



Les mélanges explosifs
2. Poussières combustibles

L'Institut national de recherche et de sécurité

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) est une association déclarée sans but lucratif (loi du 1^{er} juillet 1901), constituée sous l'égide de la Caisse nationale de l'assurance maladie. Il est placé sous la tutelle des pouvoirs publics et le contrôle financier de l'État. Son conseil d'administration est composé en nombre égal de représentants du Mouvement des entreprises de France et des organisations syndicales de salariés.

L'INRS apporte son concours aux services ministériels, à la Caisse nationale de l'assurance maladie, aux Caisses régionales d'assurance maladie, aux comités d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail, aux entreprises, enfin à toute personne, employeur ou salarié, qui s'intéresse à la prévention. L'INRS recueille, élabore et diffuse toute documentation intéressant l'hygiène et la sécurité du travail : brochures, dépliants, affiches, films, renseignements bibliographiques... Il forme des techniciens de la prévention et procède en son centre de recherche de Nancy aux études permettant d'améliorer les conditions de sécurité et l'hygiène de travail.

Les publications de l'INRS sont distribuées par les Caisses régionales d'assurance maladie. Pour les obtenir, adressez-vous au service prévention de la Caisse régionale de votre circonscription, dont vous trouverez l'adresse en fin de brochure.

Les Caisses régionales d'assurance maladie

Les Caisses régionales d'assurance maladie disposent, pour diminuer les risques professionnels dans leur région, d'un service prévention composé d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité. Par les contacts fréquents que ces derniers ont avec les entreprises, ils sont à même non seulement de déceler les risques professionnels particuliers à chacune d'elles, mais également de préconiser les mesures préventives les mieux adaptées aux différents postes dangereux et d'apporter, par leurs conseils, par la diffusion de la documentation éditée par l'Institut national de recherche et de sécurité, une aide particulièrement efficace à l'action des comités d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail.

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).

© INRS, 2006. Couverture Bernard Chadebec. Maquette et dessins intérieurs Valérie Causse.

Les mélanges explosifs

Partie 2 : poussières combustibles

Jean-Michel Petit, INRS

ED 944
septembre 2006

Sommaire

Sommaire

Introduction	5		
CHAPITRE 1		CHAPITRE 4	
Généralités sur les explosions de poussières	7	Mesures de protection	43
1. Mécanisme des explosions de poussières	7	1. Appareils résistant à la pression d'explosion	43
2. Caractéristiques des atmosphères poussiéreuses	8	2. Appareils résistant à une pression d'explosion réduite par un système de décharge de la pression d'explosion (système de protection par événement)	44
3. Caractéristiques d'explosion des poussières	14	3. Appareils résistant à une pression d'explosion réduite par un système de suppression d'explosion	46
4. Effets d'une explosion de poussières	15	4. Découplage technique	48
		5. Protection par éloignement ou séparation (mesures portant sur la construction des bâtiments)	53
CHAPITRE 2		6. Mesures organisationnelles	54
Évaluation des risques d'explosion	17		
1. Démarche préventive	17	Conclusion	57
2. Analyse et évaluation <i>a priori</i> des risques	18		
3. Zones de danger	18	Bibliographie	59
CHAPITRE 3			
Mesures de prévention	25		
1. Prévention des explosions par action sur les poussières combustibles	26		
2. Prévention des explosions par action sur le comburant : mise à l'état inerte	28		
3. Prévention des explosions par action sur les sources d'inflammation	30		
4. Appareils utilisables en atmosphères explosives	37		

Introduction

Introduction

On désigne par poussière les petites particules solides qui se déposent sous l'effet de leur poids mais qui peuvent rester en suspension dans l'air pendant un certain temps.

Les poussières peuvent soit être fabriquées dans un but déterminé (farines...), soit être générées au cours du traitement ou de la transformation de matériaux solides (sciure de bois...), soit résulter de l'abrasion de matières solides lors du transport (céréales...).

Toutes les poussières combustibles⁽¹⁾ sont capables de provoquer une explosion dès que le diamètre des particules est inférieur à 500 µm. Il s'agit d'un phénomène très général, connu depuis longtemps. On peut citer notamment les poussières :

- alimentaires (amidon, sucre, farine...),
- végétales (écorces, liège, coton, bois...),
- métalliques (aluminium, magnésium, ferroalliages...),
- industrielles (matières plastiques, déchets pulvérulents...).

En France, il se produit en moyenne une explosion de poussières par jour. Le risque a été amplifié par l'industrialisation croissante, la mécanisation, la générali-

sation des automatismes, l'augmentation des capacités de stockage, l'accroissement des débits de manutention et enfin le nombre de plus en plus élevé de produits présentés sous forme pulvérulente avec des granulométries de plus en plus faibles (diamètre médian de l'ordre de quelques microns).

Toutes les entreprises où vont être fabriqués ou manipulés des produits pulvérulents combustibles vont donc être confrontées à un risque potentiel d'inflammation et d'explosion de poussières. La prévention passera d'abord par la connaissance des caractéristiques d'explosivité des poussières, puis elle visera en premier lieu à éviter la formation d'atmosphère explosive, en second lieu à éviter l'inflammation de l'atmosphère explosive et, enfin, si l'explosion se produit, à en limiter les effets.

Plusieurs unités de pression étant utilisées dans la brochure, le lecteur trouvera dans le tableau ci-dessous la conversion des unités.

(1) Une poussière est combustible si elle est susceptible de subir une réaction exothermique avec l'air lorsqu'elle est enflammée.

	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	$1,333 \cdot 10^2$	$1,333 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$	

Généralités sur les explosions de poussières

1. Mécanisme des explosions de poussières

Pour que des poussières puissent exploser, il faut qu'elles soient combustibles, qu'elles forment, avec l'air, un nuage, mélange relativement homogène, de concentration convenable et satisfaisant à certaines conditions.

Des sources d'inflammation efficaces induisent, sur les particules d'un tel nuage, des réactions dont le bilan global est exothermique qui, présentées de manière simplifiée, peuvent être :

- une oxydation de surface, prépondérante pour les poussières métalliques,
- une pyrolyse, accompagnée d'émission de gaz combustibles formant autour de chaque particule un mélange gazeux explosif qui s'enflamme ; cette réaction est très importante pour les matières organiques, les poussières de charbon. Elle commence, pour ces dernières, à des températures de 350 à 500 °C. Elle s'accompagne, ultérieurement (dans un temps très court), de la combustion de résidus solides.

La flamme se propage dans le nuage ; elle est précédée d'une onde de pression qui est provoquée par l'expansion des gaz chauds formés par la combustion et qui entraîne les poussières du nuage. D'autres poussières déposées sur les parois de l'enceinte – notamment en canalisation – où se déroule l'explosion, peuvent être soulevées et donner lieu à des explosions successives permettant au phénomène de se propager et/ou prendre de l'ampleur.

L'inflammation d'une couche de poussière peut, par les remous gazeux provoqués, mettre en suspension un nuage et être suivie d'une explosion.

Diverses observations ont pu montrer qu'à un instant

donné, dans un nuage qui vient d'être enflammé, l'atmosphère poussiéreuse est séparée en deux régions. La partie en arrière du front de flamme contient des gaz et des résidus solides déjà partiellement brûlés, la partie en avant du front de flamme contient des poussières non brûlées. Si ce processus se passe à l'air libre, nous observons simplement une boule de feu (flambee) avec tous les dégâts que cela peut entraîner.

Les caractéristiques de l'explosion dépendent de la géométrie du confinement :

- Dans un récipient peu allongé, l'expansion des gaz de combustion précomprime l'atmosphère poussiéreuse en avant du front de flamme ; la vitesse de flamme est assez faible, quelques dizaines de m.s^{-1} au maximum et la pression maximale pourra atteindre 10 bars.
- Dans une canalisation, l'expansion des gaz peut conduire à des vitesses de propagation de flamme élevées, de l'ordre de 300 à 400 m.s^{-1} (et même, dans certaines conditions, des valeurs bien supérieures) et des surpressions de plusieurs dizaines de bars.
- La présence d'obstacles modifiera notablement la propagation de l'explosion.

Une explosion peut se produire selon deux régimes : la déflagration ou la détonation. Seules des mesures expérimentales sur les caractéristiques de l'explosion (pression et vitesse de flamme) permettent de savoir si l'un ou l'autre régime est atteint :

- En milieu confiné, c'est le régime de déflagration qui est le cas le plus courant pour les explosions de poussières. La flamme se propage à vitesse subsonique et est précédée par une chasse d'air due à l'expansion des gaz brûlés qui se déplacent à la même vitesse dans les gaz de combustion. Compte tenu du fait que la flamme se propage dans un milieu lui-même en écoulement, la vitesse apparente de la flamme (vitesse de propagation de la flamme par rapport à un repère

lié aux poussières + vitesse d'expansion des gaz brûlés) peut aller jusqu'à 300 à 400 m.s⁻¹ (pouvant atteindre, dans certaines conditions, des valeurs bien supérieures).

- Dans des cas particuliers en canalisation, c'est un régime de quasi-détonation qui peut être atteint. La vitesse de flamme est alors supersonique dans le milieu considéré ; la pression présente une variation brutale et on peut atteindre pendant des temps très courts des surpressions de plusieurs dizaines de bars. C'est cette onde de pression qui chauffe le mélange réactionnel suffisamment brutalement pour que la réaction de combustion se produise immédiatement.

Pour la pratique industrielle, il faut retenir que de tels phénomènes de quasi-détonation pour des explosions air/poussières sont très rares et dépendent de la longueur et du diamètre de conduite, de la concentration en poussières et de leurs caractéristiques ainsi que des pressions et températures.

Toutes ces remarques mettent en évidence la complexité des phénomènes d'explosion de poussières et font qu'il n'est pas possible de caractériser de telles explosions sans avoir réalisé de nombreux essais.

Une explosion (transformation brutale d'un système matériel avec émission de gaz chauds) sera possible si, en premier lieu, sont réunies simultanément les trois conditions de la combustion :

- présence d'un **comburant** (pratiquement toujours l'oxygène de l'air) ;
- présence d'un **produit pulvérulent** combustible à l'état suffisamment divisé (au moins une partie des particules dont le diamètre est inférieur à 0,5 mm) ;
- présence d'une **source d'inflammation** pour amorcer l'explosion. L'action principale de la source d'inflammation est d'élever, au moins localement, le nuage de poussières à une température telle que la réaction d'oxydation responsable de la combustion se produise à une vitesse suffisante. Dans la pratique industrielle, les principales sources d'inflammation sont :
 - les étincelles provoquées par la friction, par l'électricité statique, par le matériel électrique,
 - une flamme,
 - une surface chauffée,
 - des travaux par point chaud (soudure...),
 - l'auto-inflammation d'un dépôt de poussières,
 - des particules et nids incandescents,
 - la foudre...

Le fameux « triangle du feu » qu'est la réunion des trois conditions indique que l'explosion n'est qu'un cas particulier de la combustion ; il s'agit d'une combustion qui se déroule très rapidement. Pour que cette com-

bustion puisse être qualifiée d'explosion, trois conditions complémentaires sont nécessaires (cf. figure 1) :

- Présence de **poussières en suspension** : un nuage de poussières peut être créé par le processus même du traitement du produit (broyage, séchage en lit fluidisé...). Il peut l'être aussi par les manutentions qu'il subit (vidange de silos, transport pneumatique, décolmatage de filtres...). Il peut également être provoqué par le démarrage de l'explosion elle-même. La dispersibilité des poussières est difficile à caractériser. Elle est en principe d'autant plus grande que la masse volumique de la poussière est faible ; de plus, elle dépend de sa cohésion, celle-ci étant liée à l'humidité et à la forme des particules.
- Obtention d'un **domaine d'explosivité** : des limites d'explosivité fixent le domaine de concentration de poussières dans l'air à l'intérieur duquel les explosions sont possibles.
- **Confinement suffisant** : en absence de confinement, on obtient un phénomène de flambée (combustion rapide avec flamme importante mais, généralement, sans effet de pression notable).

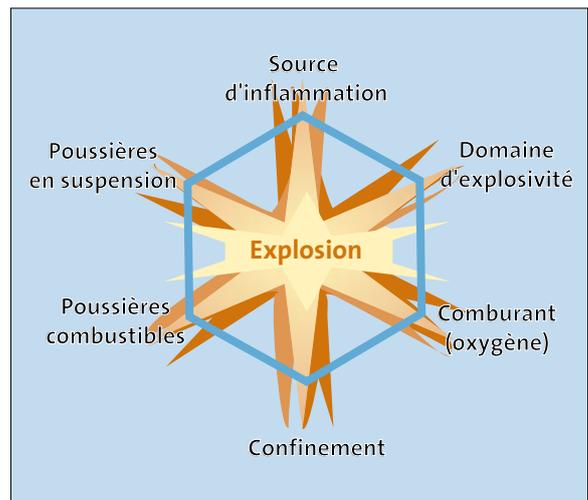


Figure 1 • Hexagone de l'explosion.

2. Caractéristiques des atmosphères poussiéreuses

2.1. Valeurs d'inflammation

Les poussières de toutes les matières combustibles sont susceptibles de s'enflammer et d'exploser plus ou moins violemment. La facilité d'inflammation d'une poussière est mesurée par les valeurs minimales des caractéristiques examinées dans les paragraphes suivants : concentrations inflammables, température et énergie d'inflammation, etc. Ces valeurs sont indiquées pour les poussières courantes dans le *tableau 1* (ci-après).

Tableau 1 • Table des températures et énergies minimales d'inflammation - concentrations minimales d'explosion (d'après l'US Bureau of Mines).

Poussières	Température minimale d'inflammation		Énergie minimale d'inflammation (nuages) (mJ)	Concentration minimale d'explosion (nuages) (g/m ³)	Pressions maximales d'explosion (bar)	Vitesses maximales de montée de pression (bar.s ⁻¹)
	couche	nuage (°C)				
■ POUSSIÈRES D'ORIGINE AGRICOLE						
Amidon (blé)	380	400	25	25	8	500
Arachide (coques)	210	460	50	45	8	560
Blé (vrac)	220	500	60	65	5	160
Bois/pin (farine)	260	470	40	35	8	400
Cacao	240	510	100	75	5	85
Colon brut	520	-	100	190	5	30
Cellulose	270	480	80	55	9	320
Dextrine	390	410	40	40	9	400
Farine/froment	440	440	60	50	7	200
Fécule de maïs	-	380	30	40	7	500
Lait en poudre	200	490	50	50	7	300
Liège	210	460	35	35	7	500
Malt	250	400	35	55	7	300
Riz	450	510	100	85	3,5	50
Soja (farine)	340	550	100	60	7	55
Sucre	400	370	30	45	8	350
■ POUSSIÈRES MÉTALLIQUES						
Aluminium broyé ⁽¹⁾	460 à 900	550 à 700	50 à 120	45 à 120	6 à 7,5	500 à 1 000
Aluminium en paillettes ⁽¹⁾	400 à 900	600 à 700	10 à 100	40 à 60	6,5 à 8	500 à 1 400
Aluminium pulvérisé ⁽¹⁾	490 à 700	550 à 800	15 à 160	40 à 140	4 à 6,5	500 à 1 400
Antimoine	330	415	1 900	420	2	20
Cadmium	250	570	4 000	-	0,5	9
Chrome électrolytique	400	580	40	230	4	350
Cuivre	-	900	-	-	-	-
Étain	430	630	80	190	3,5	120
Fer réduit à l'hydrogène	290	320	80	120	4,5	160
Fer pentacarbonyle	310	320	20	105	3	170
Ferro-dilicium (88 % Si)	-	860	400	425	5	350
Ferro-fitane	400	370	80	140	4	700
Magnésium moulu	430	560	40	30	8,5	1 050
Magnésium-aluminium (Dow métal)	480	430	80	20	6,2	700
Manganèse	240	460	305	125	4	350
Plomb atomisé	270	710	-	-	-	-
Silicium	950	780	96	160	6,5	170
Thorium	280	270	5	75	5,5	400
Thorium (hydrure de)	20	260	3	80	6	850
Titane	510	330	25	45	5	430
Titane (hydrure de)	540	480	60	70	8,5	860
Uranium	100	020	45	60	5	360
Uranium (hydrure d')	20	020	5	60	5,3	650
Vanadium	490	500	60	220	4	70
Zinc	540	690	960	460	3,5	120
Zirconium	300	350	120	45	6,5	350
Zirconium (hydrure de)	270	350	60	85	6,5	680

(1) Selon granulométrie et mode d'obtention.

CHAPITRE 1

Tableau 1 (suite)

Poussières	Température minimale d'inflammation		Énergie minimale d'inflammation (nuages) (mJ)	Concentration minimale d'explosion (nuages) (g/m ³)	Pressions maximales d'explosion (bar)	Vitesses maximales de montée en pression (bar.s ⁻¹)
	couche	nuage (°C)				
■ PRODUITS CHIMIQUES						
2,2'-Azobis (isobutyronitrile)	350	430	25	15	9,5	560
Acide acétylsalicylique (aspirine)	fond	660	25	50	6	700
Acide adipique	-	550	60	35	6	200
1,4-Benzènediamine	430	380	15	20	5,5	450
Acide benzoïque	fond	620	20	30	5,5	400
Amidon (blé)	380	400	25	25	8	500
Acide fumarique	-	520	35	85	7,5	210
Acide téréphtalique	-	680	20	50	6	550
Anhydride phtalique	-	650	15	15	5	300
Biphényle	-	630	20	15	6	260
Bisphénol A	-	570	15	20	6,5	100
2,6-Di-Tert-butyl-4-crésol	-	470	20	20	7	1 400
Hexaméthylènetétramine	-	410	10	15	7	800
Hydroxyéthylcellulose	-	410	40	25	7,5	180
Isophtalate de diméthyle	-	580	15	25	6	550
Mannitol	-	460	40	65	7	200
Pentaérythritol	-	450	10	30	6,5	680
Peroxyde de dicumyle	180	560	30	45	6,5	450
Phényl-b-naphtylamine	-	680	25	25	5,5	300
Phtalate de diallyle	-	480	20	30	6,5	600
Savon	500	640	120	83	6,7	180
Soufre	220	10	15	35	5,5	350
Stéarate de zinc	fond	510	10	20	5,5	700
Vitamine B1 nitrate	-	360	60	35	7	530
Vitamine C (acide ascorbique)	280	460	60	70	6	350
■ MATIÈRES CARBONÉES						
Asphalte	550	510	40	35	6	350
Brai	-	630	25	45	6	250
Charbon bitumeux	180	610	30	50	7	300
Charbon de référence (Pittsburgh)	170	610	60	55	6,5	200
Charbon (anthracite)	-	730	100	65	-	-
Charbon de bois	180	530	20	40	6	90
Graphite	580	pas d'inflammation	-	-	-	-
Noir de carbone	900	pas d'inflammation	-	-	-	-
Noir de fumée	-	730	-	-	-	-
Lignite	200	450	30	30	6,5	550
■ MATIÈRES PLASTIQUES, CAOUTCHOUCS						
ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène)	-	480	20	25	6	340
Acétate de cellulose	-	420	15	40	6	250
Caoutchouc brut	-	350	50	25	5,7	270
Caoutchouc chloré	290	940	flamme en présence de surface chaude			
Caoutchouc synthétique (33 % de soufre)	-	320	30	30	6,7	220
Carboxyméthylcellulose	310	460	140	60	9	350
Copolymère styrène-acrylonitrile	-	500	30	35	5	100
Copolymère styrène-anhydride maléique	490	470	20	30	7	700

Tableau 1 (suite)

Poussières	Température minimale d'inflammation		Énergie minimale d'inflammation (nuages) (mJ)	Concentration minimale d'explosion (nuages) (g/m ³)	Pressions maximales d'explosion (bar)	Vitesses maximales de montée en pression (bar.s ⁻¹)
	couche	nuage (°C)				
■ MATIÈRES PLASTIQUES, CAOUTCHOUCS (SUITE)						
Copolymère styrène-butadiène	-	440	35	25	6,5	280
Éthylcellulose	350	370	10	25	8,5	450
Gomme laque	-	390	10	15	6	850
Méthylcellulose	340	360	-	30	9,5	450
Nylon (polyadipamide d'hexaméthylène)	430	500	20	30	7	280
Polyacétate de vinyle	-	550	160	40	5	70
Polyacétochlorure de vnyle	-	690	pas d'inflammation	-	-	-
Polyacrylonitrile	460	500	20	25	6,4	750
Polybutyral vinylique	-	390	10	20	6	140
Polycarbonate	-	710	25	25	7	350
Polychlorure de vinyle	400	660	flamme en présence de surface chaude		2	15
Polyester (styrène-fibre de verre)	360	440	50	45	6,5	430
Polyéthylène	380	450	30	20	6,8	280
Polyformaldéhyde	-	440	20	35	8	300
Polyméthacrylate de méthyle	-	480	20	30	6	150
Polypropène	-	420	30	20	5,5	400
Poly-2-propène-1-ol	-	510	20	35	6,5	540
Poly-2-propène-1-ol + fibre de verre	-	540	1 600	345	4	70
Polystyrène (latex)	500	500	15	20	7	500
Polystyrène moulé	-	560	40	15	5,5	350
Polytétrafluoroéthylène	570	670	flamme en présence de surface chaude			
Polyuréthane mousse ignifugé	390	550	15	25	7	260
Polyuréthane mousse non ignifugé	440	510	20	30	6	260
Résinate de sodium	220	350	60	40	6	180
Résine alkyde moulée	270	500	120	155	3	20
Résine coumarone-indène	-	550	10	15	6,5	800
Résine époxydique pure	-	540	15	20	6,7	530
Résine mélamine-aldéhyde formique	-	810	320	85	5,8	57
Résine de pétrole (asphalte soufflé)	500	510	25	25	6,7	350
Résine phénol-aldéhyde formique	-	580	15	25	5,5	250
Résine phénol-2-furaldéhyde	-	530	10	25	6,4	600
Résine urée-aldéhyde formique moulée	-	460	80	385	6,4	250
Viscose (rayonne)	250	520	240	55	7,8	130

2.2. Formation des nuages de poussières

Comme mentionné précédemment, les nuages de poussières peuvent être créés :

- par mise en suspension, lente ou rapide, dans l'air, de poussières disposées en couches (courant d'air,

remous lors de l'inflammation de couches, souffle d'une déflagration initiale) ;

- lors des traitements de matières (ponçage, broyage...), de leur transport (pneumatique en particulier), de manutentions (vidanges ou remplissages de silos et de dépoussiéreurs, pelletage, vibrations de tamis...).

