Mai 2008
Révision intermédiaire avril 2017
Page 1 sur 48
Traduction février 2020

PREVENTION ET REDUCTION DES RISQUES D'INCENDIE ET D'EXPLOSION DE POUSSIERES COMBUSTIBLES

Table des matières

Page

1.0 OBJET DE LA PRESENTE FICHE TECHNIQUE 3
1.1 Modifications 3
2.0 RECOMMANDATIONS DE PREVENTION DES SINISTRES 3
2.1 Généralités 3
2.2 Risques d'explosion dans les locaux/bâtiments 5
2.2.1 Construction et emplacement 5
2.2.2 Activité 7
2.2.3 Protection 7
2.2.4 Exploitation et maintenance 9
2.3 Risques d'explosion liés aux équipements 10
2.3.1 Généralités 10
2.3.2 Elimination des risques d'explosion 10
2.3.3 Réduction des risques d'explosion 11
2.3.4 Contrôle des sources d'ignition 17
2.4 Cyclones et collecteurs de poussière 19
2.4.1 Construction et emplacement 19
2.4.2 Protection (3.1.21) 19
2.4.3 Contrôle des sources d'ignition 20
2.4.4 Collecteurs de poussière ouverts (3.1.24) 20
2.5 Gaines de raccordement (3.1.25) 21
2.5.1 Activité 21
2.5.2 Protection 21
2.6 Silos (3.1.26) 22
2.6.1 Protection 22
2.6.2 Equipements et procédés 23
2.7 Elévateurs à godets (3.1.27) 23
2.7.1 Construction et emplacement 23
2.7.2 Protection 23
2.7.3 Contrôle des sources d'ignition 24
2.8 Séchoirs par atomisation 25
2.8.1 Protection 25
2.9 Manutention de grains bruts en vrac 25
2.9.1 Equipements et procédés 25
2.10 Fabrication additive (impression 3D) (3.1.29) 25
2.11 Risques d'incendie de poussière 26
3.0 RECOMMANDATIONS 27
3.1 Commentaires et assistance technique 27
3.1.1 Y a-t-il un problème de tenue des locaux ? (2.2.4.2) 27
3.1.2 Déplacement des risques d'explosion à l'extérieur (2.3.1.1) 27
3.1.3 Inertage (flegmatisation) (2.3.2.3) 28
3.1.4 Calculs des effets d'explosion de FM Global - DustCalc (2.3.3.1) 28
3.1.5 Systèmes d'évent avec dispositif arrête-flamme (2.3.3.1.2) 29
3.1.6 Robustesse des équipements (2.3.3.1.3) 30
3.1.7 Effets de la masse de l'évent d'explosion (inertie) (2.3.3.1.6) 30
3.1.8 Effet des gaines d'évents d'explosion (2.3.3.1.7) 31
3.1.9 Refermeture des évents d'explosion (2.2.3.4 et 2.3.3.1.9) 32

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés. Ce document ne peut en aucun cas être reproduit, conservé dans un système de stockage, ni transmis, en tout ou en partie, sous quelque forme que ce soit et par quelque moyen que ce soit, y compris par le biais de photocopies, d'enregistrements ou de toute autre méthode électronique ou mécanique, sans l'autorisation écrite de Factory Mutual Insurance Company. Mentions légales : Les fiches techniques (ou autre type de document) sont rédigées en anglais, puis traduites en français. FM Global ne fournit aucune garantie quant à l'exactitude et à l'exhaustivité de la présente traduction. En cas de contradiction, de divergence ou d'ambiguïté entre la version en langue anglaise et la version en langue française, la version en langue anglaise fera foi.

3.1.10 Effets de la pression et de la boule de feu liés à une explosion (2.3.3.1.11) 32
3.1.11 Obstacles fixes à proximité de la façade des évents d'explosion (2.3.3.1.12)..... 33
3.1.12 Distribution des évents d'explosion (2.3.3.1.15)..... 33
3.1.13 Pressions de service des collecteurs de poussière (2.3.3.1.17) 33
3.1.14 Isolement des explosions (2.3.3.2) 33
3.1.15 Systèmes d'isolement (2.3.3.3)..... 34
3.1.16 Vannes d'isolement à flotteur à action rapide (2.3.3.3.4)..... 34
3.1.17 Fonctionnement sous vide (2.3.3.6)..... 34
3.1.18 Extinction d'étincelles et suppression d'explosion (2.3.4.1) 35
3.1.19 Energie minimale d'inflammation (EMI) (2.3.4.2) 35
3.1.20 Séparateurs de corps étrangers, magnétiques ou autres (2.3.4.3) 36
3.1.21 Côté propre et côté sale des collecteurs de poussière (2.4.2) 36
3.1.22 Events d'explosion sur les cyclones (2.4.2.3) 36
3.1.23 Manches « conductrices » de collecteurs de poussière (2.4.3.1)..... 36
3.1.24 Collecteurs de poussière ouverts (2.4.4)..... 37
3.1.25 Gaines de raccordement (2.5)..... 37
3.1.26 Silos (2.6) 38
3.1.27 Elévateurs à godets (2.7) 39
3.1.28 Equipement de réduction granulométrique (broyeurs, pulvérisateurs, broyeurs à marteaux, etc.)..... 39
3.1.29 Fabrication additive (impression 3D) (2.10)..... 39
4.0 REFERENCES..... 43
4.1 FM Global 43
4.2 Autres 43
ANNEXE A GLOSSAIRE 44
ANNEXE B HISTORIQUE DE REVISION DU DOCUMENT 46
ANNEXE C INFORMATIONS DE RECHERCHE SUR LES RISQUES D'EXPLOSION DE POUSSIERE 47
ANNEXE D BIBLIOGRAPHIE 47

Liste des figures

Fig. 1. Emplacements recommandés pour les procédés ou équipements de traitement des poussières combustibles 6
Fig. 2. Schéma des évents d'explosion en toiture qui projettent au-delà de la ligne de toiture 8
Fig. 3. Ecluse rotative..... 14
Fig. 4. Vanne d'isolement à action rapide (type opercule) 15
Fig. 5. Vanne à flotteur à action rapide (Ventex ESI ®) 15
Fig. 6. Système de dérivation d'explosion..... 16
Fig. 7. Installation en intérieur d'un système de dérivation d'explosion..... 16
Fig. 8. Vanne guillotine à fermeture rapide 16
Fig. 9. Exemple de gaine d'évent d'explosion au niveau d'un coude 22
Fig. 10. Système d'évent avec dispositif arrête-flamme agréé FM (photo de Rembe GmbH)..... 30
Fig. 11. Exemple de collecteur ouvert..... 37
Fig. 12. Procédés de fusion sur lit de poudre..... 40
Fig. 13. Procédés de dépôt de matière 40
Fig. 14. Impression 3D et procédés liquides 41
Fig. 15. Conception SLS (Chemical Engineering Progress, mai 2014)..... 41
Fig. 16. Systèmes 3D à échelle industrielle : imprimantes laser Prox300 et Concept M2..... 41

Liste des tableaux

Tableau 1. Type de construction pour les activités de traitement de poussière 6
Tableau 2. Events d'explosion pour élévateurs à godets 24
Tableau 3. Densité de la poussière en vrac 27

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

1.0 OBJET DE LA PRESENTE FICHE TECHNIQUE

Cette fiche technique décrit les mesures préventives recommandées pour réduire la fréquence des explosions de poussières combustibles et les caractéristiques de protection pour réduire les dommages causés par ces dernières. Pour plus d'informations sur les risques associés aux incendies de poussière, se référer aux fiches techniques spécifiques aux affectations concernées. Toutefois, un aperçu des statistiques de sinistres liés aux incendies de poussière est inclus dans ce document.

Cette fiche technique n'inclut pas les programmes de protection et de prévention des explosions de poussière propres à la manipulation, au stockage et au traitement des grains. Les recommandations de prévention des sinistres adaptées à ces activités sont présentées dans la fiche technique 7-75*, Grain Storage and Milling*. Toutefois, les recommandations contenues dans cette fiche technique s'appliquent aux risques liés aux installations de traitement des grains qui ne sont pas spécifiques à ces installations.

La technologie de l'évaluation des risques d'explosion de poussière est principalement abordée en unités métriques (SI) qui sont les unités utilisées dans cette fiche technique.

Cette fiche technique fait référence au logiciel DustCalc. Le logiciel DustCalc a été développé pour être utilisé par les ingénieurs de FM Global afin de dimensionner les évents d'explosion des bâtiments et des équipements présentant un risque d'explosion de poussières combustibles. D'autres méthodes de dimensionnement des évents sont disponibles, mais elles ne sont pas utilisées par FM Global.

1.1 Modifications

Avril 2017. Révision intermédiaire. La recommandation 2.7.2.3 sur la protection des élévateurs à godets a été modifiée pour plus de clarté.

2.0 RECOMMANDATIONS DE PREVENTION DES SINISTRES

2.1 Généralités

2.1.1 Considérer tous les équipements de traitement des poussières combustibles, ainsi que tous les locaux ou bâtiments dans lesquels des poussières combustibles peuvent s'accumuler et être mises en suspension, comme présentant un risque d'explosion de poussière.

2.1.2 Mettre en place une procédure de gestion des changements dans toutes les installations de traitement des poussières combustibles afin de s'assurer qu'aucun changement ne contribue à aggraver un risque d'explosion de poussière déjà présent ou ses conséquences, ni à introduire un risque d'explosion de poussière lorsqu'il n'en existait aucun. Voici quelques exemples de ces modifications :

- ajout de nouveaux équipements tels que des mélangeurs, des broyeurs, des outils de coupe, des collecteurs de poussière, des cyclones, etc. :
- augmentation des températures liées au process de nature à entraîner le traitement de matières plus sèches ;
- ajout de nouvelles matières ;
- modification de la formulation du produit en ajoutant des matières combustibles ou en réduisant la proportion de matières inertes ;
- changements des procédés susceptibles de réduire la taille des particules des matériaux en cours de fabrication.

2.1.3 Lorsque des modifications de processus, d'équipements, de matières premières ou de produits sont prévues et susceptibles de modifier de manière significative les propriétés de la poussière, tester à nouveau la poussière pour évaluer son explosivité.

2.1.4. Vérifier que votre procédure de gestion des changements respecte les caractéristiques minimales suivantes :

a) fournit une méthode d'identification des changements devant être soumise à la procédure ;

b) fournit la documentation du changement proposé ;

c) fournit une analyse formelle des mesures de prévention des sinistres impliquées dans le changement proposé ;

d) identifie les besoins de formation pour la remise à niveau du personnel ;

e) assure la communication du changement et des conséquences en matière de prévention des sinistres aux personnels appropriés (agents de maintenance, opérateurs, agents de sécurité, équipe d'intervention d'urgence, etc.) ;

f) définit les procédures administratives nécessaires (documentation, formulaires d'inspection des risques, formation, etc.) ;

g) identifie les éventuelles autorisations requises.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.1.5 En cas de risque d'explosion de poussière, éliminer le risque ou en limiter l'impact en utilisant l'une des méthodes suivantes :

a) Contrôler les rejets de poussière fugitive à l'aide d'enceintes, de systèmes de dépoussiérage et de conceptions spécifiques d'équipements.

b) Réaliser les opérations de production de poussière dans des zones séparées des différentes activités à risques à l'aide de constructions (barrières anti-poussière et anti-explosion) ou en instaurant une distance.

c) Réduire les risques d'accumulation de poussière en organisant les éléments de construction des bâtiments et les équipements de façon à réduire les risques d'accumulation de poussière. Utiliser des murs lisses et faciles à nettoyer, des surfaces horizontales encastrées ou couvertes (poutres, solives, etc.) et des surfaces inclinées à un minimum de 60 ° par rapport à l'horizontale.

d) En cas de libération et d'accumulation de poussière fugitive dans des bâtiments, concevoir la structure pour évacuer en toute sécurité l'explosion potentielle à l'aide d'une construction anti-explosion.

e) Placer l'équipement de collecte et de transfert de poussière à l'extérieur, à l'écart des bâtiments et des utilités importants.

f) Construire les équipements de traitement ou de transfert de particules combustibles de façon à contenir ou évacuer en toute sécurité une explosion potentielle.

g) S'il n'est pas possible d'équiper les équipements d'évents d'explosion ou de systèmes de confinement d'explosion, éliminer l'oxygène dans le système par inertage ou installer un système de suppression d'explosion.

2.1.6 Assurer une maintenance efficace des équipements de production et de protection. Un programme de maintenance efficace permet de :

a) Identifier et éliminer en permanence les sources de poussière fugitive.

b) Inspecter, tester et entretenir les systèmes de détection et d'extinction d'étincelles, les systèmes d'isolement d'explosion et les évents de surpression pour vérifier leur bon état de fonctionnement, conformément aux directives du fabricant ou au minimum une fois par mois.

c) Tester et entretenir les équipements de détection et d'extraction des métaux et des produits non métalliques pour s'assurer qu'ils sont en bon état de fonctionnement, au moins une fois par trimestre.

d) Vérifier l'alignement des courroies et des équipements rotatifs au moins une fois par trimestre pour éviter qu'ils ne deviennent une source d'échauffement par friction.

e) Lubrifier les paliers et les équipements rotatifs (ventilateurs, souffleries, équipement de réduction granulométrique) conformément aux directives du fabricant ou au moins une fois par trimestre.

f) Eliminer la poussière accumulée sur les paliers et les composants d'équipements rotatifs afin de ne pas gêner leur fonctionnement et d'empêcher l'échauffement par friction, au moins une fois par trimestre.

g) Attribuer des responsabilités et conserver des registres précis.

2.1.7 S'assurer qu'un programme complet de sensibilisation aux risques d'incendie et d'explosion de poussière existe sur tous les sites où des poussières combustibles sont présentes, soit dans des systèmes de traitement de poussière fermés, soit sous forme de poussière fugitive à l'intérieur des bâtiments. Inclure les éléments suivants :

a) Formation de base visant à promouvoir la sensibilisation et la compréhension des risques associés aux poussières combustibles.

b) Formation des nouveaux employés sur les risques et les précautions inhérents à leurs services.

c) Formation annuelle, exercices et sensibilisation des pompiers et/ou des équipes internes de lutte contre l'incendie.

d) Formation périodique de remise à niveau pour l'ensemble du personnel du site.

2.1.8 Contrôler rigoureusement les sources potentielles d'ignition de poussières en cas de présence de poussières combustibles.

a) Vérifier que tous les équipements électriques sont classés Classe II, Division 1 ou 2, ou Zone 20, 21 ou 22 selon NFPA 70, les articles 500, 502 et 506, du National Electric Code (Code électrique national), selon le cas, ou les équivalents internationaux. (Voir la fiche technique 5-1, *Electrical Equipment in Hazardous Locations*, pour plus de détails sur la classification des zones et le choix des équipements).

b) Utiliser une procédure de gestion des travaux par point chaud pour gérer tous les travaux par point chaud. (Voir la fiche de prévention des sinistres 10-3 de FM Global, *Gestion des travaux par point chaud* et *Hot Work Management Kit (*P9601).

c) Etablir une interdiction de fumer et l'utilisation de flammes nues.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

d) Effectuer la mise à la terre et la liaison équipotentielle des composants métalliques avec une résistance à la terre inférieure à 1 x 10^6 ohms. (Voir la fiche technique 5-8, *Static Electricity*.) Vérifier au moins une fois par an la continuité des composants métalliques et la sécurité de toute liaison équipotentielle.

2.1.9 Interdire le recyclage de l'air d'extraction provenant du séparateur d'air et de matières dans les bâtiments ou les locaux, sauf si le point « a » ou tous les points « b » à « h » s'appliquent :

a) la gaine de reprise devrait refouler dans une zone ne contenant aucun des éléments suivants : poussière fugitive, équipement ou stockage combustible, construction combustible, équipement de grande valeur ou équipement essentiel à la production ; OU

b) installer un filtre en aval des séparateurs de poussières et d'air pour empêcher le retour de poussières dans l'enceinte de l'équipement avec une efficacité minimale de 99,9 % à 10 microns ; ET

c) installer un dispositif de mesure de la chute de pression dans le filtre avec une alarme pour indiquer que le filtre doit être nettoyé ou remplacé ; ET

d) soutenir le filtre à l'aide d'un tamis métallique ou d'une autre méthode permettant au filtre de résister à une pression égale ou supérieure à la valeur Pred (pression maximale à laquelle les équipements peuvent résister sans déformation) de l'équipement directement en amont de celui-ci ; ET

e) installer un système d'isolement d'explosion entre le bâtiment et le dernier collecteur de poussière dans le système (le plus éloigné en aval) ; ET

f) lors de l'activation du système d'isolement d'explosion, arrêter tous les équipements de collecte de poussière qui y sont raccordés ; ET

g) les vapeurs inflammables, les gaz ou les mélanges hybrides ne sont pas impliqués ; ET

h) le système de dépoussiérage est conforme aux exigences de protection des autres sections de cette fiche technique.

Lorsque ces caractéristiques sont présentes, le recyclage de l’air d’extraction provenant du séparateur d’air et de matières ne nécessite pas l’installation de dispositifs de protection contre l’explosion tel que les évents d’explosion, etc. (D'autres facteurs présents dans le bâtiment/local peuvent toutefois créer ce besoin.)

2.2 Risques d'explosion dans les locaux/bâtiments

2.2.1 Construction et emplacement

Isoler les zones de traitement des poussières combustibles des autres activités présentant moins de risques en les séparant par une construction ou une distance afin de limiter les dommages causés par une explosion ou un incendie potentiel. Les zones qu'il est nécessaire d'isoler sont celles où la poussière fugitive n'est pas facilement contrôlée, par exemple, les opérations de meulage, ponçage, sciage, transport ouvert, remplissage des bacs ouverts, etc. Les locaux abritant des collecteurs de poussière, sécheurs par atomisation, sécheurs à lit fluidisé, etc., disposant d'évents adéquats ne sont pas concernés.

Dans les nouvelles constructions susceptibles d'abriter une certaine quantité de poussière fugitive, optimiser l'évent d'explosion au-delà de celui calculé par DustCalc, peut offrir une flexibilité future pour les changements de procédé ou de matériau et peut souvent être effectué moyennant un coût supplémentaire modeste.

2.2.1.1 Isoler les zones où des poussières combustibles sont manipulées en utilisant les méthodes indiquées ci-dessous par ordre de préférence (voir également la figure 1, tableau 1) :

a) Emplacement extérieur séparé à une distance minimale de 15 m (fig. 1, emplacement 1) d'une installation ou d'un bâtiment important.

b) Le long d'un mur extérieur d'un bâtiment important, de préférence dans un angle pour limiter le risque (fig. 1, emplacement 2).

c) A l'intérieur d'un bâtiment important au premier étage, soit dans un angle extérieur, soit le long d'un mur extérieur. Eviter les emplacements aux étages supérieurs des bâtiments à plusieurs étages. Si les emplacements aériens sont inévitables, vérifier que le sol et le plafond du local ont la même résistance à la pression que les murs. (fig. 1, emplacements 3 et 4)

Lorsqu'il est confirmé à l'aide du logiciel DustCalc, l'espacement peut être inférieur à la distance recommandée au point ″a″ ci-dessus ou la distance X du tableau 1.

