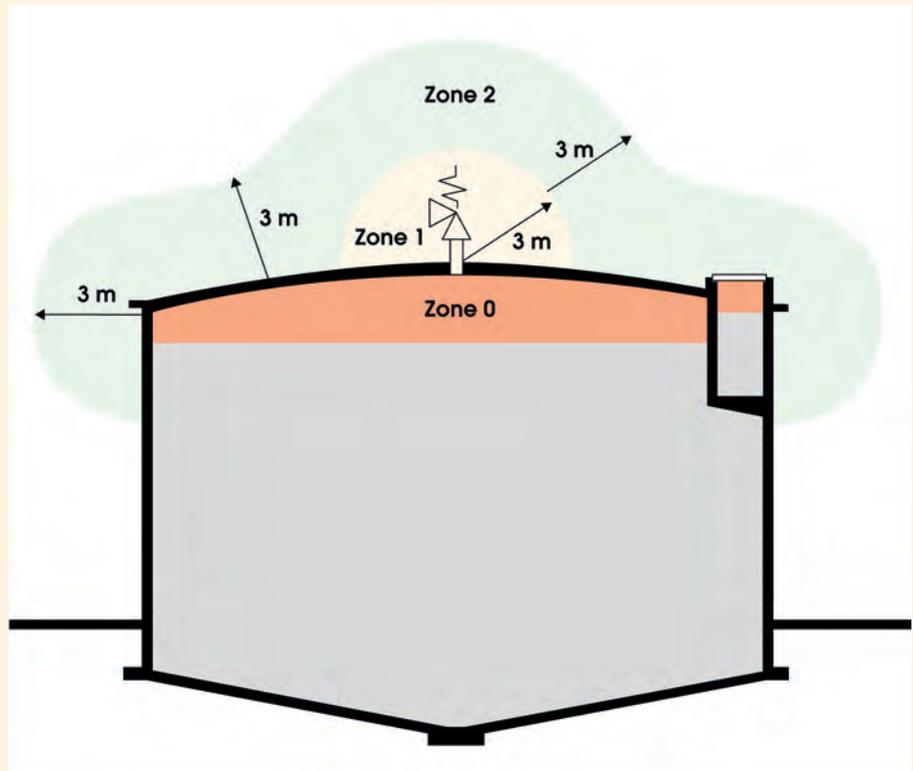
- la cuve est fermée,
- les solvants sont introduits automatiquement dans la cuve à partir des réservoirs de stockage situés à l'extérieur de l'atelier : le local de stockage des solvants est ainsi supprimé,
- le produit est vidangé automatiquement en fin d'opération dans une cuve située à l'extérieur de l'atelier,
- la commande des vannes et des pompes est assurée à distance depuis un tableau de commande situé dans un local mis en surpression par rapport à l'atelier,
- une ventilation générale mécanique a été mise en place.

Dans ces conditions, la totalité de l'atelier constitue une zone 2 sauf l'intérieur de la cuve qui doit être classé en zone 0.

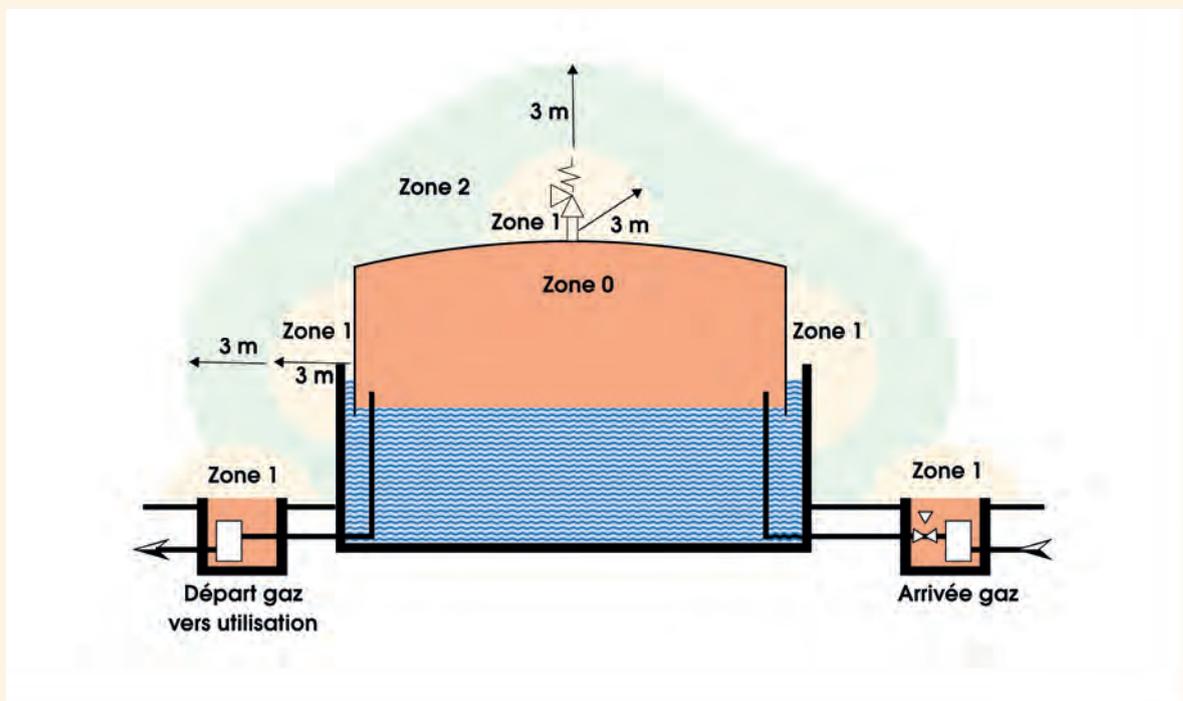
La salle de commande qui est mise en surpression est en zone hors danger.

Encadré 4 • Usine d'épuration d'eaux résiduaires. (Source : Degrémont).

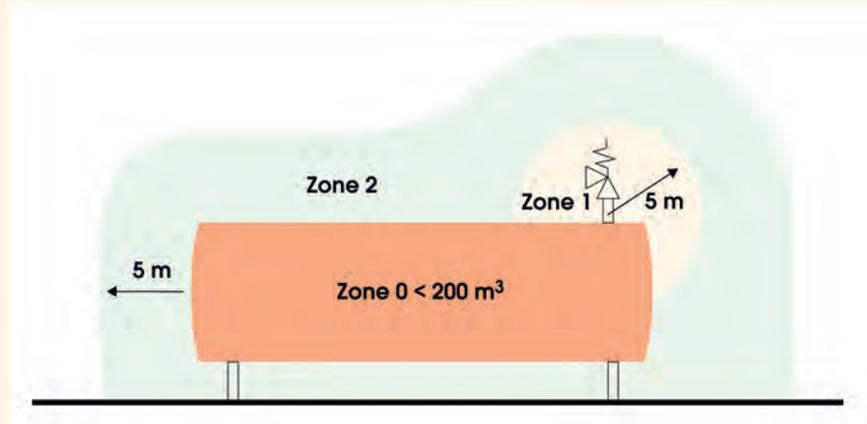
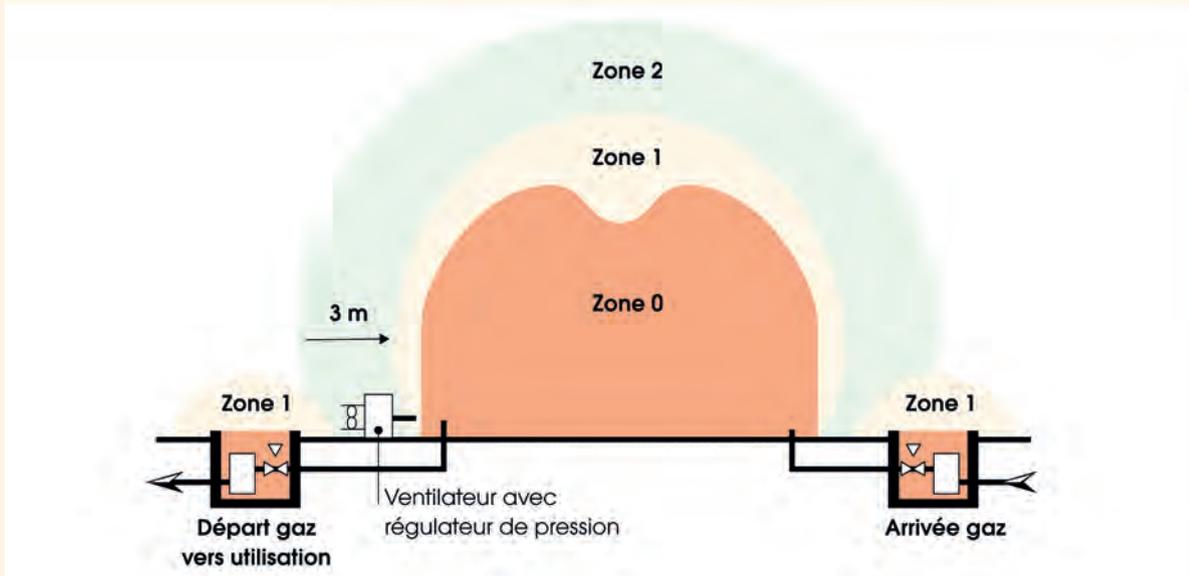
Digesteur



Gazomètre à cloche



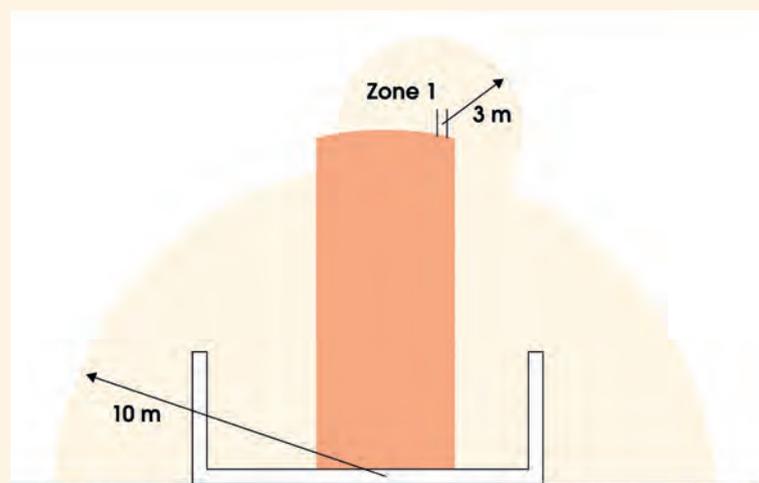
Gazomètre à membrane



Stockage gaz liquéfié sous pression

Cuve liquide inflammable

Point d'éclair <math>< 21 \text{ }^\circ\text{C}</math> (la cuve de rétention est considérée comme zone 1).



4. Surveillance de l'explosivité d'une atmosphère - Explosimètres

La surveillance de l'explosivité d'une atmosphère de gaz et vapeurs inflammables est effectuée au moyen d'explosimètres. Ces matériels sont l'objet des normes homologuées :

- NF EN 50054 (règles générales), NF EN 50055 et NF 50056 (performances des matériels du groupe I), avril 1998,
- NF EN 50057 et NF EN 50058 (performances des matériels du groupe II), juillet 1992.

Le principe de l'explosimètre est de provoquer l'oxydation catalytique d'un gaz ou d'une vapeur et de mesurer l'échauffement produit. Cette réaction se fait sur un filament de platine chauffé par un courant électrique, constituant l'une des branches d'un pont de Wheatstone. La résistance du filament variant avec l'échauffement produit par la combustion catalytique déséquilibre le pont de Wheatstone. Ce déséquilibre, exprimé en pourcentage de la LIE, est lu sur le galvanomètre de l'explosimètre.

La déviation maximale de l'appareil a lieu pour la concentration stoechiométrique du gaz ou de la vapeur dans l'atmosphère, concentration nettement supérieure à la LIE. Pour cette raison, une mesure faite sur un mélange plus riche en combustible que la concentration stoechiométrique peut être interprétée de façon erronée.

En toute rigueur, les indications de l'explosimètre ne sont valables que pour le combustible pour lequel il est étalonné. La mise en œuvre de l'appareil doit se faire conformément aux informations du fabricant.

Un explosimètre reste cependant utilisable pour la plupart des autres gaz et vapeurs, notamment ceux pour lesquels l'utilisation de l'appareil est explicitement prévue par le constructeur. Il est alors nécessaire d'appliquer à la valeur lue un facteur de conversion qui dépend de la nature du gaz présent. Les indications

données par l'explosimètre en atmosphère sur - ou sous - oxygénée sont sans valeur.

Outre la connaissance parfaite de la notice de l'appareil, certaines précautions doivent être prises lors de l'utilisation d'un explosimètre, parmi lesquelles :

- vérifier que le capteur n'a pu être empoisonné par certaines substances (plomb tétraéthyle, composés sulfurés, silicones,...) ou détérioré par des mesurages de mélange trop riche en combustible,
- tester les mélanges trop riches après une dilution connue,
- utiliser l'appareil seulement dans l'air, dans la plage de concentration en oxygène et dans la plage de température prévue par le constructeur,
- vérifier périodiquement l'étalonnage de l'appareil selon la procédure indiquée par le constructeur,
- maintenir en état de fonctionnement l'ensemble de la cellule de mesure (remplacement périodique du filtre et du système de prélèvement par aspiration).

Les explosimètres peuvent être des appareils portatifs destinés à des mesures intermittentes en des lieux divers. Certains appareils assurent la surveillance et la mesure de l'explosivité de l'atmosphère d'un lieu de manière continue, pendant un laps de temps (plusieurs heures) et avertissent du dépassement d'un seuil déterminé de concentration de gaz et vapeurs inflammables. Enfin, d'autres appareils sont destinés à surveiller et mesurer en permanence l'explosivité dans une ou plusieurs des parties d'une installation, en particulier si l'on craint des fuites.

Pour les mesures dans des atmosphères qui peuvent déjà être explosives, l'emploi d'explosimètres de sûreté est nécessaire (ils ne le sont pas tous).

Il existe des détecteurs de présence anormale de gaz (inflammables ou non) dans une atmosphère, basés sur d'autres principes de fonctionnement que les explosimètres. De tels appareils peuvent prévenir d'une fuite de gaz ou de vapeur inflammable.

Prévention des explosions par action sur les gaz et vapeurs inflammables

Pour rendre non inflammable un mélange gazeux, on peut agir sur la concentration du gaz ou de la vapeur en se plaçant soit au-dessous de la LIE soit au-dessus de la LSE. Le mélange combustible/comburant n'étant pas forcément homogène, il convient d'appliquer un coefficient de sécurité aux valeurs des concentrations limites.

La concentration des gaz ou des vapeurs inflammables doit être maintenue à la plus faible valeur possible. Une circulaire du ministère chargé du Travail indique que cette concentration doit rester inférieure à 25 % de la LIE dans l'ensemble de l'installation et à 10 % de cette limite si des personnes travaillent dans cette atmosphère. Pour la LSE, si théoriquement au-dessus de cette limite, il y a absence de danger, il faut tenir compte des périodes transitoires pour l'atteindre (périodes au cours desquelles on va se situer dans le domaine d'explosivité) et des défaillances éventuelles qui peuvent avoir pour conséquence une diminution de la concentration en dessous de la LSE.

1. Diminution de la concentration de gaz ou vapeurs inflammables par la ventilation ou l'aération

La ventilation doit se faire par extraction dans les zones d'accumulations des gaz ou vapeurs et, de préférence, dans les parties basses des locaux pour les gaz et vapeurs plus lourds que l'air.

La captation des vapeurs doit se faire le plus près possible de la source d'émission.

L'air neuf de compensation, entrant naturellement ou



Photo 1 • Ventilateur pour zone 0, équipé d'arrête-flammes (Source : ALSATEC).

par ventilation pulsée, doit être amené en des zones éloignées de celles où se fait l'extraction.

On recommande que les dispositifs d'extraction soient capables de maintenir une dépression de 25 Pa, toutes ouvertures fermées et d'assurer une circulation d'air de 0,30 m/s minimum à travers les ouvertures, les accès et les communications étant ouverts normalement.

Les ventilateurs d'extraction ne doivent pas être susceptibles d'allumer un mélange inflammable ou être conçus pour résister à une explosion et être équipés à l'entrée et à la sortie d'arrête-flamme. Une construction avec moteur de sûreté et pâles anti-étincelle n'est pas suffisante, l'échauffement dû à un grippage de l'arbre par exemple pouvant initier une explosion.

L'aération par circulation d'air dans l'ensemble d'un local est suffisante dans le cas de faibles débits de gaz ou de vapeurs pour maintenir inexplosible l'atmosphère. Il en est ainsi si la fuite prévisible de gaz ou de vapeur correspond à moins de 20 % de la LIE pour

un volume égal au renouvellement d'air prévisible du local.

Le **débit** du renouvellement doit être adapté au débit des gaz ou vapeurs produits dans l'atmosphère d'une enceinte ou d'un local, atelier, tunnel, four de séchage où sont évaporés des solvants, atelier de charge d'accumulateurs où se dégage de l'hydrogène, chaufferies où peuvent se produire des fuites de gaz ou de vapeurs, magasins où sont stockés des liquides présentant une surface libre, etc.

Le débit horaire du renouvellement V doit être supérieur à :

$$\frac{100}{LIE} \cdot K \cdot v$$

où v est le débit horaire de gaz ou de vapeur inflammable et K un coefficient de sécurité choisi pour que la concentration de gaz ou de vapeur inflammable dans l'atmosphère ne dépasse pas $\frac{LIE}{K}$ (K sera pratiquement choisi entre 4 et 10), la LIE du gaz ou de la vapeur étant exprimée en volume.

Lorsqu'on doit rendre inexplosible l'atmosphère d'une enceinte, où ne sont pas émises de façon continue des quantités importantes de gaz ou vapeurs dangereux, la ventilation doit renouveler au moins 5 fois le volume de cette enceinte (cf § 3.3, *figure 32* : le graphique montre que la proportion de tout constituant du mélange est divisée par plus de 100). Dans le cas des chambres de combustion (chaudières, etc.), il est pratiqué des pré- et post-balayages.

Dans des réservoirs ou des citernes ayant contenu des liquides inflammables, après nettoyage et extraction des mélanges gazeux dangereux (opération dite « dégazage »), des résidus dans le fond ou sur les parois peuvent encore émettre des vapeurs en quantité suffisante pour provoquer une inflammation. Ce fait est particulièrement à craindre si les parois du réservoir sont rouillées ou rugueuses ou si l'on chauffe les parois en vue de travaux à y effectuer.

On sera donc amené à maintenir ou renouveler, au besoin, la ventilation dans de telles enceintes pour assurer la non-explosibilité de leur atmosphère. Il est possible également de neutraliser l'atmosphère explosible par introduction dans la capacité de gaz inerte ou d'eau. Lorsqu'on extrait d'une enceinte une atmosphère chargée de gaz ou de vapeurs inflammables, il est souhaitable de récupérer ces derniers en aval (sur des lits de charbons actifs par exemple) ou de les brûler en torchères.

La vérification par explosimètre de l'inexplosivité des atmosphères obtenues après ventilation est toujours souhaitable et souvent nécessaire, notamment si on effectue des travaux à feu nu dans les enceintes ou sur les parois extérieures.

2. Maintien de la proportion de gaz ou vapeurs inflammables au-dessus de la LSE

Cette proportion se trouve naturellement réalisée dans des enceintes closes, en présence de liquides inflammables, dont la pression de vapeur saturante à la température ambiante correspond à des concentrations nettement supérieures à la LSE : par exemple, réservoirs ou citernes contenant de l'essence d'automobile à température supérieure à 0 °C, citernes de pétrole brut. Les stockages ou les traitements de liquides inflammables sous leur propre pression de vapeur constituent des cas particuliers de cette nature, sous réserve qu'il s'agisse de substances présentant des points d'éclair inférieurs à la température ambiante de stockage.

Dans de telles conditions, des risques d'explosion proviennent, selon que la pression des réservoirs est inférieure ou supérieure à la pression extérieure, soit de l'entrée intempestive d'air dans les enceintes, soit de l'écoulement de la phase liquide ou de la fuite de vapeurs ou gaz inflammables en dehors de celles-ci. La prévention par maintien de concentrations supérieures à la LSE dans ces conditions n'est envisageable que pour des opérations ou des traitements dans des installations minutieusement réalisées et surveillées de façon continue (*photo 2*).

3. Prévention des explosions par action sur les propriétés comburantes de l'atmosphère. Mise à l'état inerte ou « inertage »

L'introduction d'un gaz inerte dans un mélange d'air avec un gaz ou des vapeurs inflammables entraîne l'appauvrissement relatif du mélange en oxygène. Au-dessous d'une certaine proportion d'oxygène, appelée MOC (*minimum oxygen content*), l'inflammation est impossible (chapitre I, tableau 12). Le mélange combustible/comburant n'étant pas forcément homogène, il convient d'appliquer un coefficient de sécurité de 0,5. Pour de nombreux gaz et vapeurs, la MOC est comprise entre 10 et 15 % ; aussi dans la pratique, on se fixe comme objectif une teneur résiduelle en oxygène inférieure à 5 %.

L'emploi de gaz inertes, pour rendre ininflammable une atmosphère ou un liquide, trouve son application dans les cas suivants :

- Stockage de liquides inflammables dans tous types de réservoirs ou de citernes.
- Transferts, dépotages et soutirages de liquides inflam-

mables par mise sous pression de gaz inerte des réservoirs, fûts, etc., auxquels sont raccordées des canalisations.

- Traitements et opérations sur des liquides inflammables ou en présence de tels liquides, dans des réacteurs, des fours, des colonnes de distillation, des citernes ou d'autres enceintes (par exemple : le lavage à chaud des citernes contenant des résidus d'hydrocarbures, à bord de pétroliers).
- Essorage et séchage de produits pour l'élimination de liquides inflammables (solvants)⁽⁷⁾.
- Purge d'installations de traitements (réacteurs, fours, etc.), après fonctionnement et en attente d'un prochain démarrage.
- Mise en condition des réservoirs, citernes, corps creux ayant contenu des liquides inflammables pour effectuer en sécurité des travaux notamment à feux nus, à proximité et sur leurs parois extérieures.
- Mise en condition d'inertie « totale » d'un gaz ou d'une vapeur inflammable pour garantir son inflammabilité, quelle que soit la quantité d'air qui puisse lui être ajoutée (prévention des explosions qui seraient consécutives à des fuites de gaz ou de vapeurs inflammables hors de réservoirs ou de canalisations).
- Mise en condition d'inertie « totale » d'un réservoir contenant de l'air, quelle que soit la quantité d'un gaz ou d'un liquide inflammable qui puisse y être introduite (pour stockage, par exemple).

Les différents gaz inertes utilisés sont, le plus fréquemment : l'azote, le dioxyde de carbone, les gaz de combustion (contenant environ 85 % d'azote) ; plus rarement la vapeur d'eau, l'argon...

L'eau peut remplir le même rôle que les gaz inertes pour réaliser la mise en inertie totale d'enceintes de volume limité, en vue de travaux par point chaud par exemple.