La stabilité des nuages dépend de la densité des poussières, de leur cohésion, de leur forme, de leur humidité, de leurs dimensions.

2.3. Granulométrie

Les nuages se forment d'autant plus facilement et sont d'autant plus stables que les poussières qui les constituent sont plus fines. Les poussières fines restent le plus longtemps en suspension : elles sont donc les plus dangereuses.

Le tableau 2 indique les vitesses de sédimentation en fonction de la taille des particules lorsqu'il n'y a pas de turbulence.

Tableau 2 • Vitesse de sédimentation.

Diamètre des particules en microns	Vitesse de sédimentation en m.s ⁻¹
200	1,2
100	0,3
50	0,03
10	0,003 (soit 11 m.h ⁻¹)
5	0,0007 (soit 2,52 m.h ⁻¹)
1	0,00003 (soit 0,1 m.h ⁻¹)

Les poussières sont d'autant plus explosibles qu'elles sont plus fines et que, corrélativement, leur surface « spécifique » est plus grande (elle est de l'ordre de quelques milliers de cm².g⁻¹). La probabilité d'une explosion devient faible pour des poussières dont les dimensions sont supérieures à 500 µm. Un exemple des caractéristiques d'explosibilité de poussières d'aluminium en fonction des diamètres moyens est montré par la figure 2.

2.4. Concentrations minimales d'explosion (figure 5)

On définit pour chaque type de poussière combustible, une concentration minimale d'explosion (limite inférieure d'explosivité ou **LIE**) dans l'air au-dessous de laquelle l'explosion ne se produit pas. La concentration minimale d'explosion dépend sensiblement de la granulométrie (cf. figure 2), de l'énergie de la source d'inflammation, du volume et de la forme des enceintes. Les concentrations minimales explosives des poussières ne sont pas connues avec autant de précision que celles des gaz. On en trouvera des valeurs dans le tableau 1. Celles-ci sont le plus souvent comprises entre 20 et 100 g.m⁻³ pour des poussières de dimensions inférieures à 100 µm.

Les concentrations maximales d'explosion (limite supérieure d'explosivité ou **LSE**) des poussières sont moins bien définies que celles des gaz et sont rarement mesurées. Elles sont de l'ordre de 1 à 3 kg.m⁻³. Pour des valeurs aussi importantes, on ne peut plus guère parler de « nuage ».

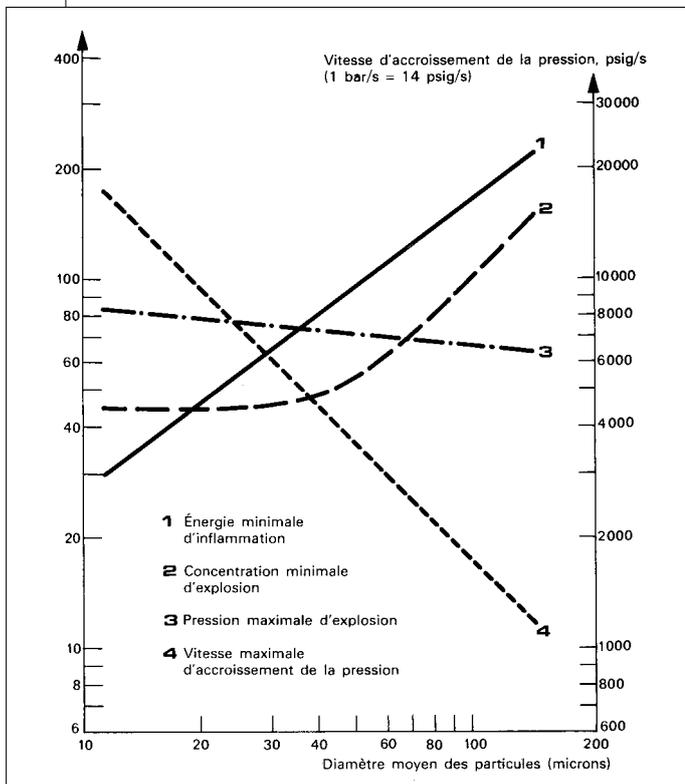


Figure 2 • Influence du diamètre moyen des particules d'aluminium pulvérisé sur les caractéristiques d'explosivité et d'explosion (d'après l'US Bureau of Mines).

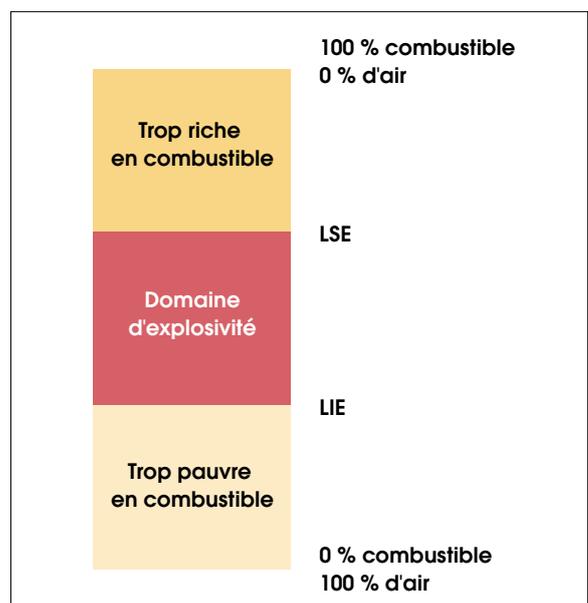


Figure 3. Domaine d'explosivité.

2.5. Initiation des explosions de poussières

Températures minimales d'inflammation

D É F I N I T I O N S

Dans des conditions d'essais spécifiées, la température minimale d'inflammation d'un **nuage de poussières** est la température la plus faible d'une surface chaude sur laquelle le mélange le plus inflammable de poussière avec l'air est enflammé.

Dans des conditions d'essais spécifiées, la température minimale d'inflammation d'une **couche de poussières** est la température la plus faible d'une surface chaude pour laquelle l'inflammation se produit dans une couche de poussière.

Les nuages de poussières peuvent exploser spontanément lorsque leur température minimale d'inflammation qui est généralement comprise entre 300 et 700 °C est atteinte.

La température minimale d'inflammation des poussières en couches est, en général, bien inférieure à la précédente et située entre 150 et 350 °C. Cette température n'est pas moins importante du point de vue de la prévention, l'inflammation d'une couche de

poussière pouvant donner lieu à une explosion de nuage.

Énergie d'inflammation

Les nuages de poussières peuvent être enflammés aux températures ordinaires par une flamme ou une étincelle d'énergie suffisante. Celle-ci, selon les poussières, peut varier de 5 millijoules à 1 joule. Pour une même poussière, l'énergie minimale d'inflammation varie avec la granulométrie (cf. figure 2).

Des températures d'inflammation et des énergies minimales d'inflammation de poussières sont indiquées dans le tableau 1.

2.6. Composition de l'atmosphère

Un appauvrissement suffisant de l'air en oxygène empêche l'inflammation des poussières, bien que certaines d'entre elles (magnésium, zirconium, titane, uranium...) puissent s'enflammer dans des atmosphères où la proportion d'oxygène est très faible. On peut ainsi prévenir l'explosion de poussières dans des enceintes closes en diminuant au-dessous d'une certaine valeur, par dilution au moyen d'un gaz inerte, la proportion d'oxygène de l'atmosphère initiale (« inertage » ou mise à l'état inerte, cf. pp. 28-29).

Le tableau 3 indique les proportions maximales d'oxygène à obtenir dans l'atmosphère pour empêcher l'explosion de quelques poussières courantes.

Tableau 3 • Proportion maximale d'oxygène pour prévenir l'explosion de poussière obtenue par dilution de l'air avec du dioxyde de carbone ou de l'azote (en pourcentage) (d'après l'US Bureau of Mines).

	CO ₂	N ₂
Aluminium	2	7
Antimoine	16	
Étain	15	
Fer pentacarbonyle	10	
Magnésium	*	2
Manganèse	14	
Thorium	*	2
Titane	*	6
Uranium	*	1
Zinc	9	9
Zirconium	*	4

* Métal réagissant avec le CO₂

	CO ₂	N ₂
Acétate de cellulose	11	7
Amidon	12	8
Caoutchouc	15	11
Cellulose	13	9
Charbon	15	11
Dextrine	14	10
Farine de bois	14	10
Nylon	13	9
Papier	13	9
Polyacétate de vinyle	17	13
Polycarbonate	15	11
Polyéthylène	12	8
Polyméthacrylate de méthyle	11	7
Polystyrène	14	10
Résine époxydique	12	8
Soufre	12	8
Vitamine C (acide ascorbique)	15	12

Il est à noter que les proportions diffèrent selon que le gaz inerte ajouté pour diluer l'atmosphère est de l'azote ou du dioxyde de carbone (CO₂).

Certaines poussières métalliques peuvent réagir avec le CO₂ ; toutes peuvent être inertées par de l'argon.

La présence de poussières inertes en quantités suffisantes peut aussi empêcher l'inflammation du mélange (cf. § 1.2, chapitre IV).

3. Caractéristiques d'explosion des poussières

3.1. Caractéristiques principales

De nombreux essais ont été définis afin de réunir les données nécessaires à la prévention des risques liés à la présence de poussières combustibles industrielles. Être en possession des caractéristiques d'explosivité des mélanges inflammables permet, en particulier, de choisir parmi les différents modes de protection possibles celui (ou ceux) qui est (sont) le(s) plus approprié(s).

La violence des explosions de poussières est caractérisée par la surpression maximale d'explosion et la vitesse maximale de montée en pression :

- Surpression maximale d'explosion (P_{max}) : les surpressions maximales d'explosion, selon la nature des poussières et les facteurs indiqués plus loin, varient de 3 à 10 bars environ, exceptionnellement de 30 bars dans un régime de détonation. Elles figurent, ainsi que les vitesses maximales de montée en pression, dans le tableau 1 ; les mesures ont été faites dans une enceinte de quelques litres, en général pour des concentrations de 500 g/m³.

- Vitesse maximale de montée en pression : la vitesse d'accroissement de la pression atteint, au cours de l'explosion, une valeur maximale dp/dt_{max}. Celle-ci peut varier, selon les poussières, de 1 bar/s à plus de 1 000 bars/s.

Mesurées dans des conditions identiques (de volume et de forme de l'enceinte, de source d'inflammation) et pour les concentrations les plus dangereuses, les vitesses maximales de montée en pression permettent de classer les poussières en quatre catégories, en vue de la protection des enceintes par événements (cf. tableau 4).

D'une manière générale, les explosions de poussières prennent le régime de déflagration. Exceptionnellement,

certaines poussières, comme celles de l'aluminium, peuvent, dans des enceintes de forme favorable (canalisations, par exemple) approcher ou atteindre un régime de détonation.

Il est souhaitable, pour fonder les mesures de protection, que les surpressions d'explosion et les vitesses de montée en pression soient mesurées dans des enceintes suffisamment grandes, soit 1 m³ au moins. Les mesures en petites enceintes (quelques litres) sont entachées d'erreurs dues aux effets de parois et à des difficultés de soulèvement et d'inflammation.

Dans des récipients peu allongés (rapport longueur ou diamètre sur hauteur inférieur à 5), la violence de l'explosion d'un nuage de poussières combustibles est caractérisée par la vitesse maximale de montée en pression (VMP) et la surpression maximale d'explosion (P_{max}). Ces valeurs, pour des conditions d'essais déterminées, sont mesurées sur la courbe pression-temps (cf. figure 4). Pour une poussière donnée, on cherchera à déterminer les valeurs les plus élevées de P_{max} surtout de VMP en faisant varier la concentration du nuage de poussières. Ces caractéristiques de violence de l'explosion dépendent de la répartition granulométrique, de la forme des grains, de la turbulence initiale du nuage de poussières dans l'air, de l'importance de

Tableau 4 • Catégories de poussières.

Classe	K _{max} en bar.m.s ⁻¹
St ₀	0
St ₁	1 < K _{max} ≤ 200
St ₂	200 < K _{max} ≤ 300
St ₃	300 < K _{max}

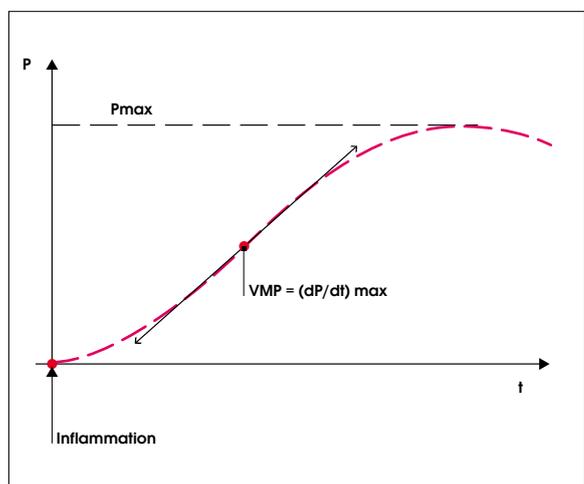


Figure 4 • Courbe pression (P)/temps(t).

la source d'amorçage, voire de la forme du récipient d'essai.

La valeur de VMP dépend aussi du volume V de l'appareillage d'essai selon une relation dite « relation cubique » :

$$\text{VMP} \times V^{\frac{1}{3}} = \text{Constante} = K_{\text{max}} \text{ (ou } K_{\text{st}})$$

$$\text{ou } dp/dt_{\text{max}} = K_{\text{st}} (V)^{-\frac{1}{3}}$$

La loi cubique ne s'applique que pour les volumes d'enceinte de forme peu allongée.

Le K_{max} est une caractéristique d'une poussière de granulométrie et d'un taux d'humidité fixés. La violence d'une explosion est caractérisée par cette valeur K_{max} . Ces valeurs permettent de classer une poussière combustible dans l'une des catégories figurant au *tableau 4*.

Les méthodes pour déterminer les différentes caractéristiques d'explosion des poussières sont définies dans différentes normes (cf. bibliographie).

La vitesse de propagation de la flamme de l'explosion dans les enceintes allongées et les canalisations est plus rapide et la surpression maximale est en général plus forte que dans les enceintes de forme approximativement cubique.

La surpression maximale d'explosion dans une canalisation varie dans le même sens que sa longueur et que l'inverse de son diamètre.

Les surpressions les plus fortes ont lieu dans des canalisations dont une extrémité est fermée et l'autre faiblement ouverte (ou fermée, mais il ne s'agit plus alors d'une canalisation) et pour une inflammation proche de l'extrémité fermée.

3.2. Facteurs influant sur les caractéristiques d'explosivité

Granulométrie

La vitesse maximale d'accroissement de la pression est d'autant plus élevée que les poussières sont plus fines (cf. *figure 2*).

Concentration des poussières dans l'atmosphère

La surpression et la vitesse de montée en pression ont en général une valeur maximale pour une valeur donnée de la concentration.

Celle-ci pour un grand nombre de poussières est comprise entre 200 et 500 g.m⁻³ (cf. *figure 5*).

Taux d'humidité

La rétention d'eau abaisse les caractéristiques d'explosivité d'une poussière. La présence d'humidité sous forme de vapeur d'eau diminue l'explosivité de plu-

sieurs manières : elle favorise la cohésion des poussières et leur agglomération, diminue la formation des charges d'électricité statique et absorbe de la chaleur.

Mélanges hybrides

Les mélanges hybrides, composés à la fois de vapeur (ou gaz) et de poussières avec l'air, nécessitent des mesures de prévention particulières intermédiaires entre celles prises pour les gaz et vapeurs et celles prises pour les poussières.

La rétention de solvant augmente fortement les caractéristiques de l'explosion.

Initiation de l'explosion

La violence d'une explosion de poussières croît généralement avec l'énergie de la source d'inflammation.

Turbulence

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. Il n'existe pas de méthode de mesure de la turbulence existant dans les installations industrielles. Il est donc recommandé de s'adresser à des organismes spécialisés pour l'évaluer.

4. Effets d'une explosion de poussières

Le caractère dévastateur du risque d'explosion représente le plus grand danger pour les salariés. Sous l'effet d'une explosion de poussières, les équipements vont être susceptibles d'éclater en libérant une onde de surpression et une flamme tout en projetant des débris dans les locaux de travail.

Rappelons que l'effet de souffle d'une première explosion (explosion primaire) peut conduire à la remise en suspension des poussières déposées et accumulées provoquant des explosions secondaires souvent beaucoup plus dévastatrices.

Les effets d'une explosion de poussières vont essentiellement résulter de la surpression et des flammes produites. Ils vont engendrer des effets sur l'homme et sur les structures.

Pour les salariés exposés, il y aura les **effets directs de l'onde de choc** (des surpressions peuvent entraîner une rupture du tympan, des lésions graves aux poumons, voire décès) et les **effets indirects de l'onde de choc** (une surpression peut être suffisante pour provoquer des effets mortels sur l'homme en le projetant à terre ou contre un obstacle ; par ailleurs, l'impact des

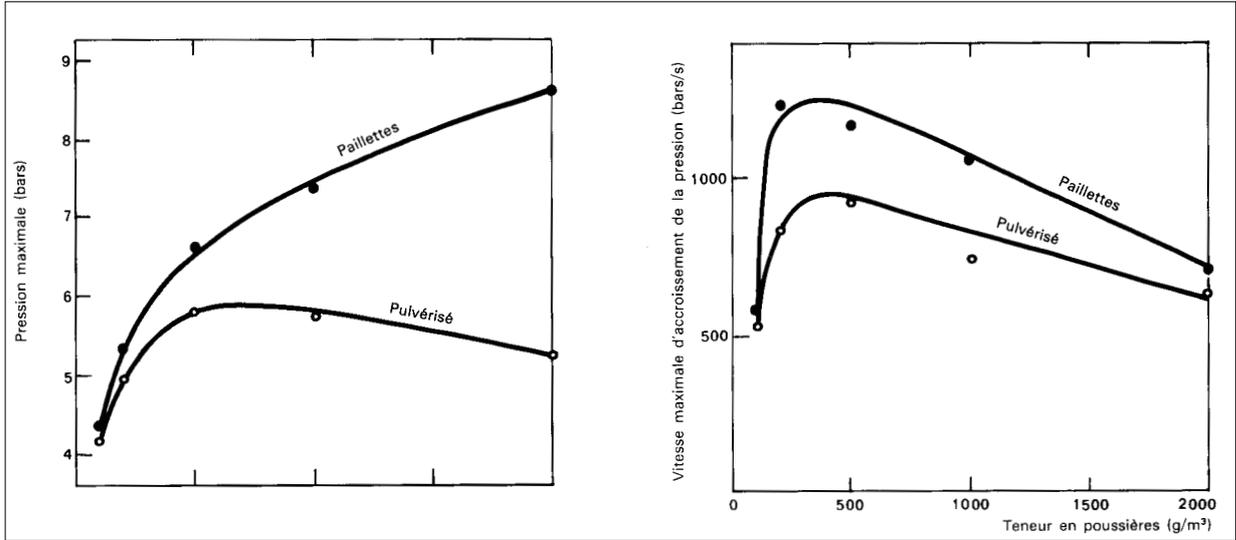


Figure 5 • Pression et vitesse d'accroissement de la pression lors de l'explosion d'aluminium pulvérisé et d'aluminium en paillettes, en fonction de la concentration en poussières (d'après l'US Bureau of Mines).

débris projetés lors de l'éclatement des équipements peut également être mortel).

Les seuils critiques donnés ci-dessous sont ceux stipulés dans l'arrêté du 22 octobre 2004 relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées :

- Pour les effets sur les structures :
 - 20 mbar, seuil des destructions significatives de vitres ;
 - 50 mbar, seuils des dégâts légers sur les structures ;
 - 140 mbar, seuil des dégâts graves sur les structures ;
 - 200 mbar, seuil des effets dominos ;
 - 300 mbar, seuil des dégâts très graves sur les structures.

- Pour les effets sur l'homme :

- 20 mbar, seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme ;
- 50 mbar, seuils des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine ;
- 140 mbar, seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine ;
- 200 mbar, seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

De plus, les **effets thermiques** dus aux flammes peuvent générer des brûlures graves voire mortelles.

Évaluation des risques d'explosion

1. Démarche préventive

Il est de la responsabilité du chef d'entreprise 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'entreprise 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,
- tenir compte de l'état d'évolution de la technique,
- remplacer ce qui est dangereux par ce qui n'est pas dangereux ou par ce qui est moins dangereux,
- 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'entreprise doit donc 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 cette brochure ne porte que sur l'explosion, l'évaluation des risques doit être globale. Cette évaluation est obligatoire dans le cadre de la réglementation issue des deux directives⁽¹⁾ relatives aux atmosphères explosives (dites directives ATEX). De plus, pour tous les ouvrages neufs, elle servira à la constitution du DIUO (dossier des interventions ultérieures sur l'ouvrage).

La prévention du risque d'explosion va nécessiter de développer des actions sur plusieurs axes concernant les bâtiments, 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 cette brochure permettant de disposer d'informations nécessaires. Elle ne prétend pas être exhaustive et doit être adaptée pour prendre en compte les spécificités propres à chaque cas.