2.2.1.2 Eviter les emplacements enterrés qui ne peuvent pas être équipés d'un évent d'explosion adéquat.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

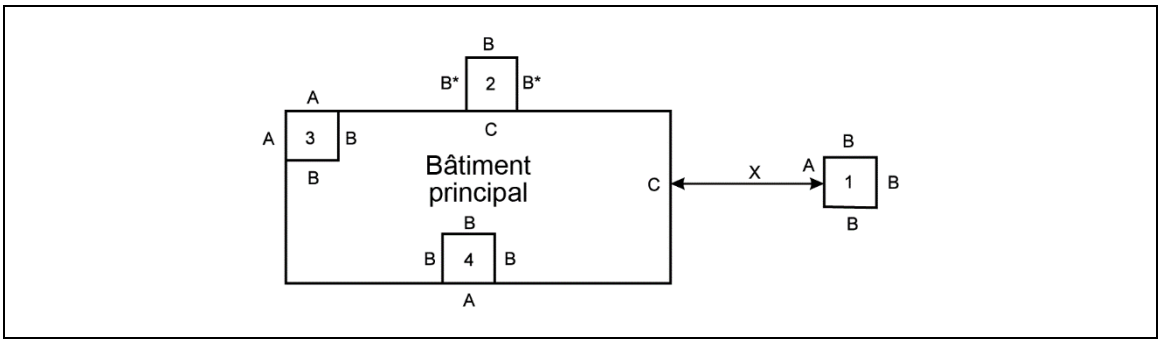

Fig. 1. Emplacements recommandés pour les procédés ou équipements de traitement des poussières combustibles

Tableau 1. Construction pour les activités manipulant de la poussière

Emplacements	*Distance X, m*	*Construction du local/bâtiment*				*Construction du mur exposé C*
		A	B		Toiture	
1 (remarque 3)	> 15	PV	PV		PV ou LW	Au choix
	10 – 50 3 – 15	PR	PV		PV ou LW	Au choix
	< 3	PR	PV		PV ou LW	PR pour 3 m, horizontalement et verticalement au-delà de la structure d'exposition
2	Contigu	N/A	B	B*	PV ou LW	PR pour 3 m, horizontalement et verticalement au-delà de la structure contiguë
			PV	PV		
	Contigu	N/A	B	B*	PR	PR pour 3 m, horizontalement au-delà de la structure contiguë
			PV	PV		
	Contigu	N/A	B	B*	PR	PR pour mur contigu uniquement
			PV	PR		
3 (remarque 5)	A l'intérieur	PV	PR		PR	N/A
4 (remarque 5)	A l'intérieur	PV	PR		PR	N/A

1. Ce tableau traite uniquement de la protection contre les risques d'explosion.
2. Les types de construction sont définis comme
   suit : PR = résistant à la pression
   PV = éventable
   LW = léger, incombustible
3. Si les calculs sont confirmés par le logiciel DustCalc, la distance X de l'emplacement 1 peut être inférieure à celle indiquée ci-dessus.
4. Une construction résistante à la pression est également nécessaire pour les sols et les plafonds possédant des espaces au-dessus ou en dessous abritant des activités présentant moins de risques.
5. Lorsque les murs seuls sont capables d'évacuer la pression, les toits (pas les plafonds) n'ont pas besoin d'être soufflables.

2.2.1.3 Construire les bâtiments dans lesquels il existe un risque d'explosion de poussières combustibles en utilisant des matériaux incombustibles ou agréés FM de classe 1.

2.2.1.4 Vérifier que les barrières physiques qui isolent les zones présentant des risques d'explosion de poussière sont étanches à la poussière grâce à des matériaux incombustibles. Lorsque les barrières présentent une résistance au feu, vérifier que les joints le sont également.

2.2.1.5 Utiliser des joints de porte, des joints de fenêtre, une pressurisation positive du local, etc. pour empêcher la poussière d'entrer et de s'accumuler dans des zones adjacentes ne présentant pas leur propre source de poussière fugitive.

2.2.1.6 S'assurer que les barrières physiques qui isolent les zones présentant des risques d'explosion de poussière résistent suffisamment aux explosions afin d'éviter toute défaillance avant que la pression ne puisse être évacuée en toute sécurité.

2.2.1.7 Interdire les ouvertures dans les murs résistants aux explosions. Lorsque les ouvertures sont inévitables, maintenir fermées toutes les portes de ces murs et s'assurer qu'elles présentent la même résistance aux explosions que les murs eux-mêmes. (Voir la fiche technique 1-44, *Damage-Limiting Construction* pour la conception et l'installation de portes et fenêtres résistantes aux explosions.)

2.2.1.8 Concevoir les zones résistantes à la pression et les surfaces d'évents conformément aux calculs effectués à l'aide du logiciel FM Global DustCalc.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.2.1.9 Dans les bâtiments susceptibles d'abriter une certaine quantité de poussière fugitive malgré la conception du process et l'entretien des équipements, organiser les éléments de construction des bâtiments et les équipements afin de réduire la probabilité et la quantité de poussière accumulée par un ou par tous les éléments suivants, selon le cas :

a) Les murs intérieurs devraient être lisses, avec un minimum de rebords.

b) Afin d'éviter l'accumulation de poussière sur les éléments de charpente des bâtiments et le sommet des équipements, ces derniers devraient si possible être recouverts d'un revêtement lisse empêchant la poussière de se déposer.

c) Un revêtement lisse incliné à 60° sur les éléments horizontaux est connu pour être suffisant.

d) Entourer la boîte en acier de construction suspendue hors de portée des opérations normales d'aspiration ou de balayage et dotée de rebords horizontaux (poutres en L ou canaux en U en position verticale ou latérale) avec un matériau incombustible pour éliminer les poches d'accumulation de poussière.

2.2.2 Activité

2.2.2.1 Les bâtiments peuvent être considérés comme ne présentant pas de risque d'explosion de poussières combustibles s'ils abritent des équipements de traitement des poussières combustibles conçus et protégés pour contrôler ou éventer en toute sécurité une explosion interne, conformément aux sections applicables de cette fiche technique.

2.2.2.2 Le cas échéant, effectuer l'une ou l'ensemble des étapes suivantes, lorsque des quantités de poussière fugitive sont envisageables dans de nouvelles opérations ou sont excessives dans les opérations existantes :

a) Vérifier les équipements pour identifier les sources d'émission de poussière.

b) Modifier, réparer ou remplacer les équipements pour supprimer ou au moins réduire l'émission de poussière.

c) Fournir des points d'aspiration sous vide de la poussière aux emplacements d'émission de poussière, tels que le meulage, le polissage, le vidage de sacs, les points de transfert ouverts dans les systèmes de convoyage et autres équipements/emplacements où de grandes quantités de poussière sont fréquemment libérées. Dans certains cas, la construction d'une hotte ventilée ou d'une enceinte de confinement pour l'équipement existant peut s'avérer nécessaire.

d) Utiliser des systèmes de traitement des poussières fermés avec une légère pression négative afin de réduire l'émission de poussière.

e) Renforcer la tenue des locaux pour les opérations existantes pendant la modification de l'équipement (voir Section 2.2.4).

2.2.2.3 La poussière combustible fugitive présente localement en petites quantités dans les bâtiments (lorsqu'elle n'occupe pas plus de 5 % de la surface du bâtiment, et dans l'absolu, ne dépasse pas une surface de 93 m^2) est jugée tolérable sans nécessiter de construction anti-explosion lorsque les conditions suivantes sont réunies :

a) le taux d'émission et d'accumulation de la poussière fugitive est très faible, c'est-à-dire moins de 2 mm pour une poussière dont la densité est d'environ 580 kg/m^3 par période de trois mois ; ET

b) la fréquence de nettoyage est suffisamment élevée pour que l'épaisseur des dépôts de poussière n'excède pas le seuil de 2 mm indiqué précédemment, même si l'un des nettoyages programmés n'était pas réalisé.

2.2.3 Protection

2.2.3.1 Construire des murs résistants à la pression ou soufflables conformément à la fiche technique 1-44, *Damage-Limiting Construction.*

a) La pression d'ouverture des évents d'explosion (P_{stat}) doit être la plus faible possible en tenant compte de la résistance au vent. Dans une zone faiblement ventée, la valeur P_{stat} peut atteindre 0,01 bar, alors que dans les zones plus ventées, 0,015 bar est plus classique.

b) Concevoir les zones résistantes à la pression et les surfaces d'évents conformément aux calculs effectués à l'aide du logiciel FM Global DustCalc.

2.2.3.2 Ne pas utiliser d'évents d'explosion en toiture en guise de dispositif de décharge d'explosion.

2.2.3.3 Lorsqu'une étude technique approfondie montre que les murs éventables ne peuvent pas, à eux seuls, fournir la surface d'évent d'explosion nécessaire, des évents de toit peuvent être utilisés pour fournir une partie de la surface d'évent nécessaire, si la neige et la glace ne peuvent pas s'accumuler sur l'évent. L'une des méthodes suivantes est acceptable :

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

a) Positionner les évents d'explosion à un angle minimum de 60 °, soit sur une toiture inclinée à cet angle, soit en projection au-dessus de la ligne de toit (voir Figure 2). Pour les évents projetés au-dessus de la ligne de toit, la surface d'ouverture de l'évent à utiliser dans les calculs de dimensionnement des évents est la plus petite section transversale à travers laquelle les gaz de combustion doivent s'écouler.

b) Prévoir un traçage thermique le long du périmètre et sur la surface de l'évent d'explosion.

1. Laisser le traçage thermique en fonctionnement en permanence ou actionner automatiquement le système lorsque la température extérieure descend à 0 °C ou moins.

2. S'assurer que le câblage du traçage thermique comporte suffisamment de mou pour permettre à l'évent d'explosion de se déployer comme prévu.

3. Utiliser un équipement de traçage thermique agréé FM.

c) Installer des évents d'explosion sans isolation pour permettre à la chaleur du bâtiment de faire fondre la neige ou la glace. Anticiper la formation de condensation sous l'évent d'explosion et prendre les mesures nécessaires pour éviter tout problème.

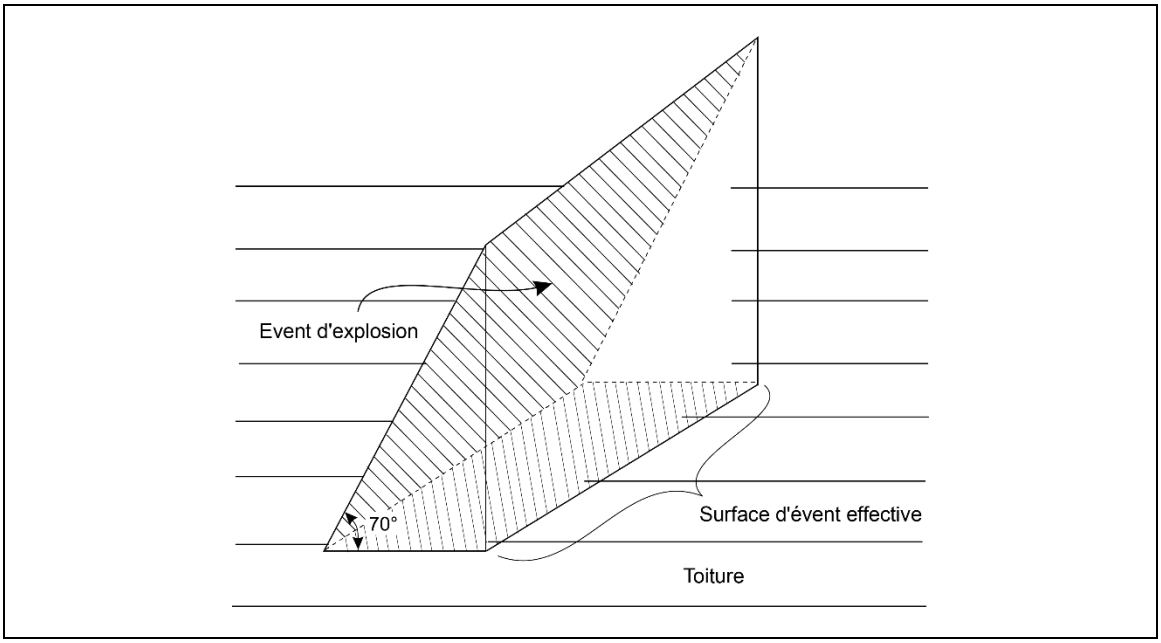

Fig. 2. Schéma des évents d'explosion sur le toit qui projettent au-delà de la ligne de toiture

2.2.3.4 Lorsque les évents d'explosion s'écartent au lieu de se rompre, utiliser des dispositifs de gravité ou mécaniques pour éviter qu'ils ne se referment. (3.1.9)

2.2.3.5 Pour éviter, en cas d'explosion, la projection incontrôlée d'évents d'explosion réalisés avec des panneaux susceptibles de se transformer en projectiles, procéder comme suit :

a) Installer des câbles de retenue pour limiter le mouvement de l'évent.

b) Attacher les câbles de retenue à deux angles maximum, en vous assurant que les angles attachés sont adjacents.

c) Pour éviter que les panneaux attachés ne se retournent dans l'ouverture de l'évent après l'explosion, effectuer les fixations sur le côté ou le bas du panneau plutôt que sur le dessus. Cela permet aux panneaux de basculer complètement hors de l'ouverture de l'évent, laissant un chemin libre pour que les gaz de combustion s'écoulent pendant l'explosion et pour que l'air frais pénètre dans l'enceinte protégée après l'explosion.

d) Calculer la longueur minimale d'attache en utilisant l'équation suivante :

$$l \geq \frac{a \times b}{2 \times (a+b)}$$

où :
l = longueur des câbles de retenue
a, b = dimensions latérales de l'évent d'explosion

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

e) Si la longueur du câble de retenue est inférieure à celle déterminée ci-dessus, considérer l'évent d'explosion comme un panneau articulé lors des calculs pour déterminer la surface d'évent et la pression de l'évent d'explosion (Pstat). L'inconvénient créé par des câbles de retenue courts sur le processus d'évent est ainsi pris en compte.

f) Lorsque les câbles de retenue sont situés aux quatre angles, cela est acceptable si la longueur du câble dépasse le minimum défini au point d, ci-dessus. Toute longueur inférieure limite la surface d'évent à l'espace annulaire déterminé par la longueur du câble et les dimensions du panneau, plutôt que par la taille du panneau lui-même.

2.2.3.6 Ne pas fixer les canalisations sprinkleur à un mur, un plafond ou un toit qui pourrait être déplacé par la pression engendrée par l'explosion dans un local ou un bâtiment.

2.2.4 Exploitation et maintenance

2.2.4.1 Dans les bâtiments où de la poussière fugitive est émise malgré la conception du process et l'entretien des équipements, intégrer les actions suivantes dans un programme de contrôle de la poussière fugitive :

a) Attribuer des responsabilités et conserver des registres.

b) Consacrer régulièrement du temps et des ressources.

c) Créer un programme de maintenance et le réviser régulièrement pour assurer sa pertinence.

d) Prendre particulièrement soin d'éliminer les accumulations de poussière au-dessus du niveau du sol, telles que les parties supérieures des équipements et les éléments de structure des bâtiments, car cette poussière est plus susceptible d'être en suspension (en suspension dans l'air) et de créer un nuage explosif en cas de perturbation.

e) Utiliser, dans la mesure du possible, un système d'aspiration centralisé, mobile ou monté sur chariot, selon le cas.

f) Lorsque l'aspiration n'est pas pratique, le balayage ou le lavage à l'eau sont d'autres options acceptables.

g) Lorsque seule la méthode par soufflage est applicable, prendre les précautions suivantes :

1. Effectuer des soufflages réguliers afin d'éviter le risque d'accumulation de poussière.

2. Limiter autant que possible les surfaces de soufflage ainsi que le volume et la pression de l'air.

3. Arrêter les équipements électriques non adaptés aux zones à risques de classe II, division 2.

4. Interdire l'utilisation de flammes nues et les travaux par point chaud et vérifier qu'aucune surface chaude n'est présente.

2.2.4.2 Toute accumulation de poussière fugitive présente un risque d'explosion secondaire et doit être éliminée dans les bâtiments non dotés d'une construction anti-explosion et être contrôlée dans ceux équipés d'une construction anti-explosion (3.1.1).

a) La fréquence de dépoussiérage doit être planifiée de façon à empêcher les accumulations de poussière de plus de 2 mm d'épaisseur sur plus de 5 % de la surface au sol.

b) Toute quantité de poussière fugitive dépassant le seuil mentionné ci-dessus est le signe qu'un nettoyage doit être initié.

c) La surface totale d'accumulation ne devrait pas dépasser 93 m^2.

d) L'épaisseur de 2 mm est basée sur une poussière de bois ou agricole type d'une densité d'environ 580 kg/m^3. L'épaisseur d'une poussière de densité différente peut être basée sur un rapport des densités.

2.2.4.3 Inspecter régulièrement les évents d'explosion afin d'éviter toute détérioration de leur état ou de leur mobilité. Les dégradations possibles sont les suivantes :

a) corrosion ;

b) peinture inappropriée de pièces mobiles ou d'évents d'explosion ;

c) givrage ;

d) accumulation de neige sur ou devant les évents ;

e) obstacle créé par des canalisations, des câbles ou d'autres utilités ;

f) présence d'équipements permanents ou provisoires à côté des évents.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Toutes ces dégradations sont susceptibles d'augmenter la pression effective de décharge de l'évent (P_{stat}) et de provoquer la défaillance des murs résistants à la pression d'ouverture de l'évent ; et/ou d'endommager la structure du bâtiment lors d'une explosion.

2.3 Risques d'explosion liés aux équipements

2.3.1 Généralités

2.3.1.1 Si possible, installer tous les équipements présentant un risque d'explosion à l'extérieur (3.1.2).

2.3.1.2 Si l'équipement présente un risque d'explosion, prendre une des mesures suivantes :

a) Eliminer le risque d'explosion à l'aide de l'une des techniques décrites à la Section 2.3.2.

OU

b) Réduire le risque d'explosion en utilisant des évents d'explosion, des systèmes de suppression d'explosion, de confinement d'explosion ou un confinement sous vide, ou une combinaison adéquate de ces méthodes, comme indiqué dans la section 2.3.3.

2.3.2 Elimination des risques d'explosion

2.3.2.1 En présence d'équipements de traitement de matériaux bruts, empêcher la poussière d'être générée lors de la manipulation des matériaux à l'aide de méthodes appropriées ou effectuer un nettoyage préalable des matériaux bruts pour éliminer toutes les particules fines de la plupart des équipements de traitement.