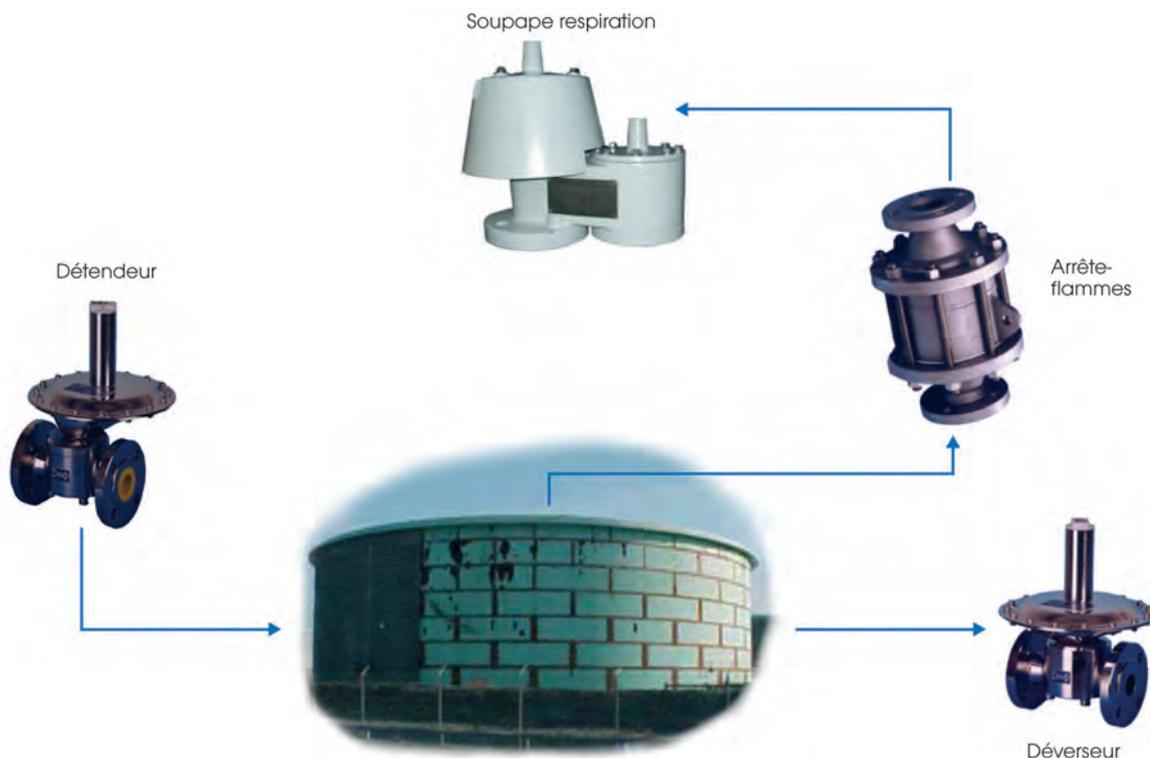
Plusieurs types de représentations graphiques rendent compte des caractéristiques théoriques d'inflammabilité des mélanges possibles d'un gaz ou d'une vapeur inflammable, d'air et de gaz inerte. Les trois types suivants sont ceux le plus souvent rencontrés.

3.1. Inflammabilité d'un mélange en fonction des proportions d'oxygène et de gaz ou vapeur combustible

Dans ce graphique en forme de triangle rectangle, chacun des trois sommets représente un mélange réduit à 100 % d'oxygène, 100 % d'azote ou 100 % de gaz ou de vapeur combustible. Les mélanges représentés par des points situés sur un côté sont réduits à deux composants.

(7) Cf. la recommandation R 208 de la CNAMTS "Centrifugation de mélanges contenant un liquide inflammable ou un produit solide instable".

Photo 2 ● Cuve inertée azote avec protection arrête-flammes (Source : ALSATEC).



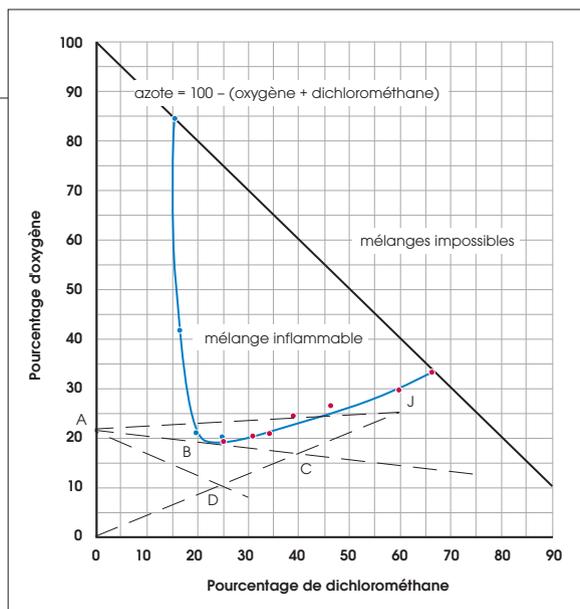


Figure 13 • Inflammabilité des mélanges vapeur de dichlorométhane, oxygène, azote.

Un exemple en est le graphique de la figure 13, relatif à l'inflammabilité de vapeurs de dichlorométhane dans l'air plus ou moins appauvri ou enrichi en oxygène, le gaz inerte étant de l'azote (températures convenables pour obtenir les pressions données, soit < 40 °C).

Sur ce diagramme, J étant un point représentant un mélange donné, A étant le point représentant la proportion d'oxygène dans l'air normal :

- la droite JA représente un balayage du mélange considéré par l'air (l'introduction d'air, dilution, échappement du mélange ainsi formé de l'enceinte). Dans le cas de la figure, cette opération fait passer le mélange par un état inflammable ;
- la droite JO représente un balayage du mélange par de l'azote ;
- les mélanges représentés par des points situés en dessous de la tangente AB à la courbe (D, par exemple) ne risquent pas de devenir explosibles lors d'un balayage du mélange par de l'air, autrement dit quelle que soit la quantité d'air ajoutée au mélange.

Les deux diagrammes simplifiés (figures 14 et 15) sont relatifs à l'hydrogène et l'oxyde de carbone en mélange avec de l'air et de l'azote.

Sur ces deux diagrammes, la proportion % d'azote calculée par différence $100 - (\% \text{ d'oxygène} + \% \text{ de gaz})$ comprend celle de l'azote de l'air et celle de l'azote ajouté pour la mise à l'état inerte.

On applique la même démarche que celle relative au graphique concernant le dichlorométhane, J étant un point représentant un mélange donné, A étant le point représentant la proportion d'oxygène dans l'air normal :

- la droite JA représente un balayage du mélange par de l'air ;
- la droite JO représente un balayage du mélange par de l'azote.

3.2. Inflammabilité d'un mélange en fonction des proportions de gaz inerte ajouté et de gaz ou vapeur combustible

Sur les graphiques des figures 14 et 15, la proportion de gaz ou de vapeurs inflammables dans le mélange est lue sur le côté horizontal du rectangle. La concentration de gaz inerte ajouté par rapport à l'atmosphère initiale (sans gaz ou vapeur inflammable) est lue sur l'autre côté. Les balayages par de l'air ou un gaz inerte sont représentés par des courbes qui ne sont pas des droites bien qu'elles en soient très voisines pour de faibles concentrations de gaz ou de vapeur (jusqu'à 10 % environ) ; on voit sur la figure 17, relative à l'hydrogène, qu'une courbe représentant les mélanges théoriques contenant initialement 30 % d'hydrogène et des concen-

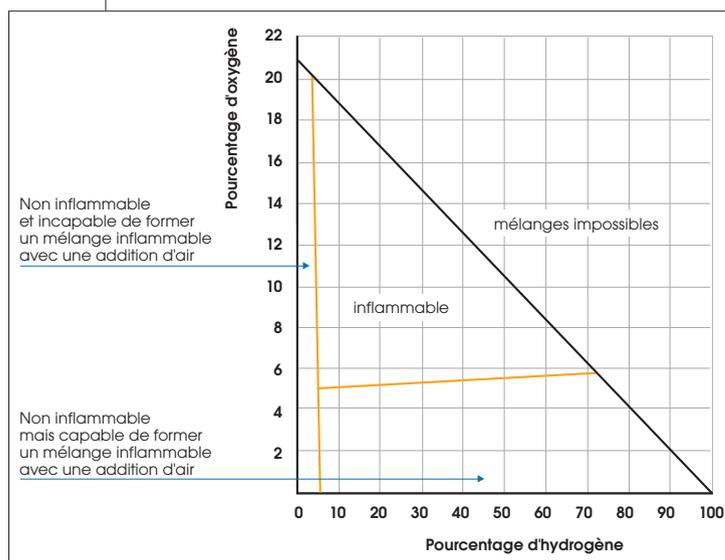


Figure 14 • Inflammabilité des mélanges hydrogène, air, azote.

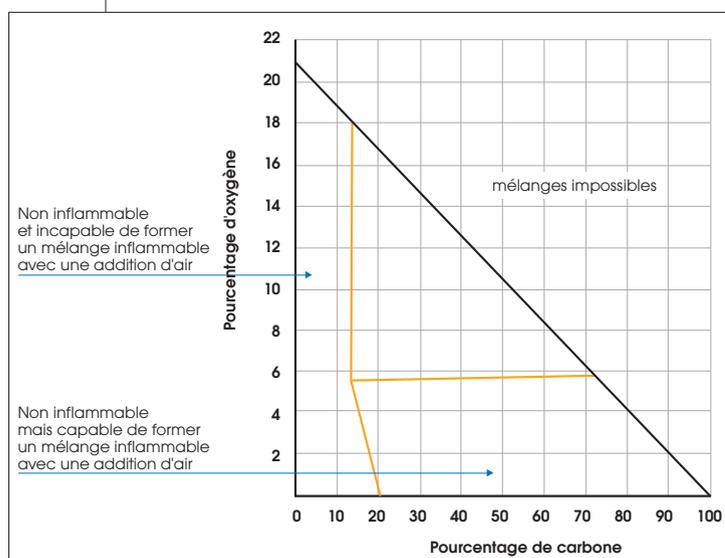


Figure 15 • Inflammabilité des mélanges oxyde de carbone, air, azote.

trations de 0 à 100 % de gaz inerte est sensiblement différente d'une droite.

Le graphique de la *figure 16* est relatif à l'inflammabilité des vapeurs d'essence en mélange avec de l'air et différents gaz inertes (azote, dioxyde de carbone, gaz d'échappement, trois hydrocarbures halogénés).

Les mélanges représentés par des points situés au-dessus des domaines d'inflammabilité peuvent passer par un état inflammable lors d'une addition d'air.

Sur ce graphique, le point E représentant un mélange donné de vapeur et d'air (ici à 6 % de vapeur) :

- un balayage par un gaz inerte est figuré sensiblement par une droite joignant E au point 0 % de vapeur (100 % de gaz inerte) ;
- un balayage par de l'air d'un mélange représenté par

un point du diagramme - R par exemple - est figuré sensiblement par le segment de la droite RO ; cette opération peut faire passer par un état explosible ;

- les mélanges représentés par des points situés en dessous de la tangente - telle OQ - à la courbe relative à un gaz inerte (ici le dioxyde de carbone), ne risquent pas de devenir explosibles lors d'un balayage du mélange par de l'air, autrement dit quelle que soit la quantité d'air qu'on ajoute au mélange.

Les *figures 17 à 29* correspondent à des graphiques analogues relatifs à des mélanges avec de l'air des gaz et vapeurs suivants : hydrogène, benzène, 1,3-butadiène, butane, cyclopropane, éthane, éthylène, hexane, méthane, oxyde de carbone, pentane, propane, propène.

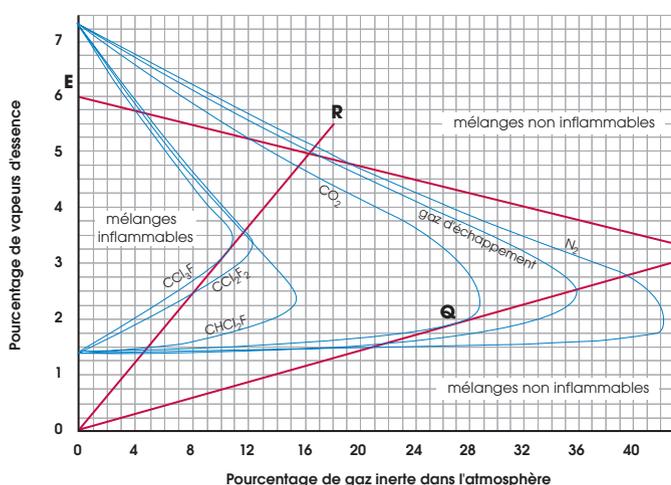


Figure 16 • Inflammabilité de vapeurs d'essence d'automobiles en mélange avec de l'air et différents gaz inertes.

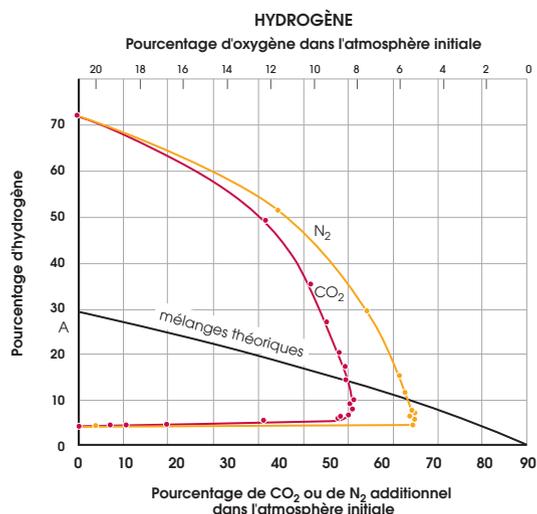


Figure 17 • Limites d'inflammabilité de l'hydrogène dans l'air avec le dioxyde de carbone ou l'azote.

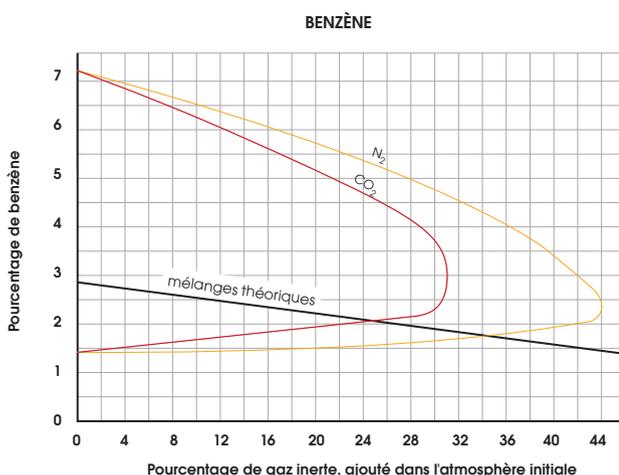


Figure 18 • Limites d'inflammabilité du benzène dans des mélanges d'air et d'azote ou d'air et de dioxyde de carbone.

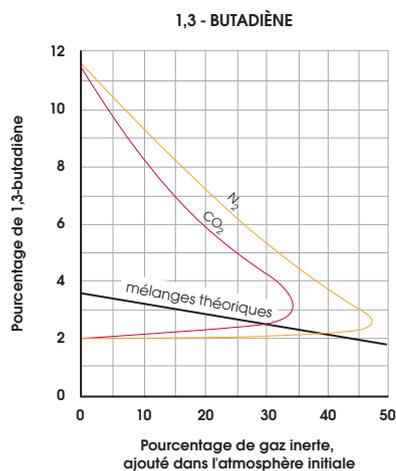


Figure 19 • Limites d'inflammabilité du 1,3-butadiène dans des mélanges d'air et d'azote ou d'air et de dioxyde de carbone.

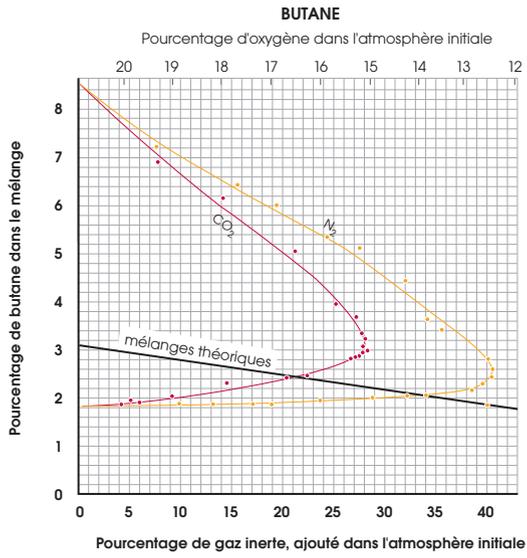


Figure 20 : Limites d'inflammabilité du butane dans des mélanges d'air et d'azote ou d'air et de dioxyde de carbone.

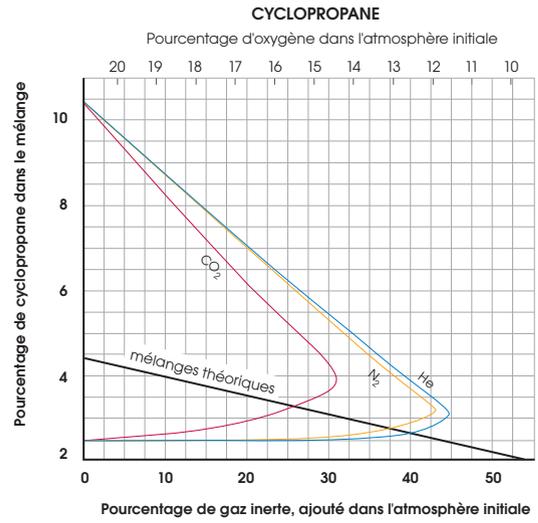


Figure 21 : Limites d'inflammabilité du cyclopropane dans des mélanges d'air et d'azote ou d'air et de dioxyde de carbone ou d'air et d'hélium.

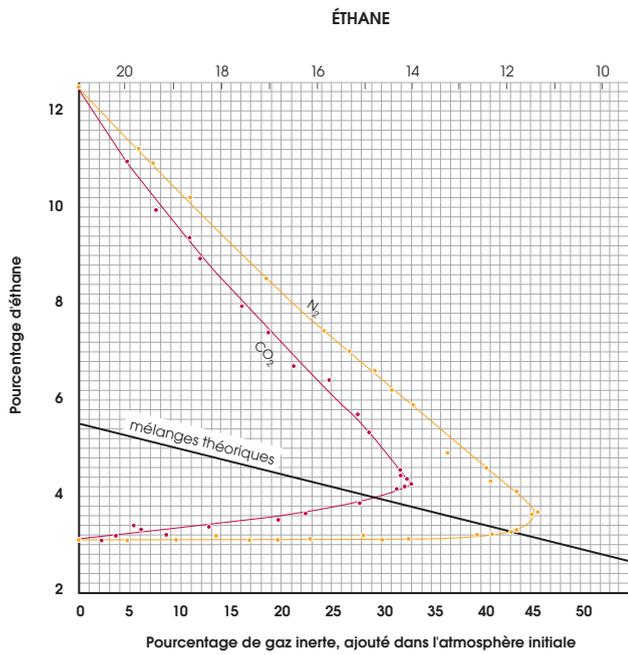


Figure 22 : Limites d'inflammabilité de l'éthane dans des mélanges d'air et d'azote ou d'air et de dioxyde de carbone.

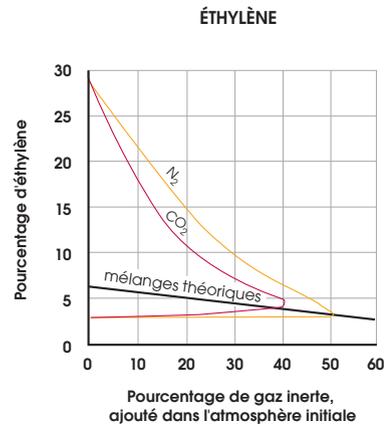


Figure 23 : Limites d'inflammabilité de l'éthylène dans des mélanges d'air et d'azote ou d'air et de dioxyde de carbone.

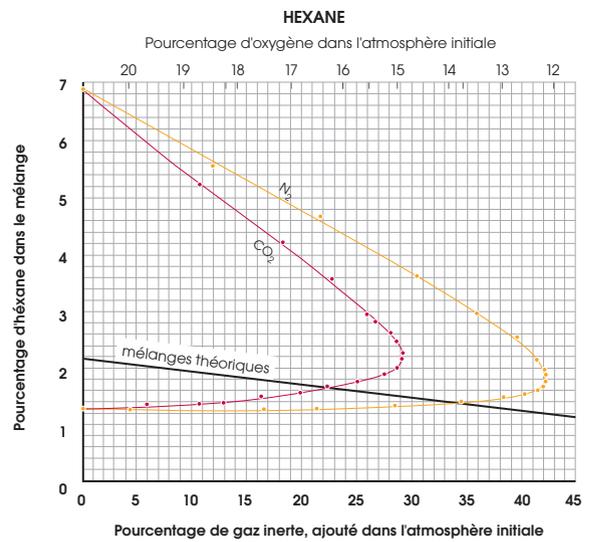


Figure 24 : Limites d'inflammabilité de l'hexane dans des mélanges d'air et d'azote ou d'air et de dioxyde de carbone.

Figure 25 • Limites d'inflammabilité du méthane dans des mélanges d'air avec des gaz suivants : dioxyde de carbone, vapeur d'eau, hélium et argon.

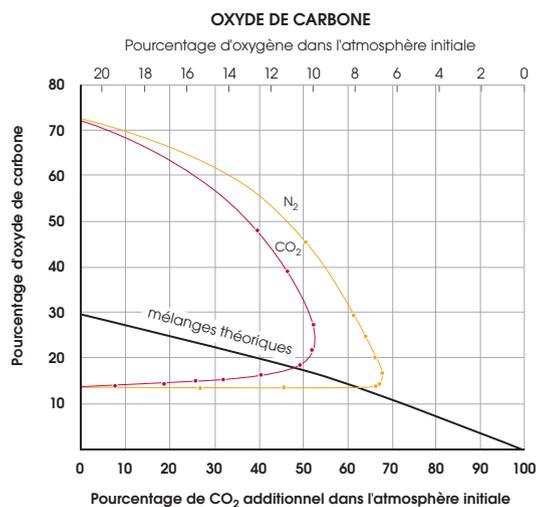
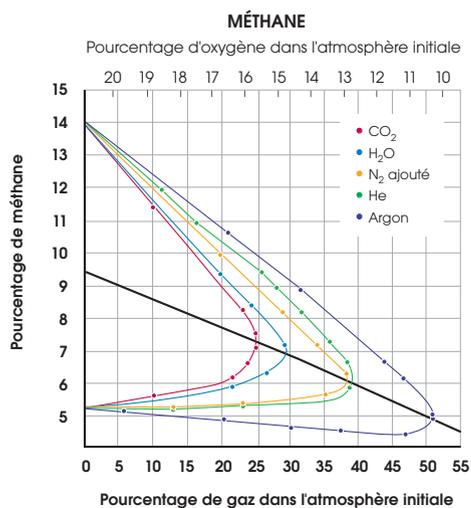


Figure 26 • Limites d'inflammabilité de l'oxyde de carbone dans l'air avec le dioxyde de carbone ou l'azote.

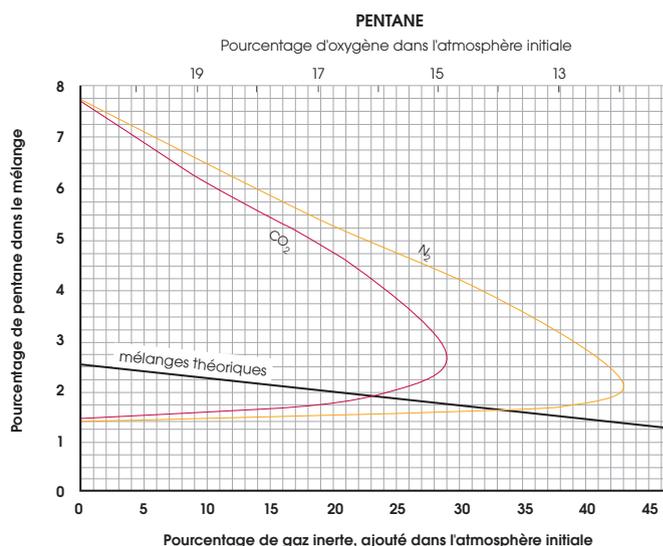


Figure 27 • Limites d'inflammabilité du pentane dans des mélanges d'air et d'azote, ou d'air et de dioxyde de carbone.