Le chef d'établissement établit et tient à jour un document relatif à la protection contre les explosions. Celui-ci doit, en particulier, faire apparaître :

- que les risques d'explosion ont été déterminés et évalués,
- que des mesures adéquates sont prises,
- quels sont les emplacements classés en zones,
- 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 document relatif à la protection contre les explosions doit être révisé périodiquement, au moins tous les ans, et lorsque des modifications, des extensions ou des transformations notables sont apportées notamment aux lieux, aux équipements de travail ou à l'organisation du travail.

(1) 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 explosives.

Directive 1999/92/CE du 16 décembre 1999 concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés aux risques d'atmosphères explosives.

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 (bâti-ments) et les notices d'utilisation (équipements de travail) qui doivent être compréhensibles par les utilisateurs.

2. Analyse et évaluation *a priori* des risques

Les risques d'explosion de poussières doivent être analysés en particulier dans des installations de stockage, de transports en canalisations, de combustion (chaudières, fours, séchoirs, etc.), de traitement et de fabrication, d'utilisation où sont présentes des poussières combustibles. Cette analyse devra préciser la probabilité de formation, dans un endroit donné, normalement ou dans des conditions accidentelles, une atmosphère explosive, c'est-à-dire contenant des poussières combustibles en proportion supérieure ou égale à la concentration minimale d'explosion.

Les risques seront appréciés en s'appuyant principalement sur la connaissance des critères tels que la nature des poussières, la granulométrie, la concentration dans l'atmosphère... et en utilisant les éléments précédemment décrits, notamment les caractéristiques d'explosivité des produits combustibles présents (cf. tableau 1).

Le dépôt de poussières inflammables en couche, susceptibles d'être remises en suspension dans l'atmosphère, constitue aussi un danger d'explosion.

Lorsque les caractéristiques d'explosivité d'une poussière ne sont pas connues, elles doivent être recherchées dans la bibliographie sinon déterminées expérimentalement conformément aux normes (cf. bibliographie) par un organisme compétent.

3. Zones de danger

L'un des principaux résultats de l'analyse des risques est la détermination des zones à risque d'explosion, espaces tridimensionnels délimités et classés en fonction de la fréquence et de la durée d'apparition d'atmosphères explosives.

La directive européenne 1999/92/CE, qui 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, a été transposée en droit français par les décrets n°s 2002-1553 et 2002-1554, complétés par trois

arrêtés d'application des 8 et 28 juillet 2003. Elle prévoit 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 donc délimiter les emplacements dangereux en zones :

Zone 20 : emplacement où une atmosphère explosive, sous forme de nuage de poussières combustibles, est présente dans l'air en permanence, pendant de longues périodes ou fréquemment.

En général, ces conditions, lorsqu'elles se produisent, apparaissent à l'intérieur des réservoirs, des canalisations, des récipients... (cf. § 3.3 de ce chapitre).

Zone 21 : emplacement où une atmosphère explosive, sous forme de nuage de poussières combustibles, est susceptible de se présenter occasionnellement en fonctionnement normal.

Cette zone peut inclure, entre autres, des emplacements à proximité immédiate par exemple, des points de remplissage ou de vidange de poudre et des emplacements dans lesquels les couches de poussières apparaissent et sont susceptibles, en fonctionnement normal, de conduire à la formation d'une concentration de poussières combustibles en un mélange avec l'air (cf. § 3.3 de ce chapitre).

Zone 22 : emplacement où une atmosphère explosive, sous forme de nuage de poussières combustibles, n'est pas susceptible de se présenter en fonctionnement normal ou, si elle se présente néanmoins, elle n'est que de courte durée.

Cette zone peut inclure, entre autres, des emplacements au voisinage d'appareils, systèmes de protection et composants contenant de la poussière, à partir desquels de la poussière peut s'échapper par suite de fuites et former des dépôts de poussières (par exemple, les ateliers de broyage dans lesquels la poussière peut s'échapper des broyeurs et ensuite se déposer, notamment sur les éléments de charpente) (cf. § 3.3 de ce chapitre).

La connaissance de ces zones est indispensable pour le choix des équipements et du matériel destinés à être utilisés en tenant compte des caractéristiques de la poussière.

3.1. Délimitation des zones

Le chef d'entreprise est responsable de la délimitation des zones à risque d'explosion dans ses installations. Contrairement aux gaz et vapeurs qui ont tendance à

se diluer dans l'atmosphère, les poussières tendent à retomber (cf. chapitre I, § 2). Les zones à risque pour ces dernières seront donc, en général, de volume plus limité. Par contre, les dépôts de poussières sur les sols, parois et structures des bâtiments et des installations sont susceptibles de créer des zones explosives très étendues lors d'une remise en suspension intempes- tive (vent, courant d'air, choc...) ou volontaire (net- toyage...). En conséquence, un classement pour les gaz et vapeurs ne peut en aucun cas être transposé aux cas des poussières.

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, surtout afin d'éviter l'in- flammation du mélange.

Les emplacements où des atmosphères explosives sont susceptibles de se présenter sont signalés, au niveau de leurs accès respectifs, par le panneau d'avertisse- ment ci-après :



Parmi les différents facteurs à prendre en considé- ration pour la délimitation des zones, on retiendra prin- cipalement :

Le procédé

Il s'agit de l'ensemble des moyens mis en œuvre (pro- duits, équipements et procédures de travail) pour réa- liser l'opération recherchée.

Les produits

Il faut prendre en considération les quantités mises en jeu mais surtout les caractéristiques d'inflammabilité des produits (températures minimales d'inflammation d'un nuage ou d'un dépôt, énergie minimale d'in- flammation...), leur granulométrie, humidité, résistivité, etc.

Les équipements

Il est nécessaire de prendre en compte non seulement les appareils de fabrication et de stockage mais aussi le matériel annexe tels que les équipements de trans- port et de manutention. On s'attachera à analyser, en

particulier, les types de dysfonctionnements raisonna- blement envisageables.

Les procédures de travail

Chaque situation devra nécessiter une étude particu- lière. Il sera impératif d'établir des mesures organisa- tionnelles précises (maintenance, fréquence de nettoyage...).

Les conditions d'implantation

La délimitation des zones doit être effectuée dans l'es- pace et non en plan, en tenant compte notamment :

- du volume et de la géométrie des installations,
- de la géométrie des ateliers,
- de la ventilation existante,
- de l'implantation et de la nature des équipements,
- des conditions et des modes de fonctionnement...

Les sources d'émission

Identifier les sources d'émission de poussières

Il est nécessaire d'identifier les conditions dans les- quelles peuvent se former des mélanges explosifs air/poussières ou se créer des couches de poussières combustibles.

Cette identification doit prendre en considération sépa- rément l'intérieur (silos, broyeurs, mélangeurs...) et l'ex- térieur des appareils.

Déterminer la fréquence d'apparition d'atmosphère explosive

Lorsque les sources d'émission dans le processus ont été identifiées, il est important de déterminer la fréquence voire la durée du dégagement de poussières qui peut avoir lieu ainsi que le caractère normal ou accidentel de cette formation d'atmosphère explosive.

Les couches de poussières

Il ne faut en aucun cas omettre d'identifier la possi- bilité de formation de couches de poussières potentiel- lement dangereuses.

Une couche de poussières est fréquemment suffisante pour créer des mélanges explosifs air/poussières.

Il importe également de prendre en compte le fait qu'avec le temps des couches de poussières dange- reuses peuvent se former à partir de nuages de pou- sières très dilués.

Les couches, dépôts et tas de poussières combustibles doivent donc être traités comme une source suscep- tible de former une atmosphère explosive. Il faut éga- lement prendre en compte les mécanismes possibles de mise en suspension des dépôts de poussières à l'in- térieur et à l'extérieur des appareils.

Ce ne sera qu'après avoir suivi toutes ces étapes qu'un classement pertinent des zones pourra être réalisé.

Selon la fréquence de formation de mélanges poussières/air potentiellement explosifs et de couches de poussières potentiellement dangereuses, les zones peuvent être désignées (cf. tableau 5).

3.2. Modification des zones

On doit effectuer des révisions du classement des zones périodiquement et, pour prendre en compte les évolutions, lors des changements du procédé, des modes opératoires, des procédures (nettoyage, entre autres), des caractéristiques du produit ou des mélanges manipulés...

Modifications temporaires des installations

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 20, zone 21, zone 22 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. 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 dont l'adaptation à la zone considérée doit être validée (dans un plan de prévention, par exemple).

Les zones provisoires peuvent être délimitées en cas de modification temporaire des installations par des panneaux, barrières, chaînes...

Modifications permanentes des installations

La délimitation des zones d'un atelier ou d'une installation doit être systématiquement vérifiée si des modifications y sont apportées.

Ces modifications peuvent concerner :

- les produits,
- l'équipement,
- la procédure de travail,
- 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 une délimitation des zones différente sur les installations voisines.

3.3. Exemples de délimitation des zones à risque d'explosion

Zone 20

Intérieur des équipements :

- trémies, silos,
- cyclones, filtres,
- systèmes de transport de produits pulvérulents,
- mélangeurs, broyeurs, etc.

Zone 21

- emplacements à l'extérieur d'un confinement de poussières et à proximité d'ouvertures soumises à de fréquentes manipulations,
- emplacements à l'extérieur d'un confinement de poussières à proximité de points de remplissage, de postes de déversement, de points de basculement de bandes, etc.,
- emplacements à l'extérieur d'un confinement de poussières où celles-ci peuvent s'accumuler,
- emplacements autour des sorties de cyclones, des filtres, etc.

Zone 22

- sorties des événements de filtres à manches,
- emplacements à l'extérieur d'un confinement de poussières et à proximité d'ouvertures soumises à des manipulations intermittentes,

Tableau 5 ● Exemple de désignation des zones en fonction du degré de dégagement et de la possibilité de formation de couches de poussières.

Nature de l'émission	Nuages des poussières	Couches de poussières d'épaisseur maîtrisée	
		souvent perturbée	rarement perturbée
Permanente en fonctionnement normal	20	21	22
Occasionnelle en fonctionnement normal	21	21	22
Accidentelle	22	21	22

- stockage de sacs contenant des produits pulvérulents,
- emplacements où des couches de poussières peuvent se former mais qui ne devraient pas engendrer de mélanges explosifs air/poussières grâce à des nettoyages fréquents, par exemple.

Des emplacements répondant au classement d'une zone 21 peuvent être considérés en zone 22 lorsque des mesures sont prises pour éviter la formation de mélanges air/poussières explosifs, par exemple, ventilation par extraction. Il convient d'utiliser ces mesures à proximité de points de remplissage, de déversement...

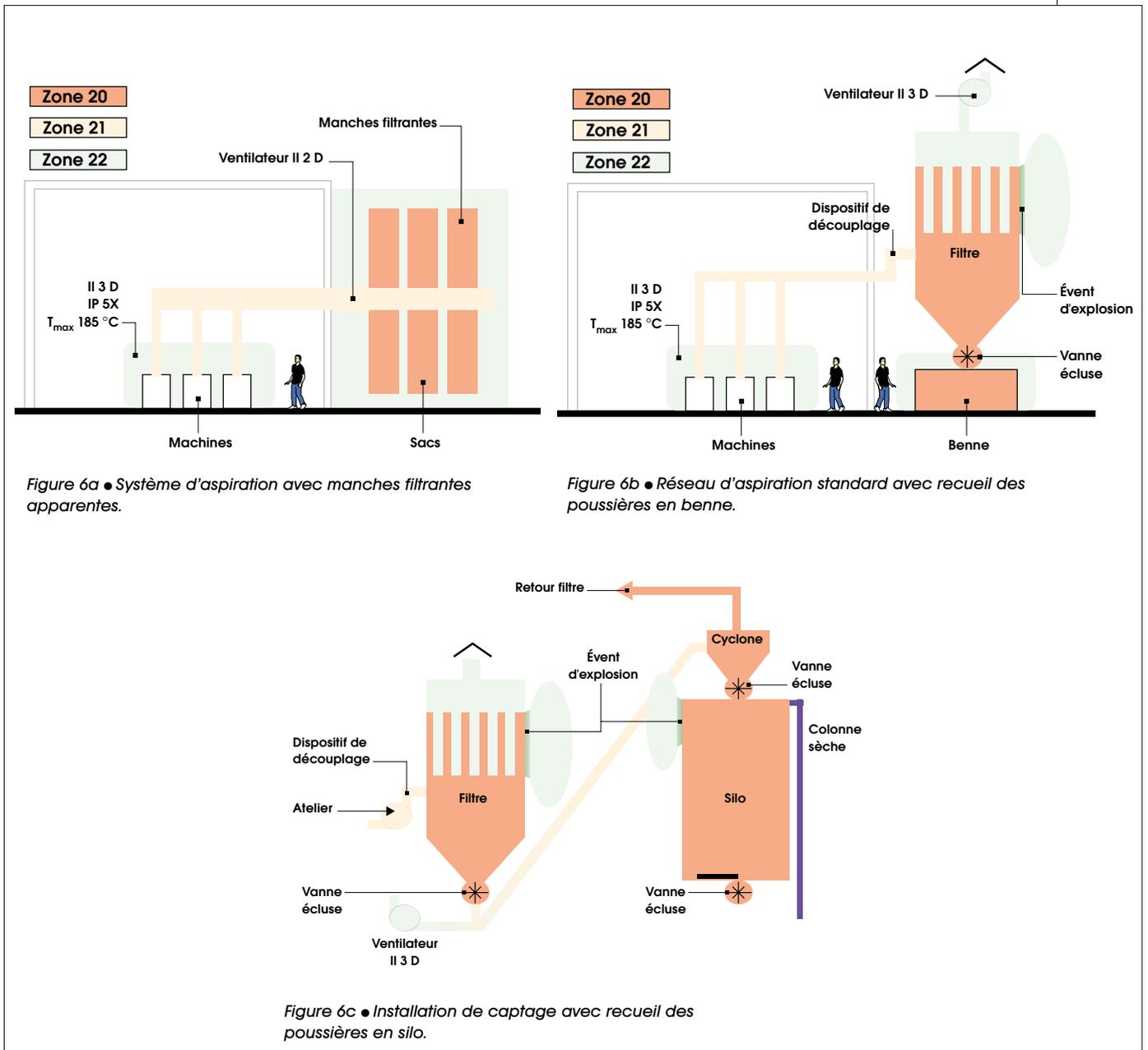
Dans le cas des emplacements situés à l'air libre, la limite de la zone 22 pourra être réduite en raison de l'effet des agents atmosphériques tels que le vent ou la pluie.

Afin d'explicitier les principes définis précédemment, plusieurs exemples sont présentés à titre indicatif dans les pages suivantes.

Ces schémas ne sont uniquement proposés qu'afin d'aider les industriels.

Il s'agit :

- d'une installation de dépoussiérage et de stockage de poussières de bois (cf. figures 6a à 6c),



Figures 6a à 6c ● Installation de dépoussiérage et de stockage de poussières de bois (d'après CRAM Rhône-Alpes).

- d'un broyeur de poussières combustibles (cf. figure 7),
- d'un moulin (farine) (cf. figures 8, 9),
- d'un stockage de sucre (cf. figures 10 et 11).

La norme européenne NF EN 50251-3 fournit également quelques exemples de délimitation de zones à risque d'explosion poussières.

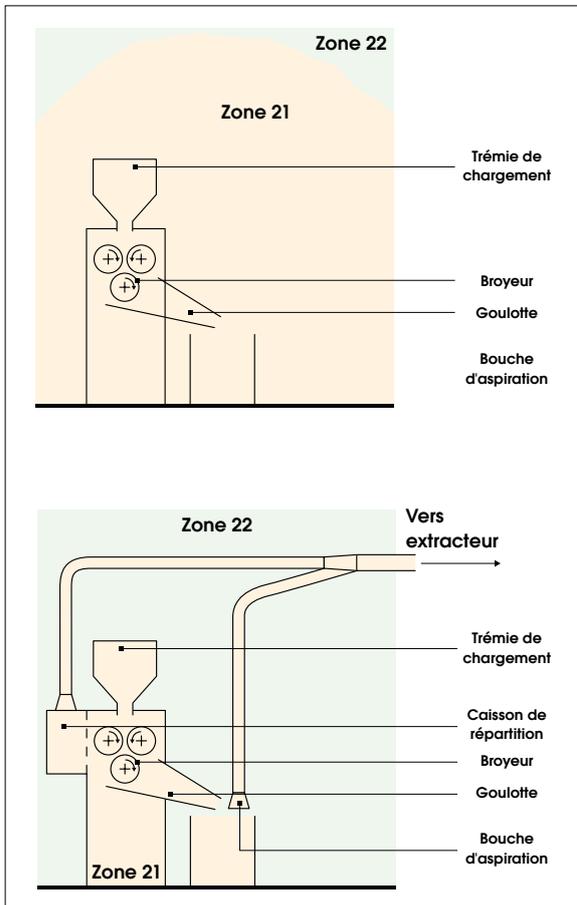


Figure 7 ● Broyeur de poussières combustibles.

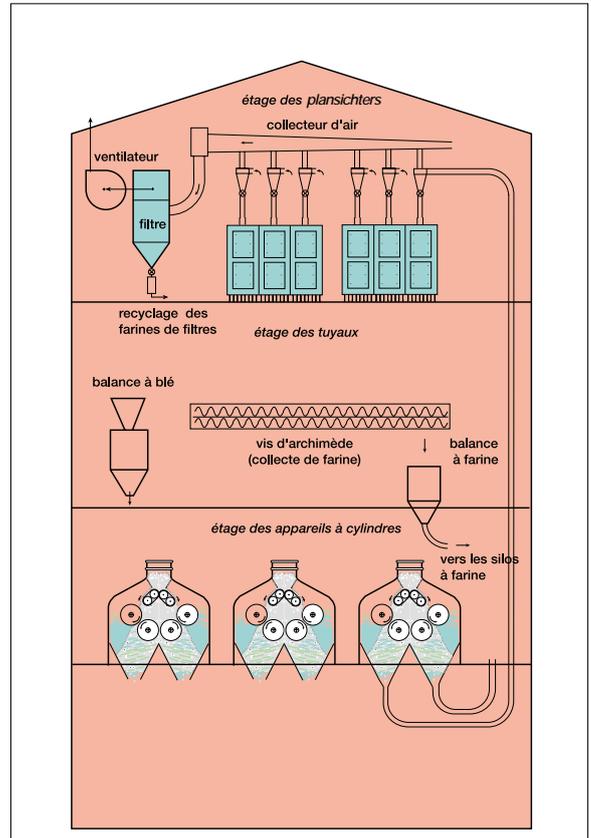


Figure 8 ● Exemple de délimitation de zones à risque d'explosion d'un moulin.

Zone 20
Zone 21
Zone 22

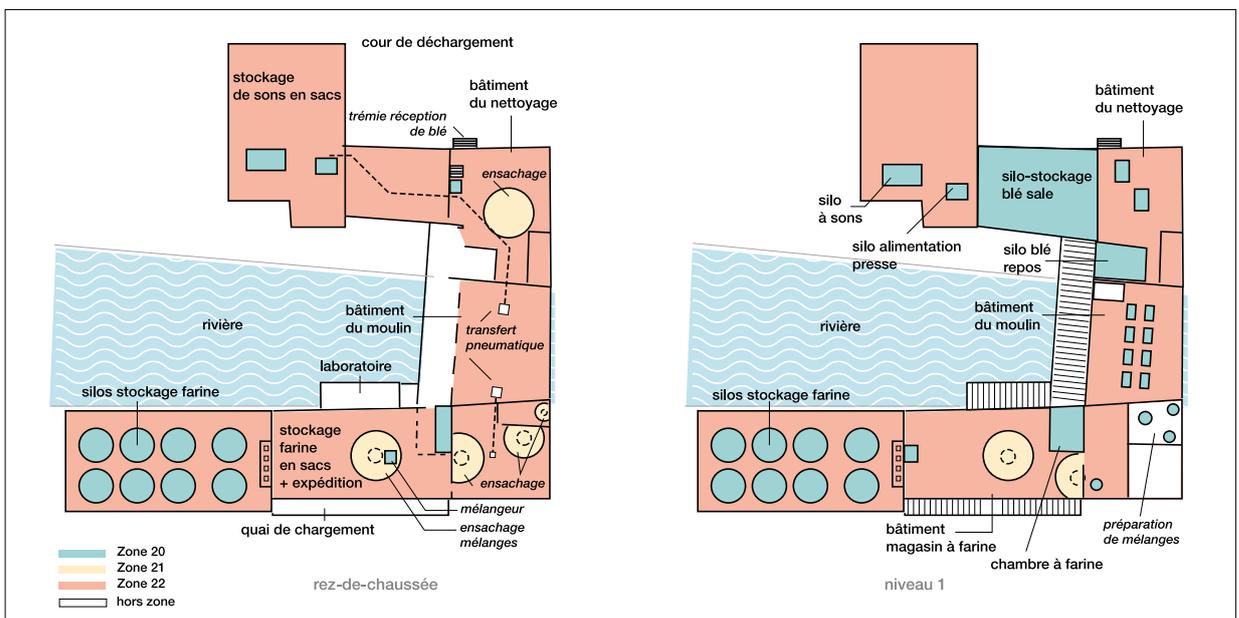


Figure 9 ● Exemples de délimitation de zones à risque d'explosion d'un moulin.