2.3.2.2 En présence d'équipements de traitement de matériaux bruts, empêcher la poussière d'être générée lors de la manipulation des matériaux en éliminant la poussière présente dans les équipements à l'aide d'une brume liquide (eau ou autre liquide compatible) de la façon suivante :

a) Appliquer le liquide à un point du processus impliquant des turbulences importantes, par exemple, au niveau d'un bec verseur de décharge, pour vous assurer que le produit d'élimination est bien mélangé au flux de matériau.

b) Installer un dispositif d'asservissement qui arrêtera le flux de production solide en cas de dysfonctionnement du système de pulvérisation si ce système est utilisé comme le seul moyen de contrôle des risques.

c) Vérifier l'efficacité du système pour éliminer la poussière présente dans l'équipement en vérifiant visuellement l'équipement pendant qu'il fonctionne, par exemple en ouvrant les orifices d'accès ou d'inspection.

d) Développer un programme d'entretien et d'inspection avec des procédures écrites et enregistrer les résultats pour s'assurer que le système de pulvérisation anti-poussière fonctionne correctement chaque fois que le flux de processus solide est en cours.

2.3.2.3 Inerter la poussière combustible en la mélangeant à une poussière incombustible (méthode de « flegmatisation ») sur la base suivante (3.1.3) :

a) Effectuer un test pour déterminer si le mélange est non explosif conformément aux normes ASTM E1226, EN 14034-1 et 2 ou tout autre équivalent international.

b) Vérifier que la poussière incombustible ne se sépare pas de la poussière combustible lors du traitement ultérieur du matériau.

2.3.2.4 Réduire le niveau d'oxygène du processus avec un gaz inerte conformément aux recommandations de la fiche technique 7-59*, Inerting and Purging of Equipment.*

2.3.2.4.1 Si les valeurs de la concentration limite en oxygène (CLO) ne sont pas disponibles dans la fiche technique 7-59 pour le matériau en cours de traitement, organiser un test en laboratoire des matériaux pour déterminer la CLO.

2.3.2.4.2 Lorsqu'une atmosphère inerte doit être utilisée pour protéger le transport pneumatique d'une poudre de métal léger fraîchement broyée ou récemment fabriquée (aluminium, magnésium, titane, zirconium) :

a) Assurer une concentration d'oxygène minimale d'au moins 1 % pour garantir la formation d'une couche d'oxyde stable (passivation).

b) Lorsque la poudre de métal ne doit pas être exposée à l'air, ou lorsque les tests ont montré qu'un niveau d'oxygène inférieur est acceptable, des concentrations inférieures à 1 % sont acceptables.

2.3.2.4.3 Les poudres métalliques de titane, de magnésium, de zirconium, d'uranium et de thorium s'enflamment dans du dioxyde de carbone pur. Utiliser de l'argon, de l'hélium ou de l'azote (sauf pour le titane, qui peut être enflammé dans de l'azote pur) pour les procédés d'inertage qui traitent ces matériaux.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.3.2.5 En guise d'alternative à une atmosphère inerte pour le traitement de poudres de métaux légers fraîchement fabriquées (aluminium, magnésium, titane, zirconium), procéder de la façon suivante :

a) Utiliser des collecteurs de poussière humides (lavage à l'eau) plutôt que des collecteurs secs.

b) Retirer les boues accumulées et les éliminer de façon sécurisée avant d'arrêter le système de collecte de poussière.

c) Continuer à ventiler le collecteur de poussière en permanence jusqu'à ce que la boue métallique/d'eau soit éliminée du collecteur.

L'aluminium possède en particulier une énergie minimale d'inflammation (EMI) très faible (jusqu'à 0,1 mJ), ce qui le rend facilement inflammable. En général, les poudres métalliques peuvent avoir un K_{st} élevé et les évents d'explosion risquent de ne pas être suffisants. La poudre d'aluminium lorsqu'elle est humidifiée avec de l'eau peut former de petites quantités d'hydrogène et doit donc être maintenue humide en permanence.

2.3.3 Réduction des risques d'explosion

2.3.3.1 Events d'explosion

2.3.3.1.1 Fournir une surface d'évent conformément aux calculs effectués à l'aide du logiciel FM Global DustCalc (3.1.4).

2.3.3.1.2 Si un équipement intérieur présentant un risque d'explosion ne peut pas être déplacé à l'extérieur, prévoir un évent d'explosion de l'une des façons suivantes :

a) Installer l'équipement à côté d'un mur extérieur et évacuer l'explosion vers l'extérieur via une gaine d'évent de faible longueur.

b) Evacuer l'explosion vers la zone environnante à l'aide d'un dispositif d'arrête-flamme agréé FM dans une zone exempte de poussière fugitive (3.1.5).

1. Une augmentation de la surface d'évent (par rapport à un évent ouvert ou sans obstacle) sera nécessaire pour tenir compte de la réduction de l'efficacité de l'évent provoquée par le dispositif arrête-flamme.

2. Utiliser l'efficacité des dispositifs d'évent avec arrête-flamme agréés FM, comme indiqué dans le Guide des produits agréés FM, une publication de FM Approvals.

Si les suggestions ci-dessus ne sont pas pratiques, appliquer les autres méthodes de réduction des risques d'explosion décrites dans la section 2.3.1.2.b.

2.3.3.1.3 Pour les calculs de la surface d'évent où les données de calcul de résistance des équipements ne sont pas disponibles, utiliser les valeurs P_{red} (pression maximale admissible) suivantes pour des équipements courants, en supposant que certaines déformations des équipements peuvent se produire dans une explosion évacuée en toute sécurité :

a) Equipements rectangulaires faibles (par exemple, filtres à manche) : 0,2 barg

b) Equipements cylindriques (par ex. cyclone) ou équipements rectangulaires solides (renforcés) : 0,3 barg (3.1.6)

2.3.3.1.3.1 Pour les équipements pour lesquels la déformation n'est pas acceptable, obtenir le calcul de résistance de l'équipement ou supposer la moitié des valeurs indiquées ci-dessus pour le P_{red}.

2.3.3.1.4 Régler la pression d'ouverture de l'évent d'explosion (P_{stat}) au niveau le plus bas possible en fonction des critères suivants :

a) Ne pas dépasser 0,05 barg lorsque l'équipement fonctionne en dessous de cette pression, OU

b) Au moins 0,1 barg en dessous du P_{red} supposé pour une pression de service plus élevée.

2.3.3.1.5 Pour les calculs de la surface d'évent où les données de calcul de résistance de l'équipement sont disponibles, définir la valeur de P_{red} en fonction des critères suivants :

a) Lorsque la déformation de l'équipement est acceptable, utiliser une valeur égale à deux fois le calcul de résistance.

b) Lorsque la déformation de l'équipement doit être évitée, utiliser une valeur égale au calcul de résistance (3.1.6).

2.3.3.1.6 Construire des évents d'explosion avec des matériaux aussi légers (masse par unité de surface) que possible pour réduire la surface d'évent requise. Les évents d'explosion qui sont des membranes de rupture (par exemple, des disques de rupture préfabriqués, des feuilles d'aluminium, etc.) ne présentent pratiquement aucune inertie et ne nécessitent aucun ajustement de la surface d'évent d'explosion requise (3.1.7).

2.3.3.1.6.1 Lorsque les dispositifs d'évent sont plus lourds que les membranes légères, calculer l'effet sur la surface d'évent à l'aide du logiciel FM Global DustCalc.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.3.3.1.7 Installer des gaines d'évents qui acheminent les produits de combustion de l'évent vers une zone sûre, conformément aux instructions suivantes :

a) Canaliser l'évent vers une zone sécurisée à l'extérieur.

b) Utiliser une gaine sans coude.

c) Limiter le rapport longueur/diamètre (L/D*) de la gaine à 1.

d) Vérifier que la gaine de l'évent est au moins aussi résistante que le P_{red} de l'équipement.

e) Ne pas boucher l'extrémité de décharge de la gaine afin de ne pas obstruer l'évacuation libre du matériau déchargé.

f) Lorsque les conditions ci-dessus ne peuvent pas être remplies, calculer l'effet sur la surface d'évent à l'aide du logiciel FM Global DustCalc (3.1.8).

* Calculer le diamètre équivalent (D_{eff}) d'une gaine non circulaire de la façon suivante :

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{4A_d}{\pi}}$$

Où A_d est la section transversale de la gaine (m²)

2.3.3.1.8 Lorsqu'un tamis métallique ou un autre obstacle doit être présent entre un évent d'explosion et l'atmosphère libre, ajuster la surface efficace de l'évent d'explosion pour compenser la perte de l'efficacité de l'évent de la façon suivante :

a) Si le tamis ou l'obstacle est inférieur à 15 % de la surface de l'évent d'explosion, aucun ajustement n'est nécessaire.

b) Si l'écran ou l'obstacle se situe entre 15 % et 40 % de la surface d'évent d'explosion, calculer la surface d'évent d'explosion efficace en utilisant la formule suivante :

$$A_{v,eff} = A_{v,actual} \times \frac{115\text{-\% } de\ blocage}{100}$$

c) Si le tamis ou l'obstacle dépasse 40 % de la surface de l'évent d'explosion, le blocage est excessif. Remplacer le tamis ou l'obstacle par un élément qui provoque un blocage plus faible.

2.3.3.1.9 Lorsque les dispositifs d'évent s'écartent au lieu de se rompre, utiliser des dispositifs à gravité ou mécaniques pour éviter qu'ils ne se referment et ne créent des conditions de vide susceptibles de faire s'effondrer/d'imploser l'équipement protégé (3.1.9).

2.3.3.1.9.1 Lorsque les évents d'explosion peuvent se refermer et qu'aucune autre ouverture ne peut aspirer de l'air, prévoir des systèmes casse-vide. (Voir la norme technique allemande VDI 3673 pour plus d'informations sur le dimensionnement.)

2.3.3.1.10 Afin d'éviter la libération des évents d'explosion réalisés avec des panneaux là où ils pourraient devenir des projectiles, fournir des câbles de retenue conformément à la norme 2.2.3.5.

2.3.3.1.11 Ne pas placer d'objets susceptibles de s'enflammer ou d'être endommagés par la pression, sur le passage des évents d'explosion (3.1.10.1 et 3.1.10.2).

2.3.3.1.12 Pour les nouvelles installations, prévoir une distance équivalente au moins à deux diamètres d'évent d'explosion entre une sortie d'évent d'explosion (face d'un évent d'explosion ou d'une gaine d'évent) et tout obstacle large, fixe et plat (par exemple, un mur). Pour les sorties d'évent d'explosion ayant des coupes transversales autres que circulaires, utiliser le diamètre hydraulique calculé ci-dessous (3.1.11).

Diamètre hydraulique = 4A/p, où
A = surface de la section de l'évent
P = périmètre de la section

2.3.3.1.13 Lorsqu'une housse de protection contre les intempéries (« chapeau de pluie ») est fournie à l'extrémité d'une gaine d'évent d'explosion, estimer l'effet sur l'efficacité de l'évent de la façon suivante :

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

a) S'il y a une distance d'au moins un diamètre d'évent d'explosion entre l'extrémité de la gaine et le chapeau de pluie, l'efficacité n'est pas compromise.

b) Si la distance est comprise entre ¼ de diamètre et 1 diamètre d'évent d'explosion, considérer le chapeau de pluie comme un coude à 90° dans le flux de l'évent lors du calcul de l'effet de la gaine d'évent.

c) Une distance inférieure à ¼ de diamètre de l'évent d'explosion est inacceptable, sauf s'il est conçu pour se détacher en cas d'explosion.

Pour les gaines non circulaires, utiliser le diamètre hydraulique pour ces calculs (2.3.3.1.12).

2.3.3.1.14 Ne pas prévoir d'évent d'explosion si la poussière ou ses produits de combustion sont toxiques, radioactifs, corrosifs pour les équipements ou structures situés à proximité, ou si pour toute autre raison, la poussière ne doit pas être évacuée d'un système fermé. Utiliser des alternatives aux évents d'explosion, telles que l'élimination des risques d'explosion, la suppression des explosions, le confinement des explosions ou le fonctionnement sous un vide élevé.

2.3.3.1.15 Lorsqu'un équipement nécessitant un évent d'explosion présente des obstacles importants au débit libre de gaz, prévoir plusieurs évents répartis à différents endroits sur l'équipement au lieu d'un large évent dans une seule zone (3.1.12).

2.3.3.1.16 Lorsqu'un équipement contient à la fois de la poussière combustible fugitive et des vapeurs de liquides qui peuvent brûler ou des gaz inflammables (mélange hybride), la réactivité du mélange nécessite des surfaces d'évents plus grandes que la poussière combustible seule.

a) La présence d'une vapeur ou d'un gaz inflammable peut être ignorée si la concentration est inférieure ou égale à 5 % de sa limite inférieure d'explosivité (LIE).

b) Lorsque la concentration de gaz dépasse 5 % de la LIE, tester la réactivité du mélange.

2.3.3.1.17 La surface d'évent requise pour un équipement présentant un risque d'explosion de poussière fonctionnant à des pressions supérieures à 0,1 barg nécessite une attention particulière et doit être soigneusement analysée. Le logiciel FM Global DustCalc peut gérer une pression initiale jusqu'à 4 barg pour les explosions à plein volume.

a) Régler la pression de décharge de l'évent, P_{stat} au-dessus de la pression de service maximale normale d'au moins 0,1 barg (3.1.13).

b) Obtenir les critères de dimensionnement des évents auprès d'experts connaissant l'évacuation d'une explosion à haute pression initiale.

2.3.3.1.18 Les forces de recul dues à l'évacuation d'une explosion peuvent déloger même les équipements importants qui ne sont pas correctement ancrés. Appliquer une des méthodes suivantes pour contrôler les forces de recul :

a) Prévoir des évents de dimensionnement égal sur les côtés opposés de l'équipement.

b) Calculer l'amplitude et la durée de la force de recul dynamique (ou une force statique équivalente) à partir d'un évent et prévoir un ancrage capable de résister à ces forces (3.1.10.3).

2.3.3.2 Isolement

Eviter l'interconnexion de multiples éléments d'équipement présentant un risque d'explosion de poussière. Un équipement correctement protégé peut être endommagé lorsqu'une explosion se propage à partir d'un autre équipement. Les systèmes d'isolement permettent d'éviter ce problème (3.1.14).

2.3.3.2.1 Prévoir des systèmes d'isolement contre les explosions sur tous les raccords d'équipements (ou groupes d'équipements) conçus pour contenir la pression d'explosion (conception résistante aux explosions).

2.3.3.2.2 Prévoir des systèmes d'isolement contre les explosions sur toutes les connexions entre les équipements (ou groupes d'équipements) protégés individuellement par des évents d'explosion (ou autre méthode de réduction du risque d'explosion) mais susceptibles de subir des dommages matériels inacceptables ou une interruption de l'activité suite à un événement de propagation.

2.3.3.2.3 Concevoir des dispositifs d'isolement mécanique sur des équipements conçus pour retenir l'explosion, en fonction de la pression de conception de l'équipement et des dispositifs d'isolement sur les équipements protégés par des évents d'explosion pour résister à la pression réduite de conception (P_{red}). Cela inclut des écluses rotatives, des vannes à action rapide, des systèmes de dérivation de front de flamme/d'explosion, des vannes guillotine à fermeture rapide, des vannes à double clapet et des amortisseurs de retour de pression.

2.3.3.2.4 Vérifier que les dispositifs d'isolement actifs, nécessitant une détection pour l'activation mécanique du dispositif, sont suffisamment éloignés pour que le dispositif se ferme avant l'arrivée de la flamme.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.3.3.2.5 La tuyauterie utilisée pour le transport pneumatique en phase dense de poussières combustibles ne présente généralement aucun risque de propagation d'explosion. La tuyauterie peut être installée sans dispositif d'isolement d'explosion si le matériau transporté n'est pas une poussière métallique ou un mélange hybride.

2.3.3.3 Systèmes d'isolement

Cette section mentionne les formes acceptables d'isolement d'explosion et les caractéristiques nécessaires pour garantir que les systèmes sont des barrières efficaces pour les flammes (3.1.15).

2.3.3.3.1 Systèmes chimiques de blocage d'explosion

a) Installer le système conformément à la fiche technique 7-17, *Explosion Protection Systems.*

b) Installer des équipements agréés FM.

c) Ces systèmes peuvent ne pas suffire dans les situations suivantes :

1. Les débits de processus sont élevés.
2. L'explosion primaire se produit dans un très grand équipement.
3. L'explosion primaire se produit dans un équipement protégé par un dispositif de confinement d'explosion.

2.3.3.3.2 Ecluses rotatives

Installer les dispositifs de la façon suivante :

a) Vérifier que l'angle des aubes et la forme de l'habitacle permettent à deux aubes d'être engagées dans le passage, de chaque côté, en permanence.

b) Vérifier que les aubes (y compris les pointes) sont en métal et que leur épaisseur est d'au moins 3 mm.

c) Vérifier que l'espace entre les pointes des aubes et le logement se situe entre 0,2 et 0,25 mm (inférieur ou égal à 0,1 mm pour la poussière d'aluminium). Consulter la référence 17 de l'annexe D si des informations supplémentaires sur l'écart admissible sont nécessaires.

d) Asservir l'écluse rotative pour qu'elle s'arrête automatiquement en cas d'explosion, afin d'éviter le passage de matières en feu. Un dispositif d'asservissement n'est pas nécessaire si la matière en feu ne provoque pas un second incendie ou une explosion.

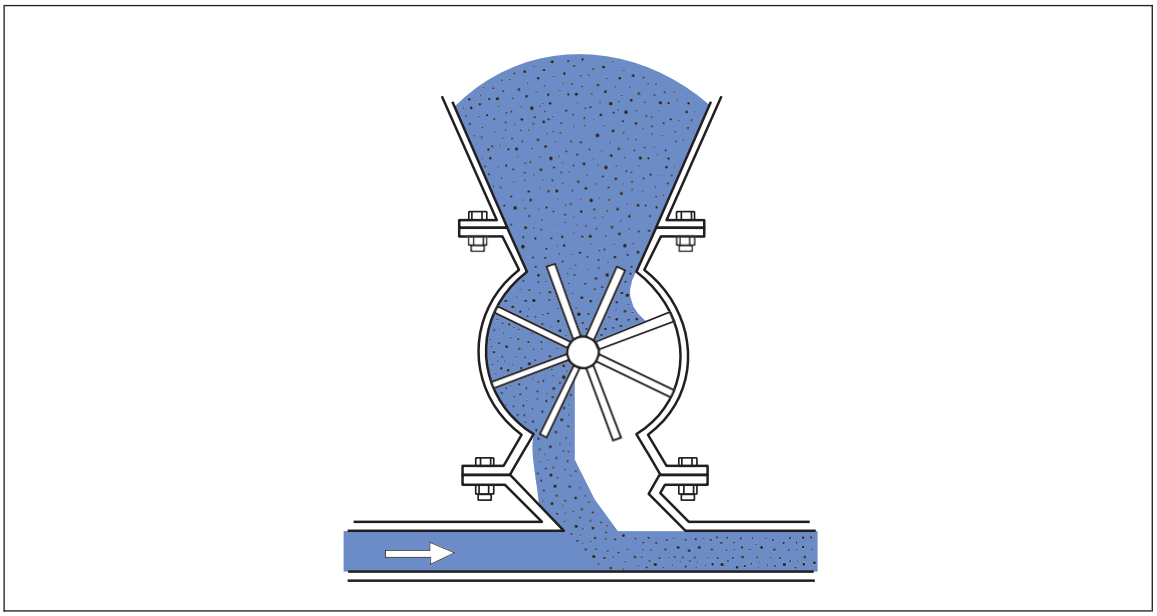

Fig. 3. Ecluse rotative

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.3.3.3.3 Vannes d'isolement à action rapide, de type opercule ou papillon

Vérifier que la distance entre le dispositif de détection d'explosion et la vanne d'isolement à action rapide est suffisante pour permettre à la vanne de se fermer complètement avant l'arrivée du front de flamme.