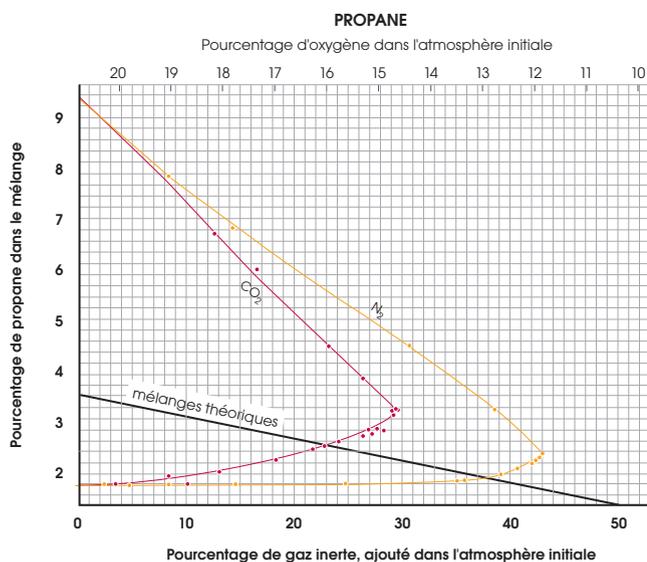


Figure 28 • Limites d'inflammabilité du propane dans des mélanges d'air et d'azote, ou d'air et de dioxyde de carbone.

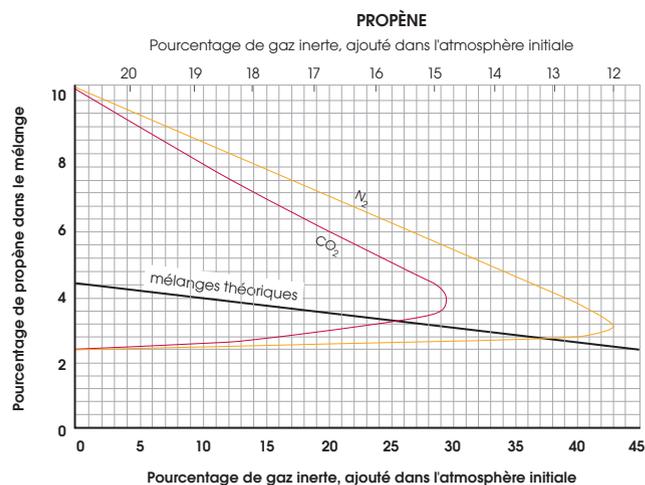


Figure 29 • Limites d'inflammabilité du propène dans des mélanges d'air et d'azote, ou d'air et de dioxyde de carbone.

3.3. Inflammabilité d'un mélange ternaire en fonction de proportions des trois composants - gaz ou vapeur combustible, oxygène ou air, gaz inerte - par un diagramme triangulaire

À la forme près, un tel graphique est analogue à ceux présentés précédemment. Chaque côté du triangle constitue l'échelle (généralement comme dans les

graphiques ci-après, de 0 à 100 %) des proportions d'un des constituants. Le sommet qui correspond à l'extrémité « 100 % » de cette échelle représente un mélange réduit à ce composant pur. Les mélanges réduits à deux composants sont figurés sur les côtés du triangle.

Pour connaître la proportion d'un composant dans un mélange représenté par un point quelconque de la surface du triangle, il faut mener de ce point la parallèle au côté opposé au sommet figurant 100 % (ou la proportion maximale de l'échelle) du composant et lire la proportion % à l'intersection de cette parallèle avec le côté constituant l'échelle du composant.

Les deux diagrammes des figures 30 et 31 sont relatifs aux mélanges hydrogène/air/azote ou dioxyde de carbone sous température et pression normales, éthylène/air/azote à 250 °C/9,5.10⁵ Pa et sous température et pression normales.

Sur chacun de ces graphiques, les droites issues d'un point quelconque, figurant un mélange donné, et passant par l'un des sommets du triangle « 100 % de gaz ou vapeur inflammable » et « 100 % d'air » représentent le remplacement progressif du mélange par balayage de l'enceinte, par exemple, respectivement par le gaz ou la vapeur et par l'air. Les tangentes à la courbe, issues de l'un de ces deux sommets du triangle, permettent de déterminer les proportions du gaz inerte à réaliser pour rendre non inflammable le mélange, respectivement :

- en cas d'addition illimitée de gaz ou vapeur combustible (soit, pour l'hydrogène, 75 % d'azote ou 65 % de dioxyde de carbone ; pour l'éthylène à 250 °C, sous 9,5.10⁵ Pa, 75 % d'azote) ;
- en cas d'addition illimitée d'air (soit, pour l'hydrogène, 95 % d'azote ou 91 % de dioxyde de carbone ; pour l'éthylène à 250 °C, sous 9,5.10⁵ Pa, 97 % d'azote).

Enfin, la droite parallèle au côté-échelle des « % de gaz inerte » et laissant à droite juste la totalité de la courbe, indique à son intersection avec l'échelle des « % d'air », la proportion maximale d'air (donc d'oxygène) pour éviter toute explosion dans une enceinte contenant le mélange (pour l'hydrogène, 23 % d'air, soit 4,8 % d'oxygène ; pour l'éthylène, 13 % d'air, soit 2,7 % d'oxygène).

Les tableaux des quantités de gaz inerte nécessaire à la prévention de l'inflammation de gaz ou vapeurs, présentent de manière simplifiée, les indications données par le calcul ou par des graphiques semblables à ceux des paragraphes précédents. Pour assurer, par

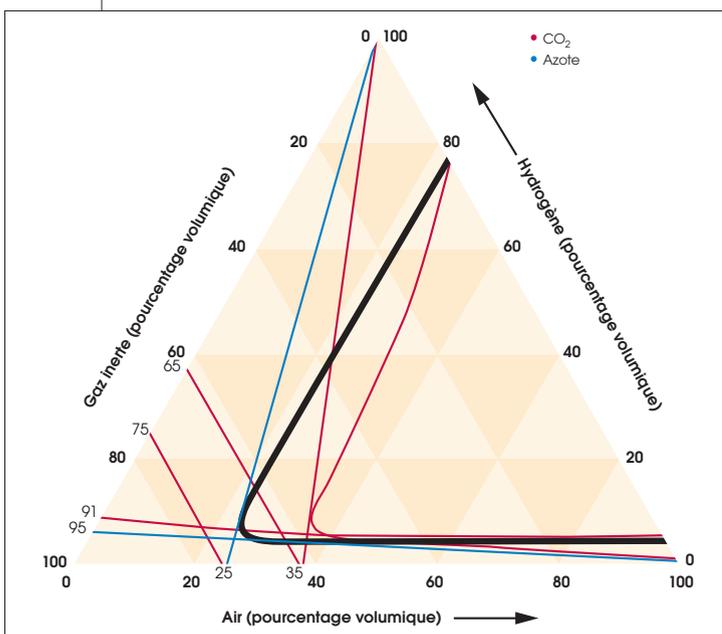


Figure 30 • Domaine d'explosibilité des systèmes H₂/N₂/Air et H₂/CO₂/Air à 20 °C sous 1 bar (d'après CONRAD). (1 bar = 10⁵ Pa).

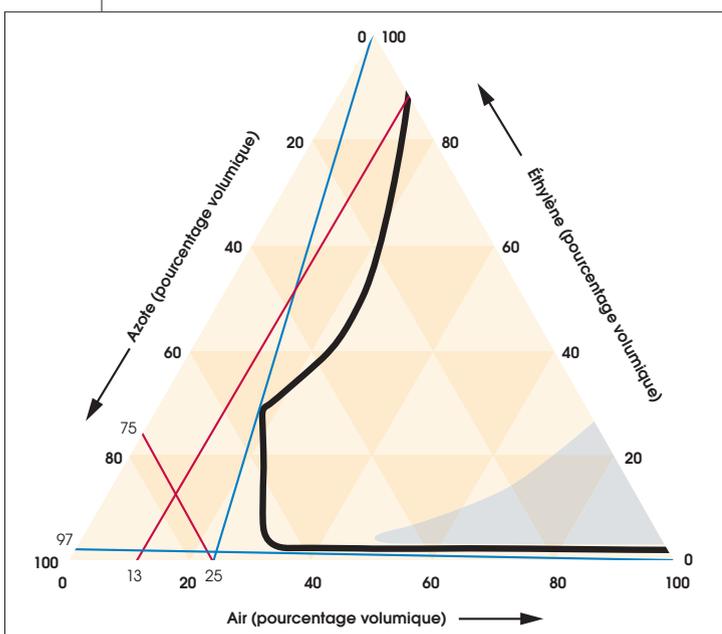


Figure 31 • Domaine d'explosibilité du système C₂H₄/N₂/Air à 250 °C sous 9,5 bars et sous T.P.N. (aire grise) (d'après CONRAD) (1 bar = 10⁵ Pa).

addition d'azote ou de dioxyde de carbone, la mise à l'état inerte d'un mélange de gaz ou de vapeurs inflammables courants en proportion quelconque et d'air, la concentration en oxygène doit être au plus celle indiquée au *tableau 12* (chapitre 1). Le rapport minimal au volume d'air du volume d'azote ou de dioxyde de carbone à ajouter est rappelé au *tableau 19*.

Dans ce même tableau, sont indiqués les rapports, aux volumes de gaz ou de vapeurs combustibles, des volumes d'azote ou de dioxyde de carbone nécessaires pour assurer l'inflammabilité de gaz ou de vapeurs combustibles courants, quelle que soit la quantité d'air avec laquelle ils peuvent être mélangés.

Pour réaliser un inertage de qualité, il faut procéder en deux étapes :

- purger l'installation afin d'éliminer le mélange gazeux initial,
- assurer le maintien de l'atmosphère inerte.

La réalisation pratique de la purge (mise à l'état inerte) d'une enceinte contenant un mélange gazeux inflammable peut se faire par :

■ **balayage** (réacteur, colonne de distillation, réservoir) : introduction, sous une pression un peu supérieure à celle de l'enceinte (de 10^2 à 10^3 Pa), de gaz inerte, dilution de celui-ci, évacuation du mélange en excès par un orifice éloigné (et sans « court-circuit » possible) de l'introduction. Pour faciliter la dilution, le

Tableau 19 ● Valeurs limites des quantités de gaz inerte rapportées à celles de gaz ou de vapeurs combustibles courants ou à celles d'air pour assurer la mise à l'état inerte de mélanges ternaires dans les conditions ordinaires de température et de pression.

Gaz ou vapeurs combustibles	Rapport minimal du volume d'azote ou de CO ₂ au volume de combustible (C) pour rendre le mélange inerte quelle que soit la quantité d'air ajoutée		Rapport minimal du volume d'azote ou de CO ₂ au volume d'air (A) pour rendre le mélange inerte quelle que soit la quantité de combustible ajoutée	
	N ₂ /C	CO ₂ /C	N ₂ /A	CO ₂ /A
Acétone			0,91	0,56
Benzène	22,5	14	1	0,62
1,3-Butadiène	20,5	13,7	1,14	0,75
Butanes	18	10	0,96	0,59
Butènes			0,98	0,6
Éthane	13,7	8,5	1	0,62
Éthanol			1,1	0,68
Éthylène	16	9,5	1,14	0,78
Heptanes			0,91	0,56
Hexanes	26	15	0,93	0,57
Hydrogène	17	10	3,7	2
Méthane	6,5	3,5	0,83	0,5
Méthanol			1,2	0,75
Oxyde d'éthylène	17,2	9	pas de valeur limite	pas de valeur limite
Oxyde de carbone	4,5	2,5	2,8	1,6
Oxyde de diéthyle			1,2	0,75
Pentanes	23	12,7	0,94	0,58
Propanes (cyclo inclus)	15,7	8,5	0,96	0,59
Propène	15,2	8,5	0,98	0,6
Sulfure d'hydrogène			2	1,1
Disulfure de carbone			3,7	2
Vapeurs d'essence auto	27	15,2	0,91	0,56

débit de gaz inerte peut être limité. La *figure 32* indique, en fonction du rapport des teneurs initiale et finale du mélange en constituant à éliminer, le nombre nécessaire de renouvellements de l'atmosphère à effectuer par balayage de gaz inerte. Une marge de sécurité doit être observée dans l'adoption du nombre de renouvellements pour compenser notamment des hétérogénéités éventuelles du mélange ;

■ **cycles de compression-détente**, notamment lorsque la position des orifices d'une enceinte ne permet pas le balayage. Si C et C_0 sont les proportions finale et initiale du constituant à éliminer, P_c et P_d les pressions absolues de compression et de détente, le nombre de cycles nécessaires, n , est :

$$n = \frac{\log C - \log C_0}{\log P_d - \log P_c}$$

Le nombre de cycles adopté pourra être plus élevé par mesure de sécurité.

Lorsque l'installation purgée résiste au vide, la phase de détente peut être plus poussée grâce à l'utilisation d'une pompe à vide. On parle alors de compression-détente sous vide, le nombre de cycles et les quantités de gaz inerte nécessaire seront moins importants ;

■ **déplacement** : dans des canalisations, on peut déplacer un gaz par un gaz inerte avec une faible dilution ou un liquide avec interposition d'un piston racleur.

Dans des réservoirs, on peut déplacer un liquide ; la pression partielle de vapeur de ce dernier dans l'atmosphère reste toutefois la même jusqu'à la fin du déplacement et tant que le liquide mouille les parois. Ce risque se prolonge d'autant plus que le liquide est moins volatil.

Pour assurer le maintien de l'atmosphère inerte, il existe trois méthodes qui diffèrent selon les applications : le balayage, la surpression constante et l'analyse de l'atmosphère inertée.

La méthode généralement préconisée consiste à maintenir une légère surpression constante dans l'installation à inertiser. Cette surpression compense les fuites et permet d'éviter toute entrée d'air parasite. La dernière solution consiste à réguler l'injection du gaz inerte non plus en fonction d'une consigne de pression mais en fonction d'une analyse de l'atmosphère inertée ; en général il s'agit d'une analyse d'oxygène.

Il importera d'observer toutes les précautions contre les explosions et les intoxications lors d'opérations de remplissage et de balayage d'enceintes par gaz inerte.

■ Afin d'empêcher l'initiation d'explosions dans des atmosphères explosibles par des décharges d'électricité statique, les gaz inertes doivent être exempts de poussières, d'eau, de particules de glace et, pour le dioxyde de carbone, de particules de neige carbonique.

■ Les mélanges gazeux balayés des enceintes par le gaz inerte introduit peuvent :

- être inflammables. Ils doivent donc être évacués loin des sources d'inflammation et, au besoin, brûlés en torchère ;
- être dangereux ou asphyxiants. Ils doivent donc être rejetés, après traitement, loin de lieux où séjournent des personnes ;
- les gaz inertes eux-mêmes n'entretiennent pas la vie ; ils doivent donc être manipulés avec précaution, des procédures doivent être établies si des interventions humaines dans les enceintes sont possibles.

Deux phases sont à considérer pour la mise à l'état inerte d'un stockage liquide d'une enceinte :

- la vérification des conditions initiales de l'inertage (le contrôle le plus simple consiste en la mesure de la teneur en oxygène par un capteur situé dans l'enceinte) ;
- la vérification du maintien des conditions de l'inertage (deux solutions sont couramment utilisées : contrôle par manomètre de la légère surpression (10^3 à $5 \cdot 10^3$ Pa) de l'enceinte inertée et contrôle de la teneur en oxygène). Ce dispositif doit être complété par une alarme automatique en cas de défaillance de l'inertage.

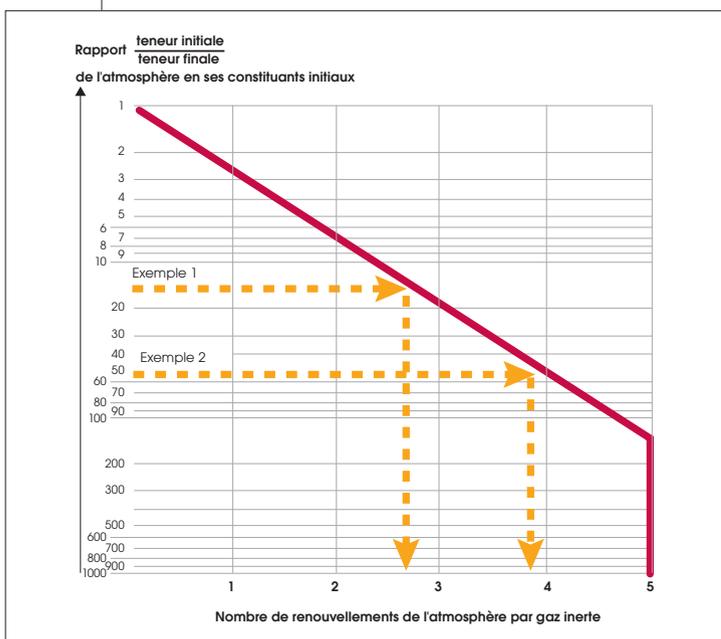


Figure 32 • Nombre de renouvellements nécessaires de l'atmosphère d'une enceinte par l'utilisation d'un gaz inerte pour diminuer la teneur des constituants dans un rapport donné (Document «L'Air Liquide»).

MESURES EMPÊCHANT L'EXPLOSION DE SE PRODUIRE

Prévention des explosions par suppression des sources d'inflammation

Les mesures de prévention de cette nature - dites « secondaires » - doivent éliminer les sources d'inflammation de mélanges gazeux, qui peuvent être essentiellement :

- les flammes et feux nus,
- les surfaces chaudes,
- les étincelles d'origine mécanique,
- les étincelles provenant de décharges d'électricité statique,
- les étincelles et échauffements dus aux matériels électriques,
- les ondes électromagnétiques.

Les sources pouvant enflammer les mélanges gazeux, doivent être proscrites bien entendu des zones de danger 0 et 1, mais aussi 2 où, avec une probabilité faible, des gaz ou vapeurs dangereux peuvent être présents.

Dans les normes européennes EN 292-1 et -2, publiées en 1991, sont décrits les risques engendrés par les machines, notamment les risques d'explosion. Dans la norme NF EN 1127-1, sont analysés les risques d'explosion générés par les machines et les moyens de protection qui permettent de les éviter ou de les réduire.

1. Flammes et feux nus

Leur proscription des zones dangereuses entraîne l'interdiction des travaux par « points chauds » (soudage et découpage à l'arc ou au chalumeau), à moins que des précautions particulières ne soient prises. La pro-

cédures du « permis de feu » est alors nécessaire. Le permis de feu (voir modèles, encadrés 5 et 6 pages suivantes) est délivré par le chef d'entreprise ou son représentant qualifié, pour chaque travail de ce genre exécuté soit par le personnel propre de l'entreprise soit par celui d'une entreprise extérieure.

TEXTES RÉGLEMENTAIRES relatifs aux travaux par points chauds

- Ordonnance préfectorale du 16 février 1970 (Paris).
- Installations classées. Les éditions du Journal officiel, brochures n° 1001.
- Dépôts d'hydrocarbures liquides. Arrêté du 9 novembre 1972 modifié.
- Entreprises extérieures. Décret n° 92-158 du 20 février 1992 codifié aux articles R. 237-1 et suivants.
- Recommandation R. 266 de la CNAMTS.

L'interdiction des flammes et des feux nus s'applique, entre autres, aux appareils de chauffage à flamme ou présentant des parties incandescentes (les radiateurs à résistances électriques, en particulier) et aux fumeurs.

2. Surfaces chaudes et compression

Les températures des surfaces ne doivent pas dépasser des valeurs égales à 80 % des températures d'auto-inflammation des gaz ou vapeurs (exprimées en °C). Les surfaces chaudes à surveiller sont le plus souvent

Instructions impératives de sécurité

AVANT LE TRAVAIL ET AVANT TOUTE REPRISE DE TRAVAIL

(on pourra cocher dans le carré correspondant les précautions à mesure qu'elles seront prises)

- 1° Vérifier que les appareils sont en parfait état (tension convenable, bon état des postes oxyacétyléniques, tuyaux ...).
- 2° Éloigner, protéger ou couvrir de bâches ignifugées tous les matériaux ou installations combustibles ou inflammables et, en particulier, ceux qui sont placés derrière les cloisons proches du lieu de travail. Éventuellement, arroser le sol et les bâches de couverture.
- 3° Si le travail doit être effectué sur un volume creux, s'assurer que son dégazage est effectif (réservoirs, tuyauteries, etc.).
- 4° Aveugler les ouvertures, interstices, fissures, etc. (sable, bâches, plaques métalliques...).
- 5° Dégager largement de tout matériel combustible ou inflammable le parcours des conduites traitées.
- 6° Disposer à portée immédiate les moyens d'alarme et de lutte contre le feu. Ceux-ci devront comporter au moins un extincteur à eau pulvérisée de 9 litres et un extincteur approprié à l'extinction d'un feu naissant à proximité des travaux.
- 7° Prendre les dispositions nécessaires pour éviter le déclenchement du système de détection ou d'extinction automatique.
- 8° Désigner un aide instruit des mesures de sécurité.
- 9° Établir et faire signer le PERMIS DE FEU.

PENDANT LE TRAVAIL

- 10° Surveiller les projections incandescentes et leurs points de chute.
- 11° Ne déposer les objets chauffés que sur des supports ne craignant pas la chaleur et ne risquant pas de la propager.

APRÈS LE TRAVAIL

- 12° Remettre en service le système d'extinction automatique ou de détection éventuellement neutralisé.
- 13° Inspecter le lieu de travail, les locaux adjacents et les environs pouvant être concernés par les projections d'étincelles ou les transferts de chaleur.
- 14° Maintenir une surveillance rigoureuse pendant deux heures au moins après la cessation du travail.

(De nombreux sinistres se sont en effet déclarés dans les heures suivant la fin des travaux).
Si cette surveillance ne peut être assurée, cesser toute opération par point chaud au moins deux heures avant la cessation générale du travail dans l'établissement. Si possible, confier le relais de la surveillance à une personne nommément désignée pouvant accomplir des rondes.