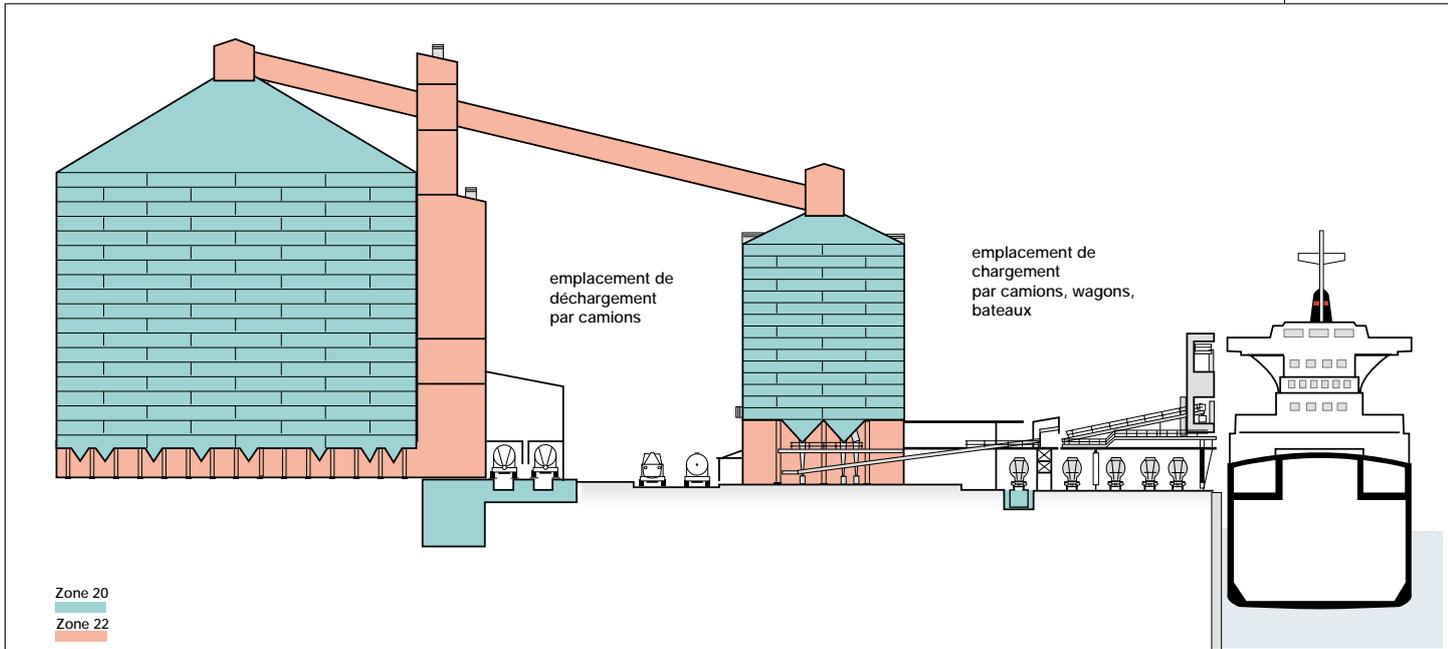


Figure 10 • Stockage dans des silos de sucre.

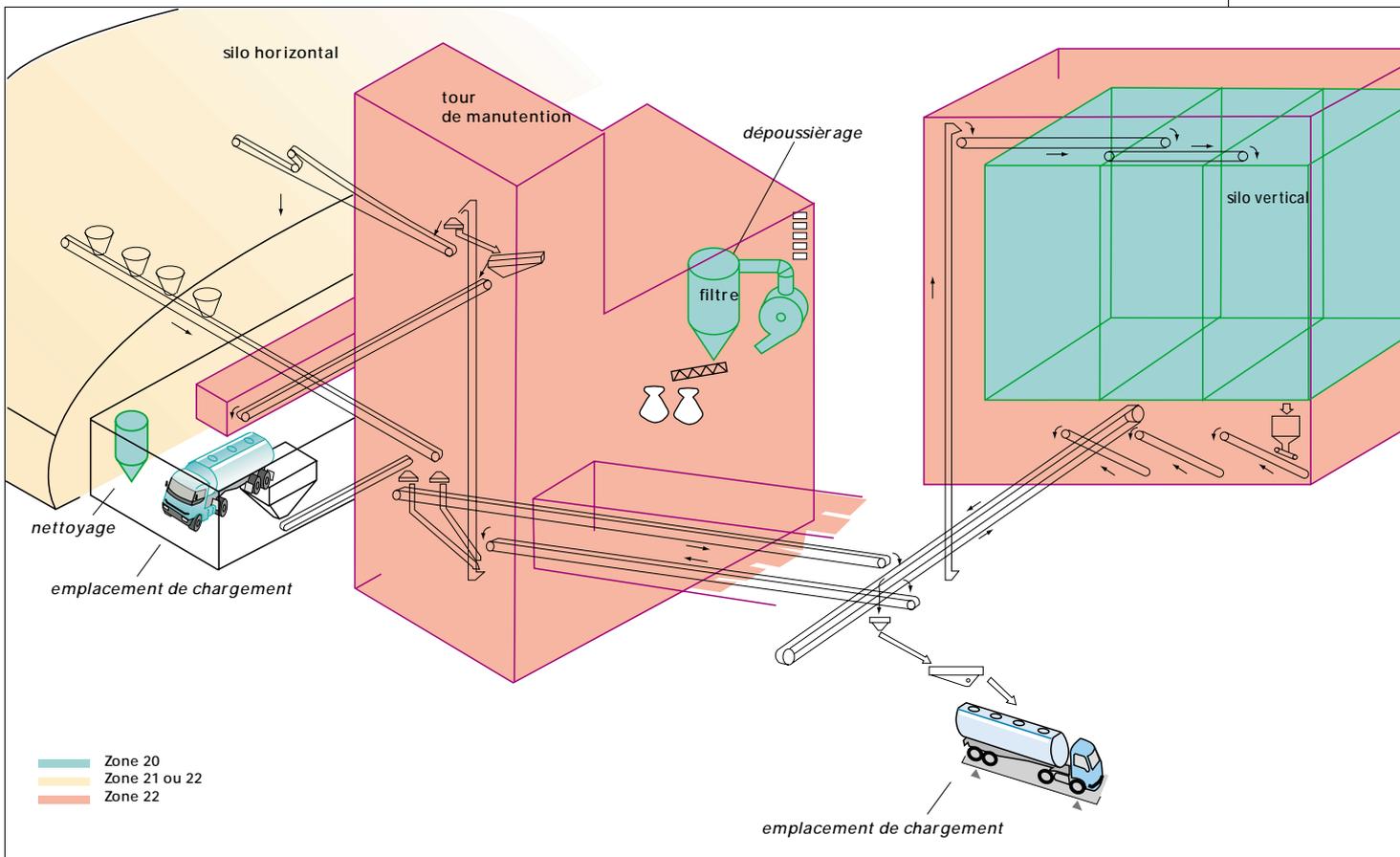


Figure 11 • Stockage dans des silos de sucre.

Mesures de prévention

Mesures de prévention

Dans le premier chapitre, ont été étudiées les conditions devant être remplies pour que l'explosion puisse se produire. Les mesures de prévention consisteront dans la pratique à supprimer au moins l'une de ces conditions et, si possible, pour une plus grande efficacité, au moins deux d'entre elles, afin de rendre l'explosion impossible.

Ainsi, les explosions de poussière pourront être empêchées, si :

- la concentration en poussières combustibles peut être maintenue suffisamment faible pour que le mélange air/poussière soit trop « pauvre » pour permettre la naissance puis la propagation d'une explosion ;
- l'oxygène nécessaire à la combustion explosive de la poussière est absent ;
- des sources d'inflammation possibles sont supprimées...

Lorsque l'analyse fait apparaître un risque d'explosions de poussières 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 des 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 constructives et organisationnelles.

L'application des mesures de sécurité mentionnées suppose donc la connaissance des caractéristiques d'inflammabilité de la poussière concernée. Ces données ne sont pas des constantes physiques mais dépendent de l'état de la poussière et de la méthode de détermination utilisée et doivent être connues pour permettre d'interpréter et de choisir les diverses mesures de sécurité (cf. *tableau 6*).

Tableau 6 • Mesures de prévention.

Paramètre qualitatif du risque	Mesures de prévention
Vitesse maximale de montée en pression Pression maximale d'explosion	Suppression de l'explosion
Concentration minimale d'explosion	Limitation des concentrations
Concentration maximale d'oxygène	Protection par gaz inerte
Température minimale d'inflammation Énergie minimale d'inflammation Sensibilité au choc	Élimination des sources d'inflammation
Pression maximale d'explosion	Construction résistant à l'explosion
Vitesse maximale de montée en pression Pression maximale d'explosion	Décharge d'explosion

1. Prévention des explosions par action sur les poussières combustibles

1.1. Substitution des matières combustibles par d'autres, incombustibles

La poussière combustible peut être substituée par une poussière non combustible.

Cette mesure n'est applicable que de manière relativement restreinte ; elle se limite essentiellement à la substitution de matières de remplissage combustibles par d'autres qui ne le sont pas.

1.2. Addition de substances solides inertes

Des poussières inertes (poussières de roche, ciment, sels de sodium...) peuvent rendre impossible l'explosion d'autres poussières ou la rendre moins probable (élévation des concentrations inflammables) ou moins violente (surpression et vitesse de montée en pression moins fortes). Les poussières inertes doivent avoir une granulométrie et une densité voisines de celles des poussières explosibles. Leur proportion dans le mélange de poussières doit être en général de l'ordre de 50 à 80 % (cf. tableau 7), selon la poussière inflammable et la poussière inerte et la quantité minimale nécessaire est fonction de l'énergie de la source d'ignition à prendre en compte.

Leur présence comme corps « étranger » n'est pas souvent compatible avec les process mis en œuvre.

1.3. Suppression des possibilités de formation des nuages de poussières

Rappelons (cf. chapitre 1, § 2) que la probabilité d'une explosion devient faible pour des poussières dont les diamètres sont supérieurs à 500 µm. En conséquence, l'élimination de toute poussière de granulométrie inférieure

à cette valeur permettrait de limiter de manière significative tout risque d'explosion.

La lutte contre l'empoussièrément passe par trois étapes qui ne devraient pas être dissociées :

Éviter la formation des dépôts de poussières

C'est ici qu'intervient la conception des bâtiments et équipements de travail en prenant les dispositions suivantes qui permettront de limiter les accumulations de poussières :

- sols, murs lisses, nivelés et bien jointoyés,
- suppression des volumes morts et des recoins,
- suppression ou réduction des points d'émission,
- zones mortes à éviter à la conception des appareils...

Capter et transporter les poussières

La formation de poussières sera cependant inévitable dans bien des cas et il faut alors les capter le plus près possible de la source et effectuer un dépoussiérage efficace.

L'extraction des poussières se fait essentiellement par **transport pneumatique** et met en œuvre généralement de grands volumes d'air sous une faible pression relative. Elle doit se faire le plus près possible des points où sont produites les poussières en des parties des locaux éloignées des entrées d'air neuf.

Il conviendra d'éviter les systèmes de dépoussiérage centralisés faisant communiquer entre elles toutes les parties de l'installation et de privilégier le dépoussiérage ponctuel, si cela est techniquement possible afin de limiter les volumes de déchets.

Les vitesses satisfaisantes de l'air aux points de captage (machines, hottes d'aspiration, par exemple) sont le plus souvent comprises entre 0,5 et 3 m.s⁻¹.

Les ventilateurs d'extraction doivent être situés, autant que possible, en air propre (en aval des organes de séparation poussières/air). Leur construction (matière des pales et des coques, équilibrage) doit empêcher des chocs accidentels entre parties fixe et mobile pouvant produire des étincelles. Leur degré de protection IP (cf. page 40) sera adapté à la zone à risque.

Tableau 7 ● Inertage de poussières combustibles par mélange avec des solides inertes ($V = 1 \text{ m}^3$, $E_{ign} = 10\,000 \text{ J}$) (d'après un document AISS de 1987).

POUSSIÈRE COMBUSTIBLE		SOLIDE INERTE		
Type de poussière	Valeur médiane (µm)	Solides inertes	Valeur médiane (µm)	Quantité minimale par rapport au mélange (% poids)
Méthylcellulose	70	CaSO ₄	< 15	70
Pigment org.	< 10	(NH ₄) ₂ PO ₄	29	65
Houille (grasse)	20	CaCO ₃	14	65
Houille (grasse)	20	NaHCO ₃	35	65
Sucre	29,5	NaHCO ₃	35	50

Il est fortement recommandé qu'ils soient installés à l'extérieur des locaux de travail.

Les conduits d'évacuation pneumatiques des poussières doivent être aussi courts que possible. Pour éviter la génération d'électricité statique, ils seront en matière conductrice et leur continuité électrique sera assurée par des éléments conducteurs (fibres incorporées, gainage, revêtement). Pour éviter les dépôts intérieurs, les coudes et les variations de l'aire et de la forme de la section doivent être aussi réduits que possible ; la vitesse de circulation souhaitable est de 15 à 25 m.s⁻¹ selon les produits.

Les particules ou objets étrangers susceptibles de produire des étincelles par choc doivent être éliminés, par exemple, par des grilles, des dispositifs magnétiques de retenue ou des séparateurs par gravité.

La vérification et le nettoyage des conduits doivent être effectués périodiquement par du personnel formé et suivant des procédures précises.

Il est souhaitable que les tronçons de plus de 3 mètres soient protégés par des événements de décharge (cf. chapitre IV). S'il en existe, les coudes ou les courbes sont des positions favorables pour ces événements.

Certaines poussières peuvent être incandescentes ou très chaudes lors de leur émission (par des machines à meuler, à poncer, etc.) et sont capables d'initier une explosion dans des conduits d'extraction et de transport. Elles peuvent être refroidies par un dispositif refroidisseur à échangeur ou éteintes par une extinction convenable après détection (cf. chapitre IV).

Les poussières extraites peuvent être séparées de l'air de transport :

- par un ou plusieurs cyclones dans lesquels la vitesse de l'air est d'une quinzaine de mètres/seconde. La protection contre les explosions qui peuvent s'y produire consiste généralement en un système de décharge de la pression (cf. chapitre IV) ;
- par des filtres à manches qui doivent être en matière antistatique, incombustible ou au moins difficilement inflammable. Ils exigent un nettoyage très fréquent par secouage mécanique ou pression pneumatique à contre-courant (éventuellement au moyen d'un gaz inerte). Les filtres (enceintes où se produisent fréquemment une explosion) doivent être protégés contre le risque (cf. chapitre IV) ;
- par un arrosage à l'eau entraînant les poussières, en particulier dans des conduits situés à la sortie des broyeurs, dans des cyclones ou en aval, et près de l'aspiration des particules sur les machines ; ce moyen, associé à la ventilation est conseillé pour collecter les poussières de métaux inflammables (magnésium, aluminium). **Attention toutefois à la formation possible d'hydrogène.**

Le transport pneumatique des poussières se fait le plus souvent à des concentrations trop élevées pour être explosibles (jusqu'à 50 kilogrammes par mètre cube d'air) et à des pressions ou des dépressions relatives élevées, de l'ordre de 0,5 bar. Les risques d'explosions se présentent lors des démarrages et des arrêts des installations, alors que les concentrations sont, temporairement au moins, explosives avec remise en suspension brutale des poussières. L'électricité statique y constitue une source d'inflammation probable.

Il est toujours préférable d'établir le courant d'air de transport avant d'y injecter les poussières et de l'arrêter après qu'elles ont cessé de circuler.

Le transport de poussières particulièrement dangereuses sous gaz inerte se heurte à de grandes difficultés, notamment en raison des quantités de gaz nécessaires (cf. § 2).

Toute installation de dépoussiérage de poussières susceptibles d'exploser requiert une surveillance et un entretien rigoureux et fréquent, comportant tout particulièrement le contrôle :

- de la perte de charge,
- des systèmes de décolmatage,
- de l'évacuation des poussières dans la trémie du filtre (en aucun cas un filtre ne peut être considéré comme un organe de stockage des poussières),
- du bon état des événements d'explosion,
- de fuite éventuelle au niveau des media filtrants...

La vérification et le nettoyage des conduits doivent être effectués périodiquement.

Les poussières combustibles sont parfois convoyées par **transport mécanique** (vis sans fin...). Celui-ci est fréquemment utilisé à la sortie de broyeurs, tamis, malaxeurs, silos.

Il est souhaitable que, dans les dispositifs de transport mécanique, un dispositif d'isolement empêchant la propagation d'une explosion (cf. chapitre IV) soit interposé entre deux enceintes (un broyeur ou un silo) et la canalisation de transport placée en aval.

Nettoyer

En dehors des lieux de stockage, les dépôts de poussières dont on n'a pu empêcher la formation doivent être enlevés par des opérations de nettoyage courantes avant que la quantité de poussières fines au sol ne présente un danger. Une attention spéciale sera portée aux poussières se déposant aux alentours des appareils, dans les recoins, sur les charpentes...

Les installations, les bâtiments et les locaux occupés par du personnel doivent être débarrassés régulièrement des poussières recouvrant le sol, les parois, les chemins de câbles, les gaines, les conduits, les

appareils et les équipements. **L'enlèvement des dépôts de poussières constitue la mesure essentielle dans la prévention des explosions.**

Il faut donc impérativement éliminer les dépôts de poussières rapidement après leur formation et optimiser les opérations de nettoyage. En utilisant des aspirateurs industriels portables adaptés aux poussières combustibles (par exemple, media filtrants antistatiques), voire aux atmosphères explosives (adapté au risque de la zone considérée). La vigilance portera tout particulièrement sur le nettoyage de toutes les installations électriques. L'utilisation de balais ou brosses, provoquant la mise en suspension d'une quantité importante de poussières, devra être déconseillée voire proscrite.

Le nettoyage des locaux sera fréquent.

2. Prévention des explosions par action sur le comburant : mise à l'état inerte

L'introduction d'un gaz inerte (azote, argon, dioxyde de carbone...) en proportion suffisante dans une atmosphère chargée de poussières inflammables entraîne l'appauvrissement de celle-ci en oxygène et rend donc l'inflammation impossible. Les systèmes de mise à l'état inerte sont utilisés depuis de nombreuses années dans l'industrie comme une des principales techniques préventives offrant une protection contre le risque d'explosion.

La mise à l'état inerte n'est généralement applicable qu'aux installations fermées et enceintes closes (silos et stockages, réacteurs, malaxeurs, broyeurs, transporteurs, fluidiseurs...). Dans la pratique, peu d'industries utilisent en continu les procédés de diminution du taux d'oxygène, compte tenu de nombreuses difficultés dues, entre autres, à un investissement technique important, à la permanence d'une surveillance par régulation automatique, à l'étanchéité parfaite des installations (difficile à assurer), à des consommations élevées en gaz inerte...

La concentration limite en oxygène peut être définie comme la teneur la plus élevée en oxygène en dessous de laquelle l'explosion devient impossible. Elle est en général de l'ordre de 10 à 15 %, encore qu'il existe des produits capables de donner des explosions à des teneurs en oxygène bien inférieures.

Le *tableau 3* indique les proportions maximales d'oxygène à maintenir en présence de quelques poussières courantes pour empêcher leur explosion lorsque le gaz inerte est du dioxyde de carbone ou de l'azote

(gaz de mise à l'état inerte les plus couramment utilisés). Cependant, surtout lorsque celles-ci peuvent être portées à haute température, certaines catégories de poussières (métaux légers tels que le lithium ou l'aluminium), peuvent réagir avec le dioxyde de carbone voire parfois avec l'azote ; l'inertage sera alors réalisé au moyen d'un autre gaz tel que l'argon, non réactif chimiquement.

La concentration limite d'oxygène correspondant à la mise à l'état inerte du mélange poussière/air/gaz inerte est déterminée expérimentalement. C'est une grandeur spécifique de la poussière considérée et du gaz inerte utilisé. Le dioxyde de carbone est un gaz inerte plus efficace que l'azote puisqu'il admet une concentration limite d'oxygène plus grande. En général, la limite de concentration d'oxygène est donnée à température ambiante. Il convient de tenir compte du fait que la limite de concentration d'oxygène diminue avec des températures élevées (environ 1,5 volume en % pour une augmentation de 100 °C).

À partir des valeurs expérimentales de la limite de concentration d'oxygène, on obtient la concentration d'oxygène maximale autorisée en maintenant le taux d'oxygène à 2 % en dessous de la concentration limite en oxygène. Ce facteur de sécurité doit prendre en compte les fluctuations du système, la sensibilité et la fiabilité des appareils de mesure.

La présence de gaz inerte en excès dans l'air entraîne une réduction de la concentration de l'atmosphère en oxygène qui peut, dans certaines limites, être à l'origine de troubles de la santé. Lorsque la concentration en oxygène dans l'air est comprise entre 12 et 16 %, les symptômes que l'on enregistre comprennent une augmentation du rythme respiratoire et du pouls ainsi qu'une légère perturbation de la coordination des mouvements. Entre 10 et 14 %, la conscience reste en éveil mais des risques psychiques apparaissent ainsi qu'une fatigue anormale et une respiration inégale. Entre 6 et 10 %, surviennent des nausées et des vomissements, les pertes de conscience peuvent apparaître rapidement. En dessous de 6 % d'oxygène, des convulsions se produisent, le sujet devient inconscient, la respiration stoppe et, quelques minutes plus tard, le cœur s'arrête. À la différence des principaux gaz inertes (azote, argon, etc.), le dioxyde de carbone (CO₂) présente une toxicité engendrant un risque physiologique même avant que l'effet asphyxiant ne se manifeste. Le CO₂ provoque des perturbations des fonctions respiratoire et circulatoire ainsi que l'équilibre acidobasique. Ces troubles augmentent avec le pourcentage de CO₂ dans l'atmosphère. Dès que la concentration

de CO₂ dépasse 15 %, il peut y avoir perte de connaissance ; dès qu'elle dépasse 25 %, on peut observer une dépression du système nerveux central, avec coma convulsif et la mort. Ces troubles peuvent apparaître de façon très brutale si la transition entre l'atmosphère normale et l'atmosphère polluée est rapide.