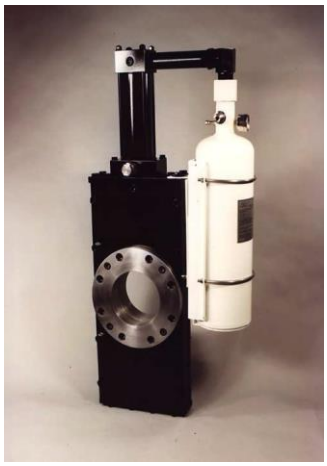

Fig. 4. Vanne d'isolement à action rapide (type opercule)

2.3.3.3.4 Vanne d'isolement à action rapide (type à flotteur) (3.1.16)

Le Ventex ESI (Figure 5) est un exemple de ce type de vanne.

a) Monter la vanne à une distance minimale de 5 m et maximale de 12,5 m de l'équipement où l'explosion se déclenche.

b) Vérifier que la valeur $_{Pstat}$ (pression d'ouverture de l'évent) pour les équipements équipés d'évents d'explosion en amont ou en aval de la vanne d'isolement à flotteur dépasse la pression différentielle requise pour fermer la vanne, généralement environ 0,1 barg.

c) Si la valeur P_{stat} doit être inférieure à la pression différentielle requise, prévoir un autre mécanisme de fermeture en installant un système de détection optique au niveau de la source d'explosion afin de déclencher la libération rapide du gaz comprimé près de la vanne flottante pour forcer sa fermeture.

d) Ne pas placer de vanne d'isolement à flotteur dans un flux d'air qui présente une charge importante de poussière abrasive susceptible d'user prématurément les surfaces du flotteur mobile.

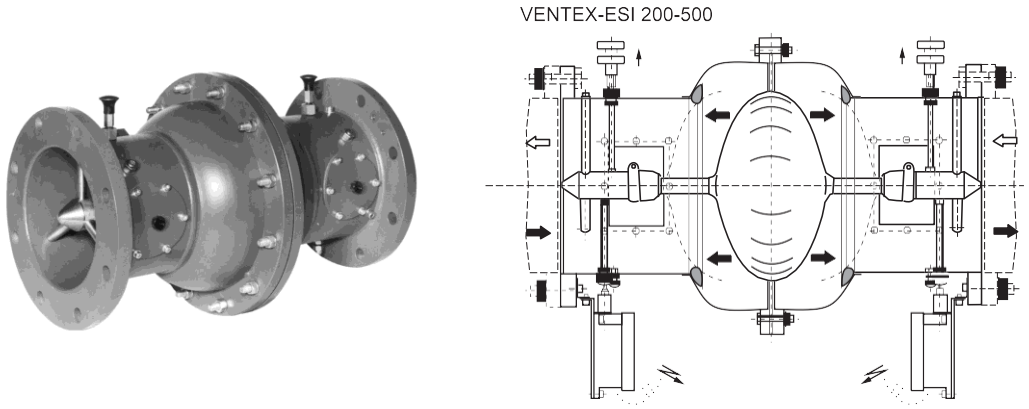

Fig. 5. Vanne à flotteur à action rapide (Ventex ESI ®)

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.3.3.3.5 Systèmes de dérivation de front de flamme ou d'explosion

a) Ne pas installer ce dispositif en amont d'un dispositif de déplacement d'air, car une telle explosion se propage au-delà du système de dérivation.

b) Ne pas utiliser de systèmes de dérivation d'explosion dans des flux d'air qui présentent une charge importante de poussière abrasive susceptible d'éroder le couvercle du répartiteur de décharge de pression et de s'échapper.

c) Ne pas utiliser de systèmes de dérivation d'explosion pour les mélanges hybrides où les vapeurs inflammables dépassent la LIE.

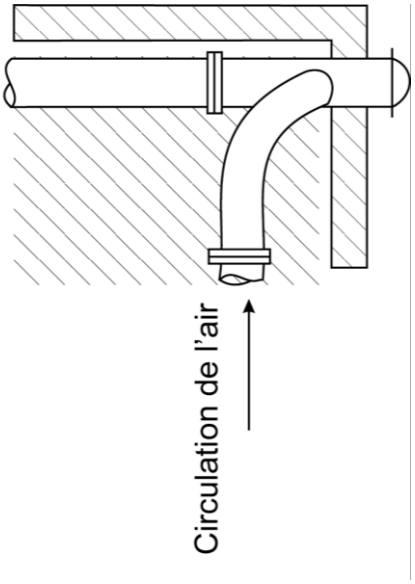

Fig. 6. Système de dérivation d'explosion

Fig. 7. Système de dérivation d'explosion installé à l'intérieur

2.3.3.3.6 Vannes guillotine à fermeture rapide

a) Actionner la vanne guillotine à fermeture rapide par le biais d'un système de détection de pression ou de détection infrarouge d'explosion dans l'équipement en amont susceptible de subir l'explosion.

b) Vérifier que le système de détection et les réactions de la vanne guillotine sont suffisamment rapides pour fermer complètement la vanne guillotine avant que le front de flamme ne l'atteigne.

c) Vérifier que la réinitialisation de la vanne guillotine est manuelle. La réinitialisation automatique n'est pas acceptable.

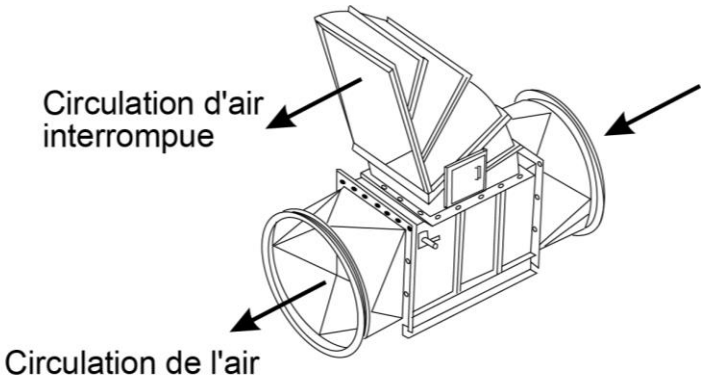

Fig. 8. Vanne guillotine à fermeture rapide

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.3.3.3.7 Vannes à double clapet

Installer un dispositif d'asservissement pour s'assurer que les deux vannes ne s'ouvrent pas simultanément.

2.3.3.3.8 Amortisseur de souffle

Il s'agit essentiellement d'un clapet anti-retour efficace pour arrêter la propagation d'explosion dans la direction opposée au débit normal. Vérifier que le dispositif est équipé d'un évent d'explosion en aval du flux normal dans le système.

2.3.3.4 Suppression

2.3.3.4.1 Lorsque la suppression d'explosion est la méthode de réduction des risques d'explosion choisie :

a) Monter les systèmes de suppression d'explosion conformément à la fiche technique 7-17, *Explosion Protection Systems.*

b) Installer l'équipement agréé FM conformément aux limites d'application répertoriées.

2.3.3.5 Confinement

2.3.3.5.1 Si le confinement des explosions est la méthode de réduction des risques d'explosion choisie, utiliser la méthode de conception de résistance aux explosions. Les équipements existants, résistants aux chocs, sont acceptables pour le confinement des explosions.

a) Une conception résistante aux explosions désigne tout équipement dont la pression de conception est de 6 barg ou plus et qui ne serait pas déformé par une explosion de poussière se produisant à une pression initiale (pré-explosion) inférieure à 0,1 barg.

b) Une conception résistante aux chocs désigne tout équipement dont la pression de conception est de 3 barg ou plus, lorsqu'il est conçu conformément à la norme ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, ou dont la limite élastique est de 6 barg ou plus, selon d'autres normes. Avec cette conception, l'équipement peut se déformer sans se rompre en cas d'explosion de poussière se produisant à une pression initiale (pré-explosion) inférieure à 0,1 barg.

c) Pour éviter d'endommager d'autres équipements connectés en amont et en aval des équipements protégés par un système de confinement d'explosion, prévoir un système d'isolement d'explosion.

2.3.3.6 Vide élevé (3.1.17)

2.3.3.6.1 Lorsqu'un vide élevé est la méthode de réduction des risques d'explosion choisie, utiliser les critères suivants :

a) Faire fonctionner les équipements de traitement des poussières à une pression sous-atmosphérique inférieure à 0,1 bar absolu.

b) Installer un dispositif d'asservissement permettant d'inerter ou d'arrêter automatiquement le processus en cas de perte de vide.

2.3.4 Contrôle des sources d'ignition

2.3.4.1 Lorsqu'un procédé ou un système présente une forte fréquence d'explosions de poussière, appliquer les méthodes suivantes :

a) Faire fonctionner l'équipement à l'origine d'étincelles ou de particules chaudes/incandescentes dans une atmosphère inerte ; OU

b) Installer un système de détection des étincelles associé à un système d'extinction des étincelles ou à une vanne guillotine à fermeture rapide ; ET

c) Situer le système d'extinction des étincelles ou la vanne guillotine à fermeture rapide en amont du premier équipement présentant un risque d'explosion ; ET

d) Lors de l'activation du système de détection des étincelles, arrêter tout équipement de collecte de poussière qui y est raccordé.

Le recours aux méthodes de contrôle des étincelles mentionnées ci-dessus n'exclut pas la nécessité de systèmes de réduction des risques d'explosion (3.1.18).

2.3.4.1.1 Les zones/équipements suivants sont considérés comme présentant une haute fréquence d'explosions de poussière :

a) menuiserie : séchoirs rotatifs, séchoirs flash, équipements de ponçage, équipements de broyage de panneaux de particules (voir la fiche technique 7-10, *Wood Processing and Woodworking Facilities*, pour connaître les exigences supplémentaires en matière de protection contre les incendies et les explosions liées à cette industrie) ;

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

b) tout équipement de broyage mécanique doté d'un équipement connecté tel qu'un cyclone en aval (à l'exception des pulvérisateurs de charbon et du broyage de produits alimentaires pour la consommation humaine qui ne sont pas considérés comme présentant une fréquence élevée d'explosions aux fins de cette recommandation) ;

c) les processus qui produisent régulièrement des étincelles ou des braises incandescentes (par exemple, en raison d'un meulage ou d'une friction) pouvant pénétrer dans un système de collecte de poussière ;

d) tout processus ou système ayant subi au moins deux explosions au cours d'une période de 10 ans.

2.3.4.2 Afin de réduire l'inflammation des nuages de poussière due à l'accumulation et à la décharge d'électricité statique, appliquer les méthodes suivantes :

a) Mettre en œuvre toutes les recommandations applicables dans la fiche technique 5-8*, Static Electricity*, pour réduire la probabilité d'inflammation.

b) Si possible, utiliser des canalisations et des gaines métalliques, correctement mises à la terre et en liaison équipotentielle, pour transférer la poussière combustible.

c) Si des canalisations ou des gaines en plastique sont utilisées pour transférer le matériau, la mise à la terre et la liaison équipotentielle sont inefficaces en raison des propriétés isolantes du plastique. Toutefois, si des composants conducteurs ou métalliques sont présents dans ces systèmes, par exemple une canalisation en plastique ou un tuyau raccordé à une canalisation métallique, ces composants conducteurs doivent être correctement mis à la terre et en liaison équipotentielle.

d) Si les matériaux sont très facilement inflammables (énergie d'inflammation minimale inférieure à 10 mJ), envisager les options suivantes pour réduire le risque d'inflammation statique :

1. Faire fonctionner tout équipement présentant un risque d'explosion dans un environnement inerte (voir 2.3.2.4) (3.1.19).

2. Faire fonctionner à une pression inférieure à 0,1 bara.

3. Eliminer le mélange inflammable en exploitant les équipements à 50 % maximum de la CME (concentration minimale d'explosion).

4. Réduire la génération ou l'accumulation de charge due à des changements de procédés, tels que la réduction du débit du matériau transféré.

5. Fournir des systèmes d'élimination ou de neutralisation d'électricité statique. Vérifier qu'ils sont solidement fixés, correctement installés et mis à la terre, maintenus propres et exempts de corps étrangers.

6. Demander à un expert d'évaluer la situation et de développer un plan d'action approprié.

2.3.4.3 Installer des séparateurs magnétiques en amont de tous les équipements de réduction granulométrique, par exemple les meules, les broyeurs, les broyeurs à marteaux ou les autres équipements en contact mécanique avec le matériau de traitement (3.1.20).

2.3.4.3.1 Des séparateurs autres que magnétiques (par exemple, séparateurs d'air, grilles, tamis épais) peuvent être utilisés si du métal non ferreux ou d'autres objets (par exemple, des pierres) peuvent pénétrer dans le flux de produit et provoquer un risque d'inflammation.

2.3.4.4 Les ventilateurs et les souffleries dans un flux d'air de poussière fugitive peuvent devenir une source d'ignition. Installer ces dispositifs conformément aux recommandations suivantes :

2.3.4.4.1 Dans les systèmes à pression négative, installer le ventilateur du côté refoulement (côté propre) du collecteur de poussière.

2.3.4.4.2 Dans les systèmes à pression positive, installer la soufflerie en amont du point d'injection de poussière.

2.3.4.4.3 Si pour des raisons de conception, le ventilateur doit se trouver dans le flux d'air sale et la concentration de poussière/flux d'air doit être supérieure à 25 % de la CME :

a) Installer les ventilateurs et les souffleries de type A ou B résistants aux étincelles conformément à la norme AMCA 99-0401-86, *Classifications for Spark Resistant Construction.*

b) Les ventilateurs et les souffleries ordinaires peuvent être utilisés dans un flux d'air de poussière à concentration illimitée si un test a montré que la poussière s'enflamme difficilement (hard-to-ignite).

2.3.4.4.4 Les ventilateurs et les souffleries ordinaires peuvent être utilisés dans un flux d'air de poussière à concentration illimitée si un test a montré que la poussière s'enflamme difficilement (hard-to-ignite).

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.3.4.4.5 Les systèmes de traitement des poussières de bois peuvent utiliser des ventilateurs ordinaires en amont des filtres à manche si un cyclone (collecteur de poussière primaire) est en amont du ventilateur.

2.3.4.4.6 Des ventilateurs et des souffleuses ordinaires peuvent être utilisés si une vanne à fermeture rapide ou un système d'extinction des étincelles agréé FM sont présents entre le ventilateur et tout équipement important en aval.

2.3.4.5 Empêcher les matériaux soumis à un échauffement spontané de devenir une source d'explosion en prenant les mesures suivantes :

a) Empêcher l'accumulation de poussière dans les gaines en maintenant une vitesse de transport suffisante.

b) Empêcher l'accumulation de poussière dans les équipements en effectuant des nettoyages fréquents.

c) Ne pas laisser l'humidité entrer en contact avec ce type de matériau ; toutefois, des sprinkleurs automatiques ou des systèmes d'extinction des étincelles peuvent être utilisés dans les gaines, si nécessaire.

d) Nettoyer les collecteurs de traitement des résidus sujets à un échauffement spontané tous les jours ou selon les besoins afin d'éviter tout risque de surchauffe et d'accumulation de poussière.

2.3.4.6 Eviter d'utiliser des entraînements mécaniques à régime ou puissance élevés, car ils peuvent provoquer une inflammation de poussière à cause de la chaleur générée par la friction ou les étincelles.

2.3.4.6.1 Utiliser les paramètres suivants pour déterminer le potentiel de conditions à risques en fonction de la vitesse tangentielle (v) du composant rotatif :

a) Lorsque $v < 1$ m/s : il n'y a pas de danger d'ignition.

b) Lorsque $1 < v < 10$ m/s : Evaluer chaque cas séparément en tenant compte des caractéristiques spécifiques du produit et du matériau telles que l'énergie minimale d'inflammation (EMI) et la taille des particules (pour chacune, la valeur la plus faible aura tendance à être plus sensible à l'ignition).

c) Lorsque $v > 10$ m/s : un risque d'ignition est toujours présent.
Remarque : pour convertir la vitesse rpm en vitesse tangentielle, utiliser $v = \text{rpm} \times 2\pi r \times 1/60$, où
v = longueur (mêmes unités que r) par seconde
r = longueur de la pièce en rotation, du centre de l'arbre à l'extrémité extérieure

2.3.4.6.2 Lorsqu'un équipement basse vitesse et haute puissance est utilisé, généralement dans les opérations de meulage ou dans les convoyeurs à vis et les mélangeurs, le risque d'échauffement non contrôlé dû à un temps de séjour excessif, les accumulations sur les paliers, les corps étrangers, etc., doit être pris en compte et protégé par l'utilisation de goupilles de cisaillement, la détection et l'alarme de surcharge, l'entretien et le nettoyage appropriés, des filtres et des séparateurs.

2.4 Cyclones et collecteurs de poussière

Outre les exigences présentées ci-dessus et dans DS 7-73, *Dust Collectors*, les exigences suivantes sont spécifiques aux cyclones et collecteurs de poussière.

2.4.1 Construction et emplacement

2.4.1.1 Pour les nouvelles installations, utiliser des collecteurs de poussière distincts pour chaque zone afin d'atténuer le risque d'explosion de poussière impliquant de nombreuses opérations. Par exemple, pour une opération de sciage de bois brut dans une zone et de ponçage de bois de construction fini dans une autre, chacune impliquant plusieurs scies et postes de ponçage dans chaque zone, deux collecteurs de poussière distincts peuvent réduire l'interruption d'activité due à un seul événement. Cette installation sera plus fiable que l'utilisation de dispositifs d'isolement d'explosion dans un système interconnecté.

2.4.2 Protection (3.1.21)

2.4.2.1 Lors de la définition de la surface d'évent d'explosion pour un collecteur de poussière de type intermédiaire (par exemple, filtres en tissu, cartouches filtrantes en papier), inclure à la fois le côté air propre et le côté air sale pour calculer le volume du collecteur.

2.4.2.2 Pour les collecteurs de poussière de type intermédiaire, placer les évents d'explosion entièrement sur le côté sale du volume du collecteur.