Figure 1 : explosion due à un dégazage incomplet

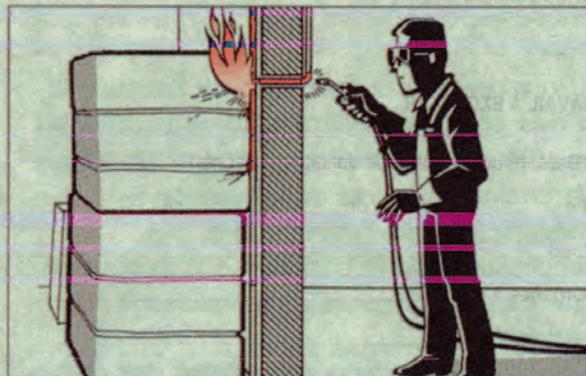


Figure 2 : inflammation au contact de conduites invisibles chauffées

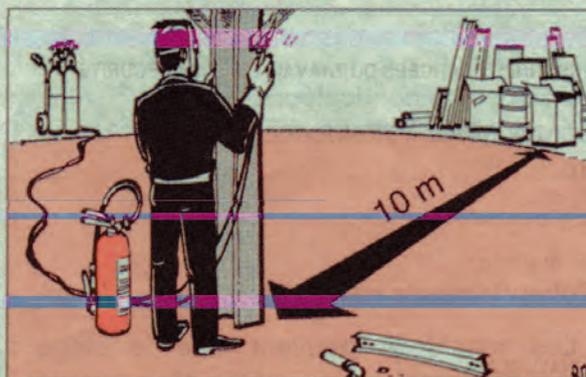


Figure 3 : les projections de particules incandescentes sont dangereuses jusqu'à plus de dix mètres

Recommandations importantes

Chefs d'entreprises, ne laissez jamais commencer un travail par chalumeau ou arc électrique avant d'avoir complètement fait remplir, puis signer et délivrer le PERMIS DE FEU correspondant.

Vérifiez que le travail prévu est compatible avec les prescriptions réglementaires vous concernant : règlement de sécurité des établissements recevant du public, code du travail, législation des installations classées, etc., selon les cas.

Vérifiez que votre police d'assurance incendie couvre bien le cas présent, tant pendant le travail qu'après son achèvement.

Si le travail doit être effectué par une entreprise extérieure, celle-ci devra vérifier sa police d'assurance responsabilité civile.

Chargés de sécurité, opérateurs : ne laissez entreprendre, ne commencez un travail au chalumeau ou à l'arc électrique, qu'après avoir obtenu le PERMIS DE FEU correspondant et vérifié les dispositions prises pour la sécurité de l'opération.

Ne manquez pas de contresigner le PERMIS DE FEU et d'en respecter scrupuleusement les consignes, ainsi que celles de vos instructions permanentes.

Encadré 6 • Autre exemple de permis de feu (autorisation de travaux avec points chauds).

REMARQUE IMPORTANTE

La délivrance de ce document sous-entend que le signataire (chef d'établissement ou son représentant qualifié) s'est informé au préalable de la configuration des locaux concernés et situés à proximité, des produits qui y sont utilisés ou entreposés et des activités effectuées (risques spéciaux).

Date de début des travaux :
Durée maximale :
Travail à exécuter :

Soudage
 Chalumeau
 Découpage électrique
 Pas de point de feu

Risques particuliers :

.....

.....

MISE EN SÉCURITÉ	<input type="checkbox"/>	MOYEN DE PROTECTION	<input type="checkbox"/>
Protection ou évacuation des produits inflammables	<input type="checkbox"/>	Contrôle d'atmosphère	<input type="checkbox"/>
Délimitation et signalisation de la zone dangereuse	<input type="checkbox"/>	Écrans, bâches, protection du voisinage	<input type="checkbox"/>
Consignation - séparation des sources d'énergie	<input type="checkbox"/>	ventilation forcée	<input type="checkbox"/>
Vidange	<input type="checkbox"/>	Extincteurs	<input type="checkbox"/>
Nettoyage - dégazage	<input type="checkbox"/>	Surveillant de sécurité	<input type="checkbox"/>
Isolation totale de tuyauterie	<input type="checkbox"/>	Moyens d'alerte (téléphone)	<input type="checkbox"/>
Démontage de tuyauterie	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>

SERVICES CONCERNÉS	NOM	SIGNATURE
Demandeur		
Sécurité		
Entretien		
Exécutant (ou chef d'équipe d'entreprise extérieure)		

PERMIS DE FEU
délivré le

SIGNATURE DU CHEF D'ÉTABLISSEMENT
(ou de son représentant qualifié)

celles des parois d'enceintes et des cloisons chauffées, des canalisations de fluides à température élevée (de vapeur notamment), des pièces de machines s'échauffant par action mécanique (broyeurs,

malaxeurs), des appareils de chauffage. La protection par calorifugeage n'est pas une mesure suffisante à elle seule. Il faut en plus que l'atmosphère dangereuse ne puisse pas atteindre la paroi chaude

calorifugée, ce qui implique un calorifugeage adhérent à cellules closes ou une protection par balayage dans le calorifuge.

Certaines réactions exothermiques peuvent entraîner sur des matières ou sur des surfaces métalliques des températures susceptibles d'initier des explosions : en particulier, des actions d'acides répandus sur des métaux, des réactions d'oxydation violentes (par nitrate d'ammonium, chlorate de potassium,...), des combustions lentes (huiles et chiffons gras, certains déchets ou poussières métalliques), des fermentations de produits agricoles.

Des compressions adiabatiques de rapport élevé, même inférieures à celles réalisées dans les moteurs Diesel (dont le taux de compression est de 15 au moins) peuvent également entraîner l'inflammation explosive de mélanges de gaz ou de vapeurs avec l'air, portés par ce moyen à leur température d'auto-inflammation.

3. Étincelles d'origine mécanique

Elles sont constituées de particules métalliques (fer, acier, cuivre, aluminium, etc.) ou minérales (carbone, quartz, silice, grès) arrachées à un matériau par le choc ou le frottement, sous pression d'une matière aussi dure ou plus dure.

La détermination quantitative des phénomènes se déroulant aux points de contact, est aussi difficile à effectuer pour les frottements que pour les chocs. Mais il est certain que, dans les deux cas, les températures atteintes aux points d'impact sont très élevées (dans le cas des métaux, elles ne sont limitées que par le point de fusion de ces derniers et peuvent dépasser 1 000 °C).

On peut s'attendre à ce qu'un copeau de dimension convenable pour la formation des étincelles soit porté, au moment où il est détaché, à une température atteignant aisément 1 000 °C. Cette température, bien que suffisante pour porter les particules à incandescence, est trop faible pour allumer les mélanges très inflammables composés d'air et d'acétylène ou d'hydrogène. Ces particules ne créent un risque grave d'inflammation que lorsqu'elles brûlent dans l'oxygène du mélange gazeux environnant, la chaleur de combustion libérant une énergie qui peut enflammer le mélange gazeux. Le minimum d'énergie libérée par choc, nécessaire à la formation d'étincelles susceptibles de causer l'inflammation, est de 340 J environ.

L'aptitude des étincelles à provoquer l'inflammation dépend surtout de leur température, de leur dimension et de leur vitesse. Des résultats d'essais ont confirmé que la température des petites étincelles est très élevée mais elles doivent avoir une certaine dimension pour

pouvoir provoquer l'inflammation. Aussi, cette aptitude à provoquer l'inflammation ne peut croître indéfiniment car la température des particules détachées par choc ou par frottement est inversement proportionnelle à leur dimension. Si la vitesse des étincelles est trop grande, elles ne peuvent guère provoquer l'inflammation car leur séjour dans un mélange explosif est trop bref. L'inflammation n'a lieu, en général, qu'en fin de trajectoire mais elle peut parfois se produire dès la formation des étincelles en présence de promoteurs d'inflammation (poussières,...).

La possibilité qu'un mélange gazeux soit enflammé par des étincelles dépend de la nature de ses composants et de leurs proportions. L'inflammation ne se produit, en général, que dans la zone inférieure du domaine d'explosivité du mélange. En effet, la proportion d'oxygène doit être élevée pour que les étincelles deviennent incandescentes.

Les appareils ou les objets les plus courants, susceptibles de produire des étincelles mécaniques dangereuses en atmosphères inflammables et appelant des mesures de prévention sont :

Les ventilateurs d'extraction

Les matières des pales et de l'enveloppe doivent être choisies pour éviter les étincelles d'origine « électricité statique » et « choc mécanique ». Pour ce dernier, il faut garantir un jeu entre les parties fixe et mobile.

Leurs moteurs électriques doivent être placés hors de l'atmosphère éventuellement inflammable, ou être de sûreté. Ils seront de plus construits pour résister à une pression d'explosion et équipés généralement d'arrête-flamme s'ils fonctionnent dans un flux classé en zone 1, et obligatoirement en zone 0 (flux interne).

Remarque

Cette combinaison avec arrête-flamme peut s'appliquer aussi aux compresseurs, pompes à vide sèches, soufflantes...

Les meules, broyeurs, marteaux-piqueurs, appareils de sablage

À moins d'être rendus inoffensifs par des mesures particulières (broyeurs sous atmosphère inerte, abrasifs non étincelants), ils sont inacceptables en présence de mélanges dangereux.

Les petites pièces et particules métalliques

Elles sont éventuellement en mouvement (conduits, installations de chargement et de transport, broyeurs). Des filtres, des capteurs magnétiques doivent les arrêter.

Les chaussures cloutées

Les chaussures cloutées doivent être prohibées et la nature des sols choisie en fonction des risques.

Les outils

L'emploi d'outils « anti-étincelants » (marteaux et masses en cuivre ou alliages de cuivre, nickel, aluminium, outils en bronze au béryllium, en alliages d'aluminium, etc.) diminue de façon importante la probabilité de production d'étincelles mais ne l'élimine pas complètement. La formation d'étincelles peut être prévenue également en appliquant sur l'outil ou sur la pièce un produit adapté.

Un revêtement plastique, défini par la norme NF EN 74-400, des parties non travaillantes des outils évite les étincelles provoquées par des chocs et des chutes intempestifs.

4. Étincelles provenant de décharge d'électricité statique

De telles étincelles peuvent apporter l'énergie de quelques dizaines à quelques centaines de microjoules nécessaires pour enflammer un mélange gazeux. Cette énergie est liée aux charges Q accumulées dans une capacité C , sous une tension V , selon l'expression :

$$W = 1/2 QV = 1/2 C.V^2$$

(W en Joules, Q en Coulombs, V en Volts, C en Farads)

On rencontre couramment des capacités de quelques picofarads (par exemple, le corps humain isolé par rapport au sol, 100 à 300.10⁻¹² farads) et la génération de tensions de plusieurs milliers de volts (jusqu'à 30 kV) par frottement. D'après la formule précédente, le corps humain est susceptible d'accumuler des champs électrostatiques correspondant à une énergie de quelques millijoules.

Pour qu'une étincelle de décharge disruptive se produise entre deux surfaces chargées, une différence de potentiel suffisante, fonction de leur distance doit être atteinte ; dans l'air sec, elle est de l'ordre de 30 000 volts par centimètre.

L'accumulation de charges électrostatiques s'observe surtout lors de ruptures de contact et frottements entre deux corps dont un au moins est un isolant (résistivité > 10¹⁰ Ω/cm).

Les circonstances de la création de charges et de potentiels électrostatiques les plus courantes sont les suivantes :

- l'écoulement d'un liquide isolant dans une canalisation ; des charges de signes opposés sont collectées par la paroi et emportées par le liquide. Ces charges croissent avec la vitesse d'écoulement (de façon importante pour des vitesses supérieures à 1 m/s), les frottements dus à des rétrécissements de la section, les obstacles, la présence d'impuretés dans le liquide (eau, air) ou lorsque le matériau des canalisations n'est pas conducteur ;

- l'écoulement, la chute de liquides dans un récipient et, plus encore lorsqu'elle se fait en pluie, et dans celui-ci des mélanges, des turbulences, des agitations, des mouvements gazeux. Les charges apparaissent notamment à la surface du liquide dans le réservoir et, opposées en signe, à l'intérieur de la paroi. Des étincelles disruptives peuvent jaillir entre la surface du liquide et la paroi ou des éléments liés à la paroi ;

- l'écoulement de gaz chargé de particules liquides ou solides (eau, poussières, particules de « neige carbonique »), de jets de vapeur, dans des canalisations, à l'orifice de bouteilles de stockage, dans des pistolets de pulvérisation, dans des transports pneumatiques de pulvérulents ;

- les frottements de diverses natures : courroies et poulies de transmission, déroulement de feuilles de textiles, de papier, de matière plastique, véhicules en mouvement dans l'air, personnes se déplaçant sur des sols isolants, poussières en mouvement ;

- l'orage.

Les mesures de prévention des décharges électrostatiques dangereuses sont, selon les possibilités :

- l'**humidification** de l'atmosphère : une humidité relative minimale de l'ordre de 70 % empêche l'apparition des charges électrostatiques sur les matériaux susceptibles de fixer l'humidité (coton, laine, bois, papier,...) ;

- l'**augmentation de la conductibilité des corps isolants** comme le cuir, le carton, le caoutchouc, les textiles, les matières plastiques, les liquides. Cet état peut être atteint par addition dans la masse, lors de la fabrication ou du conditionnement ou par application superficielle de produits conducteurs et antistatiques. Cette mesure est applicable aux équipements de pro-

tection individuelle utilisables dans les atmosphères explosibles tels que les casques, les vêtements, les chaussures,...

- la **mise à la terre**, au regard des potentiels électrostatiques, d'une installation, d'un objet, peut être considérée réalisée de fait, si la résistance entre la terre et n'importe quel point de l'installation ou de l'objet est inférieure ou égale à une 10^6 ohms. De plus, chaque chaussure des personnes qui se tiennent sur le sol doit avoir, dans la plupart des cas, une résistance maximale à la terre de 0,5 à 1.10^6 ohms. Les différents éléments d'installations (réceptifs, tronçons de canalisations, filtres, buses, etc.) par lesquels passe le transfert de substances capables d'accumuler des charges électrostatiques (hydrocarbures et autres liquides inflammables) doivent de plus, être reliés par des liaisons équipotentielles de résistance inférieure à 10^6 ohms. Pratiquement, les liaisons équipotentielles sont de l'ordre de quelques ohms et ont pour fonction également de prévenir les risques d'électrisation des personnes ;

- la **réduction des frottements** par abaissement des pressions exercées sur les corps en contact, la **diminution des vitesses d'écoulement** des liquides et des gaz, la **réduction des hauteurs de chutes** de liquides inflammables dans les réservoirs, l'**interdiction des déversements en pluie** : pour les hydrocarbures, les vitesses d'écoulement dans des canalisations doivent autant que possible être limitées à 1 m/s pendant les premières et dernières minutes d'un transfert et entre temps, à la vitesse v (m/s) telle que $v.d$ (d étant le diamètre le plus étroit de la canalisation en centimètres) soit inférieur à 120 et de toute façon limitée à 7 m/s ;

- La **neutralisation des charges** par ionisation de l'air : emploi d'éliminateurs à induction électrostatique, d'éliminateurs électriques, etc.

Dans certains cas, il est souhaitable de mettre en œuvre une protection par gaz inerte ou d'être sûr que l'atmosphère contient des proportions supérieures à la LSE de vapeurs inflammables. Il faut également s'abstenir d'amorcer des étincelles près de la surface chargée du liquide, par l'introduction d'une jauge ou d'un organe de prélèvement immédiatement après un transfert. On peut être amené à interrompre des transferts à l'air libre de liquides inflammables par temps d'orage.

5. Étincelles et échauffements dus aux matériels électriques

Les risques d'inflammation provenant du matériel électrique ont pour origine :

L'étincelle électrique

Le risque principal est dû à la production d'une étincelle dite de rupture à l'ouverture d'un circuit inductif (tout circuit comportant un bobinage électrique : relais, électrovannes, etc.).

L'énergie de l'étincelle de rupture est fonction du carré de l'intensité lors de la coupure et n'est pas directement liée à la tension. Elle peut donc être très importante même avec les très basses tensions (48 V, 24 V ou 12 V) et même dans certains cas, avec des sources telles que les piles des lampes portatives (4,5 V ou 6 V). Le matériel réalisé pour fonctionner en très basse tension (TBT) ne présente donc de sécurité que vis-à-vis du risque d'électrisation, mais absolument pas vis-à-vis du risque d'explosion.

On parlera d'arc électrique plutôt que d'étincelle électrique en cas de court-circuit (durée plus importante et intensité généralement plus élevée). Ce risque existe également en TBT, notamment sur les batteries d'accumulateurs.

La production d'étincelles peut également exister à la fermeture d'un circuit électrique.

L'énergie des étincelles électriques est généralement suffisante pour enflammer un mélange gazeux explosif. Il convient donc d'utiliser soit du matériel ne produisant pas d'étincelle électrique, soit du matériel dans lequel la production d'étincelles électriques n'a pas de répercussion sur l'atmosphère à risques d'explosion.

L'échauffement superficiel du matériel électrique

Tout matériel électrique en fonctionnement normal engendre des pertes d'énergie par effet Joule, ce qui entraîne un échauffement des conducteurs électriques actifs et, par conduction thermique, un échauffement des enveloppes externes et des bornes de connexion. Il convient donc que la température atteinte lors de l'échauffement reste dans les limites admissibles, compte tenu des produits inflammables mis en œuvre.

Le risque est évidemment accru lors de surcharge ou de court-circuit.

6. Ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques, émises par des émetteurs (radio, radar) ou par des machines industrielles, peuvent, à proximité, entraîner la production d'étincelles entre pièces conductrices jouant le rôle d'antennes réceptrices, ou provoquer l'échauffement de

matériaux. Des atmosphères explosives ne doivent pas pouvoir se former dans ces circonstances.

La norme NF EN 1127-1 fournit des informations sur les ondes électromagnétiques et sur quelques mesures de sécurité les concernant.

Appareils utilisables en atmosphères explosibles

1. Généralités

Dans les zones à risques d'explosion, zones qui sont déterminées sous la responsabilité du chef d'établissement, les appareils et les systèmes de protection, notamment électriques (voir ci-après partie 2. Matériels électriques de sûreté), doivent être réduits à ce qui est indispensable aux besoins de l'exploitation. Les appareils électriques, les moteurs (de ventilateurs, en particulier), les canalisations, les organes de communication nécessaires doivent, autant que possible, être placés en dehors de ces zones de danger.

Le décret n° 96-1010 du 19 novembre 1996 modifié (transposition en droit français de la directive 94/9/CE du 23 mars 1994, concernant le rapprochement des législations des États membres pour les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles) s'applique aux appareils et aux systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles, électriques et non électriques. Vu la conception des matériels et son domaine d'application, ce texte couvre :

- les appareils tels que les machines, les matériels, les dispositifs fixes ou mobiles, les organes de commande, l'instrumentation et les systèmes de détection et de prévention qui, seuls ou combinés, sont destinés à la production, au stockage, à la mesure, à la régulation, à la conversion d'énergie et à la transformation de matériau et qui, par les sources potentielles d'inflammation qui leur sont propres, risquent de provoquer le déclenchement d'une explosion ;

- les systèmes de protection, qui sont définis comme des dispositifs autres que les composants définis ci-dessus, dont la fonction est d'arrêter immédiatement les explosions naissantes et/ou de limiter la zone affectée par une explosion et qui sont mis séparément sur le marché comme système à fonction autonome ;
- les composants, qui sont des pièces essentielles au fonctionnement de l'installation, mais qui n'ont pas de fonction autonome ;
- les dispositifs de sécurité, de contrôle et de régulation prévus pour être utilisés à l'extérieur des atmosphères explosibles, mais qui sont nécessaires pour assurer un fonctionnement sûr des appareils et des systèmes de protection situés en atmosphère explosible.

Selon le décret précité, les appareils et, le cas échéant, les dispositifs et composants sont divisés en deux groupes, eux-mêmes subdivisés en catégories. Les critères de cette subdivision illustrent une des principales différences entre les groupes I et II :

- dans le groupe I, la catégorisation est fonction, entre autres, du fait que l'alimentation en énergie doit ou non être coupée lorsque les conditions rendent l'atmosphère explosible ;
- dans le groupe II, elle dépend de l'endroit où le produit est destiné à être utilisé et du fait qu'une atmosphère explosible soit toujours présente ou susceptible de se constituer, pour une période de courte ou de longue durée.

Le marquage des catégories sur les appareils permet à l'utilisateur de posséder des indications claires afin de permettre une utilisation sûre. En fonction du niveau de sécurité requis, deux catégories sont mises

en place pour le groupe I (M1 et M2) et trois catégories pour le groupe II (1, 2 et 3).

Le groupe I comprend les appareils destinés à être utilisés dans les parties souterraines des mines ainsi que dans les parties en surface de ces mines susceptibles d'être menacées par le grisou et/ou les poussières inflammables

■ Les appareils de **catégorie M1** sont conçus et, si nécessaire, équipés de moyens de protection spéciaux additionnels pour pouvoir fonctionner conformément aux paramètres opérationnels établis par le constructeur et assurer un très haut niveau de protection. Les appareils de cette catégorie doivent rester opérationnels, même dans le cas d'un dérangement rare de l'appareil, en présence d'atmosphères explosives et sont caractérisés par des moyens de protection tels que :

- soit, en cas de défaillance d'un des moyens de protection, au moins un second moyen indépendant assure le niveau de protection requis ;
- soit, dans le cas de l'apparition de défauts indépendants l'un de l'autre, le niveau de protection requis est assuré.

■ Les appareils de **catégorie M2** sont conçus pour pouvoir fonctionner conformément aux paramètres opérationnels établis par le constructeur et basés sur un haut niveau de protection. Dans le cas où une atmosphère explosible se manifeste, l'alimentation en énergie de ces appareils est censée être coupée. Les moyens de protection relatifs aux appareils de cette catégorie assurent le niveau de protection requis lors d'un fonctionnement normal, y compris dans des conditions d'exploitation contraignantes et notamment celles résultant d'une utilisation sévère de l'appareil et de conditions changeantes.

Le groupe II comprend les appareils destinés à être utilisés sur d'autres sites susceptibles d'être exposés aux risques dus à la présence d'atmosphères explosibles

■ Les appareils de **catégorie 1** sont conçus pour pouvoir fonctionner conformément aux paramètres opérationnels établis par le constructeur et assure un très haut niveau de protection. Les appareils de cette catégorie sont destinés à un environnement dans lequel des atmosphères explosives dues à des mélanges d'air avec des gaz, vapeurs ou brouillards sont présentes constamment ou pour une longue période ou fréquemment. Les appareils de cette

catégorie doivent assurer le niveau de protection requis même dans le cas d'un dérangement rare de l'appareil et sont caractérisés par des moyens de protection tels que :

- soit, en cas de défaillance d'un des moyens de protection au moins un second moyen indépendant assure le niveau de protection requis ;
- soit, dans le cas de l'apparition de deux défauts indépendants l'un de l'autre, le niveau de protection requis est assuré.

Ces appareils sont destinés à la zone 0.

■ Les appareils de **catégorie 2** sont conçus pour pouvoir fonctionner conformément aux paramètres opérationnels établis par le constructeur et assurer un haut niveau de protection. Les appareils de cette catégorie sont destinés à un environnement dans lequel des atmosphères explosives dues à des gaz, des vapeurs ou des brouillards se manifesteront probablement. Les moyens de protection relatifs aux appareils de cette catégorie assurent le niveau de protection requis même dans le cas de dérangement fréquent ou des défauts de fonctionnement des appareils dont il faut habituellement tenir compte.

Ces appareils sont destinés à la zone 1.

■ Les appareils de **catégorie 3** sont conçus pour pouvoir fonctionner conformément aux paramètres opérationnels établis par le constructeur et assurer un niveau normal de protection. Les appareils de cette catégorie sont destinés à un environnement dans lequel des atmosphères explosives dues à des gaz, des vapeurs ou des brouillards ont une faible probabilité de se manifester et ne subsisteront que pour une courte période.

Ces appareils sont destinés à la zone 2.

Les appareils, les systèmes de protection, les dispositifs de sécurité et les composants doivent répondre aux **exigences essentielles de sécurité et de santé** contenus dans la réglementation. Ces exigences ont été établies afin de prendre en compte l'usage des produits et le progrès technologique. Les exigences essentielles comprennent des moyens :

- pour prévenir la formation d'une atmosphère explosive par l'équipement, le système de protection et les dispositifs de sécurité ;
- pour prévenir l'inflammation de l'atmosphère explosive par des sources d'énergie électrique ou non électrique ;
- pour empêcher ou pour limiter l'extension d'une explosion.