Le paragraphe précédent nous amène à préconiser une mise en œuvre des gaz inertes entourée de précautions et de procédures dûment établies et suivies. Les précautions essentielles à observer pour assurer la sécurité des personnes, face notamment au risque d'asphyxie, devront être :

Pour les trappes d'accès aux enceintes mises à l'état inerte :

- mise en place, sur toutes les trappes, d'affiches mettant en garde sur la présence du risque et avec spécification du port de détecteur à oxygène obligatoire,
- entrée consignée et permis de pénétrer,
- dispositif d'ouverture (clé, etc.) à prendre au poste de contrôle après, en particulier, vérification de la teneur en oxygène.

Pour les galeries techniques (hautes et basses) :

- aération (taux d'ouvertures obligatoire pour avoir une aération naturelle maximum),
- contrôle du taux d'oxygène, pour les zones peu ou non ventilées,
- report de l'information au poste de contrôle et à l'entrée avec arrêt d'urgence et alarmes, une visuelle et une sonore, différentes de l'alarme incendie,
- mise en place d'affiches aux entrées mettant en garde sur la présence du risque avec spécification du port de détecteur à oxygène obligatoire.

Pour les canalisations d'amenée en gaz inerte :

- mise en place de canalisations aériennes, sans joint, au maximum en extérieur, métalliques (en cuivre ou en inox afin d'éviter la corrosion),
- détection des grosses fuites grâce à un débitmètre gaz, avec blocage de la distribution en cas de débit trop important,
- détection des petites fuites par une vérification semestrielle avec un produit adapté (mélange eau/savon, par exemple).

Pour la salle de commande :

- éloignement des installations et enceintes protégées,
- elle regroupera :
 - l'asservissement pour les moteurs et arrêt d'utilisation en cas de dépassement de la valeur de consigne,
 - tous les suivis des teneurs en oxygène, notamment dans les galeries techniques avec asservissement des accès (pas de teneur en oxygène inférieure à 18 %).

Le personnel sera équipé en permanence d'un détecteur à oxygène avec ordre d'évacuation immédiate dès que la teneur devient inférieure à 18 %. Le calibrage de ces détecteurs se fera tous les six mois. Les interventions ne seront jamais effectuées par une personne seule et la présence d'appareil de protection respiratoire autonome sera obligatoire.

En outre, une des toutes premières mesures d'information de tout le personnel sera de porter à sa connaissance le risque que représente la raréfaction en oxygène de l'atmosphère, les moyens de prévention à mettre en œuvre et les procédures à observer si un accident se produit. L'information et la formation du personnel doivent être systématiques et renouvelées annuellement afin de maintenir un état de vigilance vis-à-vis de ces risques. En particulier, l'entraînement au sauvetage est fondamental, car un sauvetage improvisé à la hâte, sans le respect d'une stricte procédure s'avère souvent inefficace sinon catastrophique (le sauveteur devenant une seconde victime). Un programme annuel de formation et d'entraînement au sauvetage doit être établi dans chaque établissement concerné.

Pour les entreprises extérieures, un plan de prévention avec permis de travail sera établi. Un des points importants qui doit figurer est l'information détaillée à donner obligatoirement au personnel des sociétés intervenantes avant le début des travaux.

Le recours à l'utilisation de l'inertage comme moyen de prévention sera à prendre en compte principalement lorsque :

- l'installation ne peut être efficacement protégée contre les effets d'une explosion éventuelle,
- la poussière possède une énergie minimale d'inflammation très basse,
- les sources d'inflammation ne peuvent être totalement éliminées (par exemple quand la température de mise en œuvre dépasse la température d'auto-inflammation de la poussière).

Ce système de prévention demande de respecter un certain nombre de dispositions dont les principales, outre la protection du personnel, seront :

- d'avoir en permanence une source de gaz inerte suffisante pour maintenir l'installation au taux d'oxygène requis, de prévoir un plan de mise en sécurité de manque de gaz inerte,
- de contrôler le taux d'oxygène en continu en divers points et dans tous les appareils,
- d'établir des consignes de démarrage et d'arrêt de l'installation pour que ces opérations se déroulent sous atmosphère inerte...

3. Prévention des explosions par action sur les sources d'inflammation

Cette action de prévention s'attachera à éliminer :

- les flammes et feux nus,
- les surfaces chaudes,
- les étincelles et échauffements d'origine mécanique,
- les étincelles et les échauffements dus aux matériels électriques et moteurs thermiques,
- les étincelles provenant des décharges d'électricité statique,
- l'échauffement spontané en l'absence de source de feu extérieur.

3.1. Sources d'origine électrique

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, notamment 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, 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 de sécurité (TBTS) 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 de poussières 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

Les causes d'inflammation d'origine électrique proviendront principalement de l'éclairage, de

l'appareillage électrique, des canalisations, des armoires et des moteurs électriques...

Le matériel électrique présent dans les zones à risque d'explosion doit être conforme à la réglementation (cf. § 4).

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 canalisations électriques.

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 combustibles mis en œuvre. Le risque est évidemment accru lors de surcharge ou de court-circuit.

Un certain nombre de mesures élémentaires doivent être respectées : isolement des lignes, mise à la terre convenable, protection contre les surtensions ou surintensités, bonne disposition des appareils permettant la dissipation de l'énergie calorifique produite, entretien régulier et maintenance des appareils...

Les principes de la protection des matériels électriques utilisés en présence de poussières combustibles seront les suivants :

- les appareils doivent être suffisamment étanches pour éviter la pénétration des poussières,
- la surface des matériels ne doit pas pouvoir atteindre une température capable d'enflammer les poussières en couche ou en nuage,
- le matériel doit être conçu pour éviter l'accumulation des poussières ou des fibres.

En conséquence, le matériel sera choisi en tenant compte des prescriptions suivantes :

- le degré de protection IP (cf. la norme NF EN 60529) des enveloppes des matériels électriques sera IP 6X pour les zones 20, 21 et 22 avec poussière conductrice⁽¹⁾ et IP 5X pour les autres zones 22,
- la température maximale de surface du matériel ne doit pas dépasser deux tiers de la température minimale d'inflammation (en °C) du nuage air/poussière considéré,
- la température maximale de surface du matériel doit

(1) Poussière dont la résistivité est inférieure ou égale à $10^3 \Omega.m$.

être au plus égale à la température minimale d'inflammation d'une couche de 5 mm d'épaisseur de la poussière considérée, diminuée de 75 K.

3.2. Étincelles d'origine électrostatique

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

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} C.V^2$$

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

Les plus énergiques de ces étincelles peuvent, dans certaines conditions, enflammer des nuages de poussières (moins de 5 mJ dans les cas les plus sensibles). On rencontre couramment des capacités de quelques picofarads (par exemple, celle du corps humain isolé par rapport au sol est de 100 à $300 \cdot 10^{-12}$ 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 $> 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$).

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

- le transport des produits pulvérulents dans des canalisations,
- le criblage, le filtrage, la séparation,
- la manutention de poudres en sacs en plastique,
- les personnes pouvant être facilement chargées électriquement,
- les frottements de diverses natures : courroies et poulies de transmission, déroulement de feuilles de textiles, de papier, de matière plastique,
- l'orage.

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

- **l'humidification** de l'atmosphère : une humidité rela-

tive 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 protection individuelle utilisables dans les atmosphères explosibles tels que les casques, vêtements, chaussures... ;

- **la mise à la terre** (équipotentialité), 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 $10^6 \Omega$. En outre, les chaussures des personnes qui se tiennent sur le sol doivent avoir une résistance maximale à la terre de 0,5 à $1,10^6 \Omega$.

Les divers éléments d'installations (récipients, tronçons de canalisations, filtres, buses...) par lesquels passe le transfert de substances capables d'accumuler des charges électrostatiques doivent être reliés par des liaisons équipotentielle de résistance inférieure à $10^6 \Omega$;

- **la réduction des frottements** par abaissement des pressions exercées sur les corps en contact, la **diminution des vitesses d'écoulement**, la **réduction des hauteurs de chutes** des produits ;

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

3.3. Flammes et feux nus

Leur banissement des zones dangereuses entraîne l'interdiction des travaux par « points chauds » (soudage et découpage à l'arc ou au chalumeau), à moins que

TEXTES RÉGLEMENTAIRES relatifs aux travaux par points chauds

- Ordonnance préfectorale du 16 février 1970, Paris.
- Installations classées pour la protection de l'environnement : brochure JO n° 1001.
- Recommandation R 266 de la CNAM.
- Entreprises extérieures : décret du 20 février 1992.



PERMIS DE FEU

Le PERMIS DE FEU est établi dans un but de prévention des dangers d'incendie et d'explosion occasionnés par les travaux par point chaud (soudage, découpage, meulage...). Il est délivré par le chef de l'entreprise utilisatrice ou son représentant qualifié, pour chaque travail de ce genre exécuté soit par le personnel de l'entreprise, soit par celui d'une entreprise extérieure. Il ne concerne pas les travaux effectués à des postes de travail permanents de l'entreprise. Il doit être renouvelé chaque fois qu'un changement (d'opérateur, de lieu, de méthode de travail...) intervient dans le chantier.

ORDRE DE TRAVAIL DONNÉ PAR (1)

M _____
 Fonction _____

ENTREPRISE EXTÉRIEURE ÉVENTUELLEMENT (2)

Raison sociale _____
 Représentant qualifié _____

TRAVAIL À EXÉCUTER

(Date, heure et durée de validité du Permis)
 Le _____ de _____ à _____
 Lieu _____
 Organisme à traiter _____
 Opérations à effectuer _____

PERSONNES CHARGÉES DU TRAVAIL ET DE SA SÉCURITÉ

1^{er} Agent veillant à la sécurité générale de l'opération :
 M _____
 2^e Opérateur : M _____
 3^e Auxiliaire(s) : M ou MM _____

SIGNATURES (3)

	Dates
Le représentant du Chef d'entreprise donnant l'ordre de travail :	_____
Agent veillant à la sécurité générale de l'opération :	_____
Opérateur :	_____

CONSIGNES PARTICULIÈRES RÉSULTANT DU TYPE D'EXPLOITATION DE L'ÉTABLISSEMENT

RISQUES IDENTIFIÉS (STOCKAGES, CONSTRUCTION, CONTIGUITÉS...)

MOYENS DE PROTECTION CONTRE LES PROJECTIONS

A PROXIMITÉ DU LIEU DE TRAVAIL

- MOYENS D'ALERTE : _____

 - MOYENS DE 1^{re} INTERVENTION : _____

EN CAS D'ACCIDENT, TÉLÉPHONE :

(1) Le représentant qualifié du Chef d'entreprise donnant l'ordre de travail.

(2) Dans le cas où pour exécuter le travail il est fait appel à une entreprise extérieure, et sans qu'il soit dérogé au contrat entre les deux entreprises, l'entreprise utilisatrice qui commande le travail doit veiller à ce que le maximum de précautions soient prises pour la mise en état du lieu où le travail doit être exécuté ainsi que des abords, surtout lorsque ceux-ci comportent des matériels ou marchandises inflammables ou susceptible de faciliter une

explosion ou la propagation d'un incendie.

Toutefois, il appartient à l'entreprise extérieure de prendre contact avec le chargé de sécurité de l'entreprise utilisatrice qui commande le travail et d'établir en commun les mesures de sécurité.

(3) Le donneur d'ordre recueille les signatures des parties intéressées. Chacun des signataires reçoit un exemplaire du PERMIS DE FEU, complété et revêtu de toutes les signatures.



Encadré 1 • Exemple de permis de feu (recto-verso).



Instructions impératives de sécurité



AVANT LE TRAVAIL ET AVANT TOUTE REPRISE DE TRAVAIL

(on pourra cocher dans le casé 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 des 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

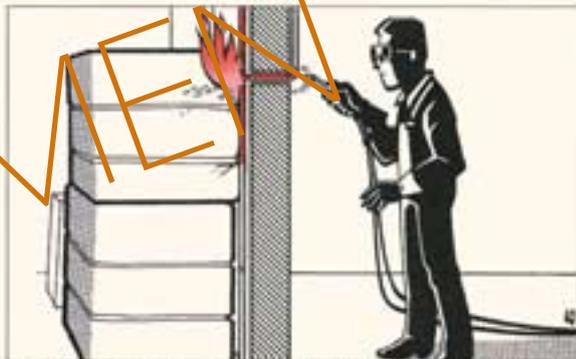


Figure 2 : inflammation au contact de conduites invisibles chauffées



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 contre-signer le PERMIS DE FEU et d'en respecter scrupuleusement les consignes, ainsi que celles de vos instructions permanentes.

CHAPITRE 3

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		MOYEN DE PROTECTION	
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"/>
Autre...	<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)

des précautions particulières ne soient prises. La procédure du « permis de feu » est alors nécessaire. Le permis de feu (cf. encadrés 1 et 2 pages précédentes) 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.

En particulier, pour éviter que le chauffage ne constitue une source d'inflammation, il faut proscrire les systèmes de chauffage à flamme nue.

3.4. Surfaces chaudes

Les surfaces chaudes à surveiller sont le plus souvent 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 et de séchage.

Les températures limites de surface sont les températures maximales que peuvent atteindre les appareils en fonctionnement normal ; elles doivent être au plus égales au minimum :

- des 2/3 de la température minimale d'inflammation du nuage air/poussière considéré,
- de la température minimale d'inflammation d'une couche de 5 mm d'épaisseur de la poussière considérée, diminuée de 75 K.

Pour les appareils de chauffage, il faut éviter ceux qui présentent une température de surface élevée (notamment les systèmes rayonnants) et choisir de préférence des systèmes avec échangeurs ou fluides caloporteurs. Pour les procédés de séchage mettant en œuvre des tours d'atomisation, lits fluidisés, filtres..., l'une des principales sources d'ignition est le nid incandescent formé par un agglomérat de produit subissant une oxydation lente au contact de la paroi chaude. Si de tels nids se forment et se détachent de la paroi, ils peuvent, en se brisant, générer de nombreuses particules incandescentes pouvant faire exploser l'installation ou être transportées vers les autres installations propageant ainsi le risque d'explosion ou d'incendie. Une technique préventive pour ce type de risque consiste à faire une analyse différentielle et continue du taux de monoxyde de carbone (CO) entre l'entrée et la sortie du procédé. Un niveau de détection de l'ordre de la ppm (partie par million) permet de prendre des mesures immédiates avant même que les nids incandescents n'apparaissent. En fonction du taux de monoxyde de carbone mesuré, un arrêt instantané de l'installation ou le noyage de la tour permettent de supprimer le risque.

Par ailleurs, les engins munis de moteurs à combustion interne devront présenter des caractéristiques de sécurité suffisantes pour éviter l'explosion.

3.5. Étincelles et échauffements d'origine mécanique

En milieu industriel, les frottements et les chocs d'origine mécanique les plus fréquents, engendrant échauffements et étincelles sont dus aux :

- frictions au niveau des appareils de manutention (élévateurs, transporteurs...),
- frottements continus de pièces en contact,
- travaux de meulage, de découpe et de rectification,
- impacts liés à la chute ou au détachement de pièces...

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. Ainsi 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. Les énergies d'étincelles nécessaires à l'inflammation de nuages de poussières sont environ 100 fois plus grandes que celles qui peuvent initier des explosions de gaz.

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

- les ventilateurs d'extraction (les matières des pales et de l'enveloppe seront choisies pour éviter les étincelles par choc accidentel ; leurs moteurs électriques seront placés hors de l'atmosphère éventuellement inflammable ou sinon seront adaptés à la zone à risque) ;
- les meules, broyeurs : ils peuvent être rendus inoffensifs par des mesures particulières (broyeurs sous atmosphère inerte, etc.) ;
- les petites pièces et particules métalliques éventuellement en mouvement (conduits, installations de chargement et de transport, broyeurs) ;
- 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...) 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 les parties non travaillantes des outils

un produit adapté (un revêtement plastique, défini par la norme NF EN 74-400) pour éviter les étincelles provoquées par des chocs et des chutes intempestifs.

Les étincelles sont constituées de particules métalliques⁽¹⁾ (fer, acier, cuivre, aluminium...) ou minérales (carbone, quartz, silex, grès) arrachées à un matériau par le choc ou le frottement sous pression d'une matière aussi dure ou plus dure.

La prévention pour limiter ou supprimer la formation d'étincelles s'attachera principalement :

- à la recherche d'un autre mode opératoire,
- au captage (dispositifs magnétiques),
- à la rétention (filtres et tamis),
- à l'élimination par gravité des particules susceptibles de produire des étincelles par choc dans les conduits de transport pneumatique, aux alimentations de broyeurs, de mélangeurs et d'autres appareils de traitement de pulvérulents.

On peut également prévoir sur des lignes de transport pneumatique ou de dépoussiérage, des systèmes infrarouges de détection d'étincelles. Ces étincelles, une fois détectées, seront éteintes à l'aide d'un dispositif d'arrosage placé à une distance suffisante dans la conduite en aval de la détection (cf. chapitre IV, § 4.4). 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 ainsi dépasser 1 000 °C).

Les élévations de température peuvent aussi se produire lors de dysfonctionnements, par suite d'une usure, d'un mauvais montage, d'un grippage, etc. Des échauffements importants par frottement en têtes et pieds d'élévateurs à godets ou de bandes transporteuses à la suite d'une mauvaise tension ou d'un désalignement se produisent fréquemment.

L'utilisation de dispositifs de contrôle peut alerter des conditions anormales de glissement de bandes, de bourrage de goulottes, de présence de dépôt et d'apparition d'échauffement.

La maintenance et la surveillance des installations susceptibles d'échauffement devront être rigoureuses.

Pour lutter contre les frottements mécaniques, elle

demandera la mise en place de dispositifs de détection tels que :

- contrôleurs de vitesse de rotation, placés sur les arbres des poulies de pied des élévateurs à godets par exemple,
- contrôleurs de position de la sangle pour s'assurer que celle-ci ne dévie pas ou ne frotte pas au bâti,
- détecteurs de bourrage sur les divers transporteurs...

Toute anomalie détectée par l'un de tous ces dispositifs de contrôle donnera lieu à un ensemble d'alarmes, centralisé sur un tableau général des commandes.

3.6. Autres sources

D'autres sources initiatrices d'une explosion de poussières peuvent être citées et il conviendra également de s'en prémunir. Parmi celles-ci, on retiendra essentiellement :

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

La foudre

Il ne faut pas oublier que la foudre peut conduire à l'inflammation d'un nuage de poussières (il faut éviter la présence d'antennes radio, par exemple sur les silos ou tours de manutention).

Il est souhaitable de faire procéder à une étude de protection par un spécialiste.

L'auto-échauffement et la fermentation

La combustion spontanée résulte de l'oxydation d'une poussière combustible, lorsque la ventilation à l'intérieur du tas est suffisante pour fournir l'oxydation mais insuffisante pour disperser la chaleur résultant de cette oxydation. L'auto-échauffement, phénomène d'accumulation de chaleur, peut être défini comme la combustion lente d'un amas de poussières.

La prévention consiste à assurer une détection suffisamment précoce de l'élévation de la température. Cette détection n'est pas toujours aisée surtout dans les stockages de grandes dimensions ou dans les installations ayant des débits d'air élevés, le détecteur

(1) Des métaux tels que le zirconium et le titane, qui produisent des étincelles par frottement ou par impact à fort potentiel d'inflammation, devraient être évités dans les zones à risque d'explosion. Parmi les étincelles à fort potentiel d'inflammation, on peut citer le frottement d'acier rouillé contre des métaux légers (aluminium, magnésium, titane).

devant être placé à proximité immédiate du point d'apparition de l'auto-échauffement. Pour pallier cet inconvénient, il sera judicieux de mettre en place plusieurs lignes de détection.

La mesure des flux de chaleur à travers la paroi d'un silo, par thermographie infrarouge, permet également de détecter la présence d'un auto-échauffement.

De plus, les phénomènes de fermentation et d'oxydation lente peuvent aussi conduire à la formation de gaz combustibles qui pourront contribuer à favoriser la formation d'une explosion. On peut détecter ces gaz émis au départ de l'oxydation lente (le monoxyde de carbone - CO - est généralement le gaz traceur retenu).

La mise à l'état inerte au moyen de gaz (azote, par exemple) peut être utilisée pour réduire les risques d'auto-échauffement.

4. Appareils utilisables en atmosphères explosives

Dans les zones à risques d'explosion, déterminées sous la responsabilité du chef d'établissement, les appareils et les systèmes de protection, notamment électriques, 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 être placés, autant que possible, en dehors de ces zones de danger.

Le décret n° 96-1010 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.

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 sont destinés aux travaux souterrains des mines et aux parties de leurs installations de surface mis en danger par le grisou et/ou des poussières combustibles. 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 :
 - en cas de défaillance d'un des moyens de protection, au moins un second moyen indépendant assure

le niveau de protection requis ;

- en cas d'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**. Les appareils de cette catégorie sont destinés aux travaux souterrains des mines et aux parties de leurs installations de surface susceptibles d'être mis en danger par le grisou et/ou par des poussières combustibles. Dans le cas où une atmosphère explosive se manifeste, l'alimentation en énergie de ces appareils est 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 assurent 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 poussières 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 :
 - en cas de défaillance d'un des moyens de protection, au moins un second moyen indépendant assure le niveau de protection requis,
 - en cas d'apparition de deux défauts indépendants l'un de l'autre, le niveau de protection requis est assuré.

Ces appareils sont destinés à la zone 20.

Les systèmes de protection « explosion » sont toujours classés en catégorie 1.

- 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 poussières, 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 21.

- 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 poussières, ont une faible probabilité de se manifester et ne subsisteront que pour une courte période.

Ces appareils sont destinés à la zone 22.

Le marquage des catégories sur les appareils permet à l'utilisateur de posséder des indications claires pour une utilisation sûre.

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

- des moyens pour prévenir la formation d'une atmosphère explosive par l'équipement, le système de protection et les dispositifs de sécurité,
- les moyens pour prévenir l'inflammation de l'atmosphère explosive par des sources d'énergie électrique ou non électrique,
- les moyens 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 le décret n° 96-1010. 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 8* donne les différentes procédures d'évaluation de la conformité.