2.4.2.2.1 Lorsqu'il est nécessaire d'installer un évent sur le côté propre, utiliser l'équation suivante pour calculer la quantité minimale de la surface d'évent d'explosion totale qui doit être fournie sur le côté sale :

$$A_{v,sale,min} \geq (V_{sale}/V_{total})^{2/3} \times A_{v,total}$$

où :

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

$A_{v,total}$ correspond à la surface totale d'évent requise
$A_{v,sale,min}$ correspond à la surface minimale d'évent d'explosion qui doit se trouver sur le côté sale du collecteur de poussière
V_{sale} est le volume du côté sale du collecteur de poussière
V_{total} est le volume total du collecteur de poussière

2.4.2.3 Les cyclones peuvent être considérés comme équipés d'un système de décharge d'explosion adéquat sans aucun évent d'explosion supplémentaire s'ils répondent à TOUS les critères suivants :

a) la poussière en cours de traitement a un K_{st} de 80 bar m/s ou moins ; et

b) l'échappement renvoie directement dans l'atmosphère via la conduite de sortie de gaz en haut du cyclone ; et

c) le diamètre de la conduite de sortie de gaz est d'au moins 45 % du diamètre du cyclone ; et

d) l'écoulement libre des gaz n'est pas entravé par le tamisage.

1. Un « chapeau de pluie » situé au-dessus de l'orifice de sortie de gaz ne va pas à l'encontre de ces critères tant que sa distance au-dessus de la sortie de gaz n'est pas inférieure à la moitié du diamètre de la sortie de gaz (3.1.22).

2.4.2.3.1 Calculer le dimensionnement des évents d'explosion pour toutes les autres situations (K_{st} plus élevé, sortie de gaz plus petite, sorties de gaz avec une conduite supérieure à L/D = 1, conduite avec un coude, etc.) à l'aide du logiciel DustCalc de FM Global.

2.4.3 Contrôle des sources d'ignition

2.4.3.1 Les filtres à manche n'ont pas besoin de manches « conductrices » spéciales pour dissiper les charges électriques statiques.

a) Lorsque ces manches « conductrices » spéciales sont installées, lancer un programme d'inspection et d'entretien pour vous assurer que les brides utilisées pour la mise à la terre des manches sont toujours bien fixées à la structure du collecteur de poussière.

b) Quel que soit le type de manche utilisé, prévoir une connexion de mise à la terre fiable pour les enveloppes des manches (supports métalliques) (3.1.23).

2.4.4 Collecteurs de poussière ouverts (3.1.24)

Les collecteurs de poussière ouverts sont généralement situés dans la même pièce que l'équipement auquel ils sont rattachés.

2.4.4.1 Des collecteurs de poussière ouverts peuvent être utilisés s'ils répondent à tous les critères suivants :

a) Ils ne sont pas utilisés avec des équipements produisant des étincelles, des particules chaudes ou incandescentes, tels que des meuleuses métalliques, des ponceuses, des raboteuses ou des procédés de travail à chaud.

b) Ils ne sont pas utilisés pour les poussières métalliques.

c) La salle dans laquelle ils sont utilisés est équipée de sprinkleurs automatiques conçus pour protéger l'activité principale.

d) Chaque collecteur de poussière a une capacité de traitement d'air maximale de 140 m^3/min.

e) Le collecteur de poussière est utilisé de manière irrégulière ou occasionnelle et non avec un processus de production continu ou fréquent.

f) Le système de filtre n'est pas secoué ni pulsé sous pression pour déloger la poussière pendant le fonctionnement.

g) L'énergie minimale d'inflammation (EMI) des matériaux collectés est supérieure à 500 mJ.

h) La poussière collectée est éliminée tous les jours ou en fonction d'une fréquence suffisante pour limiter la poussière collectée à moins de 9 kg.

i) La poussière fugitive est bien contrôlée et limitée à 2 mm d'épaisseur au maximum et à moins de 3 m du système.

j) Les collecteurs de poussière multiples dans la même pièce sont séparés les uns des autres par une distance minimale de 6 m.

k) Les collecteurs de poussière sont séparés des stocks de matériaux combustibles de tout type par une distance minimale d'au moins 6 m.

l) Le système de filtre doit être situé à une distance minimale de 11 m de toute flamme nue ou surface chaude capable d'enflammer un nuage de poussière du matériau qu'il contient.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

m) Les ventilateurs ou les souffleries situés dans le flux d'air sale sont installés conformément à la Section 2.3.4.4

n) Aucun équipement électrique standard n'est présent à moins de 3 m du collecteur.

o) Le ventilateur ou le moteur de soufflerie, non situé dans le flux d'air sale, est conforme à la Classe II, division 2 ou Classe III (zone 22), selon le cas.

2.5 Gaines de raccordement (3.1.25)

Les gaines reliant des pièces d'un processus ou d'un collecteur de poussière peuvent favoriser le passage d'une explosion initiale et peuvent contenir suffisamment de poussière pour propager une explosion. Cette section ne s'applique pas aux gaines d'air propres en aval des séparateurs air-matériau ni au transfert pneumatique de matériaux de procédé à des taux bien supérieurs à ceux de la CME (transfert de phase dense).

2.5.1 Activité

2.5.1.1 Contrôler la concentration de poussière dans un collecteur de poussière fugitive pour empêcher l'apparition d'une atmosphère continue et explosive dans la gaine à l'aide des méthodes suivantes :

a) Lorsque le taux de génération de poussière est variable, maintenir la poussière en dessous d'une concentration moyenne de 25 % de la concentration minimale d'explosion (CME). Limiter toujours les taux d'émission de poussière de pointe au-dessus de 100 % de la CME pendant seulement quelques secondes à tout moment.

b) Lorsque le taux d'émission de poussière est constant sans pics importants, maintenir la concentration de poussière à 90 % de la CME au maximum.

2.5.1.2 Lorsque la concentration de poussière dans une gaine dépasse régulièrement la CME, installer une protection contre le risque d'explosion supplémentaire dans la gaine (2.5.2.3).

2.5.1.3 Dans les gaines transportant des poussières combustibles, maintenir une vitesse de l'air supérieure à la vitesse de dépôt du matériau transporté.

Remarque : la vitesse des poussières industrielles types (par exemple, la poussière de scie) peut se situer entre 1 070 et 1 220 m/min. Si la vitesse de décantation d'un matériau est inconnue, consulter la fiche technique 7-78, *Industrial Exhaust Systems*, pour connaître les recommandations relatives à la vitesse de transport.

2.5.2 Protection

2.5.2.1 Sur les gaines contenant de la poussière combustible à des concentrations toujours inférieures à celles de la CME et qui transportent la poussière à des vitesses rendant son accumulation improbable, installer les dispositifs d'isolement d'explosion suivants :

a) Sur les raccordements à des équipements importants.

b) Sur les gaines qui retournent vers des bâtiments contenant des équipements onéreux ou des processus importants qui pourraient être endommagés ou contenir de la poussière fugitive.

Si la valeur de la CME n'est pas disponible, une estimation de 30 grammes/m^3 peut être utilisée.

2.5.2.2 Disposer les gaines contenant des poussières combustibles à des concentrations dépassant toujours ou fréquemment la CME ou transportant la poussière à des vitesses susceptibles de provoquer l'accumulation de poussière, de la façon suivante :

a) Canaliser les gaines vers l'extérieur.

b) Installer un dispositif d'isolement d'explosion à chaque point de connexion entre la gaine et un équipement.

c) Protéger la gaine contre une explosion se propageant dans le mélange explosif en utilisant l'une des méthodes suivantes :

1. Installer des évents pour la gaine conformément à la section 2.5.2.3.
2. Concevoir la gaine de sorte qu'elle ne résiste pas à des pressions aussi faibles que possible, mais pas plus de 0,3 barg.

2.5.2.2.1 Lorsque la gaine contenant de la poussière au-dessus de la CME ou transportée à une vitesse inférieure à la vitesse d'accumulation de la poussière doit être installée à l'intérieur, prendre les précautions suivantes :

a) Installer un dispositif d'isolement d'explosion à chaque point de connexion entre la gaine et un équipement ; ET

b) Concevoir la gaine pour contenir l'explosion (résistante aux chocs) ; OU

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

c) Equiper la gaine d'un évent d'explosion conformément à la section 2.5.2.3 en canalisant toutefois les évents vers l'extérieur.

2.5.2.3 Installer un évent d'explosion sur toute la longueur d'une gaine, en fonction des éléments suivants :

a) Calculer la distance maximale entre les évents d'explosion (L_{max}) de la façon suivante :

$L_{max} = 7{,}5\ D^{1/3}$, D et L en mètres, OU
$L_{max} = 16{,}5\ D^{1/3}$, D et L en pieds.

Pour les gaines non circulaires, calculer le diamètre effectif de l'équation ci-dessus avec :

$$D_{eff} = \sqrt{\frac{4A_d}{\pi}}$$

où : A_d = section transversale de la gaine (m^2)

b) Prévoir une surface d'évent à chaque emplacement au moins égale à la section transversale de la gaine.

c) Prévoir un évent de dimensionnement normal à une distance maximale équivalente à 2 diamètres, du point de raccordement de la gaine à un élément de l'équipement.

d) Régler les pressions de décharge de l'évent d'explosion (P_{stat}) aussi basses que possible, avec une valeur maximale de 0,1 barg.

e) Prévoir un évent d'explosion au niveau de tous les coudes et brides d'extrémité (voir figure 10).

f) Lorsqu'ils sont situés à l'intérieur, acheminer les produits explosifs vers l'extérieur via une gaine courte (L/D inférieur ou égal à 1).

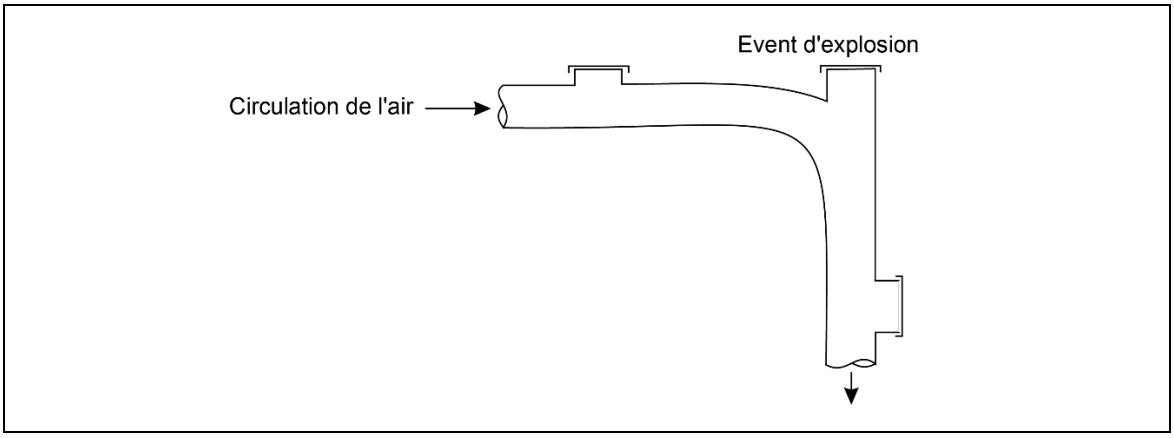

Fig. 9. Exemple de gaine avec évent d'explosion au niveau d'un coude

2.6 Silos (3.1.26)

2.6.1 Protection

2.6.1.1 Lorsqu'un silo de stockage est équipé d'un collecteur de poussière (autre qu'une simple chaussette d'évent) sur l'évent de respiration, installer une protection contre les explosions de la façon suivante :

a) Considérer la combinaison collecteur/silo comme une seule unité si l'une des conditions suivantes existe :

1. La gaine reliant le silo au collecteur de poussière présente un rapport L/D inférieur à 2 ; OU

2. La section transversale de la gaine de raccordement est au moins aussi grande que la surface d'évent nécessaire pour protéger seulement le volume du collecteur de poussière.

b) Installer un évent d'explosion pour la combinaison silo/collecteur en fonction du volume total des deux unités.

c) Si possible, installer une partie de l'évent d'explosion sur le collecteur de poussière, afin de ne pas dépasser la section transversale de la gaine de raccordement, même si tous les évents d'explosion se trouvent sur le silo.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.6.1.2 Lorsque la combinaison collecteur de poussière/silo ne répond pas aux critères d'une seule unité :

a) Installer un évent d'explosion pour chaque composant en fonction de son volume individuel.

b) Prévoir un évent d'explosion pour la gaine de raccordement conformément à la section 2.5.2.3.

2.6.1.3 Vérifier que la zone de l'évent d'explosion prévue pour un silo ne dépasse pas sa section ($A_{x\text{-}sect}$). Tout évent d'explosion supérieur à cette valeur ne permettra pas de diminuer la pression d'explosion.

2.6.1.3.1 Si les calculs montrent que la surface d'évent nécessaire est supérieure à la section transversale, utiliser un système de suppression d'explosion ou renforcer le silo afin qu'il puisse résister à la valeur de P_{red} correspondant à $A_v = A_{x\text{-}sect}$.

2.6.2 Equipements et procédés

2.6.2.1 Ne pas utiliser de canons à air pour briser les matières responsables de la formation d'une arche dans les silos contenant des matériaux combustibles en cas de présence de particules inférieures à environ 500 microns dans le matériau.

2.7 Elévateurs à godets (3.1.27)

2.7.1 Construction et emplacement

2.7.1.1 Les élévateurs à godets fermés qui manipulent des poussières combustibles présentent un risque d'explosion et doivent être installés en respectant les points suivants :

a) Placer les élévateurs à godets à l'extérieur.

b) Placer les élévateurs à godets intérieurs à côté d'un mur extérieur de manière à ce que les évents d'explosion puissent être dirigés vers l'extérieur via des conduits courts.

c) Equiper l'élévateur à godets intérieur d'un système de suppression d'explosion ou d'évents d'explosion avec dispositifs de décharge d'explosion sans flamme agréés FM.

2.7.1.2 Lorsque des revêtements sont ajoutés à l'intérieur d'un élévateur à godets pour résoudre les problèmes d'érosion localisés, utiliser des matériaux incombustibles.

2.7.2 Protection

2.7.2.1 Pour les élévateurs à godets fermés qui manipulent des poussières avec un K_{st} inférieur à 200, installer un évent d'explosion en fonction des éléments suivants :

A. Placer les évents d'explosion le long de la hauteur de l'élévateur à godets, avec un espacement centre à centre conforme au tableau 2, en fonction du type d'élévateur, du Kst et du Pred de l'enceinte.

B. Acheminer l'évent d'explosion des élévateurs intérieurs vers l'extérieur par des conduits droits courts (moins de 1 m) ou des dispositifs arrête-flamme agréés FM.

C. Installer les évents d'explosion sur les côtés ou sur la façade de l'enveloppe.

D. Installer l'évent d'explosion dans la section supérieure équivalent à la section transversale de la jambe de l'équipement.

E. Installer l'évent inférieur aussi près que possible de la trémie (partie inférieure du système) de l'élévateur à godets, sans dépasser l'espacement spécifié dans le tableau 2.

F. Dimensionner l'évent d'explosion équivalent à la section transversale de la jambe de l'équipement. La surface d'évent peut être constituée comme des évents séparés de demi-taille, situés de part et d'autre de l'enceinte.

G. Installer un évent d'explosion au sommet et à la base des conceptions à double enveloppe.

H. Régler la pression de décharge de l'évent d'explosion (P_{stat}) à 0,1 barg ou moins et construire des évents de matériau léger.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Tableau 2. Event d'explosion de l'élévateur à godets

Type d'élévateur à godets	*Kst (bar.m/s)*	*Espacement, m*		
		Pred ≤0,2 bar	0,2 < Pred ≤0,5 bar	< 0,5 Pred ≤1,0 bar
Double enveloppe	< 100	6	Aucun requis	Aucun requis
	100-150	3	10	19
	151-175	N/A	4	8
	176-200	N/A	3	4
Simple enveloppe	< 100	N/A	Aucun requis	Aucun requis
	100-150	N/A	7	14
	151-175	N/A	4	5
	176-200	N/A	3	4

Remarque : N/A = Non Autorisé
Sauf conception spécifique, supposer que Pred = 0,2 bar.

2.7.2.2 Lorsque le sommet de l'élévateur ou la trémie alimente des équipements ou des zones présentant un risque d'explosion, utiliser un système de blocage des explosions à l'aide de dispositifs de suppression d'explosion ou d'autres types de barrières physiques, comme une écluse rotative entre la tête ou la trémie et les zones ou équipements adjacents.

2.7.2.3 Protéger les élévateurs à godets à l'aide de sprinkleurs automatiques, de la façon suivante :

a) En haut du puits de l'élévateur à godets, si l'enceinte est incombustible. Si l'enceinte est constituée de matériaux combustibles, installer une protection sprinkleur supplémentaire le long du puits de l'élévateur (c'est-à-dire, le considérer comme un puits avec des côtés combustibles), espacés de 3 à 3,7 m.

b) Concevoir la protection sprinkleur pour fournir un débit minimum de 95 L/min au sprinkleur le plus éloigné.

c) Si les sprinkleurs sont situés dans des zones sujettes au gel, vérifier que l'installation est adaptée aux températures attendues.

2.7.3 Contrôle des sources d'ignition

2.7.3.1 Pour éviter les explosions de l'élévateur à godets :

a) Equiper les élévateurs entraînés par courroie d'un dispositif mécanique ou électromécanique pour couper l'alimentation du moteur d'entraînement et déclencher une alarme si la bande ralentit de plus de 20 %.

b) Ne pas placer ni exposer les paliers dans l'enveloppe de l'élévateur.

c) Installer des asservissements d'alignement afin de garantir l'arrêt du convoyeur en cas de mauvais alignement.

2.7.3.2 Utiliser les mesures préventives suivantes lorsque cela est possible :

a) Utiliser des paliers antifriction sur tous les élévateurs.

b) Assurer l'entretien de tous les paliers conformément aux recommandations du fabricant et les maintenir exempts de poussières, produits et résidus de matériau lubrifiant.

c) Limiter l'utilisation de revêtements combustibles (par exemple, plastique, caoutchouc, bois) aux points d'impact, sur les surfaces d'usure et sur les trémies raccordées.

d) Installer des courroies d'entraînement (par exemple, courroies trapézoïdales, courroies de distribution et courroies plates) électriquement conductrices à 1 mégaohm ou moins, et résistantes au feu et à l'huile.

e) Concevoir la transmission avec un facteur d'entretien de 1,5 pour caler la transmission sans patiner.

f) Installer des courroies dans les élévateurs dont la résistivité en surface est inférieure à 100 mégaohms par carré et qui sont résistantes au feu et à l'huile (aucune résistance à l'huile n'est nécessaire dans les moulins à farine).

g) Pour les élévateurs situés à l'intérieur d'un bâtiment dont la vitesse de la bande dépasse les 2,6 m/s, il est possible de surveiller la température des paliers ou de détecter les vibrations.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.8 Séchoirs par atomisation

2.8.1 Protection

2.8.1.1 Les séchoirs par atomisation fonctionnent souvent avec une grande partie du séchoir à un niveau inférieur à la CME. Installer une protection contre l'explosion avec les méthodes suivantes :

a) Obtenir des calculs précis pour confirmer que la concentration moyenne de poussière dans la partie cylindrique est inférieure à la CME du matériau traité. Sur cette base, seule la section conique au bas du séchoir et tout équipement en aval (par exemple, cyclones, collecteurs de poussière de type filtre à manche) a un mélange explosif.

b) Utiliser le logiciel DustCalc de FM Global pour déterminer la surface d'évent d'explosion requise lorsqu'un nuage combustible n'existe que dans une fraction du volume total de l'équipement.

c) Répartir uniformément les évents d'explosion sur toute la surface du séchoir bien que des évents à proximité de la section conique soient recommandés.