Les points suivants sont également couverts :

- le choix des matériaux,
- la conception et la fabrication,
- les sources d'inflammation potentielles,
- les risques résultant des influences externes,
- les exigences pour les appareils qui contribuent à la sécurité,
- les exigences pour les systèmes de protection.

Afin de déclarer la conformité du produit, le responsable de la mise sur le marché doit respecter la (ou les) procédure(s) prévue(s) par la directive 94/9/CE.

Dans certains cas, l'intervention d'un organisme notifié est obligatoire pour vérifier la conformité aux exigences, effectuer des essais ou contrôles ou évaluer le système qualité. Le *tableau 20* donne les différentes procédures d'évaluation de la conformité. L'examen CE de type est la procédure par laquelle l'organisme notifié (ON) constate et atteste qu'un échantillon représentatif de la production considérée est conforme aux exigences de la directive qui lui sont applicables.

Le demandeur fournit à l'organisme notifié avec le (ou les) échantillon(s), la documentation technique nécessaire à la mise en œuvre des vérifications et essais. Cette documentation, comprend :

- une description générale,
- les plans, diagrammes, etc., de conception et de construction,
- toutes les explications nécessaires à la compréhension des plans et du fonctionnement,
- une liste des normes harmonisées qui s'appliquent totalement ou partiellement au produit et une description des solutions qui ont été adoptées afin de répondre aux exigences essentielles applicables,
- les résultats de calcul, d'essai et de vérification, les rapports d'essai.

Selon la catégorie du produit, le fabricant ou son mandataire légal applique un des modules de vérification de la production décrit ci-après :

- assurance qualité de production,
- vérification sur produit,
- conformité au type,
- assurance qualité du produit,

Tableau 20 • Procédures d'évaluation de la conformité. Catégories des matériels utilisables en atmosphères explosives.

Nature de la protection	Groupe	Catégorie	Procédures à suivre
Système de protection			Examen CE de type (Annexe III) et : <ul style="list-style-type: none"> • soit assurance qualité production selon annexe IV, • soit vérification sur produit selon annexe V.
Matériels électriques et moteurs à combustion interne	I	M 1	Examen CE de type (Annexe III) et : <ul style="list-style-type: none"> • soit assurance qualité production selon annexe IV, • soit vérification sur produit selon annexe V.
		M 2	Examen CE de type (Annexe III) et : <ul style="list-style-type: none"> • soit assurance qualité produit selon annexe VII, • soit conformité au type selon annexe VI.
	II	1	Examen CE de type (Annexe III) et : <ul style="list-style-type: none"> • soit assurance qualité production selon annexe IV, • soit vérification sur produit selon annexe V.
		2	Examen CE de type (Annexe III) et : <ul style="list-style-type: none"> • soit assurance qualité produit selon annexe VII, • soit conformité au type selon annexe VI.
		3	Contrôle interne de fabrication selon annexe VIII.
Matériels autres	I	M 1	Examen CE de type (Annexe III) et : <ul style="list-style-type: none"> • soit assurance qualité production selon annexe IV, • soit vérification sur produit selon annexe V.
		M 2	Contrôle interne de fabrication selon annexe VIII et dépôt du dossier montrant la conformité chez l'ON.
	II	1	Examen CE de type (Annexe III) et : <ul style="list-style-type: none"> • soit assurance qualité production selon annexe IV, • soit vérification sur produit selon annexe V.
		2	Contrôle interne de fabrication selon annexe VIII et dépôt du dossier montrant la conformité chez l'ON.
		3	Contrôle interne de fabrication selon annexe VIII.

ON = Organisme notifié. - Toutes les annexes sont issues de la directive 94/9/CE.

- contrôle interne de fabrication,
- vérification à l'unité.

Tous les appareils et dispositifs de protection mis sur le marché dans l'Union Européenne doivent être marqués conformément à la directive et doivent être fournis avec une déclaration CE de conformité émise par le fabricant et rédigée sur les bases de la directive 94/9/CE et des autres directives qui s'appliquent à l'appareil.

La directive précise le détail du marquage. Ce dernier comporte les initiales CE suivies, selon le cas, par le numéro d'identification de l'organisme notifié concerné par l'évaluation du système d'assurance qualité ou par la vérification à l'unité. Le marquage CE ne doit pas figurer sur les composants. Le marquage est complété par le marquage spécifique de protection contre les explosions (Ex dans un hexagone) et suivi du groupe, de la catégorie et d'une indication relative aux atmosphères explosives pouvant être présentes, G pour les gaz (D pour les poussières).

Exemple
CE  II 1 G

Ce type de marquage fait abstraction du mode de protection utilisé et de la température maximum d'utilisation du matériel.

La directive ne fait pas de référence directe à des normes mais, comme on l'a vu, à des exigences relatives à la sécurité en fonction des industries (mines ou industries de surface) et des zones d'utilisation. **Toutefois, la conformité à une norme harmonisée vaut présomption de conformité aux exigences essentielles correspondantes.**

En outre, des normes harmonisées peuvent prévoir un marquage supplémentaire dit « normatif ».

Le marquage comporte également au moins les indications suivantes :

- le nom du fabricant et son adresse,
- la désignation de la série (ou du type),
- le numéro de série s'il existe,
- l'année de construction,
- si nécessaire, toutes indications indispensables à la sécurité d'emploi.

Chaque produit doit être accompagné d'une notice d'instructions établie dans une langue communautaire. Lors de la mise en service, le produit doit être accompagné de la notice rédigée dans la

langue du pays où est installé l'appareil. La notice comprendra :

- toutes les informations relatives au marquage et facilitant la maintenance,
- les instructions pour effectuer sans risque la mise en service, l'installation, l'utilisation, le montage et le démontage, la maintenance et les réglages,
- si nécessaire, les indications relatives aux zones de décharge de pression (pour les événements par exemple), les conditions spéciales d'utilisation, les paramètres électriques...,
- si nécessaire, les instructions de formation,
- tous les schémas, instructions utiles du point de vue de la sécurité.

2. Matériels électriques de sûreté

Dans les zones à risque d'explosion, parmi l'ensemble des installations présentes, les plus couramment utilisées sont celles qui mettent en œuvre l'énergie électrique. Cela concerne aussi bien les circuits de puissance que de commande.

Afin que ces installations ne soient pas à l'origine de situations dangereuses pour les personnes et les biens, des règles concernant la conception et l'utilisation de ces dernières sont à respecter.

D'une façon générale, les installations situées dans les zones à risque d'explosion, doivent être réduites au strict minimum et ne pas être la cause possible de l'inflammation de l'atmosphère explosible. Ces principes sont valables pour les matériels comme pour les canalisation électriques.

2.1. Règles de réalisation des installations électriques

Les installations et matériels électriques utilisés dans les zones à risque d'explosion sont visés par plusieurs textes réglementaires (voir annexe « Réglementation et normes »).

La normalisation est omniprésente notamment dans le domaine de la conception des matériels électriques (cf. annexe « Réglementation et normes »). Les principales normes sont :

- la norme NF EN 50014 « Matériel électrique pour atmosphères explosives - Règles générales » ;
- les normes NF EN 50015 à 50021, NF EN 50028 et NF EN 50039 se rapportant aux modes de protection des matériels électriques ;
- la norme NF EN 50284, qui complète les exigences des normes NF EN 50014 à 50020 et NF EN 50028 pour

adapter le niveau de sécurité apporté par ces normes au très haut niveau du risque.

Les règles de sécurité à respecter, quant à la distribution générale basse tension, sont détaillées dans la norme NF C 15-100, qui s'applique jusqu'à la tension de 1 000 volts en courant alternatif et 1 500 volts en courant continu. Les règles énumérées ci-après ne sont pas exhaustives (voir, entre autres, la norme NF C 15-100 de décembre 2002, § 4.2.4).

De plus, la norme NF EN 60079-14 contient les règles particulières de conception, de sélection et de montage applicables aux installations électriques situées dans des atmosphères explosives gazeuses et la norme NF EN 60079-17 traite de l'inspection et de l'entretien des installations électriques dans les emplacements dangereux.

2.1.1. Protection contre les contacts directs

La protection contre les contacts directs concerne prioritairement la sécurité des personnes contre les risques d'électrisation et d'électrocution. Dans les zones à risque d'explosion, elle concourt également à éviter tout risque d'étincelles d'origine électrique pouvant provoquer une ignition des produits inflammables. De ce fait, l'ouverture de matériel électrique sous tension situé en zone à risque d'explosion, même par du personnel habilité, est à proscrire.

2.1.2. Protection contre les contacts indirects

La protection contre les contacts indirects consiste à limiter, en amplitude et en durée, les courants de défauts à la terre et à se prémunir des différences de potentiel qui pourraient être dangereuses pour les personnes.

Plusieurs paramètres sont plus particulièrement à prendre en compte dans les zones à risque d'explosion, notamment :

a) le type de réseau

La fixation du potentiel du circuit électrique peut être différente suivant les besoins et certaines contraintes dus à la sécurité des personnes et des biens. C'est ainsi que le potentiel du réseau peut être fixé ou non à la terre. Il existe trois types de réseaux :

- réseau à neutre isolé : IT,
- réseau à mise au neutre : TN,
- réseau à neutre à la terre : TT.

Schéma IT

Dans les installations à risques d'explosion, la distribution électrique doit se faire, de préférence, suivant le schéma de réseau à neutre isolé ou

impédant. Dans ce cas, le premier défaut d'isolement par rapport à la terre doit être impérativement recherché et éliminé dès son apparition de façon à éviter une montée en potentiel consécutive au deuxième défaut d'isolement. De plus, il est recommandé que les conducteurs de protection soient de même section que les conducteurs de phase et inclus dans la même gaine que les conducteurs actifs. Dans certains circuits terminaux, pour les installations en zone 1, on pourra mettre en œuvre des dispositifs à courant différentiel résiduel pour diminuer le temps d'élimination des courants de défaut.

Schéma TN

Il y a deux types de schémas TN :

- le schéma TNS où les masses sont reliées au conducteur neutre avec un conducteur de protection séparé ;
- le schéma TNC où les masses sont reliées au conducteur neutre avec un conducteur de protection confondu avec le conducteur.

Le schéma de réseau de type TNS peut être admis si, dans les zones 1, on emploie des dispositifs à courant différentiel résiduel (300 mA maximum) pour diminuer le temps d'élimination des courants de défaut. Un défaut non franc sera vu comme une surcharge. De ce fait, le conducteur neutre doit avoir la même section et les mêmes conditions de protection que pour les phases. Par contre, le schéma de réseau de type TNC ne doit pas être employé dans les zones à risques d'explosion. Le grief le plus important est la circulation d'un courant d'emploi, en fonctionnement normal, dans les structures mises de fait en parallèle avec le conducteur P.E.N. (conducteur de protection et conducteur neutre). Cela est totalement incompatible en zone explosible, les cheminements étant de plus non maîtrisés. En outre, en cas de défaut d'isolement, le neutre va monter en potentiel et cette montée peut occasionner des claquages (et donc des étincelles) dans les récepteurs.

Schéma TT

Si un schéma de réseau de type TT est utilisé en zone 1, il doit être protégé par un dispositif à courant différentiel résiduel, y compris pour les réseaux alimentés en TBT (24 V ou 48 V). La sensibilité du (ou des) dispositif(s) (300 mA maximum) ne devra être limitée que par les courants de fuite normaux des récepteurs et des lignes d'alimentation. On aura généralement du mal à descendre en dessous de 30 milliampères, sauf à morceler excessivement l'installation. Ce schéma n'est toutefois pas admis en zone 0. Il pose également problème en cas de

défaut sur le conducteur neutre, en aval du disjoncteur différentiel. Ce défaut ne sera pas éliminé s'il est seul et en cas de second défaut, il y aura un courant de court-circuit phase neutre éliminé dans les conditions liées au courant de court-circuit et temps de coupure correspondant.

Le seul schéma très sûr serait un schéma IT avec coupure au premier défaut, mais ce type de fonctionnement serait très pénalisant par rapport au critère de disponibilité de l'installation électrique.

b) la section des conducteurs de protection

La section des conducteurs de protection doit, au minimum, respecter les sections minimales indiquées dans la norme NF C 15-100. En cas de dysfonctionnement, l'intensité du courant de défaut va provoquer un échauffement du conducteur de protection par effet joule. La température maximale atteinte par le conducteur de protection non isolé, ne doit pas être supérieure à la température d'auto-inflammation des gaz ou vapeurs présents pouvant s'enflammer.

Aussi, dans les zones à risque d'explosion, il y a lieu de déterminer et vérifier la section des conducteurs de protection, en tenant compte de l'échauffement maximal compatible avec cette température d'auto-inflammation.

2.1.3. Liaison équipotentielle

La mise en œuvre des mesures, prévues pour protéger les personnes contre les risques de contact indirect ; ne sont pas toujours suffisantes pour éviter la formation d'étincelles entre les différentes masses des matériels électriques ou entre ces mêmes masses et toutes les structures conductrices telles que les charpentes, tuyauteries, etc., pouvant être accessibles simultanément.

En effet, dans le cas où l'on installe les dispositifs de protection assez loin des récepteurs (salle de commande et de contrôle centralisée), les conducteurs de protection de chaque récepteur ont, du fait de leur longueur, une résistance non négligeable. En cas de défaut, il peut alors exister localement, entre les masses de deux récepteurs voisins ou entre un récepteur et une structure conductrice, une différence de potentiel appelée tension de contact. Même si elle n'est pas dangereuse pour les personnes, cette tension peut créer de petits arcs ou étincelles entre ces deux masses si celles-ci entrent en contact accidentellement, par exemple par un objet métallique de type outil. Il convient donc de compléter l'interconnexion des masses, réalisée normalement

par les conducteurs de protection inclus dans les câbles d'alimentation, au moyen de tresses de liaison directe entre ces masses voisines.

Beaucoup de matériels électriques de sûreté comportent d'ailleurs d'origine plusieurs bornes (ou vis) de mise à la terre complémentaires de celle de la boîte à bornes. Il ne faut pas se fier à une interconnexion des masses reposant uniquement sur le fait que des récepteurs voisins sont fixés sur des structures métalliques voisines ou communes, car certains appareils sont fixés sur des supports antivibratoires.

2.1.4. Installations de sécurité

Les installations assurant des fonctions de sécurité doivent faire l'objet d'une attention toute particulière. Elles sont de plusieurs types :

Éclairage de sécurité

Le type et la nature des installations assurant un éclairage de sécurité, en cas de coupure de l'alimentation générale pour les locaux présentant des zones à risque d'explosion, sont fonction de la taille et de la nature des locaux :

- pour les locaux de travail où l'effectif atteint 100 personnes - avec une occupation supérieure à 1 personne pour 10 m² - et leurs dégagements - si la surface de ces derniers est supérieure à 50 m² -, l'éclairage de sécurité doit être de type fixe et assurer un éclairage d'ambiance et de balisage ;
- pour les autres locaux, l'éclairage de sécurité doit être de type fixe et assurer un éclairage de balisage.

Installations nécessaires à la sécurité des travailleurs en cas de sinistre

Les installations (autres que l'éclairage), dont le maintien en service est nécessaire pour assurer la sécurité des travailleurs en cas de sinistre, sont principalement des installations de signalisations de sécurité (voyants,...), d'alarme sonore ou de télécommunication de secours (téléphone, interphone,...).

Autres installations

Les installations, dont l'arrêt inopiné ou le maintien à l'arrêt entraîne des risques pour le personnel, sont généralement des circuits de puissance pouvant avoir des sections importantes et doublant au besoin un certain nombre de circuits normaux. Pour ces circuits et pour les matériels fixes associés (câbles et accessoires de pose), on doit utiliser des matériels présentant au moins les mêmes caractéristiques de sécurité que celles de l'installation normale d'exploitation de la zone considérée. On ne doit ni

Tableau 21 • Synthèse des modes de protection normalisés, des symboles et des références des normes.

Mode de protection	Symbole	Norme	Indice de classement
Immersion dans l'huile	o	NF EN 50015	C 23-515
Surpression interne	p	NF EN 50016	C 23-516
Remplissage pulvérulent	q	NF EN 50017	C 23-517
Enveloppes antidéflagrantes	d	NF EN 50018	C 23-518
Sécurité augmentée	e	NF EN 50019	C 23-519
Sécurité intrinsèque	i	NF EN 50020	C 23-520
Matériel de type «n»	n	NF EN 50021	C 23-521
Encapsulage	m	NF EN 50028	C 23-528
Système électrique de sécurité	i	NF EN 50039	C 23-539

réduire les sections ni changer les qualités requises (résistance au feu, protection mécanique, etc.), ni modifier les calibres et réglages des dispositifs de protection contre les surintensités.

Les critères de sécurité vis-à-vis de l'explosion doivent rester compatibles avec les indicatifs de « sûreté procédé ». Ils sont à formaliser avec les principes directeurs de sécurité propres à la zone considérée.

2.2. Matériel de sûreté

2.2.1. Mode de protection

Le matériel électrique de sûreté, dont les conditions de construction, de montage et de fonctionnement permettent d'éviter l'inflammation du mélange explosif ambiant, doit respecter les règles techniques contenues dans les normes européennes traitant des matériels électriques pour atmosphère explosible.

Le tableau 21 fait la synthèse des modes de protection normalisés, des symboles utilisés ainsi que des références des normes avec leur indice de classement.

Certaines règles de construction (enveloppes, fermetures, scellements, raccordements, entrées de câbles, vérifications et épreuves, marquages) étant communes pour les modes de protection **o**, **p**, **q**, **d**, **e**, **i** et **m**, celles-ci font l'objet de la norme NF EN 50014 : « Matériel électrique pour atmosphères explosives - Règles générales ».

Des normes spécifiques existent pour le matériel de projection électrostatique (NF EN 50053, parties 1 à 3).

« o » - Immersion dans l'huile (NF EN 50015)

Mode de protection dans lequel le matériel électrique ou les parties de matériel électrique sont immergés dans un liquide de protection, de telle sorte qu'une atmosphère explosive, se trouvant au

dessus du liquide ou à l'extérieur de l'enveloppe, ne puisse s'enflammer.

La norme NF EN 50015 est applicable aux matériels électriques et aux parties de matériel électrique qui ne produisent pas d'arcs ou d'étincelles en service normal, sauf pour les parties conçues pour être conformes à la norme NF EN 50020 « Matériel électrique pour atmosphères explosives - Sécurité intrinsèque **i** ». De plus, ce mode de protection est limité aux matériels fixes.

Ce mode de protection peut s'appliquer aux machines tournantes, matériels de régulation et de faible puissance, démarreurs, régulateurs de vitesse, rhéostats, résistances, transformateurs, etc. Il est actuellement peu utilisé en France.

« p » - Surpression interne (NF EN 50016)

Mode de protection dans lequel la pénétration d'une atmosphère environnante à l'intérieur de l'enveloppe du matériel électrique est empêchée par le maintien, à l'intérieur de celle-ci, d'un gaz de protection à une pression supérieure à celle de l'atmosphère environnante. La surpression est maintenue avec ou sans débit continu du gaz de protection. Cette surpression peut être assurée par un gaz inerte (argon, azote,...) ou par l'air prélevé en zone non dangereuse.

Un dispositif automatique fonctionnant dès que la surpression, par rapport à la pression extérieure, est inférieure à 0,5 mbar (1 bar = 10⁵ Pa), doit entraîner la mise hors tension, le déclenchement d'une alarme ou tout autre moyen assurant la sécurité de l'installation.

Ce principe paraît assez simple mais son application réclame certaines précautions essentielles :

- les fuites doivent être suffisantes mais pas trop importantes pour ne pas conduire à un débit de gaz de protection excessif ;

- la mise sous tension ne doit pouvoir s'effectuer qu'après balayage par une quantité de gaz de protection suffisante, au minimum égale à cinq fois le volume interne de l'enveloppe et de ses éléments associés, y compris les canalisations d'amenée et d'évacuation du gaz de protection ;
- si le gaz de protection n'est pas un gaz inerte mais de l'air, celui-ci doit être prélevé dans une zone où cet air ne peut pas être pollué par des gaz combustibles ;
- des dispositifs de contrôle de la pression interne sont nécessaires, afin de s'assurer que l'enveloppe soit toujours en surpression ;
- lorsque les matériels sont de nature à produire des étincelles, particules incandescentes ou présenter des surfaces internes dont la température dépasse la température d'auto-inflammation, les rejets doivent s'effectuer à l'extérieur de la zone dangereuse ou à l'intérieur de celle-ci, s'il existe :
 - pour les matériels produisant des étincelles, un dispositif d'arrêt d'étincelles et de particules,
 - pour les matériels présentant une température supérieure à celle d'auto-inflammation, un dispositif s'opposant à la pénétration rapide de l'atmosphère explosible dans l'enveloppe ;
- toute partie d'installation, située à l'intérieur de l'enveloppe et susceptible de rester sous tension après arrêt de la surpression, doit être dotée d'un autre mode de protection ;
- les portes ou couvercles, pouvant être ouverts sans l'aide d'un outil, doivent être verrouillés de telle sorte que leur ouverture entraîne automatiquement la mise hors tension et que la mise sous tension ne soit possible qu'après leur fermeture.

Ce mode de protection est applicable aux matériels statiques, tournants, producteurs ou non d'étincelles, c'est-à-dire par exemple à des gros moteurs à courant alternatif ou continu ou à des armoires d'équipements électriques. Il est également utilisé pour assurer la protection des îlots électriques renfermant du matériel électrique comme des disjoncteurs, sectionneurs, fusibles, contacteurs, etc., bien que la norme NF EN 50016 ne vise pas ce type d'installation (voir norme CEI 79-13, relative à la construction et l'exploitation de salles ou bâtiments protégés par surpression interne).

Ce mode de protection autorise également le montage d'appareils avec éventuellement source de dégagement interne (analyseurs de gaz par exemple).

(8) Matériel ou partie de matériel électrique pour atmosphères explosibles.

« q » - Remplissage pulvérulent (NF EN 50017)

Mode de protection par lequel les parties susceptibles d'enflammer une atmosphère explosive sont en position fixe et sont complètement noyées dans un matériau de remplissage (particules de quartz ou de verre), de telle sorte que l'inflammation d'une atmosphère explosive environnante soit empêchée. Le mode de protection peut ne pas interdire la pénétration de l'atmosphère explosive environnante dans le matériel et les composants Ex⁽⁸⁾, ni l'inflammation par les circuits. Cependant, du fait des petits volumes libres dans le matériau de remplissage et du fait de l'extinction d'une flamme qui se propagerait à travers les cheminements dans le matériau de remplissage, une explosion externe n'est pas possible.

Ce mode de protection ne peut s'appliquer qu'aux matériels ne comportant pas de pièces en mouvement au contact du matériau de remplissage. Il peut être employé, par exemple, pour des transformateurs, des ballasts d'appareil d'éclairage, des résistances fixes, des boîtes à bornes, des boîtes de raccordement de câbles électriques et des condensateurs.

« d » - Enveloppe antidéflagrante (NF EN 50018)

Mode de protection par lequel les pièces, qui peuvent enflammer une atmosphère explosive, sont enfermées dans une enveloppe qui résiste à la pression développée lors d'une explosion interne d'un mélange explosif et qui ne permet pas la transmission à l'atmosphère explosive environnante de l'enveloppe.