L'examen CE de type est la procédure par laquelle l'or-

organisme notifié 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 le ou les échantillons et la documentation technique nécessaire à la mise en œuvre des vérifications et essais.

Cette documentation, comprend :

- une description générale,
- les plans, diagrammes... 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 man-

dataire légal applique un des modules de vérification de la production décrit ci-dessous :

- assurance qualité de production,
- vérification sur produit,
- conformité au type,
- assurance qualité du produit,
- 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. Il est complété par le marquage spécifique de protection contre les explosions

Tableau 8 ● 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 ⁽¹⁾) 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 ⁽¹⁾) 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 ⁽¹⁾) 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 ⁽¹⁾) 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 ⁽¹⁾) 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 ⁽¹⁾) 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 ⁽²⁾ .
	II	1	Examen CE de type (Annexe III ⁽¹⁾) 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 ⁽²⁾ .
		3	Contrôle interne de fabrication selon annexe VIII.

(1) Toutes les annexes sont issues de la directive 94/9/CE.

(2) ON = Organisme notifié.

Encadré 3 • Choix du matériel pour atmosphère explosive de poussières

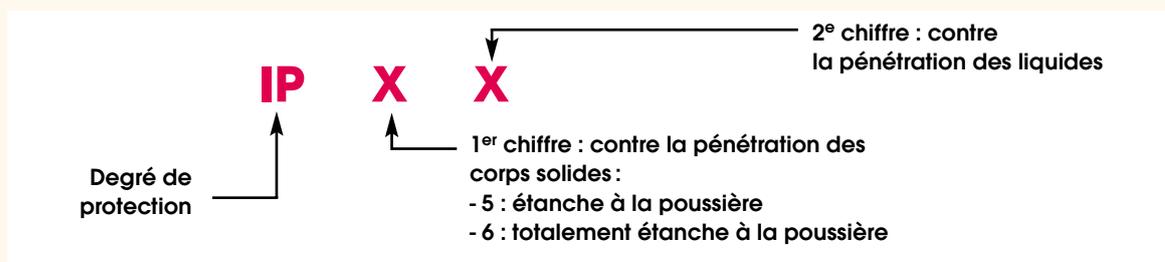
Pour le choix du matériel en atmosphère explosive de poussières, il faut prendre en compte quatre critères.

1. Catégorie du matériel

Catégorie de protection du matériel	Zone à risque d'explosion
Catégorie 1 D	Zone 20
Catégorie 2 D	Zone 21
Catégorie 3 D	Zone 22

2. Étanchéité du matériel

Zone à risque d'explosion	Étanchéité nécessaire
Zone 20	Catégorie IP 6X
Zone 21	Catégorie IP 6X
Zone 22	Poussières conductrices : Catégorie IP 6X Poussières isolantes : Catégorie IP 5X



3. Température limite de surface

Norme EN 1127-1 :

Zone 20 : « Même en cas de dysfonctionnements rares, la température de toutes les surfaces qui peuvent venir en contact avec les nuages de poussières ne doit pas dépasser les deux tiers de la température minimale d'inflammation, exprimée en degrés Celsius, du nuage de poussières concerné. De plus, la température des surfaces sur lesquelles la poussière peut être déposée doit être inférieure, en prenant en compte une marge de sécurité⁽¹⁾, à la température minimale d'inflammation de la couche la plus épaisse qui peut être formée à partir de la poussière concernée (...). »

Zone 21 : « Même en cas de dysfonctionnements, la température de toutes les surfaces qui peuvent venir en contact avec les nuages de poussières ne doit pas dépasser les deux tiers de la température minimale d'inflammation, exprimée en degrés Celsius, du nuage de poussières concerné. De plus, la température des surfaces sur lesquelles la poussière peut être déposée doit être inférieure, en prenant en compte une marge de sécurité, à la température minimale d'inflammation de la couche la plus épaisse qui peut être formée à partir de la poussière concernée (...). »

Zone 22 : « En fonctionnement normal, la température ambiante d'utilisation, la température de toutes les surfaces qui peuvent venir en contact avec les nuages de poussières ne doit pas dépasser les deux tiers de la température minimale d'inflammation, exprimée en degrés Celsius, du nuage de poussières. De plus, la température des surfaces sur lesquelles la poussière peut être déposée doit être inférieure, en tenant compte d'une marge de sécurité⁽¹⁾, à la température minimale d'inflammation de la couche de poussière concernée. »

4. Température ambiante d'utilisation

La température limite indiquée sur le matériel ne s'applique que pour une température ambiante d'utilisation donnée. C'est à l'utilisateur de s'assurer que le matériel sera bien utilisé dans une température ambiante en conformité avec celle prévue lors de la détermination de la température limite.

(1) Une marge de sécurité de 75 K entre la température minimale d'inflammation d'une couche de poussières et la température de surface de l'appareil est souvent utilisée. Cette valeur est tirée des situations où l'épaisseur de la couche de poussières est inférieure ou égale à 5 mm et tient compte des variations de la température minimale d'inflammation, mesurée sur une couche de 5 mm, et d'un effet isolant d'une couche de 5 mm de poussières qui peut entraîner des températures de surface plus élevées, si celles-ci ne sont pas limitées.

(Ex) et suivi du groupe, de la catégorie et d'une indication relative aux atmosphères explosives pouvant être présentes : D pour les poussières et G pour les gaz.

Exemple
CE (Ex) II 1 D

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.

Elle 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 et les instructions utiles du point de vue de la sécurité,
- les limites d'utilisation couvertes par la certification issue de la réglementation relative aux atmosphères explosives.

Mesures de protection

Mesures de protection

Dans les chapitres précédents, ont été étudiées les conditions devant être remplies pour qu'une explosion de poussières combustibles puisse se produire et les mesures de prévention pouvant empêcher cette dernière. Rappelons que les trois mesures préventives pour réduire la possibilité d'avoir une explosion sont :

- le contrôle de la concentration en poussières,
- la mise à l'état inerte,
- la suppression des sources d'ignition.

Cependant, comme ces mesures préventives ne peuvent pas éliminer avec certitude les risques d'explosion, des mesures sont à prendre pour garantir qu'une explosion n'ait aucune conséquence dangereuse. Ces mesures sont qualifiées de « mesures constructives de protection ». Les enceintes et les appareils doivent en effet être construits et équipés de manière à garantir la sécurité du personnel et à limiter, autant que possible, les dégâts portés aux bâtiments et aux installations si une explosion a lieu.

Ces mesures constructives générales de protection se fondent sur les caractéristiques d'explosivité des produits et sur les résultats des essais relatifs à leur explosion (cf. chapitre I).

Les mesures constructives de protection se basent sur la pression maximale d'explosion en enceinte fermée, P_{max} (cf. § 3, chapitre I) et les plus courantes sont une :

- construction résistant à la pression d'explosion : confinement d'explosion, enceinte résistant à 10 bars,
- construction résistant à une pression d'explosion réduite :
 - par un système de décharge de la pression (évent de décharge d'explosion),
 - par un système de suppression d'explosion résultant d'une extinction immédiate.

Si les mesures ci-dessus atténuent l'explosion, elles ne l'empêchent pas. Il est donc nécessaire d'appliquer

des mesures complémentaires, ou découplage technique des appareils lors d'une explosion, arrêtant la transmission des effets de l'explosion à d'autres parties de l'installation. Ce découplage doit se faire aussi près que possible des installations ou appareils à protéger, afin d'empêcher l'emballement de l'explosion pouvant devenir rapidement incontrôlable.

À chaque cas spécifique, devront correspondre les mesures à prendre. Quoiqu'il en soit, toutes les parties de l'installation qui peuvent être soumises à une onde de choc au cours d'une explosion seront construites de manière à y résister. Elles sont à retenir par principe lors de la réalisation de nouvelles installations, mais il est souvent possible de modifier l'équipement d'installations anciennes pour améliorer la sécurité. Dans tous les cas cependant, ces mesures feront l'objet d'une étude particulière approfondie, menée par des experts.

Rappelons que tous les systèmes de protection doivent être conformes à la réglementation relative aux atmosphères explosives (cf. chapitre III, § 4).

1. Appareils résistant à la pression d'explosion

Comme protection contre les effets de la pression des explosions, on peut utiliser des appareils capables de pouvoir supporter une explosion interne sans rompre (cf. la norme NF EN 14460).

Les appareils construits pour résister à la pression de l'explosion doivent pouvoir supporter la pression maximale prévisible sans subir de déformations permanentes et l'explosion doit rester confinée dans le volume. La pression maximale d'explosion P_{max} (cf. chapitre I) est en général de l'ordre de 7 à 10 bars. On admet qu'un appareil construit pour résister à une pression de 10 bars contient l'explosion sans déformation.

Ce mode de protection est généralement bien adapté à la protection de petits volumes (réservoirs, appareils) contre les effets de la pression des explosions.

Toutefois, il sera souvent nécessaire d'y adjoindre un découplage technique (cf. § 4) afin de localiser l'explosion à l'équipement où elle s'est produite et d'éviter sa transmission par les conduits au reste de l'installation.

Après une explosion, l'inspection de l'appareil est obligatoire et avant toute remise en marche, il convient de procéder aux essais permettant de s'assurer que l'appareil est sans danger.

2. Appareils résistant à une pression d'explosion réduite en association avec la décharge de la pression d'explosion (système de protection par événement)

Pour éviter la destruction éventuelle d'enceintes suite à une explosion, une fraction déterminée de la surface de leurs parois est rendue 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 par événement est une mesure de protection évitant la destruction d'une enceinte liée à la surpression engendrée par une explosion, par l'ouverture à un stade précoce de celle-ci des zones fragilisées bien définies. Ces événements doivent être garantis sans fragmentation pour éviter de blesser les personnes par projection de parties métalliques.

Lorsque l'on protège une enceinte par un dispositif de décharge d'explosion, la courbe de montée en pression diffère par rapport à celle d'une explosion confinée. La figure 12 ci-après montre la courbe d'évolution de la pression au cours du temps pour une explosion évacuée. Dans une enceinte fermée, la pression maximale P_{max} qui peut être atteinte est supérieure à la pression de résistance de l'enceinte et conduira à la destruction de celle-ci. Lors d'une décharge d'explosion, la pression réduite d'explosion P_{red} qui est atteinte doit être inférieure à la pression de résistance de l'enceinte afin de ne causer aucun dommage aux structures de cette enceinte.

Les équipements protégés par événements sont conçus pour pouvoir supporter une pression réduite d'explosion P_{red} . Pour la décharge d'explosion, la pression réduite d'explosion est généralement comprise entre 0,2 et 3 bars. Cette méthode de protection est particulièrement bien

adaptée pour des volumes moyens (entre 5 et 200 m³), mais peut également être utilisée pour des volumes plus importants.

Les événements doivent être installés le plus près possible des sources potentielles d'inflammation qui peuvent déclencher une explosion et seront placés aux endroits permettant de maintenir le bon fonctionnement des appareils.

La décharge d'explosion par événement d'explosion est le mode de protection d'explosion de poussières qui est actuellement le plus mis en œuvre. Plusieurs normes, internationalement reconnues, sont utilisées pour le dimensionnement et l'implantation des dispositifs de décharge d'explosion :

- le projet de norme européenne NF EN 14491,
- la norme américaine NFPA 68.

Les paramètres de base à introduire pour faire un calcul de surface d'évent sont :

- le volume de l'enceinte à protéger,
- la géométrie de celle-ci (rapport hauteur/diamètre),
- les caractéristiques d'explosivité de la poussière (K_{st} et P_{max}),
- la pression d'explosion maximale qui ne doit pas être dépassée (P_{red}),
- la pression d'ouverture de l'évent (P_{stat}),
- la longueur de la gaine d'évacuation.

Cependant, ce type de protection sous-entend que la décharge d'explosion se fasse dans un endroit où le risque d'explosion secondaire est nulle dans une zone non dangereuse pour le personnel sur site ou le personnel de passage et libre de tout stockage de produits inflammables. En effet, lors de la décharge d'explosion, des produits imbrûlés, des produits de com-

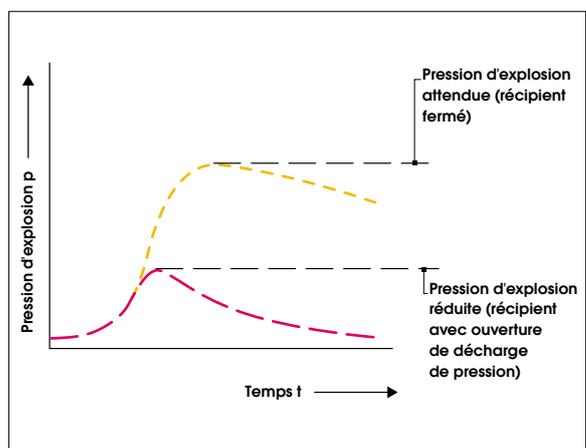


Figure 12 ● Déroulement d'une explosion de poussière avec et sans la mesure de protection « décharge de pression d'explosion »

bustion et la flamme de l'explosion se trouvent libérés, ce qui entraîne une propagation de la flamme et de l'onde de pression de l'explosion dans la zone de décharge en dehors de l'enceinte protégée, une zone de danger existe donc autour de l'événement puisque une flamme, parfois importante, peut être la cause d'incendies voire d'initiation d'explosions secondaires.

Lorsque l'appareil à protéger se trouve à l'intérieur d'un bâtiment, la décharge d'explosion devra se faire vers l'extérieur à l'air libre par l'intermédiaire d'une canalisation d'évacuation dans une direction où elle n'est pas dangereuse et sera, éventuellement, rendue inoffensive par un déflecteur convenable. L'installation sera implantée de telle sorte que la gaine d'évacuation soit rectiligne et la plus courte possible (de préférence de longueur inférieure à 3 mètres).

La perte de charge due à la gaine ainsi que l'explosion du mélange air/poussières dans la gaine conduisent à une augmentation de la pression réduite d'explosion. L'augmentation de celle-ci devra être compensée, soit par l'augmentation de la surface de décharge d'explosion, soit par l'augmentation de la pression de résistance de l'appareil.

La décharge de l'explosion provoque également des forces de réactions qui peuvent causer le renversement des appareils. Ces forces de réactions, une fois estimées, doivent être prises en compte pour la fixation des appareils au sol ou dans les structures.

Le fonctionnement des événements d'explosion doit être validé par des tests dans des conditions réelles d'explosion pour prendre en compte les caractéristiques suivantes :

- Pression de rupture prédéterminée : l'objectif de l'événement d'explosion étant de limiter la pression d'explosion à l'intérieur d'une enceinte à une valeur spécifique, il doit s'ouvrir à une pression bien définie.
- Temps de réponse : la pression d'explosion se développant très vite, le temps nécessaire pour arriver à une ouverture totale de l'événement doit être le plus faible possible.
- Pleine ouverture : l'ouverture des événements d'explosion doit être déterminée et contrôlée de façon à obtenir une ouverture totale à la valeur d'éclatement, sans réduire la surface de décharge.
- Fragmentation nulle : lors de son ouverture, l'événement d'explosion ne doit pas se fragmenter, les parties éjectées pouvant être dangereuses pour le personnel et les installations voisines.
- Compatibilité avec les systèmes : l'événement doit être adapté à un environnement corrosif, aux températures et pression de service, à une éventuelle usure mécanique...

On rencontre le plus fréquemment les types d'événements suivants :

- **Membranes d'explosion** : ces événements sont obturés par une pièce de rupture calibrée appelée membrane ou disque. Les pièces de rupture restent stables en fonctionnement normal et se déchirent dès qu'une surpression se produit (tarage prédéterminé des disques généralement pour une pression de 100 mbar). Lorsque l'on protège une enceinte par une membrane d'explosion, il faut toujours tenir compte du fait que cette protection n'évite pas l'incendie au sein de l'enceinte et il faudra contenir sa propagation en évitant particulièrement les possibilités d'explosions secondaires. L'effet dynamique sur le process n'est jamais à négliger, particulièrement lorsque l'on est obligé de prévoir une conduite de décharge. Il faut toujours tenir compte qu'une conduite de décharge doit avoir une largeur au moins légèrement supérieure au disque de rupture et une résistance suffisante.



Photo 1 ● Membranes d'explosion

- **Clapets de décharge d'explosion** : ce sont des dispositifs mécaniques se refermant automatiquement après une décharge d'explosion et tarés à une valeur d'ouverture souvent variable. Leur avantage est de réduire le risque d'incendie consécutif à la décharge d'explosion en empêchant une entrée d'air interpestive. La plupart du temps, ces dispositifs doivent être équipés de fonctions casse vide pour éviter que le vide créé par la décharge de l'explosion ne déforme ni détruise l'équipement. En outre, les clapets de décharge d'explosion permettent d'éviter les explosions secondaires à l'intérieur de l'équipement, mais pas à l'extérieur. Par leur conception, en raison de leur inertie propre, ils induisent une augmentation de la surpression maximale résiduelle dans l'équipement protégé. Cette diminution du coefficient de décharge peut être compensée par une pression d'activation



Photo 2 • Système de décharge d'explosion sans flamme.

souvent plus faible que pour une membrane d'explosion.

● **Systèmes de décharge d'explosion sans flamme** : ces dispositifs sont conçus pour décharger une explosion à l'intérieur d'un local même classé en zone à risque d'explosion 22. Le système de décharge d'explosion sans flamme est constitué d'un tube de coincement de flammes grillagé sur toute sa surface et surmonté d'un panneau d'explosion. Ce dispositif est prévu pour décharger la pression d'explosion tout en retenant les flammes et les poussières à l'intérieur de l'équipement. Cette obstruction à la décharge de l'explosion a cependant pour conséquence de fortement diminuer le coefficient de décharge du dispositif et il est nécessaire de surdimensionner la surface d'événement. De ce fait, ces dispositifs ne peuvent être proposés que sur des appareils de faible volume, résistant à une pression relativement élevée. Un périmètre de sécurité doit être mis en place autour de ces systèmes de décharge sans flammes et le volume de la pièce où l'explosion est déchargée doit être suffisant pour éviter une pres-



Photo 3 • Capteur dynamique.

surisation dommageable pour la zone de décharge. Les systèmes de décharge d'explosion sans flammes sont dimensionnés de la même façon que les événements d'explosion.



Photo 4 • Multicapteur dynamique d'explosion.

3. Appareils résistant à une pression d'explosion réduite par un système de suppression de l'explosion

Vu qu'une explosion est un phénomène très rapide, ce mode de protection a pour but de détecter une explosion dans une phase originelle et d'empêcher le développement d'une pression intolérable dommageable à l'équipement à protéger. Ce système, qui supprime les explosions et restreint l'effet des flammes au stade initial de l'explosion, est particulièrement adapté pour les équipements confinés ou semi confinés qui ne peuvent résister aux surpressions maximales d'explosion. Dès la détection de l'explosion, un produit d'extinction est propulsé dans l'enceinte protégée où il neutralise complètement la combustion.

L'onde de pression d'explosion est détectée par un capteur de pression dynamique qui déclenche l'ouverture des réservoirs renfermant un produit d'extinction (généralement de la poudre). Il est projeté en quelques millisecondes par la poussée d'un gaz propulseur (azote) et produit devant la flamme un nuage dense qui l'étouffe. Des dispositifs à eau surchauffée micronisée peuvent remplacer la poudre dans certaines applications.

Une suppression d'explosion se déroule en trois étapes :

● **La détection** : le type de détecteur à délai de réponse rapide (< 20 ms) est retenu en fonction des conditions propres au process et, surtout, de sa capacité à distinguer au plus tôt une réaction de combustion durant le fonctionnement normal de l'installation. Seuls les dis-

positifs de détection de pression ou infrarouge sont suffisamment rapides pour la détection. Les détecteurs de pression dynamique sont les plus utilisés. Les détecteurs de pression statique qui peuvent également être proposés entrent en action plus tardivement, sont sensibles aux variations de pression du procédé et surtout ne peuvent pas être utilisés si le procédé fonctionne dans des conditions de dépression.

● **Le déclenchement** : lorsque l'explosion est détectée, un signal est envoyé vers l'unité électronique de contrôle et de commande. Son rôle est de permettre la liaison entre le détecteur de pression et les réservoirs où se trouve l'agent d'extinction, et d'assurer le déclenchement des supresseurs ultra-rapides dans le laps de temps le plus court. Cette unité doit surveiller les circuits électroniques qui permettent au signal de détection d'être correctement transmis, fournir la puissance nécessaire pour générer l'ouverture des réservoirs, être auto-contrôlée et afficher tous les défauts de fonctionnement du système détection/extinction. Dans la plupart des cas, plusieurs détecteurs et réservoirs peuvent être contrôlés par un système centralisé. Certains dispositifs permettent un contrôle continu de l'état des supresseurs (pression, mise à feu, position d'armement) et des capteurs. Ils enregistrent tous les déclenchements et dysfonctionnements. L'historique est conservé dans une mémoire informatique.

● **L'extinction** : la projection de l'agent d'extinction contenu dans les réservoirs est la dernière phase de l'opération. Afin d'obtenir un temps de réponse minimum, les réservoirs sont maintenus sous pression par de l'azote. En conditions normales, les réservoirs sous pression sont isolés de l'appareil qu'ils protègent par un disque de rupture ou une vanne mécaniquement verrouillable (présentant l'avantage de pouvoir manipuler la bouteille sans la dépressuriser). Dès réception du signal en provenance de l'unité de contrôle, une cartouche pyrotechnique du type générateur de gaz fait instantanément éclater le disque de rupture ou provoque l'ouverture de la vanne. Certains dispositifs utilisant des détonateurs et explosifs (charges creuses) sont à éviter. L'agent extincteur est alors projeté des réservoirs pressurisés vers l'intérieur de l'enceinte à protéger par des buses de diffusion. Le produit extincteur peut être une poudre (bicarbonate de sodium...), de l'eau... ; son efficacité pour le type de poussière concernée doit être prouvée expérimentalement. La performance du système va dépendre de la vitesse de déclenchement, de la pression dans les réservoirs, du diamètre d'ouverture des réservoirs, du mode de diffusion de l'agent extincteur (buses), du choix de l'agent extincteur, de la quantité de produit propulsé.