2.8.1.2 Pour la protection incendie, voir DS 6-9, *Industrial Ovens and Dryers,* dans la section sur les séchoirs par atomisation de traitement de la poussière.

2.9 Traitement des grains crus en vrac

2.9.1 Equipements et procédés

2.9.1.1 Le traitement des grains en vrac présente un risque d'explosion de poussière qui peut être contrôlé ou éliminé si les méthodes suivantes sont appliquées :

a) Eliminer la poussière par brouillard d'huile (ou autre liquide) pour réduire le risque d'explosion de poussière dans les locaux ou bâtiments et équipements de traitement des grains bruts en vrac.

1. Le risque d'explosion peut être considéré comme éliminé dans les locaux si le brouillard d'huile peut réduire les émissions de poussière fugitive à un niveau suffisamment bas pour permettre un entretien normal afin de maintenir les accumulations en dessous des niveaux à risques. (Voir 2.2.4.2 pour déterminer les niveaux présentant un risque d'accumulation de poussière).

2. Le risque d'explosion de l'équipement peut être considéré comme éliminé si le brouillard d'huile peut empêcher la poussière de s'accumuler à l'intérieur de l'équipement. Confirmer cette situation en observant visuellement l'équipement pendant qu'il fonctionne (c'est-à-dire en ouvrant les orifices d'accès ou d'inspection). L'élimination complète de la poussière fugitive dans l'air à l'intérieur de l'équipement de traitement ne peut être effectuée qu'en appliquant très soigneusement le brouillard sur tous les matériaux traités.

b) Appliquer l'huile ou tout autre produit d'élimination liquide sur le grain à un point du processus qui inclut des turbulences importantes, par exemple, au niveau d'une goulotte de décharge, pour s'assurer que le produit d'élimination est bien mélangé avec le grain.

1. Ne pas appliquer de produit d'élimination dans les élévateurs à godets, car cela pourrait entraîner le patinage des bandes en caoutchouc et un risque d'échauffement par friction.

c) Développer un programme d'entretien et d'inspection pour garantir le bon fonctionnement du système d'élimination de poussière par pulvérisation pour tous les systèmes de traitement des grains.

d) Installer un dispositif d'asservissement pour arrêter le traitement des grains en cas de dysfonctionnement du système de pulvérisation lorsque ce système est le seul moyen de protection contre l'explosion.

2.10 Fabrication additive (impression 3D) (3.1.29)

La plupart des procédés de fabrication additive utilisent des poudres très fines de matériaux tels que le métal, le plastique, la céramique ou le verre. Les poudres fines peuvent être facilement dispersées dans l'air et les poudres métalliques combustibles peuvent avoir une énergie d'inflammation faible. L'équipement est souvent coûteux et nécessite des utilités dédiées. Il est donc éventuellement nécessaire de l'installer dans des zones, des locaux ou des bâtiments dédiés. Les directives suivantes sont fournies pour les processus AM utilisant des poussières combustibles.

2.10.1 Appliquer des mesures de sécurité de base relatives au traitement et au stockage des poussières combustibles.

2.10.1.1 En particulier, mettre à la terre et en liaison équipotentielle tous les équipements de traitement des poudres combustibles fines, car elles peuvent être particulièrement sensibles à l'inflammation statique.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

2.10.2 Installer l'équipement de fabrication additive dans des zones séparées des sites de fabrication ou de stockage par un espace dégagé, des murs ou dans un bâtiment séparé.

2.10.3 Stocker, manipuler et transporter les poudres dans des conteneurs conducteurs fermés.

2.10.4 Lorsque des poudres dont l'EMI est inférieure à 10 mJ sont stockées ou manipulées dans des conteneurs non conducteurs, utiliser des conteneurs antistatiques. Les matériaux considérés comme antistatiques présentent une résistance de surface comprise entre 10^5 et 10^9 ohms/carré (NFPA 77).

2.10.5 Lorsque des poudres sont manipulées ou transférées, contrôler leur libération involontaire, la formation de nuages en suspension et maintenir un niveau élevé de propreté.

2.10.6 Lorsque des systèmes de tuyauterie sont utilisés pour transférer les poudres, contrôler l'accumulation d'électricité statique avec une mise à la terre et une liaison équipotentielle présentant une résistance maximale de 1 mégaohm.

2.10.7 Si un équipement de fabrication d'additifs est utilisé dans une atmosphère inerte, procéder de la façon suivante :

A. Utiliser à un niveau inférieur de la CLO de la poudre, mesurée lorsque le gaz est en cours d'utilisation.

1. Lorsque la CLO est supérieure ou égale à 5 %, maintenir une marge de sécurité d'au moins 2 % en volume en dessous de la CLO.

2. Lorsque la CLO est inférieure à 5 %, faire fonctionner l'équipement à 60 % de la CLO au maximum.

B. Surveiller la concentration en gaz inerte ou en oxygène.

C. Placer un dispositif d'asservissement sur le système pour empêcher le démarrage sans niveau d'inertage acceptable.

D. Arrêter le système lorsque les niveaux d'oxygène ou de gaz inerte sans danger sont dépassés.

2.10.8 Considérer le produit fini (récolte) de manière à réduire ou contrôler l'émission des poudres entraînées, de la façon suivante :

A. Vérifier que les opérateurs sont correctement reliés à la terre avant d'ouvrir l'enceinte d'impression.

B. Nettoyer l'excédent de poussière du produit dans une enceinte ou une hotte correctement aérée, à l'aide d'un système de collecte de poussière adapté.

2.10.9 Vérifier que les aspirateurs portables utilisés pour le nettoyage de l'excédent de poudre sont agréés pour une utilisation dans une zone de classe II, de division 2 ou de zone 22. Vérifier également que les composants situés dans des enceintes contenant de la poussière combustible collectée sont de classe II, division 1 ou zone 20.

2.10.9.1 Utiliser des aspirateurs portables agréés par une agence tierce fiable.

2.10.10 Pour les zones de fabrication et de stockage présentant une construction ou une activité combustible, installer une protection sprinkleur automatique conçue pour une activité d'usinage du métal, HC2.

2.10.11 Lorsque des poussières métalliques combustibles sont manipulées ou stockées, installer des extincteurs portables de classe D et former le personnel à les utiliser correctement.

2.11 Risques d'incendie de poussière

En dehors du risque d'explosion traité par ce document, les poussières combustibles peuvent présenter un risque d'incendie qui doit être contrôlé. Les fiches techniques suivantes couvrent la protection et la prévention des incendies de poussières dans divers équipements ou processus :

a) A l'intérieur des séchoirs par atomisation : Fiche technique 6-9, *Industrial Ovens and Dryers*

b) Travail du bois et ateliers de travail du bois : Fiche technique 7-10, *Wood Processing and Woodworking Facilities*

c) Collecteurs de poussière : Fiche technique 7-73, *Dust Collectors and Collection Systems*

d) Installations de traitement des grains : Fiche technique 7-75*, Grain Storage and Milling*

e) Gaines : Fiche technique 7-78, *Industrial Exhaust Systems*

f) Stockage de la poussière de bois : Fiche technique 8-27, *Storage of Wood Chips*

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

3.0 RECOMMANDATIONS

3.1 Commentaires et assistance technique

3.1.1 Y a-t-il un problème de tenue des locaux ? (2.2.4.2)

La règle fondamentale est que toute accumulation de poussière à l'extérieur d'un équipement présente un risque d'explosion secondaire et doit être éliminée de même que doit être éliminée la source de rejet. Prévoir une construction anti-explosion dans les zones sujettes à des émissions incontrôlables de poussière.

En règle générale, 2 mm de poussière doit engendrer un nettoyage. (Cela suppose de la poussière de bois avec une densité d'environ 580 kg/m^3). Cette épaisseur est équivalente à celle d'une pièce de monnaie américaine (quarter).

Lorsque des poussières de densité différente sont utilisées, l'épaisseur de la masse équivalente de 2 mm de poussière de bois est inversement proportionnelle à leur densité. Par exemple, pour une poussière d'une densité d'environ 950 kg/m^3, une couche d'environ 1 mm d'épaisseur est équivalente.

Epaisseur équivalente = 2 mm x (580 kg/m^3 /950 kg/m^3) ou 1 mm

Toute accumulation de poussière dans une petite pièce (19 m^2) présente un risque d'explosion secondaire important. Dans une grande pièce, par exemple 1 860 m^2, une zone de 19 m^2 recouverte de poussière présenterait un risque moins important.

Pour des raisons pratiques, certaines accumulations de poussière dans de petites parties de grandes zones sans construction anti-explosion peuvent être considérées comme tolérables avec un nettoyage fréquent et des mesures pour éliminer la source de poussière. Une limite « tolérable » est 5 % de la surface avec 2 mm de poussière pouvant être projetée en suspension. Dans tout bâtiment de construction ordinaire, toute zone d'accumulation de poussière dépassant environ 93 m^2 est considérée comme inacceptable.

Toute poussière au-dessus du niveau du sol dans les solives, les poutres, les parties supérieures d'équipement, etc. doit être considérée comme capable d'être projetée en suspension. La poussière qui s'est agglomérée progressivement ou à cause de la chaleur, de l'humidité, etc. ne doit pas être considérée comme capable d'être projetée en suspension, mais peut être le signe d'un problème de tenue des locaux courant ou d'une source d'émission non contrôlée. La poussière sur le sol peut être suspendue, mais représente un risque moins important que les accumulations en hauteur.

Faire preuve de vigilance avec la poussière qui adhère aux murs, car elle se détache facilement. Faire également attention aux surfaces protubérantes comme les éclairages qui représentent des zones potentielles d'accumulation de poussière.

La surface disponible pour les dépôts de poussière sur les poutrelles en treillis ou les poutres en acier peut être estimée à environ 5 % de la superficie au sol. Cependant, certaines poutres en acier peuvent avoir une surface équivalente à 10 % de la superficie au sol, par exemple lorsque les portées entre les colonnes sont plus longues que la moyenne pour un espace donné ou lorsqu'une grande différence d'élévation de bâtiment nécessite une structure de toit plus solide en raison des enneigements anticipés.

Pour référence, les informations suivantes représentent des données types de densité de poussière en vrac.

Tableau 3. Densité de poussière en vrac type

Matériau	*lb/pi^3*	*kg/m^3*
Charbon, bitumineux, inférieur à 420 microns	50	800
Farine, blé	35-40	560-640
Amidon	25-50	400-800
Soufre, en poudre	50-60	800-960
Farine de bois	16-36	260-580
Source : Annexe D, Référence 15		

3.1.2 Déplacement des risques d'explosion à l'extérieur (2.3.1.1)

Une objection fréquente à l'installation d'équipements de traitement de la poussière à l'extérieur est que de la condensation se forme sur les parois intérieures de l'équipement par temps froid et de l'humidité s'introduit dans le flux de poussière. L'humidité peut être un problème si elle provoque une agglomération de particules ou un produit non conforme aux spécifications. Cela peut représenter un risque avec certains matériaux soumis à un échauffement spontané. L'humidité peut être éliminée en isolant l'équipement de traitement de la poussière. Toutefois, les évents d'explosion doivent se déployer correctement sans être affectés par le couvercle isolant. Des évents d'explosion préfabriqués de type membrane de rupture sont disponibles et possèdent une âme isolante en mousse pour éviter la condensation de se former à l'intérieur de l'évent.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Il n'est pas nécessaire d'appliquer une isolation supplémentaire sur un tel évent, ce qui évite d'entraver son déploiement.

3.1.3 Inertage (flegmatisation) (2.3.2.3)

Les poussières combustibles et incombustibles doivent être intimement mélangées pour créer un produit véritablement sûr et non explosif. En général, une poussière inerte comprise entre 50 et 75 % du poids total est nécessaire.

Les carbonates, les phosphates et les sels sont parfois utilisés pour l'inertage. Dans l'industrie du charbon, la poussière de roche est utilisée parce qu'elle est en quantité abondante. Malheureusement, aucune corrélation mathématique ne peut prédire la concentration de poudre inerte requise. Tous les mélanges doivent être testés pour déterminer leur inertie.

3.1.4 Calculs des effets d'une explosion avec le logiciel DustCalc de FM Global (2.3.3.1)

De nombreuses recommandations suggèrent l'utilisation du logiciel DustCalc de FM Global pour tout calcul impliquant la prévision des pressions d'explosion en fonction des spécificités d'une situation donnée. Il s'agit d'un système expert développé par FM Global, qui prend en compte les variables répertoriées ci-dessous pour calculer les différents effets d'une explosion. Les modèles mathématiques sont basés sur des années de recherche de FM Global. D'autres modèles sont basés sur des explosions de poussière. Certaines données ont été partagées avec la National Fire Protection Association et ont été adoptées en partie dans NFPA 68 à partir de l'édition 2002. Pour profiter pleinement des méthodes FM Global, le logiciel DustCalc doit être utilisé.

Les variables d'un équipement qui auront un impact sur les effets d'une explosion sont les suivantes :

- Volume de l'équipement (V)
- Constante d'explosivité de la poussière (K_{st}) et pression maximale d'explosion sans évents (P_{max})
- Surface d'évent d'explosion (A_v)
- Pression d'ouverture de l'évent (P_{stat})
- Masse et orientation de l'évent d'explosion réalisé avec des panneaux
- Longueur de la gaine de l'évent d'explosion (L_d) et de la surface d'évent (A_d), le cas échéant
- Fraction du volume de l'équipement contenant un mélange explosif
- Pression de l'équipement avant explosion (P_o)

Cette fiche technique n'inclut pas d'équations pour le dimensionnement des évents d'explosion ni de résultats de test de la poussière pour caractériser les matériaux précédemment testés. Premièrement, les corrélations mathématiques développées par FM Global pour prévoir le résultat des explosions sont complexes et difficiles à utiliser avec seulement une calculatrice. Dans un tel cas, des erreurs de calcul pourraient facilement se produire. Les données génériques peuvent être utiles pour l'évaluation préliminaire des systèmes d'évent existants, mais les données relatives à la poussière spécifique traitée peuvent être différentes et seules des données de test spécifiquement développées doivent être utilisées dans la conception.

Le logiciel DustCalc est disponible dans tous les bureaux FM Global du monde entier, mais il est limité au personnel familier avec sa conception et son utilisation. Seul un personnel formé peut garantir que les résultats sont développés en tenant compte de tous les facteurs importants dans la conception.

Une description détaillée des travaux analytiques et expérimentaux à la base de la méthodologie de FM Global a été publiée dans un article d'un numéro spécial du Journal of Loss Prevention in the Process Industries (Printemps 1996) consacré aux explosions de poussière. Consulter l'Annexe C pour une référence détaillée à cet article.

FM Global n'a pas adopté les méthodes de calcul allemandes de la VDI (Verein Deutscher Ingeniure - Société des ingénieurs allemands) (VDI 3673). Etant donné que la plupart des données utilisées par la VDI ont été utilisées pour développer les directives de FM Global, les conclusions de DustCalc et de la VDI sont souvent similaires. Toutefois, en raison des améliorations apportées aux méthodes de la VDI par FM Global, en plus des autres outils de calcul développés ou améliorés par FM Global, le logiciel DustCalc élargit les capacités établies par la VDI.

Pour la version 2002 de NFPA 68, FM Global a effectué une soumission et le comité de la National Fire Protection Association a accepté une grande partie des équations et des méthodes FM Global. La mise en œuvre s'effectue par le biais de nombreuses équations et de nomogrammes. L'édition 2007 conserve une grande partie des mêmes méthodes, avec quelques ajustements supplémentaires.

L'autre différence majeure avec NFPA 68-2007 est le passage de directive à norme. Le texte peut désormais être adopté comme étant exécutoire par les autorités locales compétentes. En tant que directive, aucune autorité compétente n'était en mesure d'imposer ses exigences.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Le logiciel DustCalc peut également fournir des solutions basées sur les méthodes NFPA ou VDI et indiquer les différences avec la méthode de FM Global en expliquant souvent les raisons de ces différences.

3.1.5 Système d'évent avec dispositif arrête-flamme (2.3.3.1.2)

Un système d'évent avec dispositif arrête-flamme (tube de décharge, tuyau de décharge) (Fig. 10) est similaire à un arrête-flammes monté sur un évent d'explosion de type disque de rupture. Il s'agit également d'un « évent d'explosion avec arrête-flamme » ou d'un « dispositif arrête-flamme et de rétention des particules » (National Fire Protection Association). En raison du composant arrête-flamme, la surface d'évent effective est réduite par rapport à un évent ouvert.

Lors de l'utilisation de systèmes d'évent avec dispositif arrête-flamme, plusieurs facteurs doivent être pris en compte : Kst de la poussière, Pmax et concentration de poussière (c_{st}) où ils sont mesurés, type de poussière, facteur d'efficacité (η_{total}) et volume protégé maximal (VMP).

Kst et Pmax (ST-1, 2) sont les seuls facteurs utilisés pour déterminer la surface d'évent de l'équipement protégé.

Le type de poussière (non fondue, fondue ou fibreuse) a un effet sur le facteur d'efficacité du système d'évent avec dispositif arrête-flamme. Il n'existe actuellement aucun appareil agréé FM pour une utilisation avec des poussières métalliques.

Le facteur d'efficacité (η_{total}) est la fraction numérique (0,99 ou moins) représentant la valeur effective de la surface d'évent après avoir pris en compte l'impact des composants arrête-flamme du dispositif. Dans les listes du *guide des produits agrées FM*, il est principalement représenté par la « surface d'évent effective ». Dans les normes EN, il est signalé comme « Efficiency (E_f) ». La méthodologie de calcul de l'efficacité est différente de celle utilisée dans les tests d'homologation FM.

La surface d'évent effective (EVA) est la surface d'évent utilisable après avoir pris en compte le facteur d'efficacité. L'EVA ne peut être déterminée qu'en effectuant des tests.

Le volume maximum protégé (MPV) est limité par la charge de la poussière sur le dispositif, $m''_{st,max}$ et la charge de la poussière par surface d'évent nominale (g/cm²). Cette charge est directement liée à la concentration nominale de poussière utilisée dans les tests d'homologation (g/m³). Il s'agit simplement de deux façons différentes de représenter la quantité de poussière pénétrant dans le système d'évent avec arrête-flamme.

La masse de poussière envoyée au système d'évent avec arrête-flamme est liée à la concentration de poussière et au volume de l'équipement de test (ou protégé).

Si l'équipement contient une quantité supérieure de poussière, cela a un impact sur la matrice de décharge, ce qui réduit l'efficacité. Si la charge est suffisamment élevée, cela peut entraîner la défaillance du système d'évent avec arrête-flamme. Le volume maximum protégé (VMP) est basé sur la charge de poussière utilisée lors du test d'homologation.

Pour les applications réelles, le chargement de conception est basé sur la concentration (c_{st}) de la poussière utilisée pour déterminer le dimensionnement de l'évent. La c_{st} correspond à la concentration déterminée par un test, au cours duquel Kst et Pmax se produisent. Dans la pratique, il peut être nécessaire d'ajuster le VMP si la c_{st} est différente de la charge de poussière utilisée pour le test. Le facteur d'ajustement est :

$V_{max2} = V_{max1} (c_{st1} / c_{st2})$

où :

V_{max1} = correspond au VMP répertorié.