En cas d'inflammation interne d'un mélange gazeux, le front de flamme vient se lamener à travers les interstices de fuites qui l'allongent, le refroidissent et l'éteignent. L'enveloppe n'étant pas étanche, ce matériel doit être protégé contre l'humidité et les corrosions par :

- graissage des joints à l'aide d'une graisse qui ne sèche pas (graisse au silicone ou autre suivant instructions du fabricant) ;
- protection des parties supérieures externes des joints par mise en place d'auvents ou autres dispositifs ou dispositions.

Ce mode de protection est applicable à tous les types de matériels : statiques, tournants, producteurs ou non d'étincelles. Il a fait ses preuves d'efficacité mais il conduit à des enveloppes lourdes et encombrantes et demande un usinage soigné ; son application réclame certaines précautions essentielles :

- interdire de faire subir une modification mécanique quelconque à l'enveloppe (pas de perçage supplémentaire par exemple) ;
- interdire de modifier les matériels annexes de type presse-étoupe, bouchon obturateur, visserie,...
- monter correctement les presse-étoupe et plus particulièrement utiliser les bons cônes et respecter les couples de serrage ;
- veiller au bon état des joints de laminage en n'utilisant que des produits prescrits par les fabricants ;
- interdire de modifier ou de remplacer le matériel contenu dans l'enveloppe en dehors des limites fixées par le constructeur.

« e » - Sécurité augmentée (NF EN 50019)

Mode de protection consistant à appliquer des mesures afin d'éviter, avec un coefficient de sécurité élevé, la possibilité de températures excessives et l'apparition d'arcs ou d'étincelles à l'intérieur et sur les parties externes du matériel électrique qui n'en produit pas en service normal.

Ce mode de protection s'applique uniquement aux matériels électriques ne produisant en service normal ni arc ni étincelle ni échauffement dangereux et dont la tension nominale ne dépasse pas 11 kV.

Son application réclame certaines précautions essentielles :

- les éléments susceptibles d'être soumis à des surcharges ou de dépasser la température limite doivent être protégés par des dispositifs appropriés et fiables ;
- pour les machines tournantes, les réglages des dispositifs de sécurité doivent tenir compte entre autres du rapport du courant de démarrage I_A / I_N et la durée t_E (I_A = courant de démarrage, I_N = courant nominal, t_E = durée de montée en température limite d'un enroulement sous courant de démarrage I_A) ;
- les connexions doivent être parfaitement serrées.

Il peut être employé pour des moteurs électriques à courant alternatif à rotor en court-circuit dits à « cage d'écureuil », alternateurs et moteurs synchrones sans bagues ni balais (à aimants permanents), résistances de démarrage à échauffement limité et sans contacts glissants, électro-aimants, boîtes de raccordement ou de connexion, certains luminaires à incandescence,...

« i » - Sécurité intrinsèque (NF EN 50020)

Un matériel électrique ou un circuit ou partie de circuit est dit à sécurité intrinsèque, lorsqu'aucune étincelle et aucun effet thermique, produit dans les conditions d'épreuves prescrites (qui couvrent le

fonctionnement normal et des conditions spécifiées de défauts), n'est capable de provoquer l'inflammation d'une atmosphère explosive donnée. La norme visant la conception du matériel " i " introduit la notion de matériel électrique associé. Le matériel électrique associé est un matériel électrique dans lequel les circuits ne sont pas tous de sécurité intrinsèque mais qui contient des circuits pouvant affecter la sécurité des circuits intrinsèques qui lui sont raccordés.

Le matériel électrique associé peut être :

- un matériel électrique protégé par un autre mode de protection pouvant être mis en œuvre dans une atmosphère explosible ;
- un matériel électrique non ainsi protégé qui, alors, ne doit pas être utilisé en atmosphère explosible.

Exemple

Un enregistreur situé en zone hors risque, mais qui est raccordé à un capteur placé dans une atmosphère explosible lorsque seul le circuit d'entrée de l'enregistreur est de sécurité intrinsèque.

Les matériels mettant en œuvre ce mode de protection sont répartis en deux catégories :

- catégorie « ia » : la sécurité est assurée en fonctionnement normal en présence d'un défaut unique et en présence de n'importe quelle combinaison de deux défauts ;
- catégorie « ib » : la sécurité est assurée en fonctionnement normal et en présence d'un défaut unique.

Le matériel de la catégorie « ia » est donc plus sûr que le matériel de la catégorie « ib ».

Son application réclame certaines précautions essentielles :

- interdiction de faire subir à un matériel ou circuit à sécurité intrinsèque ainsi qu'au matériel électrique associé une modification quelconque ;
- l'installation d'un matériel ou d'un circuit à sécurité intrinsèque doit être réalisée de manière à assurer de façon certaine sa séparation par rapport à tout autre circuit ;
- l'association des matériels en sécurité intrinsèque doit être réalisée conformément aux instructions du fabricant ; si les éléments de raccordement sont identifiés à l'aide d'une couleur, celle-ci doit être le bleu clair. Les systèmes de sécurité intrinsèque doivent être validés suivant la législation en vigueur (certification requise pour la zone 0).

Ce mode de protection est très répandu pour les circuits de très faible puissance et plus

particulièrement pour les circuits de régulation, commande et signalisation. Il est souvent fait usage de barrières de sécurité à diodes ou de dispositifs à isolation galvanique. Ceux-ci, situés en zone non dangereuse, constituent l'interface permettant d'alimenter sans danger des appareils électriques situés en zone à risque d'explosion.

« n » - (NF EN 50021)

Mode de protection appliqué à un matériel électrique, de manière qu'en fonctionnement normal et dans certaines conditions anormales spécifiées dans la norme NF EN 50021, il ne puisse pas enflammer une atmosphère explosive environnante. La norme définit 5 catégories de matériel de type « n » :

« nA » - Matériels ne produisant pas d'étincelles ; exemples :

Exemple

- machines tournantes (moteur...),
- fusibles,
- luminaires,
- instruments et matériels de faible puissance,
- transformateurs de courant,
- prises de courant,
- batteries d'accumulateurs et batteries,...

« nC » - Matériels produisant des étincelles, dont les contacts sont convenablement protégés par un procédé autre que par enveloppe à respiration limitée, à énergie limitée et à surpression interne simplifiée ;

Exemple

- dispositifs à coupure enfermée,
- composants non-propagateurs de flamme,
- dispositifs scellés hermétiquement,...

« nR » - Enveloppes à respiration limitée.

« nL » - Matériels à énergie limitée.

« nZ » - Enceintes à surpression interne simplifiée.

« m » : Encapsulage (NF EN 50028).

Mode de protection par lequel les pièces qui pourraient enflammer une atmosphère explosive par des étincelles ou des échauffements sont enfermées dans un compound de telle matière que cette atmosphère explosive ne puisse être enflammée.

Ce mode de protection s'applique aux matériels électriques, parties de matériel électrique et composants Ex⁽⁹⁾ dont la tension nominale ne

dépasse pas 11kV. Sauf indication contraire, ces matériels sont conçus pour supporter un courant de court-circuit présumé de 4 000 A s'ils sont raccordés à une source externe.

Matériel utilisant plusieurs modes de protection

Il est possible d'associer plusieurs modes de protection pour la construction d'un matériel. Dans ce cas, la certification doit impérativement faire l'objet d'une certification globale, où sera précisé le mode de protection de chaque partie électrique (exemple : moteur anti-déflagrant « d » avec boîte à bornes en sécurité augmentée « e »).

La norme NF EN 50284 utilise, le cas échéant, plusieurs modes de protection, afin de garantir le très haut niveau de sécurité exigé par la catégorie 1 G.

2.2.2. Marquage

Comme décrit précédemment, le marquage CE, conformément à la directive européenne 94/4/CE, ne prend en compte ni le mode protection, ni la température maximale de surface, ni les subdivisions de gaz du groupe II ; il existe cependant un système normatif auquel les utilisateurs peuvent largement se référer. Ainsi, la norme européenne NF EN 50014, concernant le matériel électrique pour atmosphères explosibles, prévoit un marquage normatif. Les éléments les plus importants de ce marquage « normatif » sont les suivants :

- le symbole EEx qui indique que le produit est conforme à une norme CENELEC au moins de cette série ;

- le symbole du mode de protection utilisé :

- « o » immersion dans l'huile,
- « p » surpression interne,
- « q » remplissage pulvérulent,
- « d » enveloppe antidéflagrante,
- « e » sécurité augmentée,
- « ia » sécurité intrinsèque, catégorie « ia »,
- « ib » sécurité intrinsèque, catégorie « ib »,
- « m » encapsulage ;

- le symbole du groupe du matériel électrique :

- groupe I - Matériels destinés aux atmosphères des mines grisouteuses ;
- groupe II - Matériels destinés aux autres atmosphères qui sont classés en trois subdivisions IIA, IIB, IIC, selon les caractéristiques de l'atmosphère de destination ;

- la classe de température pour les matériels du groupe II - 6 classes T1 à T6 : 450°, 300°, 200°, 135°, 100°, 85 °C ;

(9) Matériel ou partie de matériel électrique pour atmosphères explosibles.

- le symbole « X » si des conditions spéciales sont requises pour une utilisation sûre ;
 - l'organisme certificateur ;
 - la température ambiante, si elle est différente du domaine usuel (- 20°, + 40° C).
À ce marquage, peut s'ajouter un marquage complémentaire prévu par les normes de construction :
 - pour le matériel de sûreté - immersion dans l'huile « o » :
 - liquide de protection à utiliser,
 - valeur de réglage du dispositif de décharge, s'il y a lieu ;
 - pour le matériel de sûreté – surpression interne « p » :
 - le volume interne libre,
 - la nature du gaz de protection (pour autant que l'air n'est pas utilisé),
 - la quantité minimale de gaz de protection nécessaire au balayage de l'enveloppe,
 - la pression minimale en service et, si nécessaire, le débit minimal de gaz de protection. Le point de contrôle de la pression doit être indiqué de façon précise, soit sur le matériel électrique, soit sur le certificat ;
 - pour le matériel de sûreté – remplissage pulvérulent « q » :
 - données du fusible externe si le type de protection dépend d'un tel fusible,
 - courant de court-circuit présumé de la source externe d'alimentation électrique autorisée si le matériel a été conçu pour un courant de court-circuit différent de 1 500 A ;
 - pour le matériel de sûreté – sécurité augmentée « e » :
 - tension et courant nominaux,
 - pour les machines tournantes et les électro-aimants en courant alternatif, le rapport du courant de démarrage IA / IN et la durée tE,
 - pour les appareils de mesure et les transformateurs de mesure, le courant thermique limite et le courant dynamique limite,
 - pour les luminaires, les caractéristiques des lampes à utiliser,
 - les limitations d'emploi,
 - les dispositifs spéciaux de protection, si nécessaire ;
 - pour le matériel de sûreté – sécurité intrinsèque « i » :
 - pour le matériel électrique associé, les symboles EEx **ia** ou EEx **ib** (ou **ia** ou **ib**, si EEx est déjà marqué) doivent être placés entre crochets carrés,
 - pour les barrières, les tensions maximales d'entrée et de sortie doivent être indiquées ; pour cela, les symboles respectifs suivants doivent être utilisés U_M et U_Z ;
 - pour le matériel de sûreté – encapsulage « m » :
 - les caractéristiques électriques d'entrée et de sortie, les caractéristiques des coupe-circuit à fusibles extérieurs, s'il y a lieu,
 - le courant de court-circuit présumé admissible s'il est différent de 4 000 A ;
- Concernant le mode de protection de type « n », les règles de marquage sont indiquées dans la norme NF EN 50021. Le marquage doit comprendre :
- le nom du constructeur ou sa marque commerciale déposée,
 - la désignation du type donnée par le constructeur,
 - le symbole EEx **n** suivi de la catégorie (A, C, R, L ou Z),
 - le symbole du groupe II,
 - la classe de température (T1 à T6),
 - la plage de température ambiante si différente de - 20 °C à 40 °C,
 - le nom ou la marque de l'organisme certificateur, ainsi que le numéro du certificat lorsque le constructeur n'a pas utilisé la procédure d'auto-certification,
 - le symbole « X », s'il existe des conditions spéciales d'installation et d'utilisation (incluses dans le manuel d'instruction).

2.3. Choix du matériel

2.3.1. Association matériel(s) / zone(s)

Depuis le 1^{er} juillet 2003, seuls les appareils et systèmes de protection conformes à la réglementation issue de la directive 1999/92/CE, transposée en droit français par les décrets n° 2002-1553 et n° 2002-1554, pourront être mis sur le marché et en service.

Selon ces deux textes, l'association entre les catégories et le type de la zone est donnée dans le *tableau 22*.

Tableau 22

Zone 0	Zone 1	Zone 2
Matériels de la catégorie 1	Matériels de la catégorie 1 ou 2	Matériels de la catégorie 1, 2 ou 3

La catégorie 1 correspond à un très haut niveau de protection. La catégorie 2 correspond à un haut niveau de protection. La catégorie 3 correspond à un niveau normal de protection.

Pour chaque mode de protection la norme correspondante donne la catégorie du matériel ;

Exemple

- NF EN 50015 immersion dans l'huile « o » - catégorie 2G.
- NF EN 50017 remplissage pulvérulent « q » - catégorie 2G.
- NF EN 50020 sécurité intrinsèque « ia » - catégorie 1G.
- NF EN 50020 sécurité intrinsèque « ib » - catégorie 2G.
- NF EN 50021 mode de protection type « n » - catégorie 3G.

La norme NF EN 50284 complète les exigences des normes NF EN 50014 à NF EN 50020 et NF EN 50028 pour adapter le niveau de sécurité apporté par ces normes au très haut niveau de protection.

Il existe, de par la mise en application des deux décrets précités, une relation entre les catégories des appareils ou leur niveau de sécurité et les emplacements où ces appareils doivent être installés. Le marquage des catégories sur les appareils permet à l'utilisateur d'avoir des indications claires, afin de garantir une utilisation sûre.

Remarque

Il faut remarquer que la nouvelle réglementation n'a pas d'effet rétroactif sur les matériels déjà mis en service au 30 juin 2003. Pour mémoire, dans l'ancienne réglementation le matériel électrique de sûreté utilisable en zone à risque d'explosion était aussi fonction du classement de la zone 0, 1 ou 2. Le tableau 23 en fait la synthèse.

2.3.2. Matériels pouvant être installés en zone 0

Les matériels pouvant être installés en zone 0 doivent être conformes à la catégorie 1. Le mode de

protection sécurité intrinsèque « ia » répond aux exigences de cette catégorie. Ce mode de protection n'est plus le seul mode de protection accepté en zone 0 (voir norme NF EN 50284).

2.3.3. Matériels pouvant être installés en zone 1

Les matériels pouvant être installés en zone 1 doivent appartenir aux catégories 1 ou 2. Ils peuvent être conformes à l'un des modes de protection ci après :

- « o » immersion dans l'huile selon la norme NF EN 50015,
- « p » surpression interne selon la norme NF EN 50016,
- « q » remplissage pulvérulent selon la norme NF EN 50017,
- « d » enveloppe antidéflagrante selon la norme NF EN 50018,
- « e » sécurité augmentée selon la norme NF EN 50019,
- « i » sécurité intrinsèque, catégories « ia » ou « ib » selon la norme NF EN 50020,
- « m » encapsulage selon la norme NF EN 50028.

Ces modes de protection ne sont pas limitatifs, car tous les matériels conformes à la catégorie 2 peuvent être installés dans cette zone.

2.3.4. Matériels pouvant être installés en zone 2

Les matériels suivants peuvent être installés en zone 2 :

- matériels destinés à être utilisés en zone 0 ou en zone 1 (catégories 1 ou 2) ;
- matériels conformes au mode de protection de type « n » selon la norme NF EN 50021 (catégorie 3) ;
- matériels de la catégorie 3 dont les principales caractéristiques sont rappelées ci après :
 - engendrer, lors du fonctionnement normal, ni arc ni étincelle,
 - les températures de surface, dans les conditions de fonctionnement prévues, ne doivent pas dépasser la température d'auto-inflammation de l'atmosphère environnante,
 - ne pas produire ou libérer d'atmosphère explosive,
 - être protégés contre les surcharges à l'aide de limiteurs de surintensités, limiteurs de température, d'interrupteurs de pression différentielle,...

Tableau 23

Matériel	Zone 0	Zone 1	Zone 2
Matériels producteurs d'étincelles en service normal	Matériel de sûreté «ia»	Matériel de sûreté sauf «n»	Matériel de sûreté
Matériels sans surface chaude ni arc ni étincelle en service normal	Matériel de sûreté «ia»	Matériel de sûreté sauf «n»	Matériel conçu pour les zones 0 et 1 ou de bonne qualité industrielle

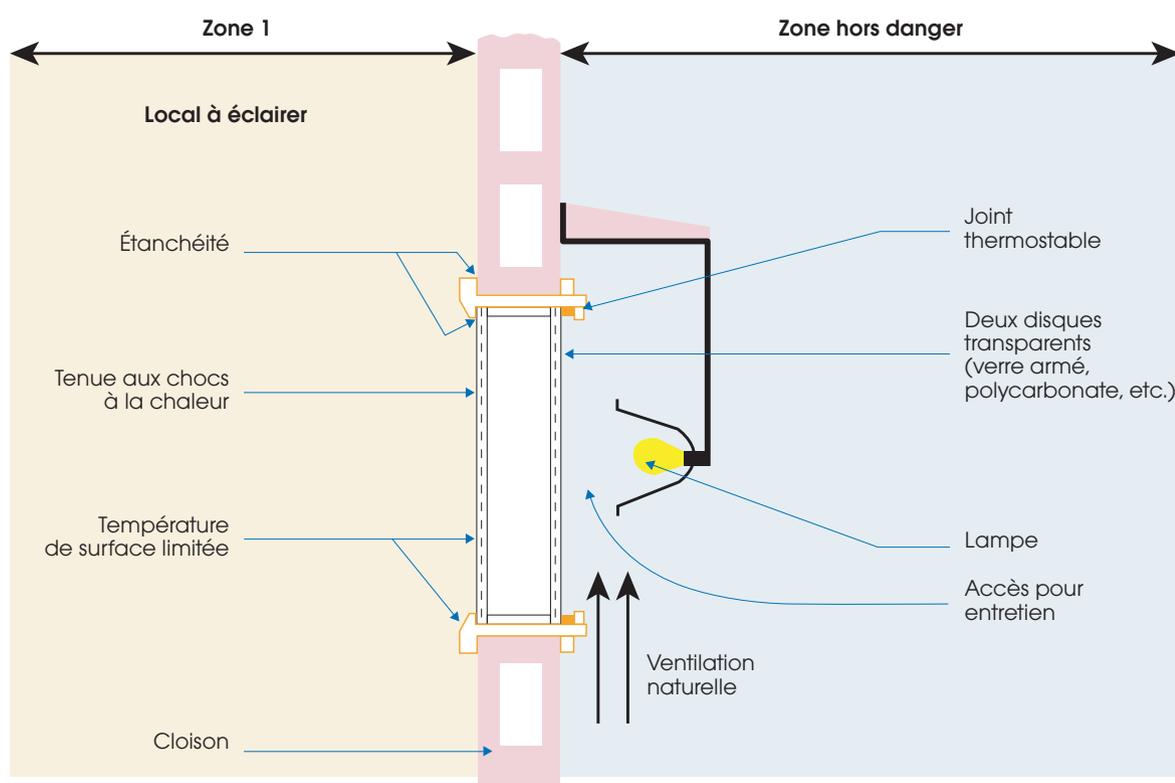


Figure 33 • Éclairage sous verre dormant.

2.3.5. Appareils d'éclairage

L'objectif prioritaire étant de minimiser le matériel électrique dans les zones à risque d'explosion, la mise en zone hors danger peut être réalisée, pour le cas particulier des appareils d'éclairage, par mise sous verre dormant, c'est-à-dire par l'installation de matériel électrique normal derrière une paroi fixe, transparente et étanche aux gaz et vapeurs.

Pour que cette disposition de mise en zone hors danger soit acceptable (figure 33), il faut que :

- le montage de l'élément transparent réalise l'étanchéité de la paroi séparant la zone dangereuse de la zone hors danger (en tenant compte de l'éloignement éventuel, de la ventilation naturelle, etc.) et l'accès pour le remplacement des lampes et l'entretien soit effectué côté zone non dangereuse ;
- la tenue dans le temps soit assurée par la qualité des matériaux, le montage et la maintenance (vieillesse des élastomères, fragilité du verre, desserrage du joint, etc.) ;
- la température de surface du point le plus chaud situé du côté zone dangereuse soit nettement inférieure à la température d'auto-inflammation du produit créant la zone dangereuse ;
- le pouvoir coupe-feu de la paroi soit suffisant.

2.4. Choix des canalisations

2.4.1. Généralités

Le choix d'un type de câble utilisable en zone à risque d'explosion doit se faire en tenant compte de :

- son lieu d'utilisation : intérieur ou extérieur de bâtiments,
- son environnement : chaleur, humidité, contact avec des liquides corrosifs, des solvants ou des poussières agressives, possibilité de chocs mécaniques,...
- son mode de pose : aérien, souterrain, caniveau, chemin de câbles,
- son utilisation : câble rigide posé en installation fixe ou câble souple pour appareil amovible.

Les câbles utilisables dans les zones à risque d'explosion doivent remplir simultanément toutes les conditions suivantes :

- avoir une tension nominale de 1 000 volts (câbles des séries R2V, RVFV, RGPFV,...),
- être soustraits au risque mécanique ou avoir une protection mécanique complémentaire appropriée aux risques mécaniques auxquels ils sont exposés,
- être non propagateurs de la flamme (catégorie C1 de la norme NF C 32-070),
- être protégés contre les détériorations chimiques,

- réduire de 15 % les valeurs des courants admissibles dans les conducteurs,
- assurer à l'origine du circuit la protection contre les surcharges.

Si l'utilisation de câbles souples est nécessaire, des câbles des séries H07RN-F, H07BB-F et 07BN-4-F peuvent être utilisés.

Attention

Dans les zones à risque d'explosion, il ne doit y avoir aucune canalisation étrangère.

Pour les **circuits d'éclairage de sécurité**, il est admis d'utiliser des câbles de tension nominale 500 volts résistant au feu (catégorie CR1 de la norme NF C 32-070), sous réserve de la surveillance de leur isolement par un contrôleur permanent d'isolement (CPI), que le câble soit sous ou hors tension.

Pour les **circuits de signalisation**, il est possible d'utiliser des câbles de tension nominale inférieure à 1 000 volts mais au moins égale à 250 volts sous réserve de respecter les conditions ci-dessous :

- les câbles font partie d'un circuit en TBTS (très basse tension de sécurité),
- l'intensité maximale du courant, même en cas de défaut, ne doit pas excéder 40 mA pour les gaz et vapeurs des subdivisions B et C et 50 mA pour la subdivision A,
- la protection doit être réalisée par 2 feuillards d'acier d'épaisseur au moins égale à 2 mm ou d'une manière équivalente.

Les **câbles de télécommunication**, utilisés dans des zones à risque d'explosion, doivent remplir simultanément toutes les conditions ci-après :

- être protégés contre les dégradations mécanique et chimique,
- comporter un écran mis à la terre,
- résister à une tension d'essai de 3 000 V 50 Hz entre l'écran et l'armature pendant 5 min,
- être non propagateurs de la flamme (catégorie C1 ou C2 de la norme NF C 32-070),
- voir l'intensité maximale du courant ne pas excéder 200 mA.