L'utilisation d'une bouteille avec système d'ouverture par clapet, mécaniquement verrouillable, apporte une sécurité supplémentaire lors des opérations de maintenance. L'utilisation de disques de rupture interdit la manipulation des réservoirs sous pression, une dépressurisation longue et contraignante étant nécessaire avant toute manipulation.



Photo 5 ● Suppresseur d'explosion.

Ces installations de suppression d'explosion doivent conserver leur fonction en cas de défaut d'alimentation électrique durant une certaine période.

Les régimes de fonctionnement des extincteurs déclenchés varient, selon les constructeurs, par la valeur de la pression de déclenchement (de l'ordre de 0,03 à 0,2 bar), dont dépend la valeur maximale de la surpression à laquelle devra résister l'installation protégée (de l'ordre de 0,1 à 1 bar) sans déformation ou au moins sans déchirement.

Pour apporter la meilleure efficacité à un système de suppression, il faut prendre pleinement en considération les paramètres suivants :

- caractéristiques d'explosivité de la poussière combustible,
- caractéristiques complètes des équipements à protéger,
- compatibilité de l'agent d'extinction avec le produit et le process à protéger.

Ce système de protection présente l'avantage de supprimer l'explosion mais aussi l'incendie. Il va éviter que les produits brûlés et imbrûlés ne sortent à l'extérieur. De ce fait, cette solution peut être adoptée pour la protection contre les risques d'explosion dans les industries mettant en œuvre des produits dangereux (toxiques...). De plus, il réduit considérablement la possibilité de propagation de l'explosion dans les équipements interconnectés. Un équipement situé en zone de passage ou dans un atelier peut être protégé. L'équipement souffre peu et le redémarrage de l'installation peut s'effectuer avec un minimum de perte d'exploitation. Ce type de protection oblige à une maintenance préventive obligatoire.

4. Découplage technique

Lorsque des réservoirs ou des appareils à risque d'explosion de poussières sont reliés par des conduits ou des canalisations à une installation, il existe un danger de transmission de l'explosion de poussière à d'autres parties de l'installation. Au cours de cette transmission il se produit des effets de déplacement de turbulence et de compression susceptibles d'engendrer des pressions et des vitesses d'explosion respectivement supérieures à 10 bars et quelques centièmes de $m.s^{-1}$.

Pour empêcher de telles transmissions, il faut prévoir des dispositifs d'isolation de certaines parties d'installation en cas d'explosion, dont le rôle est de **découpler** techniquement l'installation lors d'une explosion.

Le découplage peut s'opérer suivant le domaine d'application par exemple à l'aide d'écluses rotatives, de vannes à fermeture ultra-rapide, de clapets d'obturation à fermeture rapide, de barrières d'agent extincteur ou de cheminées de découplage de pression. L'explosion peut ainsi être limitée à un secteur réduit de l'installation. Ces systèmes ont pour but principal d'isoler des parties de l'installation et doivent être associés aux dispositifs de protection des équipements principaux.

4.1. Engorgement sur un transporteur à vis

Un transporteur mécanique à vis est fréquemment utilisé par exemple à la sortie de broyeurs, tamis, malaxeurs, silos. Il est souhaitable que, dans ce système de transport, un dispositif d'isolement soit interposé entre deux enceintes, en l'occurrence une quantité compacte de matière pulvérulente empê-

chant la propagation d'une explosion. Cela peut être réalisé par un convoyeur à vis d'Archimède interrompu en son milieu.

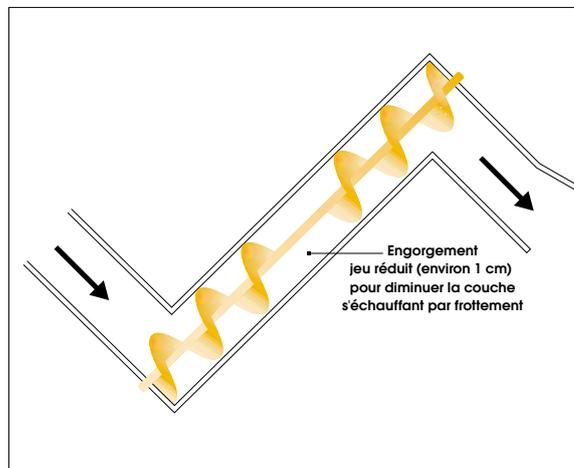


Figure 13 • Transporteur à vis.

4.2. Écluses rotatives

Le but de l'écluse rotative est avant tout de réguler l'évacuation des déchets. Elle se comporte comme une barrière mécanique à l'égard des explosions de poussières, si certaines caractéristiques de construction sont respectées. Si elle répond à des critères spécifiques en matière de largeur de fente ou de résistance mécanique maximales, elle peut très bien suffire pour contenir les flammes et la pression.

Une écluse rotative utilisée comme barrière d'explosion pourra être mise sur le marché uniquement après des essais d'explosion réalisés par un organisme notifié comme tout dispositif de protection vis-à-vis du risque explosion conformément à la réglementation relative aux atmosphères explosives. L'étanchéité aux sources d'allumage est efficace selon l'expérience lorsque deux pales sont engagées de chaque côté du corps de l'écluse, que ces pales sont en métal et que la fente entre l'enveloppe et le rotor est inférieure ou égale à 0,2 mm. Bien qu'il soit possible de calculer les exigences auxquelles une écluse rotative résistant aux explosions doit

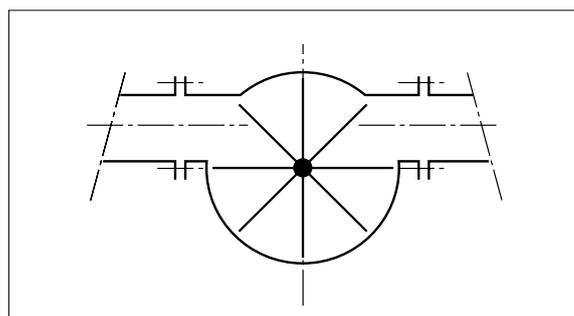


Figure 14 • Écluse rotative.

satisfaisant, il est obligatoire de tester des prototypes avec des explosions expérimentales et de les faire certifier. En cas d'explosion, l'écluse doit être immobilisée immédiatement par un détecteur de manière que les poussières enflammées ou incandescentes ne soient pas transportées et qu'elles ne causent pas un incendie ou une explosion derrière l'écluse.

4.3. Vannes d'obturation de type « Ventex »

Le but d'une vanne « Ventex », est d'agir comme barrière mécanique pour éviter la propagation d'une explosion à travers des conduites de raccordement.

La vanne « Ventex » est composée d'une boule d'obturation montée sur une tige rigide maintenue en position avec des ressorts. En cas d'explosion, l'onde de pression d'explosion qui précède le front de flamme pousse la boule contre un joint bloquant la vanne en position fermée, stoppant ainsi la progression de l'explosion.

L'utilisation des ressorts permet, d'une part, de maintenir la vanne ouverte pour laisser passer le flux et, d'autre part, de lui permettre de se fermer lorsqu'une pression est générée par une explosion.

L'intérêt de la vanne « Ventex » est la simplicité de mise en œuvre, une maintenance facilitée et l'absence de dispositifs de pilotage et d'apport d'énergie extérieur pour déclencher la vanne.

Toutefois, il convient de respecter un certain nombre de limites d'utilisation que sont les concentrations maximales de poussières dans les conduites, le Kst des poussières considérées et les distances d'implantation à la source d'ignition. Pour ce dernier point, une distance trop courte risque de ne pas permettre à la vanne de se fermer du fait d'une pression d'explosion trop faible. Une distance trop longue peut induire des pressions d'explosion entraînant la destruction de la vanne.

Une fois la vanne fermée par une explosion, cette dernière se trouve verrouillée dans cette position pour empêcher toute explosion secondaire de passer. Un déverrouillage manuel sera alors nécessaire pour réarmer le dispositif. La vanne doit être inspectée après explosion.

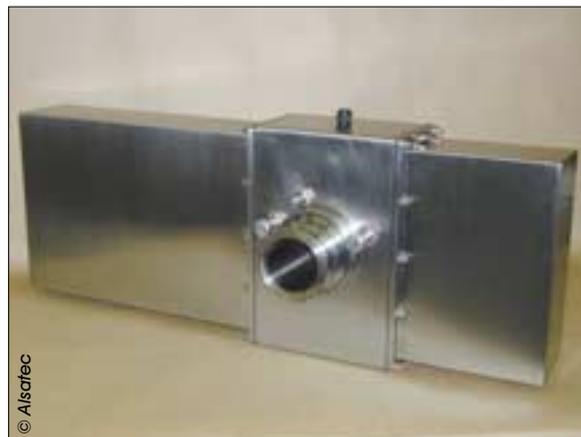
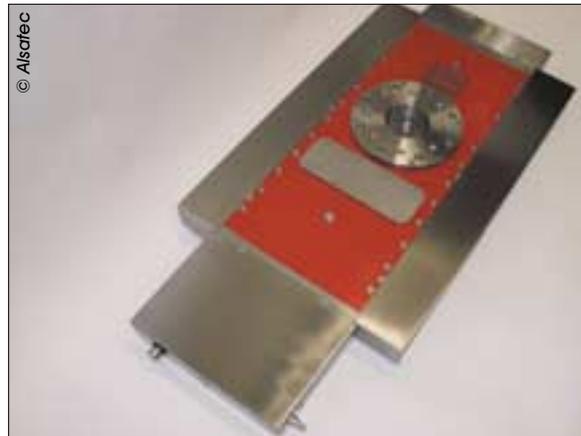
Comme tout dispositif de protection vis-à-vis du risque explosion, la vanne « Ventex » a dû subir des essais réalisés par un organisme notifié pour pouvoir être certifié conformément à la réglementation relative aux atmosphères explosives. D'autres dispositifs fonctionnant sur le même principe peuvent exister, mais ils auront dû subir les mêmes tests pour pouvoir être mis sur le marché.



Photo 6 • Vanne « Ventex ».

4.4. Vannes guillotines à fermeture ultra-rapide

L'utilisation d'obturateurs à fermeture ultra-rapide pour l'isolement automatique de parties d'installation présente l'avantage que l'élément d'isolement de la vanne se trouve à l'extérieur de la conduite permettant un passage total dans la conduite. L'intérieur de cette dernière est libre et il peut être exécuté sans niches et sans volumes morts de sorte que la poussière ne peut s'y



Photos 7 et 8 • Vannes guillotines.

déposer en conformité avec les réglementations en termes d'hygiène pour les applications pharmaceutiques et agroalimentaires.

Le corps de la vanne peut être en acier, aluminium, inox ou tout autre matériau adéquat alors que le couteau doit être construit de manière à résister à une onde de pression d'explosion d'au moins 15 bars. Compte tenu des inerties extrêmes liées aux vitesses de déclenchement, il faut apporter une attention particulière aux types d'alliages utilisés. Certaines vannes seront endommagées lors d'une mise à feu en mode ultra-rapide et nécessiteront une intervention pour remplacer les pièces. D'autres pourront être déclenchées sans subir de dommage. Les vitesses de déclenchement doivent être de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes.

Les guillotines étant utilisées comme dispositif de protection explosion, elles devront avoir été certifiées par un organisme notifié. Les conditions du procédé et de l'établissement de l'explosion devront être reproduites lors des essais.

Les vannes à fermeture ultra-rapide sont pilotées.

Il convient de respecter les distances d'implantation à la source d'ignition préconisées par le fabricant et définies par les tests réalisés par les organismes notifiés. Une distance trop courte risque de ne pas permettre à la vanne de se fermer à temps. Une distance trop longue risque d'induire des pressions d'explosion pouvant détruire la vanne.

Les modes de déclenchements sont multiples. On pourra citer les dispositifs fonctionnant avec des générateurs de gaz (dispositif utilisé pour déclencher les prétenseurs de ceintures des véhicules automobiles en cas d'accident), des bouteilles d'air ou d'azote pressurisées déclenchées par un détonateur ou générateur de gaz ou des vannes déclenchées par une vanne solénoïde pilotant une capacité d'air comprimé à 6 bars alimentée par le réseau de l'usine. Dans ce dernier cas, le réarmement de la vanne après mise à feu est instantané, limitant ainsi les arrêts de production.

Il est à noter que l'utilisation de détonateurs est réglementée et que cela peut poser un certain nombre de problèmes sur un site industriel. Les détonateurs doivent être changés périodiquement et cela conformément à la notice d'instructions du fabricant.

Les vannes guillotines doivent être équipées de capteurs de position pour connaître à tout moment la position du couteau (ouvert/fermé ou position inter-

médiaire : alarme). On peut équiper également les vannes avec un dispositif à air comprimé pour l'ouverture/fermeture de la vanne en vitesse lente qui permettra de les utiliser comme des dispositifs de sectionnement sur le process.

La détection de l'explosion peut être réalisée soit par des détecteurs de pression soit par des détecteurs à infrarouge sensibles à la lumière ou à la flamme. L'application elle-même éclairera sur le choix.

Issu de la détection, un signal, indiquant qu'une explosion s'est produite, est transmis à une unité de contrôle électronique qui va assurer le déclenchement de l'obturateur à fermeture ultra-rapide. La fermeture quasi instantanée représente une barrière physique qui empêche la propagation de l'explosion hors de la zone de confinement.

Une vanne guillotine qui a subi une explosion devra être inspectée. Les vannes guillotines qui ne nécessitent pas d'entretien après mise à feu ne nécessiteront pas de contrôle en cas de déclenchement intempestif (sans qu'une explosion se soit réellement produite).

4.5. Barrière d'agent extincteur (extincteurs déclenchés) (photos 9 et 10)

Ce mode de protection permet d'éviter la propagation des flammes d'une explosion à travers les tuyauteries de raccordement. Il est souvent appelé « barrière chimique » parce que l'agent extincteur est la plupart du temps une poudre du type bicarbonate de sodium. On peut également trouver des dispositifs fonctionnant avec de l'eau surchauffée micronisée. Le principe



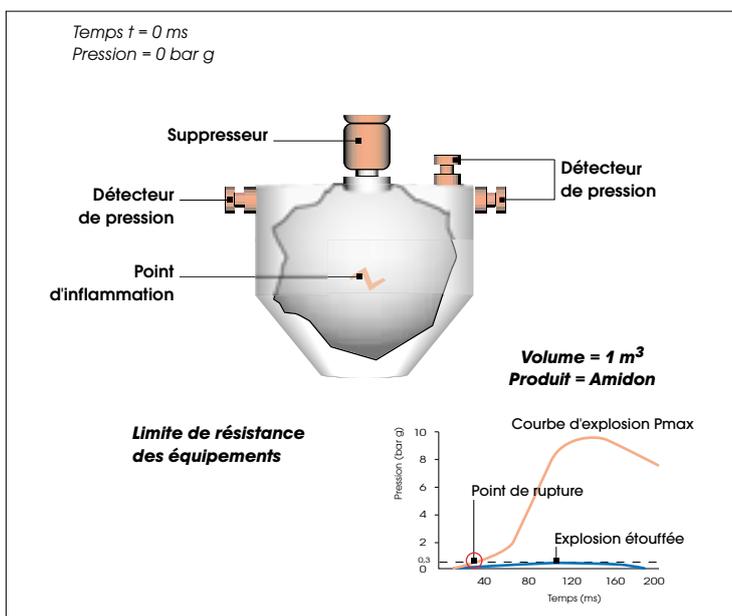
Photo 9 • Extincteurs déclenchés.

consiste à envoyer un agent extincteur dans une conduite et cela avant l'arrivée de l'explosion. Lorsque l'explosion arrive dans la zone inertée par l'agent extincteur, celle-ci s'arrête. De plus, les gaz chauds de combustion sont refroidis au contact de l'agent extincteur. La pression chute alors rapidement et l'explosion s'interrompt (cf. figures 15a à 15e).

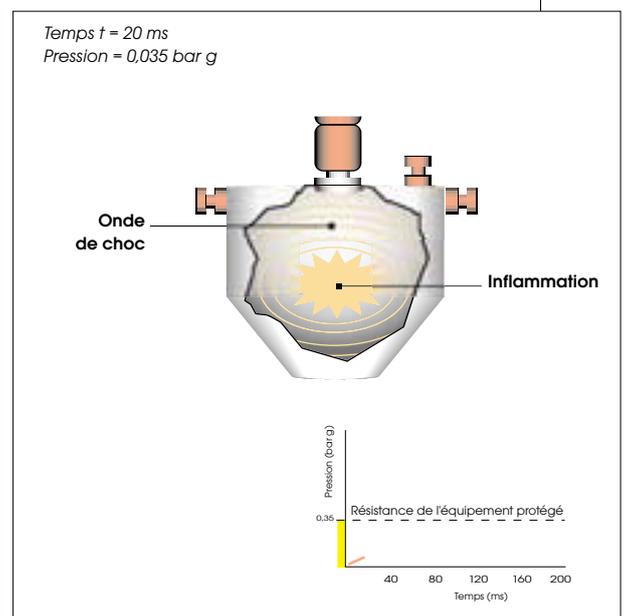
Ces dispositifs sont généralement utilisés lorsque le taux d'empoussièrément est élevé ou lorsque les conduites sont de grand diamètre (solution économiquement plus intéressante que les vannes guillotines dans ce

cas). On propose également cette solution quand un système de suppression d'explosion a été préconisé. Une barrière d'agent extincteur est composée d'un détecteur, d'une unité de commande, d'une bouteille d'agent extincteur, de son système de déclenchement et d'une buse de diffusion.

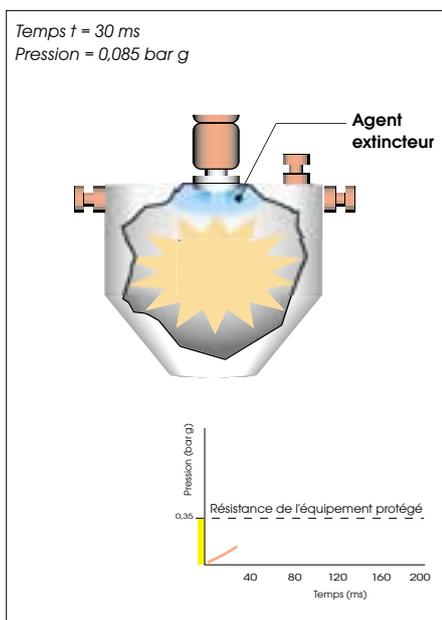
L'explosion est révélée par un détecteur. Un signal est envoyé à une armoire de commande qui pilote le déclenchement des bouteilles. La vitesse de réaction doit être très brève (de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes). Pour ce faire, on peut trouver, comme



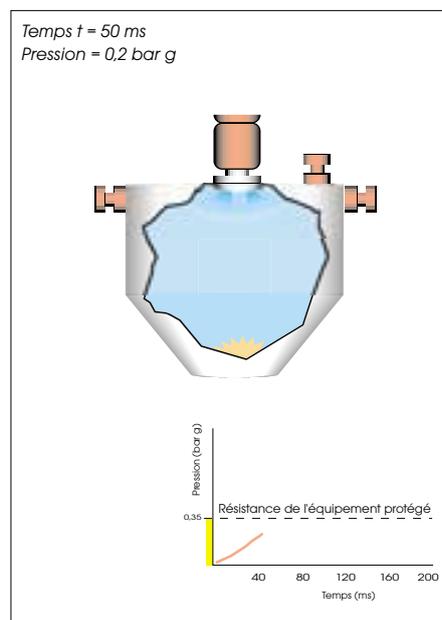
Figures 15a • Point d'inflammation, début de l'explosion.



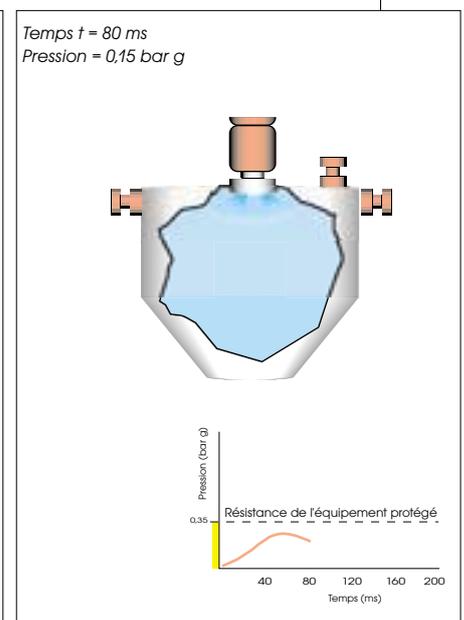
Figures 15b • Détection du front de pression (mode dynamique $\frac{dp}{dt}$).



Figures 15c • Activation et début de la suppression d'explosion.



Figures 15d • Développement de la suppression.



Figures 15e • Suppression achevée, explosion éteinte.



Photo 10 ● Visualisation partielle d'un système de protection. Suppression d'explosion sur tour d'atomisation et filtre avec découplage de la gaine de liaison.

pour les supprimeurs, des bouteilles mécaniquement verrouillables ou équipées d'un disque de rupture déclenchés par un générateur de gaz (bouteilles pressurisées à l'azote). D'autres systèmes, utilisant un détecteur et une charge creuse (au plomb), peuvent encore être proposés. Enfin, certains dispositifs utilisent le générateur de gaz pour pressuriser et déclencher la bouteille.

Entre l'emplacement du détecteur et celui des barrières une distance de 1 à 5 m, suivant la vitesse de propagation de l'explosion, est nécessaire afin que la barrière soit déclenchée avant l'arrivée du front de flammes.