V_{max2} = est le volume corrigé pour c_{st}.

c_{st1} = est la concentration utilisée dans le test d'homologation.

c_{st2} = est la concentration de la poussière de conception déterminée par les tests.

Pour choisir un système d'évent avec arrête-flamme adéquat, calculer la surface d'évent requise pour l'application, puis utiliser la surface d'évent effective dans la liste du *guide des produits agréés FM* pour sélectionner le dispositif susceptible de fournir au minimum la surface d'évent requise. Cela peut nécessiter un ou plusieurs dispositifs.

En outre, les dispositifs sélectionnés ne doivent pas dépasser le VMP. Lorsque plusieurs dispositifs sont utilisés pour fournir l'évent requis, le VMP de chaque dispositif peut être ajouté pour déterminer le VMP total. Par exemple, si deux dispositifs dotés chacun d'un VMP de 3,1 m³ sont utilisés, le volume de l'équipement à protéger est limité à 6,2 m³.

Lorsque l'explosion est évacuée via le système d'évent avec arrête-flamme, toute poussière brûlée ou non brûlée est conservée, les gaz de combustion sont refroidis et aucune trace de flamme ne sort du tuyau de décharge. En outre, les effets de l'explosion du champ proche (pression) en dehors de l'évent sont considérablement réduits. Ainsi, le système d'évent avec arrête-flamme peut effectuer l'évacuation en toute

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

sécurité d'une explosion à l'intérieur, sans craindre d'enflammer les combustibles proches ou de créer une pression dévastatrice dans la pièce. Toutefois, les gaz de sortie sont chauds (environ 100 °C).

L'effet de pression réel des gaz libérés peut raisonnablement être estimé en fonction d'une température de sortie de gaz approximative de 100 °C et de l'équation suivante :

$$\Delta p = 1.74\, p_0 \frac{V_1}{V_0}$$

où :

V_0 est le volume du bâtiment (m^3 ou pi^3)
V_1 correspond au volume de l'équipement protégé (m^3 ou pi^3)
P_0 est la pression ambiante absolue (1,01 bara)
ΔP est l'augmentation de pression créée par les gaz ventilés (psi ou bar)

Par exemple, lorsque le volume de l'équipement est 1/100 du volume du bâtiment, V1/V0 est 1/100, l'augmentation de pression est d'environ 18 mbar. Le bâtiment ne subirait aucun dommage majeur.

La liste de tous les dispositifs agréés FM inclut leur efficacité d'évent, qui représente le facteur de réduction de la surface d'évent effective du dispositif. Ce facteur est différent du calcul de l'effet de pression ci-dessus.

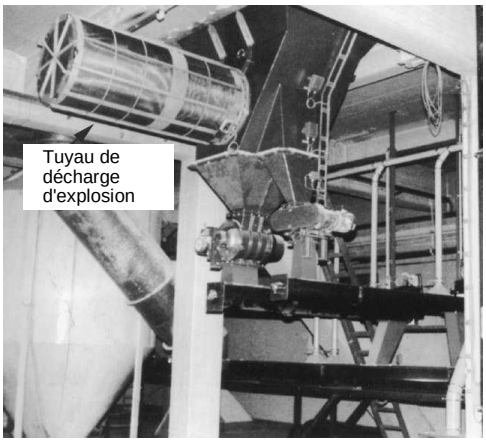

Fig. 10. Système d'évent avec arrête-flamme agréé FM (photo de Rembe GmbH)

3.1.6 Robustesse des équipements (2.3.3.1.3)

Lorsque la conception de l'évent d'explosion est basée sur des valeurs P_{red} qui prennent en compte la déformation d'un équipement, cela permet d'éviter une défaillance catastrophique de l'équipement et permet aux forces et aux produits d'une explosion de se déplacer en toute sécurité à travers l'évent d'explosion. Toutefois, cela peut empêcher l'équipement d'être utilisé ultérieurement.

Si les données relatives à la robustesse de l'équipement ne sont pas disponibles et que les valeurs théoriques de 0,2 à 0,3 barg de P_{red} sont utilisées pour le dimensionnement des évents d'explosion, les équipements ne seront probablement pas déformés en cas d'explosion s'ils sont de conception classique. Il y a toutefois un risque de déformation. Les différences de conception peuvent rendre un équipement plus faible que d'autres équipements apparemment comparables. Dans la plupart des cas, les valeurs théoriques sont suffisamment conservatrices pour empêcher la rupture des équipements. Les estimations de la pression qu'un type générique d'équipement peut supporter impliquent des incertitudes. Il est toujours préférable d'essayer d'obtenir des informations de conception réelles pour tout équipement dont la protection est évaluée ou planifiée.

3.1.7 Effets de la masse de l'évent d'explosion (inertie) (2.3.3.1.6)

Un évent d'explosion réalisé avec des panneaux lourds met plus de temps à s'ouvrir qu'un évent de dimensionnement similaire réalisé avec des panneaux légers et peut produire des pressions plus élevées à l'intérieur de l'enceinte protégée. Comme le délai est une fonction continue du poids de l'évent, son effet doit être évalué chaque fois que l'inertie d'un évent est supérieure à zéro.

Les membranes de rupture, qui sont généralement des tôles très fines en métal ou en film plastique, sont des dispositifs à inertie nulle. Toutefois, l'effet de tout autre type d'évent réalisé avec des panneaux ne peut pas être négligé et doit être calculé.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Un examen approfondi des données expérimentales générées par de nombreuses entreprises à l'échelle mondiale a permis à FM Global de corréler les données selon un cadre théorique afin de produire un outil de prévision efficace.

3.1.7.1 Masse d'évent type réalisé avec des panneaux (inertie)

Voici des exemples de matériaux qui peuvent être utilisés comme évents ou panneaux muraux avec évents d'explosion avec leur masse :

- Panneaux métalliques à simple peau : 10 kg/m²
- Panneaux sandwich métalliques isolés : 15 à 20 kg/m²
- Event d'explosion agréé FM : 12 kg/m²
- Panneau Kalwall agréé FM : 12 kg/m²

Remarque : les matériaux suivants ont une épaisseur en cm.

- Panneau de plâtre : 8 kg/m²/cm
- Acier : 77 kg/m²/cm
- Aluminium : 27 kg/m²/cm
- Verre : 29 kg/m²/cm
- Béton : 23 kg/m²/cm

3.1.8 Effet des gaines d'évents d'explosion (2.3.3.1.7)

L'effet des gaines d'évents doit être anticipé dans le dimensionnement des évents d'explosion. Positionner une gaine côté décharge d'un évent d'explosion peut affecter considérablement la pression à l'intérieur de l'enceinte. En fonction de la longueur et du diamètre de la gaine d'évent, la valeur P_{red} peut être augmentée jusqu'à un ordre de grandeur (10 fois), ce qui est généralement suffisant pour détruire complètement l'équipement protégé.

Deux facteurs sont essentiels lorsque l'on tient compte de l'effet des gaines d'évents sur le processus d'évent : (a) combustion de poussière dans la gaine pendant l'explosion et (b) inertie de la masse d'air à l'intérieur de la gaine avant l'explosion.

Pendant la première partie du processus d'évent, la poussière non brûlée est éjectée dans la gaine en amont du front de flamme provenant de l'équipement. Lorsque le front de flamme se déplace dans la gaine, la poussière commence à brûler dans la gaine et génère des produits de combustion supplémentaires. Ces produits de combustion se propagent dans TOUTES les directions, ralentissant ou inversant le flux en dehors de l'équipement, permettant à la pression de s'accumuler dans l'équipement.

L'inertie de l'air dans la gaine augmente également la pression d'explosion dans l'équipement protégé. Lorsque l'évent d'explosion s'ouvre et que les gaz de combustion commencent à s'échapper dans la gaine, ces gaz doivent évacuer tout l'air de la gaine. Pendant le temps nécessaire à l'éjection de l'air, la pression continue de croître dans l'équipement, car les gaz de combustion ne peuvent pas atteindre l'atmosphère ouverte. En présence d'une longue gaine, cette masse d'air peut suffisamment retarder l'évacuation des gaz de combustion pour augmenter considérablement la pression dans l'équipement.

Les effets de frottement du gaz circulant dans la gaine ont généralement peu d'effet sur l'explosion, sauf dans les coudes ou les autres discontinuités géométriques, par rapport aux effets précédemment notés de la combustion dans la gaine et de l'inertie de l'air.

Etant donné que le P_{red} augmente fortement à mesure que la longueur de la gaine d'évent augmente, les équipements à faible résistance ne peuvent généralement pas être protégés par des gaines d'évents si le L/D de la gaine d'évent dépasse une valeur d’un à deux, sauf si le dimensionnement de l'évent est proportionnellement augmenté.

Même si l'installation d'une gaine d'évent d'explosion dont la section transversale est inférieure à celle de l'évent d'explosion augmente la valeur P_{red} (et aggrave la situation), l'utilisation d'une gaine d'évent dont la section transversale est plus grande que la surface d'évent d'explosion ne permet pas d'abaisser le P_{red}.

Le logiciel DustCalc de FM Global calcule facilement les effets causés par les gaines d'évents.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

3.1.9 Refermeture des évents d'explosion (2.2.3.4 et 2.3.3.1.9)

Une fois que la combustion de la poussière à l'intérieur d'une pièce ou d'un équipement est terminée et que des gaz ne sont plus produits pour générer de la pression, les évents d'explosion pouvant se refermer par gravité se refermeront. Les gaz de combustion très chauds piégés dans la pièce ou l'équipement commencent à refroidir et, à moins que de l'air frais ne pénètre suffisamment rapidement dans l'enceinte (par exemple, via un système casse-vide correctement dimensionné), cela produit un vide. Ce vide peut endommager l'équipement ou entraîner l'implosion de l'équipement. Dans les pièces ou les bâtiments, les dommages causés par le vide produit sont moins importants, mais restent possibles.

3.1.10 Effets de la pression et de la boule de feu liés à une explosion (2.3.3.1.11)

Une explosion de poussière entraîne une pression de courte durée et des effets de boule de feu à l'extérieur de l'enceinte. Il existe des études limitées qui permettent d'estimer ces effets et des équations sont suggérées ci-dessous :

Estimer les effets de pression à proximité de 'évent, et dans une direction normale, à l'aide des équations suivantes :

Etape 1 : Calculer la surpression maximale ($P_{blast,max}$) générée par l'explosion à l'extérieur de l'enceinte protégée à l'aide de l'équation suivante :

$P_{blast,max}$ (barg) = 0.2 $A_V^{0,1}$ $V^{0,18}$ P_{red}

Où :

A_v correspond à la surface d'évent d'explosion, m
V est le volume de l'enceinte protégée, m^3
P_{red} correspond à la pression réduite dans l'enceinte pendant l'évacuation de la pression, barg

Etape 2 : Calculer la distance perpendiculaire (R_{max}) entre l'ouverture de l'évent et le $P_{blast,max}$ à l'aide de l'équation suivante :

R_{max} (mètres) = 0,25 $L_{f,max}$

Où

$L_{f,max}$ = longueur maximale du jet de flamme, m

Etape 3 : Pour les distances R supérieures à Rmax, calculer la pression du souffle d'explosion spécifique à la distance à l'aide de l'équation suivante :

P_{blast} (barg) = $(R_{max}/R)^{1,5}$ $P_{blast,max}$

Note 1 : ces pressions calculées sont très localisées près de la boule de feu rejetée par l'évacuation d'une explosion. Ceci n'est pas identique à la pression d'explosion globale (P_{red}) créée dans toute la pièce ou dans tout le bâtiment. Dans un grand bâtiment, cette pression de choc peut être la pression la plus importante que les murs situés à proximité de l'explosion d'un équipement ressentiront. Cependant, en général, la pression sur les murs d'une pièce entourant l'équipement après évacuation d'une explosion dépend de la quantité des gaz de combustion produits par l'explosion et dispersés dans la pièce. Cette pression est essentiellement uniforme dans toute la pièce, quelle que soit la distance des parois de l'équipement après évacuation d'une explosion.

Note 2 : les équations permettant de prévoir les effets de pression ne sont valables que pour un seul évent d'explosion. Pour les évents multiples qui s'ouvrent dans la même direction, calculer $P_{blast,max}$ pour chaque évent, puis ajouter les valeurs pour estimer l'effet de pression combiné et conservateur.

3.1.10.2 Estimer la longueur maximale du jet de flamme dans une direction normale à l'évent à l'aide de l'équation suivante :

$L_{f,max} = 8\ V^{(1/3)}$

où

$L_{f,max}$ = longueur maximale du jet de flamme, m
V = volume de l'enceinte protégée, m^3

Cette équation est valable uniquement pour les poussières ST1 (c.-à-d. $K_{st} \leq 200$) avec $P_{red} \leq 1$ barg et $P_{stat} \leq 0,1$ barg. Il n'existe aucune corrélation publiée pour les situations en dehors des limites indiquées. Il est supposé que les évolutions de P_{stat} ont un effet sur la taille de la boule de feu prévue ; toutefois, les méthodes d'estimation actuelles n'ont pas quantifié cet effet.

3.1.10.3 Estimer la force de recul d'une explosion à l'aide des équations suivantes (2.3.3.1.18) :

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

a) Pour une force de recul dynamique, utiliser la formule suivante :

$F_R = 119\ A_v P_{red}$
Unités : F_R (kN), A_v (m^2), P_{red} (barg)

$F_R = 1{,}2\ A_v P_{red}$
Unités : F_R (lb), A_v (po^2), P_{red} (psig)

b) Pour la durée de cette force de recul, utiliser la formule suivante (s'applique uniquement aux enceintes sans gaines d'évents) :

$t_f = 10^{-4} K_{st} V/(P_{red} A_v)$
Unités : K_{St} (bar m/s), V (m^3), P_{red} (barg), A_V (m^2), 10(s^2 m^{-2}) une constante

c) Comme alternative à la conception d'ancrage de force dynamique, utiliser une force statique équivalente (F_s) calculée à l'aide de la formule suivante :

$F_s = 0{,}52\ F_R$
Unités : kN ou lb comme dans l'équation d'origine

Le logiciel DustCalc de FM Global peut facilement calculer les effets causés par la pression et les boules de feu.

3.1.11 Obstacles fixes à proximité de l'ouverture des évents d'explosion (2.3.3.1.12)

Un obstacle fixe trop proche de l'ouverture de l'évent d'explosion d'un équipement crée une résistance importante à l'écoulement libre des produits de combustion provenant de l'équipement après évacuation de l'explosion. Cela est principalement dû à l'inflammation de la poussière après son éjection de l'équipement protégé. Comme la combustion se produit dans la zone semi-confinée entre l'équipement et l'obstacle, une condition similaire à une explosion secondaire se produit. Cela a des effets de contre-pression importants sur l'explosion de l'équipement. Les connaissances relatives à ce phénomène sont limitées et il est impossible de quantifier l'effet. Il n'est pas non plus possible de fournir des conseils sur les distances de sécurité jusqu'aux obstacles non plats, à cause de la complexité des effets de différentes géométries produisant un confinement partiel. La seule mesure de sécurité consiste à situer et à orienter les évents d'explosion, afin qu'ils ne pointent pas vers les surfaces voisines.

3.1.12 Distribution des évents d'explosion (2.3.3.1.15)

Si un équipement protégé présente des obstacles importants à l'intérieur, il existe deux principes d'explosion qui rendent importante la bonne distribution des évents d'explosion.

Premièrement, si les gaz se dirigeant vers un évent d'explosion à une extrémité de l'équipement doivent s'écouler dans des zones obstruées, l'écoulement des gaz serait moins rapide qu'il devrait l'être si la zone était dégagée. Par conséquent, la pression de l'évent d'explosion P_{red} peut dépasser le niveau prévu.

Deuxièmement, si les gaz se dirigeant vers l'évent d'explosion passent au-dessus d'obstacles importants, les turbulences augmentent considérablement dans l'équipement. Comme le taux d'augmentation de la pression d'une explosion augmente avec des turbulences croissantes, les obstacles peuvent aggraver l'explosion.

Les évents répartis dans l'ensemble d'une enceinte permettent de garantir que les gaz évacués pendant l'explosion empruntent le chemin le plus court hors de l'enceinte.

3.1.13 Pressions de service des collecteurs de poussière (2.3.3.1.17)

La plage de pression de fonctionnement normale pour les systèmes de collecte de poussière et de traitement de la poussière est comprise entre +40 et -40 mbar. Dans cette plage de pression, il n'est pas nécessaire d'ajuster les directives standard concernant les évents d'explosion.

3.1.14 Systèmes d'isolement d'explosion (2.3.3.2)

Lorsqu'une explosion se produit dans une enceinte protégée par un confinement de pression, la pression et la flamme (c'est-à-dire la poussière brûlée) se propagent dans toute conduite ouverte et connectée à une autre enceinte. Si ce deuxième équipement présente également une conception résistant à la pression, il est probable que cela soit insuffisant en raison d'un effet souvent appelé « empilage de pression ». La pression dans le deuxième équipement augmente avant l'arrivée de la source d'ignition (c.-à-d., le matériau brûlant), étant donné que la perturbation de la pression se déplace du premier équipement au second à la vitesse du son, qui est généralement supérieure à la vitesse du front de flamme.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Par conséquent, lorsqu'une explosion de poussière s'enflamme dans le deuxième équipement, la pression initiale est bien supérieure à la pression normale (ambiante).

Pour un rapport carburant/air donné, la pression finale sans évents d'une explosion est directement proportionnelle à la pression initiale. Par exemple, si la première explosion pré-pressurise le deuxième équipement à 3 bar absolu, la pression finale de l'explosion dans le deuxième équipement augmente d'un facteur de 3. Pour une poussière avec une valeur P_{max} de 9 bara, la pression finale sans évents dans cet exemple serait de 27 bara, bien supérieure à la robustesse de l'équipement le plus solide, conçu pour le confinement de la pression d'explosion de poussière. Ainsi, lorsque le confinement d'explosion est utilisé comme méthode de protection, il est important d'installer un système d'isolement d'explosion pour empêcher la pré-pressurisation d'un équipement par une autre explosion.

Lorsqu'un équipement protégé par un dispositif de confinement d'explosion est connecté à un second équipement protégé par évent d'explosion, il existe un problème de protection qui n'est pas lié à la pré-pressurisation, mais plutôt à la turbulence créée par le front de choc et une source d'ignition très forte provenant du front de flamme. Il en résulte une explosion plus rapide dans le deuxième équipement, non prise en compte dans la conception de l'évent, et entraînant une défaillance probable du deuxième équipement.

Ces effets sont atténués si les équipements connectés sont tous deux protégés par un évent d'explosion.

Par conséquent, lorsqu'un évent d'explosion est utilisé comme méthode de protection, il est important d'installer un système d'isolement d'explosion pour séparer l'équipement avec évent de tout équipement connecté protégé par un dispositif de confinement d'explosion.