Pour l'industrie pétrolière, les **câbles d'instrumentation** doivent être conformes à la norme NF M 87-202.

Les **lignes aériennes** en câbles nus sont interdites dans les zones à risque d'explosion. Lorsqu'une ligne aérienne dessert des emplacements à risque d'explosion, l'alimentation doit s'effectuer par l'intermédiaire d'une canalisation enterrée d'une longueur d'au moins 20 mètres.

2.4.2. Modes de pose

On distingue deux modes de pose principaux :

Pose sans accessoires particuliers

Ce mode de pose utilise certaines particularités du génie civil, caniveaux, corbeaux et tablettes moulés sur les parois. Il n'apporte pas de risque supplémentaire dans les zones à risque d'explosion dans la mesure où ces dispositifs sont en maçonnerie et font partie des parois ou sols en béton.

Pose au moyen d'accessoires spécifiques

Ce mode de pose utilise des colliers, étriers, chemins de câbles, goulottes, gouttières, tubes en matériaux divers, etc. Il convient d'être vigilant, sauf pour les goulottes ou tuyauteries réalisées en béton moulé ou en céramique. Pour les autres matériaux, certains sont à proscrire à cause de leur inflammabilité. Les chemins de câbles métalliques (éléments profilés généralement perforés) doivent être impérativement reliés à la terre, tous les éléments et profilés étant reliés entre eux par des connexions équipotentielles. Il en est de même lorsque, pour des raisons de protection mécanique, on fait cheminer les câbles dans des tubes métalliques. Cette protection contre les chocs est obtenue généralement par l'emploi de tube type MRB. Ces conduits métalliques ne doivent pas être utilisés comme conducteurs de protection, mais les éléments de tubes doivent être reliés entre eux et mis à la terre par les conducteurs de protection. Les colliers et attaches métalliques peuvent également être utilisés ; ils doivent être adaptés aux influences externes (corrosion, vibrations, etc.).

Les canalisations tubulaires, ainsi que les traversées de parois, ne doivent pas introduire un risque de communication d'atmosphère entre zones à risques différents. On utilisera donc des dispositifs empêchant le passage et l'accumulation de gaz, vapeurs ou liquides inflammables ce qui peut impliquer l'obturation de conduits ou de tuyaux, une ventilation efficace ou le remplissage par du sable.

2.4.3. Comportement au feu des câbles

La classification des conducteurs et câbles du point de vue de leur comportement au feu est donnée par la norme NF C 32-070.

La **réaction au feu** est l'aptitude à constituer un aliment pour le feu et à contribuer ainsi au développement de l'incendie. Le classement suivant la réaction au feu est :

- **C1** : câble dit ne propageant pas l'incendie. Enflammé, il ne dégage pas de produits volatils inflammables en quantité suffisante pour donner naissance à un foyer d'incendie secondaire ;

- **C2** : câble dit ne propageant pas la flamme. Pris isolément et enflammé, il ne propage pas la flamme.

La **résistance au feu** est l'aptitude à continuer le service malgré l'action d'un incendie pendant un certain temps. Le classement suivant la résistance au feu est :

- **CR1** : câble assurant sa fonction dans un incendie au moins pendant un certain temps dit résistant au feu. Ce câble comporte un premier isolant à base de caoutchouc silicone, une seconde isolation fibre de verre et une gaine extérieure silicone rouge ou orange. Si un câble est de type CR1, il est aussi au moins de type C2 ;
- **CR2** : câble ordinaire.

3. Matériel non électrique de sûreté

Un des points importants de la directive 94/9/CE, par rapport aux anciennes réglementations, est le fait qu'entrent dans son champ d'application les matériels non électriques destinés à être utilisés en atmosphères explosibles.

Même si la procédure d'évaluation de conformité est différente de celle qui s'applique aux matériels électriques et moteurs diesel, les matériels non électriques (hydrauliques, pneumatiques,

mécaniques...) doivent également répondre aux exigences de la directive précitée (voir tableau 21, où l'on constate que la principale différence réside dans le fait que pour un matériel de catégorie 2, le recours à un organisme notifié pour l'évaluation de conformité n'est pas obligatoire).

La norme NF EN 13463-1 traite les prescriptions et la méthode de base concernant les appareils non électriques pour utilisation en atmosphères explosibles. Elle définit, en particulier, les prescriptions relatives à la conception et à la construction des appareils prévus pour une utilisation en atmosphères explosibles, en conformité avec toutes les catégories des groupes I et II. Elle repose notamment sur l'évaluation du risque d'inflammation. Par ailleurs, elle explique le marquage de ces matériels.

Comme pour le matériel électrique, plusieurs normes définissent les prescriptions et les essais par modes de protection.

S'ils sont destinés à être utilisés dans des atmosphères explosives gazeuses, les chariots élévateurs, alimentés par batterie ou non, entrent dans le champ d'application de la directive 94/9/CE. Ils suivent donc la procédure d'évaluation de conformité (cf. tableau 21), l'évaluation pouvant être réalisée à partir de la norme NF EN 1755 qui fournit les règles de conceptions et de fabrication.



Mesures limitant les effets des explosions

Différentes mesures de protection des enceintes et de leur environnement contre les effets d'explosions internes ou atmosphériques existent ; elles n'empêchent pas la survenue d'une explosion mais elles en limitent les effets et évitent sa propagation à d'autres parties de l'installation.

Le choix et la mise en œuvre des dispositifs doivent obligatoirement faire l'objet d'une étude approfondie et être réalisés par des spécialistes appartenant ou non à l'entreprise et en collaboration avec les fabricants de matériel de protection. L'étude doit prendre en compte les caractéristiques de l'installation et des produits concernés.

Les principales mesures permettant de réduire les effets d'une explosion si celle-ci ne peut être exclue, sont :

- suppression de l'explosion,
- construction résistant à l'explosion,
- décharge de la pression d'explosion,
- isolement de l'explosion,...

Les dispositifs de sécurité faisant l'objet de ce chapitre peuvent être utilisés seuls ou **préférentiellement** en association, en particulier, quel que soit le mode de protection retenu, il est recommandé de découpler (arrête-flammes ou autre). Le risque d'incendie postexplosion doit également être pris en compte.

Rappelons que les systèmes de protection doivent faire l'objet d'une procédure d'évaluation de la conformité telle que définie par la directive 94/9/CE. Enfin, lorsque dans une installation, une explosion n'aura pas pu être maîtrisée, ses conséquences sur l'environnement pourront être réduites par les dispositions telles que :

- l'éloignement des autres installations ou locaux,
- la séparation de ceux-ci par des murs et des écrans

suffisamment résistants pour absorber les pressions d'explosion et les éclats d'appareillage détruits.

1. Mesures constructives permettant aux récipients de résister aux effets d'une explosion primaire ⁽¹⁰⁾

Il y a plusieurs façons fondamentales de réaliser une construction résistant aux explosions :

- Les récipients et les appareils peuvent être conçus comme résistant à la pression d'explosion ou résistant à l'onde de choc de l'explosion. Il faut également veiller à ce que les différents éléments de l'installation résistent également à la pression d'explosion attendue. Cela concerne les systèmes de fixation, les tuyauteries et gaines dans lesquelles l'explosion chemine avant d'être stoppée par l'arrête-flamme. Les forces de réactions de l'onde de pression d'explosion sont également à prendre en compte.

- Les récipients construits pour résister à la pression de l'explosion supportent la pression maximale prévisible sans subir de déformation plastique, même si ces derniers sont soumis plusieurs fois à celle-ci.

- Les récipients résistant à l'onde de choc de l'explosion sont conçus, eux, pour absorber une onde de choc de l'ordre de grandeur de celle prévisible et cela en subissant une déformation non réversible. Pour la fabrication de récipient résistant à l'onde de choc de l'explosion, on utilisera, autant que faire se peut, des éléments de construction à symétrie axiale (c'est-à-dire des surfaces cylindriques ou coniques).

(10) Explosion qui a lieu dans l'enceinte concernée.

Pour construire les appareillages, y compris les raccords, appendices, afin qu'ils puissent résister aux explosions, on se base principalement sur le P_{max} (pression maximale d'explosion) calculé expérimentalement dans des conditions déterminées (en général situé entre 7 et $8,5 \cdot 10^5$ Pa). Il est parfaitement possible de devoir prendre une valeur plus élevée ou plus faible si, par exemple, la pression initiale, la température, la teneur en oxygène diffèrent ; ce qui est susceptible de conduire à une autre pression d'explosion.

Si on veut construire une installation qui résiste aux effets d'une explosion, il faut également veiller à l'évolution de la résistance à long terme. Et dès lors, il ne faut pas seulement penser à l'influence de l'usure, mais aussi à l'adaptation des méthodes de travail quand on opère avec des trous d'homme ouverts ou quand on oublie de reconnecter toutes les connexions après entretien. Un important facteur de risque réside dans le principe de ce système de protection : l'explosion devant être confinée, cela signifie que, plus que pour d'autres mesures de protection, et aussi davantage que pour un appareil non protégé, la pression d'une explosion doit être contenue. Lorsqu'une conduite de raccordement n'est pas protégée, l'explosion sera propulsée avec force dans cette conduite.

À la suite d'une explosion, un examen s'impose dans tous les cas - même en absence de déformation visible - afin de s'assurer que la résistance du matériau est encore conforme aux exigences.

2. Décharge de la pression d'explosion

Pour éviter la destruction éventuelle d'enceintes (réservoirs, réacteurs,...), une fraction déterminée de la surface de leurs parois est ouverte ou moins résistante, de manière à permettre l'évacuation des gaz d'explosion et à ne soumettre le reste de l'enceinte qu'à une pression résiduelle supportable.

La décharge de l'explosion se fait à travers des orifices appelés événements, hors des ateliers, au besoin par l'intermédiaire d'une canalisation, dans une direction où elle n'est pas dangereuse et, éventuellement, à l'aide d'un déflecteur.

Dans une enceinte de forme déterminée, contenant un gaz ou une vapeur inflammable donnée, et pour une pression résiduelle d'explosion fixée (valeur à laquelle est limitée la pression d'explosion en raison de la présence d'événements), les événements sont caractérisés

par leur surface S ou par leur « coefficient » X , rapport S/V de la surface S de l'événement (en m^2) au volume V de l'enceinte protégée (en m^3).

La « loi cubique » (voir dans le chapitre 2, § 2.3 « Facteurs influant sur le régime et la violence de l'explosion ») de la violence de l'explosion fait intervenir une constante caractéristique K_g du gaz ou de la vapeur ; les variations de cette constante sont fonction de différents paramètres d'influence. Étant donné que le calcul des surfaces d'événement de décharge fait intervenir la valeur de la constante K_g , il est nécessaire d'évaluer les paramètres pour choisir une valeur K_g acceptable du point de vue de la sécurité.

La détermination des caractéristiques, fournies impérativement par le fabricant, doit prendre en compte, entre autres :

- la pression initiale du mélange explosif ;
- la température initiale du mélange explosif. Une augmentation de température conduit généralement à une augmentation de la vitesse de montée en pression et à une diminution de la pression d'explosion ;
- la caractéristique d'une canalisation prolongeant l'événement ;
- l'inertie des obturateurs d'événements (membranes de rupture ou clapets). L'influence de l'inertie des obturateurs se manifeste par la différence des pressions statique et dynamique d'ouverture. Les disques et membranes en métal (attention à la fragmentation) disponibles dans le commerce, spécialement conçus pour obstruer les événements d'explosion, ont fréquemment une faible inertie qu'il est nécessaire néanmoins de prendre en compte ;
- les caractéristiques de l'enceinte.

L'utilisation d'événement relativement bien maîtrisée pour les explosions air/poussières est plus difficile d'application pour les explosions air/gaz-vapeurs. Les constructeurs d'événements et les organismes spécialisés peuvent assister les industriels dans le calcul et le dimensionnement des événements.

3. Systèmes d'isolement de l'explosion

Lorsque des réservoirs ou des appareils à risque d'explosion sont reliés par des canalisations à une installation, il existe un danger de transmission de l'explosion à l'ensemble de l'installation. Au cours de cette transmission, il peut se produire des effets de déplacement de turbulence et de compression

susceptibles d'engendrer des pressions d'explosion plus élevées et même des détonations. Il peut être utile de prévoir des dispositifs pour empêcher de telles transmissions, dont le rôle est de découpler techniquement l'installation lors d'une explosion.

Pour les gaz et vapeurs, le principal système d'isolement de l'explosion (découplage) est l'arrête-flammes.

3.1. Arrête-flammes

Les arrête-flammes (*photo 3*) ont pour objet d'empêcher la propagation d'une explosion dans une atmosphère explosive. De nombreux procédés utilisent comme moyen de transport, pour des gaz ou vapeurs potentiellement inflammables ou explosibles, des réseaux de tuyauterie de longueurs variables. S'il existe une possibilité d'ignition, l'une des manières les plus efficaces d'arrêter les explosions consiste à installer un arrête-flammes en bout de ligne d'évent (pour éviter le retour de flammes de l'atmosphère vers l'appareil à protéger), là où les gaz débouchent à l'atmosphère (arrête-flammes placés

à l'extrémité des événements de respiration des réservoirs de liquides inflammables, etc.) ou en ligne, dans un endroit stratégique du système de tuyauterie dans les canalisations de transport de gaz.

Un arrête-flammes est constitué d'une matrice de métal gaufré formant d'étroits passages de section triangulaire, que doivent franchir les gaz enflammés et dans lesquels ils se refroidissent. Lorsque la flamme pénètre dans l'élément, sa température est progressivement réduite de sorte que les gaz soient refroidis en dessous de la température d'auto-inflammation, à la sortie de l'arrête-flammes.

L'étouffement d'une flamme, et donc son extinction, exige que la section des passages soit inférieure à l'interstice expérimental maximal de sécurité (IEMS) pour le gaz ou la vapeur considérés ; leurs dimensions dépendront également de la nature du gaz et de sa concentration dans son mélange avec l'air.

Les diamètres maximaux des passages de forme triangulaire sont respectivement, pour les flammes de propane de l'ordre de 0,8 et pour celle d'hydrogène de l'ordre de 0,15 mm.

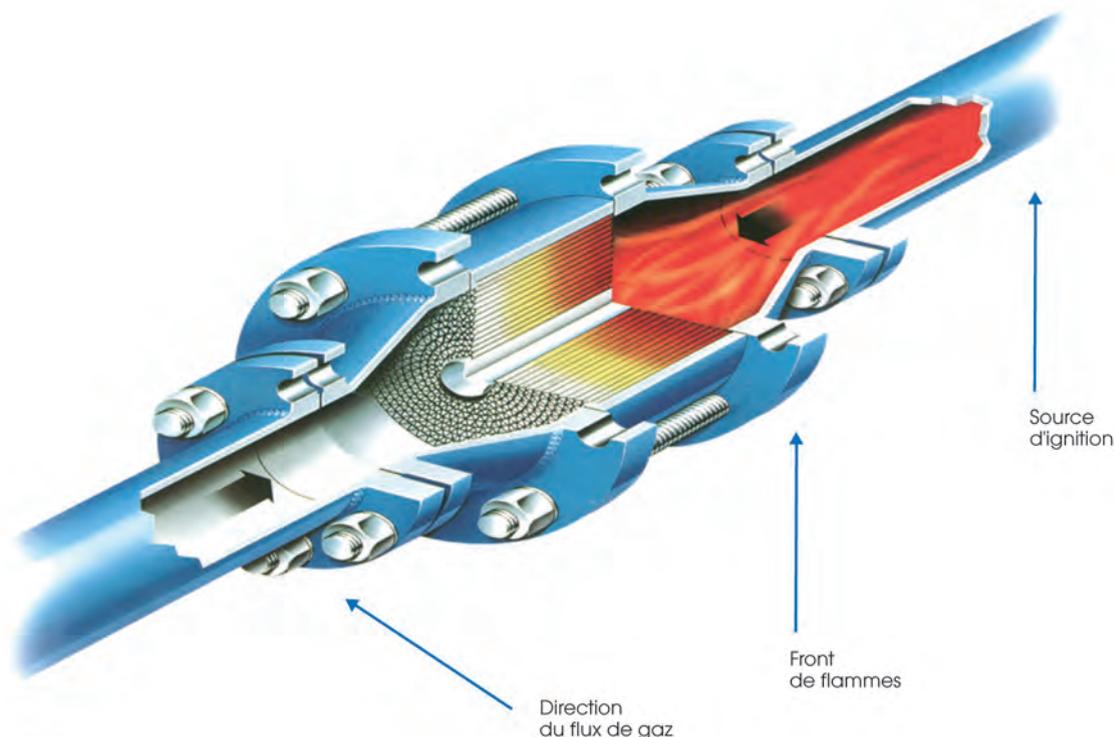


Photo 3 • Arrête-flammes en coupe (Source : ALSATEC).



Photo 4 • Arrête-flammes bout de ligne (Source : ALSATEC).

La longueur de l'épaisseur de l'élément doit encore être suffisante (de l'ordre de quelques millimètres à quelques centimètres) pour que la flamme soit étouffée à l'intérieur de l'élément et que le risque de réallumage du côté protégé de l'élément soit complètement éliminé. Lors d'une détonation, il faudra, de plus, amortir l'onde de choc.

Outre les facteurs d'influence déjà cités, la température et la pression maximum de service à l'arrête-flammes et la configuration de la tuyauterie dans laquelle chemine l'explosion, ont une influence sur les caractéristiques de l'explosion et donc sur le type d'arrête-flammes.

Les matériaux actifs des arrête-flammes, généralement métalliques, devront résister à des températures de près de 1 000 °C. On peut rencontrer des grilles à mailles serrées, des plaques perforées, des matières poreuses, des paquets de fils comprimés, des empilements de plaques (parallèles à la direction de la circulation) laminant le passage, des plaques de métaux frittés ; mais les techniques actuelles reposent sur les feuilles gaufrées enroulées (qui donnent les résultats les plus reproductibles), des

gallettes de rubans enroulés et cannelés transversalement, des assemblages de feuilles plissées (gaufrées) parallèlement à l'axe de passage. Les six premiers types de matériaux cités peuvent arrêter une flamme d'explosion mais, devant résister à la pression de cette dernière, des essais sont nécessaires pour s'en assurer (certains fournisseurs peuvent disposer de procès verbaux d'essais). La conception et la spécification d'un arrête-flammes demande beaucoup d'attention et de soins. Il existe une grande variété de gaz et de mélanges gazeux inflammables, chacun possédant ses propres caractéristiques de combustion. Une attention particulière doit être apportée à l'aspect corrosif des produits, l'élément et le corps devront être construits en matériaux résistant à la corrosion (acier inoxydable, alliage cuivre-nickel,...).

En résumé, pour pouvoir conseiller un arrête-flammes, il convient d'avoir les informations suivantes :

- composition des gaz et/ou vapeurs (% en volume) et/ou IEMS du mélange,
- contenu du stockage et point d'éclair des produits,
- pression maximale de service et de calcul de l'arrête-flammes,
- température maximale de service et de calcul de l'arrête-flammes,
- température minimale de service,
- débit maximum et perte de charge acceptable pour ce débit,
- emplacement de l'arrête-flammes (en ligne ou bout de ligne),
- distance de l'arrête-flammes en ligne à une source d'inflammation potentielle (en ligne seulement) ; de préférence une isométrie sera fournie qui indiquera la présence de coudes, vannes, etc., créant des turbulences,
- matière du corps,
- matière de l'élément,
- brûlage continu éventuel,
- spécifications particulières (peinture, etc.),...
- effet « pré-volume » généré par un changement de diamètre de conduite ou par la présence d'une capacité volumique (réservoirs, ventilateur, pot de purge, compresseur, etc.)

3.2. Autres systèmes d'isolement de l'explosion (découplage)

Parmi les autres systèmes d'isolement de l'explosion les plus fréquemment rencontrés, on peut citer :

- les vannes-guillottes à fermeture ultra-rapide et les clapets Ventex® pilotés,
- les arrêts-barrages à agent extincteur,....



Photo 5 • Vanne-guillotine ultrarapide (Source : ALSATEC).



Photo 6 • Vanne Ventex® pilotée (Source : ALSATEC).

Entre l'emplacement du détecteur et celui des vannes ou des extincteurs, une certaine distance, suivant la vitesse de propagation de l'explosion, sera nécessaire afin que la vanne ou l'extincteur agisse avant l'arrivée de l'explosion. Pour l'extincteur, la quantité de produit d'extinction dépend du type de combustible et de la dimension de la canalisation à protéger, ainsi que de la vitesse d'explosion attendue à l'emplacement des extincteurs.

Vannes à fermeture rapide

Le but d'une vanne à fermeture rapide est d'agir comme barrière mécanique, pour éviter la propagation d'un front de flamme d'explosion à travers des conduites de raccordement.

Arrêt-barrage à agent extincteur

Ce mode de protection permet d'éviter la propagation des flammes d'une explosion à travers les tuyauteries de raccordement, en injectant un produit d'extinction à un endroit donné dans la canalisation ; ce qui a pour effet d'inertier localement la zone. Ce faisant, on empêche l'explosion de se propager. La canalisation reste ouverte tant en fonctionnement normal qu'en cas d'explosion.

4. Protection contre des effets d'explosion, par éloignement ou séparation

Il est nécessaire qu'une distance de sécurité minimale soit établie entre une installation susceptible d'engendrer un risque d'explosion et toute autre installation ou construction. Ces distances peuvent être imposées réglementairement ou être le résultat de l'analyse de risque (voir chapitre II).

Les arrêtés du ministère de l'Industrie du 9 novembre 1972, la réglementation des installations classées (entre autres, la rubrique n° 1430) contiennent des prescriptions relatives aux distances à respecter entre des réservoirs de liquides inflammables ou de gaz combustibles liquéfiés et des constructions de diverses natures.

Pour la protection des personnes, comme pour celle des appareils situés près d'une installation susceptible d'être le siège d'explosions, celle-ci doit être autant que possible entourée de murs ou de cloisons retenant les éclats, le souffle et les flammes. Dans bien des cas, les éclats peuvent être arrêtés par des écrans de tissages métalliques. Lorsque les écrans protecteurs doivent être transparents, ils peuvent être constitués de plaques d'épaisseur convenable de polycarbonate, de polyméthacrylate de méthyle (plus inflammable que le polycarbonate) ou de vitrages feuilletés de verre spéc^l et de matière plastique. Le dimensionnement de ces protections doit tenir compte des températures et pressions maximales susceptibles d'être atteintes lors d'une explosion.

De plus, pour améliorer la sécurité, on peut appliquer, entre autres, les mesures suivantes :

- séparation des parties d'installation à risque (stations de transvasement et de pompage de liquides inflammables, salles de compresseurs, etc.) de celles qui présentent moins de risque ;
- installation de dispositifs de découplage entre les locaux et de dispositifs de décharge pour chaque secteur à risque afin de prévenir la propagation des explosions (voir dans ce même chapitre, § 2 « Décharge de la pression d'explosion »)^(*) ;
- interdiction de vitrages en verre ordinaire non armé...

L'environnement d'une installation susceptible d'être le siège d'explosions doit faire l'objet de mesures de prévention et de protection contre les incendies, qui peuvent être la cause ou la conséquence d'explosions, par exemple en installant des clapets coupe-feu (à ne pas confondre avec un arrête-flammes).

(*) N.B. : Attention à ne pas faire la confusion entre un découplage d'explosion du type arrête-flammes (qui arrête la propagation d'une explosion — malgré le terme « flammes » —) et un clapet coupe-feu (qui arrête la propagation d'un incendie dans une gaine aéraulique ne renfermant pas de gaz ou de vapeurs inflammables et qui est généralement utilisé lorsque la gaine traverse une paroi coupe-feu). Ce clapet coupe-feu ne saurait en aucun cas arrêter une explosion !