La quantité de produit d'extinction dépend du type de combustible et de la dimension des conduites à protéger ainsi que de la vitesse d'explosion attendue à l'emplacement des extincteurs.

À l'endroit de l'emplacement de la bouteille de barrage, la conduite devra être renforcée afin de supporter la décharge de bouteilles fortement pressurisées.

La neutralisation du front de flamme par l'agent de suppression est réalisée par :

- absorption de l'énergie calorifique produite par la flamme, ce qui abaisse la température sous le seuil d'auto-ignition,

- inhibition de la réaction de combustion par neutralisation des particules imbrûlées,
- création d'une concentration telle que la combustion ne peut plus réapparaître.

Tous ces points contribuent à l'efficacité du système. Suffisamment de produit doit être injecté dans un laps de temps assez court pour isoler l'explosion.

4.6. Cheminées de dégagement

Une cheminée de dégagement se compose d'une pièce de transition permettant d'adapter la cheminée à la conduite et d'un disque de rupture ou un clapet articulé permettant la décharge d'explosion à l'atmosphère. La cheminée de découplage opère un changement à 180° du flux de produit alors que l'explosion sera dirigée vers l'évent.

La pression d'ouverture de l'évent ne doit jamais dépasser 100 mbars.

Cette pression d'ouverture sera déterminée par le fabricant du dispositif en fonction de l'emplacement qui sera retenu pour la cheminée et suivant les essais réalisés dans le cadre de la réglementation relative aux atmosphères explosives.

En aucun cas, une cheminée de découplage ne peut être considérée comme un système d'isolation d'explosion, des flammes et des étincelles pouvant continuer à se propager dans la conduite et réinitier une explosion. La fonction première d'une cheminée de découplage est de réduire la pression d'explosion avant que celle-ci ne pénètre dans l'équipement à protéger. On n'installe pas une cheminée de découplage pour empêcher une explosion de sortir d'un filtre mais pour réduire la pression d'une explosion avant que celle-ci ne pénètre dans le filtre. Lorsqu'un conduit est suffisamment long, l'utilisation de cheminées successives sur le parcours de l'explosion peut s'avérer nécessaire.

Si un panneau d'explosion est utilisé, celui-ci doit être garanti sans fragmentation. Si un clapet est utilisé, celui-ci doit pouvoir se refermer tout seul sous l'effet de son propre poids, une fois l'explosion déchargée et sans subir aucun dommage. L'utilisation de couvercles projetés, même retenus par des chaînes ou une cage, est à proscrire. Le risque de blesser des personnes par la projection de pièces est trop important. D'autre part, les parties mobiles devront être allégées au maximum afin de limiter les inerties lors d'un déclenchement de clapet.

Comme tout système de protection vis-à-vis du risque explosion, ces dispositifs doivent être certifiés comme fonction de découplage d'explosion pour avoir le droit d'être commercialisés. L'utilisation d'un disque de rupture certifié n'est pas suffisant pour permettre à une cheminée de découplage d'être certifiée. C'est la fonction complète qui doit être évaluée et testée par un organisme notifié.

5. Protection par éloignement ou séparation (mesures portant sur la construction des bâtiments)

Les répercussions que peuvent avoir sur les bâtiments les explosions de poussières peuvent être atténuées par des mesures adéquates portant sur l'implantation, la construction et la conception de ceux-ci.

Les considérations des chapitres précédents peuvent aider à évaluer les distances qu'il est souhaitable de ménager entre une installation dangereuse et d'autres constructions. Certains arrêtés types issus de la réglementation des installations classées du ministère chargé de l'environnement contiennent des prescriptions relatives aux distances à respecter entre des

zones à risque d'explosion et des constructions de diverses natures.

Pour la protection des personnes comme pour celle des équipements de travail 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. Les bâtiments susceptibles d'être soumis aux effets de l'explosion doivent être d'une conception permettant de résister aux effets de pression pour ne pas se disloquer et s'effondrer.

Dans bien des cas, les éclats peuvent être arrêtés par des écrans de tissages métalliques convenables, proposés par certains constructeurs.

Si des portes doivent être utilisées pour compartimenter une zone qui contient un risque d'explosion, elles doivent être conçues pour résister aux explosions. 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 spécial 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 par la construction des bâtiments afin que l'explosion reste contenue à une partie de l'installation et que les dommages soient limités, on peut appliquer, entre autres, les mesures suivantes :

- distance d'éloignement appropriée entre bureaux, ateliers et zones de travail,
- séparation, par exemple par des cloisons, des parties d'installations émettant des nuages de poussières tels les postes d'ensachage ou les jetées de déversement, de celles qui n'en émettent pas,
- séparation des parties d'installation à risque (silos, filtres, cyclones, etc.) de celles qui présentent moins de risque,
- séparation, autant que possible, des locaux poussiéreux des autres locaux,
- 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 (cf. § 4.5.),
- remplacement des surfaces rugueuses par des surfaces lisses et réduction des zones de rétention afin d'empêcher la formation de dépôts de poussière,
- 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 et/ou la conséquence d'explosions.

6. Mesures organisationnelles

En complément des mesures techniques de prévention, des mesures organisationnelles s'imposent pour diminuer les risques d'explosion et pour garantir l'efficacité des mesures techniques adoptées.

Les principales mesures organisationnelles présentant un intérêt particulier dans le cadre de la pratique industrielle seront les suivantes :

6.1. Signalisation et signalétique des zones de danger

Les zones de danger doivent être signalées (cf. chapitre II, § 3) et, le cas échéant, leur accès interdit durant les heures d'exploitation. Des zones provisoires peuvent être délimitées (panneaux, barrières, chaînes...) en cas de modifications temporaires des installations.

6.2. Nettoyage des installations et de leurs alentours

Le nettoyage des locaux, installations et leurs alentours (cf. chapitre III, § 1.3) sera fréquent et réalisé avec un aspirateur adapté. Ils doivent être débarrassés de tout dépôt de poussière recouvrant le sol, les parois, les chemins de câbles, les gaines, les conduits, les appareils et équipements. On nettoiera donc non seulement à intervalles réguliers mais spécialement pendant et après chaque opération entraînant une importante formation de poussière.

6.3. Procédures et consignes

Les procédures et consignes de travail doivent faire l'objet de documents élaborés à partir de l'analyse et de l'évaluation a priori des risques. Elles concernent notamment :

- l'interdiction de fumer,
- l'établissement de permis de feu systématique pour les travaux par points chauds,
- les consignes et plans d'évacuation (cf. la brochure INRS ED 929, *Consignes de sécurité incendie. Éléments de rédaction et de mise en œuvre dans un établissement*),

- la procédure d'accès du personnel à l'intérieur des installations,
- la procédure à suivre en cas de dysfonctionnement ou d'incident,
- les procédures concernant la conduite, la maintenance et l'entretien des équipements de travail,
- l'établissement des plans de prévention régissant les interventions des entreprises extérieures,
- les programmes de nettoyage des différents locaux et le plan de nettoyage pour que toutes les surfaces empoussiérées soient effectivement nettoyées.

EN CAS DE MODIFICATIONS TEMPORAIRES DES INSTALLATIONS

Suivant l'ampleur, la durée et les risques potentiels 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 rendre non dangereuses les zones d'intervention, par exemple lors d'un arrêt programmé pour travaux d'entretien.

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.

6.4. Vérifications

Les vérifications techniques périodiques doivent déterminer l'état des éléments des installations et des dispositifs dont la détérioration pourrait entraîner un danger. Elles établiront si leur état est jugé satisfaisant ou si un échange est nécessaire dans les meilleurs délais.

Les vérifications périodiques (électricité, matériel d'incendie...) permettent un constat qui doit obligatoirement être complété par la remise en état des anomalies constatées.

Une attention toute particulière portera sur les contrôles suivants (effectués par une personne compétente de l'entreprise ou par un organisme spécialisé) :

- vérification annuelle, par thermographie, de l'ensemble des connexions de puissance afin de déceler tout échauffement anormal,
- contrôle de l'équipotentialité intégré aux vérifications périodiques des installations électriques,

- contrôle régulier de l'état d'usure des systèmes de manutention,
- vérification périodique des dispositifs de détection, d'extinction et de désenfumage.

Les opérations d'entretien et de vérification à effectuer doivent faire l'objet d'un planning rigoureusement suivi.

6.5. Formation et information du personnel

Les travailleurs, y compris ceux des entreprises extérieures, doivent être avertis des risques et recevoir une formation sur le fonctionnement des installations. En

particulier, un accueil aux postes de travail pour le personnel temporaire sera mis en place.

Il convient d'organiser des séances de formation à tous les niveaux, en insistant sur les risques d'explosion liés aux poussières et sur les moyens mis en œuvre pour les éviter.

La formation peut être complétée par des exercices pratiques, tels que des exercices combinés avec les sapeurs-pompiers.

Les exercices d'évacuation auront lieu périodiquement.

La formation et l'information du personnel constituent un maillon primordial de la chaîne de la sécurité.

Conclusion

Conclusion

Le risque d'explosion de poussières dans l'industrie est plus que jamais d'actualité ainsi qu'en témoigne la mise en place de nouveaux textes réglementaires, la plupart issus de nouvelles directives européennes.

Le risque explosion engendré par la mise en œuvre de matières pulvérulentes est désormais bien appréhendé et les connaissances dans ce domaine continuent à s'étoffer.

Il convient donc de favoriser au mieux dans ce domaine le développement technologique des moyens de prévention et de protection ou de rechercher des technologies nouvelles exemptes de risques. Les industriels ne seront toutefois pleinement convaincus et n'engageront d'action efficace que dans la mesure où des techniques économiquement réalistes sont disponibles.

La prévention des risques industriels sera d'autant plus facile qu'elle aura été étudiée au moment de la

conception de l'installation. C'est là tout l'intérêt présenté par la réflexion en amont et de l'intégration de la sécurité dans un projet nouveau.

L'ensemble de toutes les dispositions à mettre en place pour lutter contre le risque d'explosion va devenir de plus en plus important avec l'accroissement des capacités industrielles, l'évolution technologique et aussi le vieillissement des installations existantes.

Enfin, on peut insister sur le fait que les mesures de prévention ne trouveront leur pleine signification que dans la mesure où le personnel est bien informé et formé, ce qui lui permet de comprendre et d'appliquer correctement les instructions et consignes et de procéder à un entretien régulier des installations.

Tous les préventeurs doivent donc demeurer vigilants. Si le présent document a contribué à une telle prise de conscience, il aura atteint son objectif.

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.

■ 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.

■ 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 : article R. 231-51 relatif au classement des substances et préparations dangereuses.

■ Arrêté du 29 mars 2004 relatif à la prévention des risques présentés par les silos de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit

organique dégageant des poussières inflammables, ministère de l'Environnement.

■ Arrêté ADR du 5 décembre 1996, modifié, relatif au transport routier, ferroviaire et par voies de navigation intérieures ; ministère des Transports.

■ Arrêté du 2 juillet 1997 relatif au règlement sur la sécurité des navires ; ministère des Transports.

■ Instructions techniques de l'OACI pour la sécurité du transport aérien, éditions 1997-1998.

■ 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.

■ Arrêté-type, rubrique n° 2160, relatif aux silos et installations de stockage de céréales, grains, produits alimentaires ou tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables, ministère de l'Environnement.

■ Arrêté du 31 mars 1980 concernant les installations électriques des installations classées et susceptibles de présenter des risques d'explosion.

■ Arrêté du 22 octobre 2004 relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées.

■ 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.

■ Recommandation de la CNAM R 234 : *Manutention pneumatique de poussières inflammables. Risques d'incendie et d'explosion.*

■ Recommandation de la CNAM R 271 : *Installations de stockage en vrac de produits pulvérulents ou granulaires (autres que silos).*

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.*

■ NF EN 1755 (2000) : *Sécurité des chariots de manutention. Fonctionnement en atmosphères explosibles. Utilisation dans des atmosphères inflammables dues à la présence de gaz, de vapeurs, brouillards ou poussières inflammables.*

■ NF EN 1834-3 (2000) : *Moteurs alternatifs à combustion interne. Prescriptions de sécurité pour la conception et la construction des moteurs fonctionnant en atmosphère explosible - Partie 3 : moteurs du groupe II utilisés dans des atmosphères de poussières inflammables.*

■ 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 explosibles - Partie 1 : prescriptions et méthode de base.*

■ NF EN 13463-2 (2005) : *Appareils non électriques destinés*

à être utilisés en atmosphères explosibles - Partie 2 : protection par enveloppe à circulation limitée « fr ».

■ NF EN 13463-3 (2005) : *Appareils non électriques destinés à être utilisés en atmosphères explosibles - Partie 3 : protection par enveloppe antidéflagrante « d ».*

■ NF EN 13463-5 (2003) : *Appareils non électriques destinés à être utilisés en atmosphères explosibles - Partie 5 : protection par sécurité de construction « c ».*

■ NF EN 13463-6 (2005) : *Appareils non électriques destinés à être utilisés en atmosphères explosibles - Partie 6 : contrôle de la source d'inflammation « b ».*

■ NF EN 13463-8 (2003) : *Appareils non électriques destinés à être utilisés en atmosphères explosibles - Partie 8 : protection par immersion dans un liquide « k ».*

■ NF EN 13821 (2002) : *Atmosphères explosibles. Prévention et protection contre l'explosion - Détermination de l'énergie minimum d'inflammation des mélanges poussière/air.*

■ NF EN 13980 (2002) : *Atmosphères explosibles. Application des systèmes qualité.*

■ NF EN 14034-1 (2005) : *Détermination des caractéristiques des nuages de poussières - Partie 1 : détermination de la pression maximale d'explosion P_{max} des nuages de poussières.*

■ NF EN 14034-4 (2005) : *Détermination des caractéristiques des nuages de poussières - Partie 4 : Détermination de la concentration limite en oxygène CLO des nuages de poussières.*

■ NF C 15-100 (2002, mise à jour juin 2005) : *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 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 (1999) : *Matériel électrique pour atmosphères explosives. Mode de protection type « n ».*
- NF EN 50104 (2002) : *Appareils électriques de détection et de mesure d'oxygène. Règles de performance et méthodes d'essais.*
- NF EN 50281-1-1 (1998) : *Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles - Partie 1-1 : matériels électriques protégés par enveloppes. Construction et essais.*
- NF EN 50281-1-2 (1998) : *Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles - Partie 1-2 : matériels électriques protégés par enveloppe. Sélection, installation et entretien.*
- NF EN 50281-2-1 (1998) : *Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles - Partie 2-1 : méthodes d'essai. Méthodes de détermination de la température minimale d'inflammation de la poussière.*
- 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 E 74-400 (1998) : *Outils à main revêtus pour travail en atmosphères explosibles.*
- *Le point des connaissances sur explosion et lieu de travail.* INRS, ED 5001, 2003.
- *Guide d'intervention. Face au risque chimique.* Fédération nationale des sapeurs pompiers français, Paris, 1992.
- *Les risques professionnels. Connaissance et prévention.* Nathan, 1994.
- *Code NFPA 68. Guide for venting of deflagrations.* NFPA, Quincy, 1998.
- *L'électricité statique.* INRS, ED 874, 2003.
- *Aération et assainissement des lieux de travail. Aide-mémoire juridique.* INRS, TJ 5.
- *Protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques.* INRS, ED 723, 2003.
- *Consignes de sécurité incendie. Éléments de rédaction et de mise en œuvre dans un établissement.* INRS, ED 929, 2004.
- B. Giovannini, *Prévention des risques d'explosion de poussières dans les PME/PMI. Aide à la mise en œuvre de la nouvelle réglementation relative aux atmosphères explosives.* Mémoire de prévention. CRAM Rhône-Alpes. Lyon. 2004.
- *Cahier des charges pour la prise en compte du risque d'explosion dans la conception des systèmes d'aspiration de poussières de bois.* SP 1126. CRAM Rhône-Alpes. Lyon. 2004.
- *Gas explosions.* Comité international pour la prévention des risques professionnels dans l'industrie chimique de l'AISS, Heidelberg, 2000.
- J.-P. Pineau, *Comprendre l'explosion.* FAR n° 320. 1996.
- L. Médard, *Les explosifs occasionnels.* 2^e éd. Technique et documentation. Paris. 1987.
- *Les installations électriques en atmosphères explosives. Guide d'études, de réalisation et de maintenance.* Union des industries chimiques. Paris. 1996.
- *Les installations et équipements électriques dans les zones à risque d'explosion.* CRAM Rhône-Alpes. Publication CNAMTS. Lyon. 1986.

OUVRAGES

- *Caractéristiques d'explosivité de poussières industrielles. Détermination expérimentale sur six échantillons représentatifs.* INRS, ND 2070, 1998.
- *Règles pour la protection des machines et des appareils contre les explosions de poussières. Mesures préventives et constructives.* AISS, groupe de travail 6, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, Mannheim, 1987.

- F.T. Bodurtha, *Industrial explosion prevention and protection*. McGraw-Hill Book Company. New York. 1980.
- W. Bartknecht, *Explosions de gaz et de poussières, moyens de les combattre*. Traduction INRS 24 A 77, 1974.
- *Explosionen Ablauf und Schutzmassnahmen*. W. Bartknecht Springer Verlag. Berlin. 1980.
- J. Calzia, *Les substances explosives et leurs nuisances*. Dunod. Paris. 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 »*. Sicure 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 et D. Simpson, *Guide lines for estimating damage explosion. Loss prevention*. Vol. 2. p. 91. 1968.
- F.P. Lees, *Loss prevention in the process industries*. Butterworths. Londres.
- Documentation **Chubb Sécurité**. Le Blanc-Mesnil. 2004.
- Documentation **Stuvex**. Les Ullis. 2001.
- Documentation **Alsattec**. Mulhouse. 2004.
- Documentation **Fike France**. Cergy-Pontoise. 2001.
- Documentation **RICO**. Herisau - Suisse. 2005.
- Documentation **Atex**. Hamm - Allemagne. 2005.
- Documentation **THORWESTEN**. Beckum - Allemagne. 2005.
- Documentation **REMBE**. Allemagne. 2005.

Pour commander les films (en prêt), les brochures et les affiches de l'INRS, adressez-vous au service prévention de votre CRAM ou CGSS.

Services prévention des CRAM

ALSACE-MOSELLE

(67 Bas-Rhin)
14 rue Adolphe-Seyboth
BP 10392
67010 Strasbourg cedex
tél. 03 88 14 33 00
fax 03 88 23 54 13
www.cram-alsace-moselle.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.cram-alsace-moselle.fr

(68 Haut-Rhin)
11 avenue De-Lattre-de-Tassigny
BP 70488
68018 Colmar cedex
tél. 03 89 21 62 20
fax 03 89 21 62 21
www.cram-alsace-moselle.fr

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 00
fax 05 56 39 55 93
documentation.prevention@cramaquitaine.fr

AUVERGNE

(03 Allier, 15 Cantal, 43 Haute-Loire,
63 Puy-de-Dôme)
48-50 boulevard Lafayette
63058 Clermont-Ferrand cedex 1
tél. 04 73 42 70 22
fax 04 73 42 70 15
preven.cram@wanadoo.fr

BOURGOGNE et FRANCHE-COMTÉ

(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 22
fax 03 80 70 51 73
prevention@cram-bfc.fr

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
www.cram-bretagne.fr

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 30
prev@cram-centre.fr

CENTRE-OUEST

(16 Charente, 17 Charente-Maritime,
19 Corrèze, 23 Creuse, 79 Deux-Sèvres,
86 Vienne, 87 Haute-Vienne)
4 rue de la Reynie
87048 Limoges cedex
tél. 05 55 45 39 04
fax 05 55 79 00 64
doc.tapr@cram-centreouest.fr

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

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@cram-lr.fr

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
tél. 05 62 14 29 30
fax 05 62 14 26 92
doc.prev@cram-mp.fr

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
service.prevention@cram-nordest.fr

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 63 40
www.cram-nordpicardie.fr

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 21
fax 02 35 03 58 29
catherine.lefebvre@cram-normandie.fr
dominique.morice@cram-normandie.fr

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. 0821 100 110
fax 02 51 82 31 62
prevention@cram-pl.fr

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@cram.ra

SUD-EST

(04 Alpes-de-Haute-Provence,
05 Hautes-Alpes, 06 Alpes-Maritimes,
13 Bouches-du-Rhône, 2A Corse Sud,
2B Haute-Corse, 83 Var, 84 Vaucluse)
35 rue Gerge
13386 Marseille cedex 5
tél. 04 91 85 85 36
fax 04 91 85 75 66
documentation.prevention@cram-sudest.fr

Services prévention des 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

GUYANE

Espace Turenne Radamonthe
Route de Raban, BP 7015
97307 Cayenne cedex
tél. 05 94 29 83 04
fax 05 94 29 83 01

LA RÉUNION

4 boulevard Doret
97405 Saint-Denis cedex
tél. 02 62 90 47 00
fax 02 62 90 47 01
prevention@cgss-reunion.fr

MARTINIQUE

Quartier Place-d'Armes
97210 Le Lamentin cedex 2
tél. 05 96 66 51 31
05 96 66 51 32
fax 05 96 51 81 54
prevention@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 poussières combustibles 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 poussières combustibles des produits concernés.

Par ailleurs, des éléments sont fournis pour garantir l'efficacité des mesures techniques de prévention adaptées. En complément de celles-ci, des mesures d'organisation s'imposent pour diminuer les risques d'explosion. 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 d'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
30, rue Olivier-Noyer 75680 Paris cedex 14 • Tél. 01 40 44 30 00
Fax 01 40 44 30 99 • Internet : www.inrs.fr • e-mail : info@inrs.fr

Édition INRS ED 944

1^{re} édition • octobre 2006 • 5 000 ex. • ISBN 2-7389-1386-5