Conclusion

Conclusion

Cette brochure se veut un guide pratique, afin d'apporter des mesures de prévention appropriées aux risques d'explosion liés à la mise en œuvre ou à la présence de gaz ou vapeurs inflammables dans les installations industrielles.

L'application des mesures de sécurité, mentionnées dans ce document, suppose la connaissance des caractéristiques de combustibilité et d'explosivité des gaz ou vapeurs des produits concernés.

Par ailleurs, en complément des mesures techniques de prévention, des mesures d'organisation s'imposent pour diminuer les risques d'explosion, d'une part, et pour garantir l'efficacité des mesures techniques adoptées, d'autre part. Parmi de nombreuses

possibilités, les mesures d'organisation comme l'établissement de programme de contrôle de la sécurité et d'entretien des installations et équipements, la signalisation des zones de danger et l'interdiction d'accès à ces zones, l'élaboration d'instructions de service adéquates, l'information et la formation régulières du personnel, etc., sont les plus fondamentales dans le cadre de la pratique industrielle.

Il n'en demeure pas moins vrai, que d'autres risques peuvent être présents dans des unités où existent des risques d'explosions dues aux gaz ou aux vapeurs. Ils n'ont pas été traités ici, mais il conviendra de s'en prémunir également.



Bibliographie

Bibliographie

PRINCIPAUX TEXTES RÉGLEMENTAIRES

- Décret n° 2002-1553 modifié du 24 décembre 2002, relatif aux dispositions concernant la prévention des explosions applicables aux lieux de travail et modifiant le chapitre II du titre III du livre II du Code du travail (art. R. 232-12-23 à R. 232-12-29).
- Décret n° 2002-1554 du 24 décembre 2002, relatif aux dispositions concernant la prévention des explosions que doivent observer les maîtres d'ouvrage lors de la construction des lieux de travail et modifiant le chapitre V du titre III du livre II du Code du travail (art. R. 235-4-17).
- Arrêté du 8 juillet 2003 complétant l'arrêté du 4 novembre 1993 relatif à la signalisation de sécurité et de santé au travail.
- Arrêté du 8 juillet 2003, relatif à la protection des travailleurs susceptibles d'être exposés à une atmosphère explosive.
- Arrêté du 28 juillet 2003, relatif aux conditions d'installation des matériels électriques dans les emplacements où des atmosphères explosives peuvent se présenter.
- Circulaire DRT n° 11 du 6 août 2003, commentant l'arrêté du 28 juillet 2003 relatif aux conditions d'installation des matériels électriques dans les emplacements où des atmosphères explosives peuvent se présenter.
- Circulaire du 9 mai 1985 commentant les décrets n° 84-1094 du 7 décembre 1984 et n° 84-1093 du 7 décembre 1984.
- Code du travail. Art. R 231-51. Classement des substances et préparations dangereuses.
- Arrêté du 9 novembre 1972. Règles d'aménagement et d'exploitation de dépôts d'hydrocarbures. Ministère de l'Industrie.
- Arrêté ADR consolidé du 25 février 2004. Transport routier, ferroviaire et par voies de navigation intérieures. Ministère des Transports.
- Arrêté du 23 novembre 1987 modifié. Règlement sur la sécurité des navires. Ministère des Transports.
- Instructions techniques de l'OACI pour la sécurité du transport aérien. Éditions 97-98.
- Décret n° 96-1010 du 19 novembre 1996 modifié, relatif aux appareils et aux systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles (transposition en droit français de la Directive n° 94/9/CE).
- Décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977 modifié, relatif aux installations classées pour la protection de l'environnement.
- Arrêtés-types n°s 1412, 1430 et 1434. Liquides inflammables. Réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement. Ministère de l'Environnement.
- Arrêté du 31 mars 1980, concernant les installations électriques des installations classées et susceptibles de présenter des risques d'explosion.
- Décret n° 88-1056 du 14 novembre 1988 concernant la protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques.
- Arrêté du 4 novembre 1993 modifié, relatif à la signalisation de sécurité et de santé au travail.

■ Décret n° 92-158 du 20 février 1992 fixant les prescriptions d'hygiène et de sécurité applicables aux travaux effectués dans un établissement par une entreprise extérieure (art. R. 237-1 à R. 237-28).

■ Recommandation de la Caisse nationale de l'assurance maladie R. 208 - Centrifugation de mélanges contenant un liquide inflammable ou un produit solide instable.

■ Recommandation de la Caisse nationale de l'assurance maladie R. 215 - Batteries d'accumulateurs. Prévention des risques d'explosion.

PRINCIPALES NORMES

■ NF EN 292-1 (1991) - Sécurité des machines. Notions fondamentales, principes généraux de conception. Partie 1 : Terminologie de base, méthodologie.

■ NF EN 292-2 (1995) - Sécurité des machines. Notions fondamentales, principes généraux de conception. Partie 2 : principes techniques et spécifications.

■ NF EN 1127-1 (1997) - Atmosphères explosives. Prévention de l'explosion et protection contre l'explosion. Partie 1 : Notions fondamentales et méthodologie des mines.

■ NF EN 1755 (2000) - Sécurité des chariots de manutention. Fonctionnement en atmosphères explosives. Utilisation dans des atmosphères inflammables dues à la présence de gaz, de vapeurs, brouillards ou poussières inflammables.

■ NF EN 1834-1 (2000) - Moteurs alternatifs à combustion interne. Prescriptions de sécurité pour la conception et la construction des moteurs fonctionnant en atmosphère explosible. Partie 1 : Moteurs du groupe II utilisés dans des atmosphères de gaz et de vapeurs inflammables.

■ NF EN 12874 (2001) - Arrête-flammes. Exigences de performance, méthodes d'essai et limites d'utilisation.

■ NF EN 13237 (2003) - Atmosphères explosibles. Termes et définitions pour les appareils et systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles.

■ NF EN 13463-1 (2001) - Matériels non électriques pour utilisation en atmosphères explosives. Partie 1 : Prescriptions et méthode de base.

■ NF C 15-100 (1995) - Installations électriques à basse tension. Règles.

■ NF C 32-070 (1993) - Conducteurs et câbles isolés pour installations. Essais de classification des conducteurs et câbles du point de vue de leur comportement au feu.

■ NF EN 50014 (1997) - Matériel électrique pour atmosphères explosives. Règles générales.

■ NF EN 50015 (1998) - Matériel électrique pour atmosphères explosives. Immersion dans l'huile « **o** ».

■ NF EN 50016 (1998) - Matériel électrique pour atmosphères explosives. Surpression interne « **p** ».

■ NF EN 50017 (1998) - Matériel électrique pour atmosphères explosives. Remplissage pulvérulent « **q** ».

■ NF EN 50018 (2000) - Matériel électrique pour atmosphères explosives. Enveloppe antidéflagrante « **d** ».

■ NF EN 50019 (2000) - Matériel électrique pour atmosphères explosives. Sécurité augmentée « **e** ».

■ NF EN 50020 (2002) - Matériel électrique pour atmosphères explosives. Sécurité intrinsèque « **i** ».

■ NF EN 50021 (2000) - Matériel électrique pour atmosphères explosives. « **n** ».

■ NF EN 50028 (1987) - Matériel électrique pour atmosphères explosives. Encapsulation « **m** ».

■ NF EN 50054 (1998) - Appareils électriques de détection et de mesure des gaz combustibles. Règles générales et méthodes d'essais.

■ NF EN 50055 (1998) - Appareils électriques de détection et de mesure des gaz combustibles. Prescriptions de performances des matériels de groupe I pouvant indiquer jusqu'à 5 % (V/V) de méthane dans l'air.

■ NF EN 50056 (1998) - Appareils électriques de détection et de mesure des gaz combustibles. Règles de performances des appareils du groupe I pouvant indiquer jusqu'à 100 % (V/V) de méthane dans l'air.

■ NF EN 50057 (1998) - Appareils électriques de détection et de mesure des gaz combustibles. Prescriptions de performances des appareils du groupe II pouvant indiquer jusqu'à 100 % de la limite inférieure d'explosivité.

- NF EN 50058 (1998) - Appareils électriques de détection et de mesure des gaz combustibles. Règles de performances des appareils du groupe II pouvant indiquer jusqu'à 100 % (V/V) de gaz.
 - NF EN 50104 (1998) - Appareils électriques de détection et de mesure d'oxygène. Règles de fonctionnement et méthodes d'essais.
 - NF EN 50284 (1999) - Exigences spéciales pour la construction, l'essai et le marquage des matériels électriques des appareils du groupe II, catégorie 1 G.
 - NF EN 50303 (2000) - Appareils du groupe I de catégorie M1 destinés à rester en opération dans les atmosphères exposées au grisou et/ou à la poussière de charbon.
 - NF EN 60079-10 (1997) - Matériel électrique pour atmosphères explosives gazeuses - Partie 10 : classement des régions dangereuses.
 - NF EN 60079-14 (1999) - Matériel électrique pour atmosphères explosives gazeuses - Partie 14 : installations électriques dans les emplacements dangereux (autres que les mines).
 - NF EN 60079-17 (1999) - Matériel électrique pour atmosphères gazeuses - Partie 17 : inspection et entretien des installations électriques dans les emplacements dangereux (autres que les mines).
 - NF E 74-400 (1998) - Outils à main revêtus pour travail en atmosphères explosibles.
- AUTRES OUVRAGES**
-
- *Explosion et lieu de travail*. Paris, INRS, coll. Le point des connaissances sur, ED 5001.
 - *Intervention d'entreprises extérieures*. Aide-mémoire pour la prévention des risques. Paris, INRS, ED 757, 28 p.
 - D. Dalmazzone, J-C. Laforest, J-M. Petit - *Prédiction des limites inférieures d'explosivité dans l'air. Application de critères thermochimiques pour les gaz et vapeurs de substances organiques*. Paris, INRS, ND 2048, 1997.
 - M. Mairesse, J-M. Petit - *Gaz et liquides combustibles. Réglementation pour le stockage et l'utilisation*. Paris, INRS, ND 2083, 2001, 48 p.
 - *Guide d'intervention*. Face au risque chimique. Paris, Fédération nationale des sapeurs pompiers français, 1992.
 - *Les risques professionnels. Connaissance et prévention*. Paris, Nathan, 1994.
 - Code NFPA 68. *Guide for venting of deflagrations*. Quincy, NFPA, 1998.
 - *L'électricité statique*. Paris, INRS, ED 874, 2003.
 - *Aération et assainissement des lieux de travail*. Paris, INRS, coll. Aide mémoire juridique, TJ 5, 2002, 36 p.
 - *Protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques*. Paris, INRS, ED 723, 2001, 160 p.
 - Code NFPA 53. *Fire hazards in oxygen-enriched atmospheres*. Quincy, NFPA, 2002.
 - Code NFPA 325. *Fire hazard properties of flammable liquids, gases and volatile solids*. Quincy, NFPA, 1996.
 - *Gas explosions*. Heidelberg, Comité international pour la prévention des risques professionnels dans l'industrie chimique de l'AISS, 2000.
 - *Matériel électrique pour atmosphères explosibles*. Paris, GDF-EDF, 1992.
 - J.P. Pineau - *Comprendre l'explosion*. Face aux risques, n° 320, 1996.
 - L. Médard - *Les explosifs occasionnels*. Paris, Technique et documentation, 2^e éd, 1987.
 - H.F. Cowards, G.W. Jones - *Limits of flammability of gases and vapors*. Bulletin 503. US Department of interior. Washington, Bureau of mines, 1952.
 - Encyclopédie des gaz. *L'Air Liquide*. Paris, Amsterdam, Elsevier scientific publishing company, 1976.
 - *Les installations électriques en atmosphères explosives. Guide d'études, de réalisation et de maintenance*. Paris, Union des industries chimiques, 1996.
 - *Les installations et équipements électriques dans les zones à risque d'explosion*. CRAM Rhône-Alpes. Lyon, Publication CNAMTS, 1986.
 - Solvants Hoechst. *Manuel pour le laboratoire et l'usine*. 5^e éd. Francfort, 1975.
 - Code NFPA 49 - *Hazardous chemicals data*. Quincy, NFPA, 1996.

- F.T. Bodurtha - *Industrial explosion prevention and protection*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1980.
- M.A. Nettleton - *Gaseous detonations*. Londres, Chapman and Hall, 1987.
- B. Lewis, G. von Elbe - *Combustion, flames and explosions of gases*. 2^e éd. New York, Academic Press Inc., 1961.
- Documentation **CHUBB Sécurité**. Le Blanc-Mesnil, 2001.
- Documentation **Stuvex**. Les Ullis, 2001.
- Documentation **Alsatec**. Mulhouse, 2001.
- Documentation **Fike France**. Cergy-Pontoise, 2001.
- *Guide to the use of flame arresters and explosion reliefs* - Brochure n° 34. Londres, Ministry of Labor, H.M.S.O. , 1965.
- W. Bartknecht - *Explosions de gaz et de poussières, moyens de les combattre*. Traduction INRS 24 A 77, 1974.
- W. Bartknecht - *Explosionen Ablauf und Schutzmassnahmen*. Berlin Springer Verlag, 1980.
- J. Calzia. *Les substances explosives et leurs nuisances*. Paris, Dunod, 1969.
- Conrad - *Mesure de protection primaire des explosions : mise en inertie des systèmes de gaz explosibles*. Colloque AISS. Berufsgenossenschaft der Chemischen Industrie. Heidelberg. 1973.
- M.J. Weingartner - *Le problème des outils « anti-étincelants »*. Sichere Arbeit, n° 2, 1968.
- Donat - *Réduction de la pression d'explosion au moyen de disques de rupture*. Colloque AISS. Berufsgenossenschaft der Chemischen Industrie. Heidelberg. 1977.
- W. Brasie, D. Simpson - *Guide lines for estimating damage explosion*. Loss prevention, vol. 2, 1968, p. 91.
- F.P. Lees - *Loss prevention in the process industries*. Londres, Butterworths.
- A. Lannoy - *Détermination des effets mécaniques de l'explosion d'un nuage inflammable. Quelques méthodes faciles d'emploi*. Paris, RGS, n° 73, avril 1988.
- A. Lannoy - *Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre. Études déterministe et probabiliste du scénario d'accident prévision des effets de surpression*. Bulletin de la direction des études et recherches. Série A, n° 4. Paris, EDF, 1984.
- S. Duplantier - *Les phénomènes d'explosion résultant de la combustion de gaz, de vapeurs et de brouillard dans des appareils clos*. RST 04. Paris, INERIS, 1996.

Pour obtenir en prêt les audiovisuels et multimédias et pour commander les brochures et les affiches de l'INRS, adressez-vous au service Prévention de votre Carsat, Cram ou CGSS.

Services Prévention des Carsat et des Cram

Carsat ALSACE-MOSELLE

(67 Bas-Rhin)
14 rue Adolphe-Seyboth
CS 10392
67010 Strasbourg cedex
tél. 03 88 14 33 00
fax 03 88 23 54 13
prevention.documentation@carsat-am.fr
www.carsat-alsacemoselle.fr

(57 Moselle)
3 place du Roi-George
BP 31062
57036 Metz cedex 1
tél. 03 87 66 86 22
fax 03 87 55 98 65
www.carsat-alsacemoselle.fr

(68 Haut-Rhin)
11 avenue De-Lattre-de-Tassigny
BP 70488
68018 Colmar cedex
tél. 03 69 45 10 12
www.carsat-alsacemoselle.fr

Carsat AQUITAINE

(24 Dordogne, 33 Gironde,
40 Landes, 47 Lot-et-Garonne,
64 Pyrénées-Atlantiques)
80 avenue de la Jallère
33053 Bordeaux cedex
tél. 05 56 11 64 36
fax 05 57 57 70 04
documentation.prevention@carsat-aquitaine.fr
www.carsat-aquitaine.fr

Carsat AUVERGNE

(03 Allier, 15 Cantal,
43 Haute-Loire,
63 Puy-de-Dôme)
Espace Entreprises
Clermont République
63036 Clermont-Ferrand cedex 9
tél. 04 73 42 70 76
offredoc@carsat-auvergne.fr
www.carsat-auvergne.fr

Carsat BOURGOGNE et FRANCHE-COMTE

(21 Côte-d'Or, 25 Doubs,
39 Jura, 58 Nièvre,
70 Haute-Saône,
71 Saône-et-Loire, 89 Yonne,
90 Territoire de Belfort)
ZAE Cap-Nord, 38 rue de Cracovie
21044 Dijon cedex
tél. 03 80 70 51 32
fax 03 80 70 52 89
prevention@carsat-bfc.fr
www.carsat-bfc.fr

Carsat BRETAGNE

(22 Côtes-d'Armor, 29 Finistère,
35 Ille-et-Vilaine, 56 Morbihan)
236 rue de Châteaugiron
35030 Rennes cedex
tél. 02 99 26 74 63
fax 02 99 26 70 48
drpcdi@carsat-bretagne.fr
www.carsat-bretagne.fr

Carsat CENTRE

(18 Cher, 28 Eure-et-Loir, 36 Indre,
37 Indre-et-Loire, 41 Loir-et-Cher, 45 Loiret)
36 rue Xaintrailles
45033 Orléans cedex 1
tél. 02 38 81 50 00
fax 02 38 79 70 29
prev@carsat-centre.fr
www.carsat-centre.fr

Carsat CENTRE-OUEST

(16 Charente, 17 Charente-Maritime,
19 Corrèze, 23 Creuse, 79 Deux-Sèvres,
86 Vienne, 87 Haute-Vienne)
37 avenue du président René-Coty
87048 Limoges cedex
tél. 05 55 45 39 04
fax 05 55 45 71 45
cirp@carsat-centreouest.fr
www.carsat-centreouest.fr

Cram ÎLE-DE-FRANCE

(75 Paris, 77 Seine-et-Marne,
78 Yvelines, 91 Essonne,
92 Hauts-de-Seine, 93 Seine-Saint-Denis,
94 Val-de-Marne, 95 Val-d'Oise)
17-19 place de l'Argonne
75019 Paris
tél. 01 40 05 32 64
fax 01 40 05 38 84
prevention.atmp@cramif.cnamts.fr
www.cramif.fr

Carsat LANGUEDOC-ROUSSILLON

(11 Aude, 30 Gard, 34 Hérault,
48 Lozère, 66 Pyrénées-Orientales)
29 cours Gambetta
34068 Montpellier cedex 2
tél. 04 67 12 95 55
fax 04 67 12 95 56
prevdoc@carsat-lr.fr
www.carsat-lr.fr

Carsat MIDI-PYRÉNÉES

(09 Ariège, 12 Aveyron, 31 Haute-Garonne,
32 Gers, 46 Lot, 65 Hautes-Pyrénées,
81 Tarn, 82 Tarn-et-Garonne)
2 rue Georges-Vivent
31065 Toulouse cedex 9
fax 05 62 14 88 24
doc.prev@carsat-mp.fr
www.carsat-mp.fr

Carsat NORD-EST

(08 Ardennes, 10 Aube, 51 Marne,
52 Haute-Marne, 54 Meurthe-et-Moselle,
55 Meuse, 88 Vosges)
81 à 85 rue de Metz
54073 Nancy cedex
tél. 03 83 34 49 02
fax 03 83 34 48 70
documentation.prevention@carsat-nordest.fr
www.carsat-nordest.fr

Carsat NORD-PICARDIE

(02 Aisne, 59 Nord, 60 Oise,
62 Pas-de-Calais, 80 Somme)
11 allée Vauban
59662 Villeneuve-d'Ascq cedex
tél. 03 20 05 60 28
fax 03 20 05 79 30
bedprevention@carsat-nordpicardie.fr
www.carsat-nordpicardie.fr

Carsat NORMANDIE

(14 Calvados, 27 Eure, 50 Manche,
61 Orne, 76 Seine-Maritime)
Avenue du Grand-Cours, 2022 X
76028 Rouen cedex
tél. 02 35 03 58 22
fax 02 35 03 60 76
prevention@carsat-normandie.fr
www.carsat-normandie.fr

Carsat PAYS DE LA LOIRE

(44 Loire-Atlantique, 49 Maine-et-Loire,
53 Mayenne, 72 Sarthe, 85 Vendée)
2 place de Bretagne
44932 Nantes cedex 9
tél. 02 51 72 84 08
fax 02 51 82 31 62
documentation.rp@carsat-pl.fr
www.carsat-pl.fr

Carsat RHÔNE-ALPES

(01 Ain, 07 Ardèche, 26 Drôme, 38 Isère,
42 Loire, 69 Rhône, 73 Savoie,
74 Haute-Savoie)
26 rue d'Aubigny
69436 Lyon cedex 3
tél. 04 72 91 96 96
fax 04 72 91 97 09
preventionrp@carsat-ra.fr
www.carsat-ra.fr

Carsat SUD-EST

(04 Alpes-de-Haute-Provence,
05 Hautes-Alpes, 06 Alpes-Maritimes,
13 Bouches-du-Rhône, 2A Corse-du-Sud,
2B Haute-Corse, 83 Var, 84 Vaucluse)
35 rue George
13386 Marseille cedex 5
tél. 04 91 85 85 36
fax 04 91 85 75 66
documentation.prevention@carsat-sudest.fr
www.carsat-sudest.fr

Services Prévention des CGSS

CGSS GUADELOUPE

Immeuble CGRR, Rue Paul-Lacavé, 97110 Pointe-à-Pitre
tél. 05 90 21 46 00 – fax 05 90 21 46 13
lina.palmont@cgss-guadeloupe.fr

CGSS GUYANE

Espace Turenne Radamonthe, Route de Raban,
BP 7015, 97307 Cayenne cedex
tél. 05 94 29 83 04 – fax 05 94 29 83 01
prevention-rp@cgss-guyane.fr

CGSS LA RÉUNION

4 boulevard Doret, 97704 Saint-Denis Messag cedex 9
tél. 02 62 90 47 00 – fax 02 62 90 47 01
prevention@cgss-reunion.fr

CGSS MARTINIQUE

Quartier Place-d'Armes, 97210 Le Lamentin cedex 2
tél. 05 96 66 51 31 et 05 96 66 51 32 – fax 05 96 51 81 54
prevention972@cgss-martinique.fr
www.cgss-martinique.fr

Cette brochure se veut un guide pratique, afin d'apporter des mesures de prévention appropriées aux risques d'explosion liés à la mise en œuvre ou à la présence de gaz ou vapeurs inflammables dans les installations industrielles.

L'application des mesures de sécurité mentionnées dans ce document, suppose la connaissance des caractéristiques de combustibilité et d'explosivité des gaz ou vapeurs des produits concernés.

Par ailleurs, en complément des mesures techniques de prévention, des mesures d'organisation s'imposent pour diminuer les risques d'explosion, d'une part, et pour garantir l'efficacité des mesures techniques adaptées, d'autre part. Parmi de nombreuses possibilités, les mesures d'organisation comme l'établissement de programme de contrôle de la sécurité et d'entretien des installations et équipements, la signalisation des zones de danger et l'interdiction d'accès à ces zones, l'élaboration d'instructions de service adéquates, l'information et la formation régulières du personnel, etc., sont les plus fondamentales dans le cadre de la pratique industrielle.



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris • Tél. 01 40 44 30 00
www.inrs.fr • info@inrs.fr

Édition INRS ED 911

1^{re} édition (2004) • Réimpression juillet 2015 • ISBN 2-7389-1183-8