Les systèmes de transport pneumatiques en phase dense fonctionnent à une vitesse de transport relativement faible (200 à 1 000 fpm ; 1 à 5 m/s), à un taux de chargement élevé des solides et à une haute pression (jusqu'à 8,6 barg). En raison de la forte charge de poussière (bien au-dessus de la CME), il est peu probable qu'ils puissent propager le front de flamme d'une explosion.

Les systèmes de transport pneumatiques en phase diluée fonctionnent à grande vitesse (3 000 à 8 000 fpm ; 25 à 40 m/s), à faible taux de chargement de solides et à basse pression (moins de 1 barg).

3.1.15 Systèmes d'isolement d'explosion (2.3.3.3)

Lors de l'utilisation de dispositifs actifs (par opposition à passifs) pour l'isolement des explosions, la vitesse maximale du déplacement du front de flamme d'explosion, du point de détection au dispositif d'isolement, est un facteur important à prendre en compte. L'estimation de la propagation des flammes suite à des explosions de poussière a fait l'objet de nombreuses recherches sans toutefois déboucher sur une solution simple. Le fabricant du dispositif d'isolement d'explosion devra fournir la séparation appropriée pour ce dispositif.

3.1.16 Vannes d'isolement à flotteur à action rapide (2.3.3.3.4)

Ces dispositifs sont activés soit par une pression différentielle causée par l'approche du front de flamme, soit par la vitesse du gaz dans la gaine. Par conséquent, la pression d'ouverture de l'évent (P_{stat}) de l'équipement soumis à l'explosion doit être suffisamment élevée, environ 0,2 barg, pour garantir la fermeture de la vanne. Si une P_{stat} inférieure est nécessaire pour protéger l'équipement, un capteur d'explosion supplémentaire et du gaz auxiliaire sont nécessaires pour activer la vanne.

Les données sur le dispositif Ventex indiquent que des distances de séparation minimum et maximum spécifiées sont nécessaires pour garantir que le dispositif se ferme correctement et qu'aucune transition vers la détonation n'a eu lieu. Ces distances sont déterminées par le biais de tests, mais sont valables de façon approximative pour une large gamme de conditions de fonctionnement. Si des mélanges hybrides sont utilisés, les deux distances sont réduites et le chiffre exact dépend de la taille de la vanne/du tuyau. Les données du fabricant remplacent ces recommandations générales.

Les vannes Ventex sont unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Elles s'activent à partir d'un événement de pression provenant d'une seule direction ou des deux directions. Une fois fermées, elles se verrouillent dans cette position et doivent faire l'objet d'un réarmement manuel.

3.1.17 Fonctionnement sous vide (2.3.3.6)

La pression finale après une explosion étant proportionnelle à la pression initiale (pré-explosion), une explosion de poussière se produisant dans un environnement dont la valeur est inférieure à 0,1 bara produit une pression d'explosion absolue inférieure à 1 bara. Par conséquent, les dommages potentiels liés à cette explosion sont non existants.

En outre, si un processus fonctionne à une pression inférieure à 50 mbar (absolue), il est généralement impossible de provoquer une explosion.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

3.1.18 Système d'extinction d'étincelles par rapport à un système de suppression d'explosion (2.3.4.1)

Des sinistres ont révélé qu'une idée fausse pourrait exister à propos des capacités des systèmes d'extinction d'étincelles. Les systèmes d'extinction d'étincelles sont très efficaces pour réduire la fréquence des explosions de poussières combustibles. Cependant, ils n'ont pas d'impact sur la gravité d'une explosion et ne constituent pas une alternative aux évents d'explosion ni aux systèmes de blocage ou de suppression d'explosion.

Un système d'extinction d'étincelles, également appelé système de suppression d'étincelles, détecte et éteint les étincelles ou les braises incandescentes en amont de l'équipement de récupération de la poussière (collecteur de poussière), afin d'empêcher ces sources d'ignition de se déplacer vers les collecteurs de poussière et de déclencher une explosion. Le système de détection utilise un capteur infrarouge pour rechercher les particules dont les températures sont élevées. L'extincteur est une buse à eau pulvérisée en aval du détecteur.

Le détecteur doit fonctionner, quelle que soit la taille des particules chaudes en déplacement. Il détecte les particules chaudes aussi petites que les étincelles ou aussi grandes qu'un morceau de courroie de ponceuse cassée. Toutefois, l'extincteur peut ne pas fonctionner si les particules sont de taille importante. Les étincelles sont normalement toutes éteintes, mais il est possible qu'un gros morceau de matériau brûlant ou incandescent (feu couvant) ne le soit pas, auquel cas une explosion risque de se produire en cas de nuage de poussière inflammable dans l'équipement de collecte de poussière en aval.

Le système d'extinction d'étincelles ne permet pas de diminuer la gravité de l'explosion qui en résulte et le même niveau de protection contre l'explosion ou le risque d'explosion doit être obtenu pour l'équipement présentant un risque d'explosion de poussière.

Un système d'extinction d'étincelles permet d'éteindre une source d'ignition, mais ne peut pas supprimer une explosion une fois qu'elle a commencé. En empêchant l'ignition d'un nuage explosif, le système d'extinction d'étincelles empêche l'explosion.

Un système de suppression d'explosion détecte les phases précoces d'une explosion et inhibe l'explosion pour empêcher la pression d'atteindre un niveau auquel l'équipement peut être endommagé ou détruit.

Le système de suppression d'explosion réduit la gravité d'une explosion, tandis que le système d'extinction d'étincelles réduit uniquement la fréquence des explosions.

Un système d'extinction d'étincelles est uniquement conçu pour éliminer un scénario d'ignition : petites particules chaudes acheminées vers un collecteur de poussière où un nuage de poussière combustible peut être enflammé. Il existe d'autres scénarios d'inflammation pour lesquels le système d'extinction d'étincelles ne peut pas avoir d'influence. Par exemple :

- Des corps étrangers métalliques (par exemple, une vis ou un clou) sont aspirés dans le système de collecte de poussière. Le métal crée des étincelles lorsqu'il frotte contre les conduits ou les équipements métalliques en aval du système d'extinction d'étincelles.
- Des sources d'ignition produites en aval du système d'extinction d'étincelles ; par exemple, surfaces chaudes, découpe et soudage sur l'équipement de collecte de poussière ou autour.

Pour la plupart des processus, le transport de petites particules chaudes du processus de production de poussière vers le système de collecte de poussière est de loin la source d'ignition potentielle la plus fréquente. Les systèmes d'extinction d'étincelles installés peuvent être activés une fois par semaine ou plus souvent sans incident. Cela confirme la capacité du système à détecter et à éteindre systématiquement les particules les plus petites.

Il existe des exemples de sinistres où des matériaux incandescents sont passés à travers la zone d'extinction d'étincelles, pour atteindre l'intérieur d'un équipement de collecte de poussière et déclencher une explosion. Les matériaux incandescents peuvent traverser la zone d'extinction d'étincelles en raison de leur taille ou de leur forme ou en raison d'un défaut de l'équipement d'extinction d'étincelles ou de son installation. D'autres systèmes anti-explosion, tels que les systèmes d'évent ou de blocage d'explosion, peuvent être insuffisants ou ne pas être totalement adaptés. Par conséquent, les explosions qui en découlent endommagent l'équipement de collecte de poussière. En outre, un matériau incandescent a été forcé (éjecté) dans la zone de travaux, soit vers l'avant par un retour d'air chaud, soit vers l'arrière jusqu'aux points de collecte de la poussière. Un système d'évent d'explosion adéquat combiné à des protections sur le retour d'air chaud (recommandé ici et dans la fiche technique 7-73, *Dust Collectors and Collection Systems*) peut empêcher l'éjection de tout matériau incandescent.

3.1.19 Energie minimale d'inflammation (EMI) (2.3.4.2)

La grande majorité des poussières ont des valeurs EMI supérieures à 10 mJ. Il n'est donc pas nécessaire de tester régulièrement les poussières pour obtenir leur EMI. Ces tests ne sont normalement effectués que si une poussière est supposée être particulièrement exposée à l'inflammation statique. Les normes de test de l'EMI incluent les normes ASTM E2019 et EN 13821, ainsi que d'autres équivalents internationaux. Tout résultat de test signalant une EMI de 10 mJ ou moins doit être interprété comme prouvant l'inflammabilité statique.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Des charges électrostatiques incendiaires peuvent apparaître lorsque des poudres isolantes sont transférées dans des silos ou des bacs, ou lorsque des revêtements isolants (par exemple, du plastique) recouvrent des surfaces métalliques (gaines métalliques doublées). Les charges accumulées à la surface d'un tas de poudre isolante peuvent créer des décharges en aigrette qui sont généralement limitées à 20 mJ et ne risquent pas d'enflammer des poussières combustibles types. Les charges accumulées sur des revêtements peuvent entraîner la propagation de décharges en aigrette susceptibles de libérer suffisamment d'énergie (des centaines de mJ) pour enflammer des poussières combustibles. Si ces conditions sont réunies, une évaluation doit être effectuée par un expert en électrostatique.

3.1.20 Séparateurs de corps étrangers, magnétiques ou autres (2.3.4.3)

L'utilisation de séparateurs en amont de tous les équipements ayant un impact mécanique avec le matériau de procédé empêche le métal et les autres corps étrangers de pénétrer dans l'équipement. Sans les séparateurs, le métal ou tout autre matériau pénétrant dans l'équipement peut créer des étincelles d'impact ou de friction capables d'enflammer un nuage de poussière.

3.1.21 Côté propre et côté sale des collecteurs de poussière (2.4.2)

La distinction entre les côtés propres et sales de l'air n'est pas importante lors de la prise en compte des scénarios d'explosion. Les pressions générées dans une explosion rompent fréquemment le système de filtre au fur et à mesure que l'explosion se propage sur les côtés propres et sales. En outre, il peut y avoir une rupture du système de filtre avant même une explosion (par exemple, la rupture d'une manche), ce qui permet à la poussière de pénétrer dans le côté propre.

La question de l'emplacement des évents par rapport au côté propre et sale est à la fois théorique et pratique. La plupart des tests sont effectués sur une enceinte sans obstacle interne et avec l'évent éloigné de l'ignition. Des manches ou autres obstacles peuvent modifier l'explosion et le processus d'évent. Les manches sont généralement défaillantes de façon précoce au cours d'une explosion et ont un effet mineur sur le processus d'évent, mais la plaque tubulaire qui sépare les côtés propres et sales peut constituer un problème plus important. L'équation spécifiant la quantité minimale d'évents d'explosion sur le côté sale est basée sur la présence d'évents d'explosion totalement adéquats pour une explosion côté sale, si les manches ne sont pas endommagées et ne laissent pas les gaz s'échapper par le côté propre du collecteur.

3.1.22 Events d'explosion sur les cyclones (2.4.2.3)

Les calculs pour les évents d'explosion d'un cyclone basés sur des proportions de conception types montrent que la sortie de gaz type dont le diamètre est égal à la moitié du diamètre d'un cyclone fournit une surface d'évent d'explosion adéquate pour les poussières dont les valeurs K_{st} peuvent atteindre 80, sur la base de l'hypothèse d'une résistance à la pression d'environ 0,3 barg. Les poussières dont la valeur K_{st} est inférieure à 80 sont généralement plutôt brutes (par exemple, sciure, farine de maïs), ont une très faible teneur en matières volatiles (par exemple, charbon) ou ont une très faible énergie de combustion (par exemple, poussière de fer, plastique renforcé de fibres de verre à forte teneur en fibres inertes).

L'adéquation de l'évent d'explosion ne peut pas être présumée si le cyclone est doté d'une gaine avec un rapport L/D > 1 et allant au-dessus de la sortie de gaz. Comme pour tout équipement équipé d'une gaine sur l'évent d'explosion, des calculs de pression d'explosion sont nécessaires pour quantifier l'effet.

En raison des effets de contre-pression importants produits par les coudes dans les gaines d'aération, toute sortie de gaz fournie avec une gaine de 180 ° (col de cygne) ne possède probablement pas un évent d'explosion adéquat. Si possible, remplacer le col de cygne par un chapeau de pluie sur une sortie de gaz ouverte.

Les proportions types des cyclones incluent un diamètre D, une hauteur de cylindre et une hauteur de cône pour chaque 2D et un diamètre de sortie de gaz de ½ D.

3.1.23 Manches « conductrices » de collecteurs de poussière (2.4.3.1)

Les manches « conductrices » sont généralement dotées d'un fil fin tissé ou fixé dans leur tissu. La grille de fils conducteurs est connectée à une ou plusieurs sangles/fils de mise à la terre, qui doivent être fixés à la structure du collecteur de poussière. Etant donné qu'il n'existe aucun mécanisme fiable pour migrer les charges de la surface de la manche non conductrice vers le fil mis à la terre le plus proche, des différences de potentiel mesurables (et parfois considérables) peuvent exister entre la surface de la manche et les fils.

La nécessité d'une manche spécifique pour empêcher l'inflammation de poussière due à l'électricité statique n'a jamais été établie. Avec des manches ordinaires et non conductrices, l'électricité statique peut s'accumuler sur toute la surface d'une manche, mais une décharge statique peut uniquement libérer l'énergie accumulée sur une très petite zone. Cette libération d'énergie n'est probablement pas suffisante pour enflammer les poussières les plus exposées à l'ignition.

Il existe un autre problème lié aux manches « conductrices ». Les liaisons équipotentielles peuvent se détacher et transformer la manche en un condensateur géant. Tous les fils intégrés recueillant les charges

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

de la surface de la manche peuvent soudainement libérer suffisamment d'électricité statique pour enflammer un nuage de poussière. Les secousses et décharges d'air répétées pour nettoyer les manches peuvent provoquer la rupture ou le débranchement d'une ou plusieurs liaisons équipotentielles. L'entretien et l'inspection sont nécessaires pour éviter ce problème.

3.1.24 Collecteurs de poussière ouverts (2.4.4)

Les collecteurs de poussière ouverts refoulent l'air sale à l'intérieur de manches en tissu où la poussière fugitive est collectée et où l'air « propre » s'échappe dans l'atmosphère, ce qui augmente le risque d'accumulation de poussière fugitive dans l'atmosphère. L'usage est donc limité aux systèmes à utilisation occasionnelle ou irrégulière. (voir figure 11).

Les collecteurs de poussière ouverts ne sont pas conçus pour être utilisés avec la plupart des poussières collectées à partir d'équipements de traitement ou d'autres sources de poussière aérée. La poussière fine bouche rapidement le filtre, ce qui provoque des performances réduites et peut entraîner la libération de poussière fugitive dans l'atmosphère.

Etant donné que seule une manche empêche normalement la libération de poussière combustible, tout ce qui se trouve à moins de 3 m peut être considéré comme une zone de classe II, division 2 (zone 22) nécessitant un équipement électrique antidéflagrant. Une meilleure solution consiste à limiter l'utilisation d'équipements électriques ordinaires dans la zone restreinte [voir NFPA 499-2013 Figure 6.10(c)].

De nombreux collecteurs de poussière ouverts sont interconnectés avec plusieurs manches avec des conteneurs, comme illustré à la Figure 11. La limite de 140 m^3/min fait référence au débit d'air global à travers l'assemblage et pas seulement à une seule manche contenant les matériaux collectés.

L'intérieur de la manche peut être considéré comme un risque potentiel d'explosion de la poussière. Cependant, les manches sont facilement défaillantes si le nuage contenu s'enflamme provoquant généralement un feu instantané avec une boule de feu limitée. Aucun évent d'explosion n'est nécessaire ou pratique. De même, la construction ouverte permet aux sprinkleurs en toiture, le cas échéant, de maîtriser un incendie qui pourrait se développer.

Fig. 11. Exemple de collecteur sans enceinte

3.1.25 Gaines de raccordement (2.5)

Les poussières sont transférées dans des gaines, soit dans le cadre d'un système de contrôle de la poussière fugitive, soit pour déplacer le produit d'une partie du processus à une autre. Le transfert de poussière fugitive est presque toujours beaucoup moins important que la CME, tandis que le transfert de processus peut être beaucoup plus important que la CME. Le transfert de processus peut être appelé transfert de phase dense.

Pour bien comprendre le risque, les conditions de transfert doivent être connues. Ces conditions peuvent être déterminées en connaissant la quantité traitée/recueillie au cours d'une période donnée, ou mesurée par échantillonnage ou surveillance du débit réel dans la gaine. Ces données peuvent parfois être obtenues par des professionnels de la santé et de la sécurité au travail.

Le risque dans la gaine peut être affecté par les taux de transfert réels ou par la poussière qui s'échappe et s'accumule en raison d'une vitesse d'écoulement insuffisante dans la gaine. Il est important de ne pas laisser la poussière s'accumuler. Ce risque peut être contrôlé en maintenant un débit d'air suffisant

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

généralement de l'ordre de 1 070 à 1 220 m/min. La poussière qui s'est accumulée peut être déplacée de nouveau par l'onde de pression d'une explosion et créer des concentrations combustibles localisées, se déplaçant avec l'onde de pression et enflammées par le front de flamme arrière. Après une propagation considérable, ce jet de flamme turbulent devient une forte source d'ignition qui détruit les équipements apparemment correctement protégés.

Une très petite quantité de poussière peut propager une explosion. Pour un conduit circulaire de diamètre « D » avec une couche de poussière d'épaisseur « h » positionnée sur ¼ de sa circonférence interne (c.-à-d. en bas), la concentration de poussière dispersée de manière homogène dans toute la section transversale du conduit est de $C = \rho_{\text{densité en vrac}}\ h/D$. Par exemple, une poussière d'une densité en vrac de 500 kg/m^3, une épaisseur de couche de seulement 0,2 m et un conduit de 0,2 m de diamètre peuvent générer une concentration de poussière de 500 g/m^3. Cette concentration est bien supérieure à la CME de pratiquement toutes les poussières et peut donc propager une explosion.

La poussière déposée n'est probablement pas dispersée de manière homogène dans tout le conduit, mais des recherches menées par le Bureau américain des mines ont montré que les explosions peuvent se propager dans les conduits, même à des concentrations moyennes de poussière aussi faibles que la moitié de la CME. Tout ce qui est nécessaire pour la propagation est une traînée continue de mélange supérieur à la CME. Cette condition peut être remplie même s'il n'y a pas assez de poussière pour remplir l'ensemble du volume du conduit avec un mélange supérieur à la CME. Ainsi, même des quantités infimes de poussière peuvent être suffisantes pour créer une explosion à propagation, de sorte que la vitesse de l'air dans le conduit doit être suffisante pour empêcher tout dépôt de poussière.

Les évents d'explosion dans les gaines ne sont pas prévus pour sauver la gaine, généralement de faible valeur et facile à remplacer, mais pour réduire la violence d'une explosion potentielle qui se propage sur toute sa longueur. Cela n'empêche pas la propagation de l'explosion, mais réduit l'intensité de la source d'ignition à laquelle sont exposés les équipements connectés contenant de la poussière en suspension. Concevoir une gaine pour qu'elle se rompe à basse pression plutôt que d'installer des évents d'explosion peut constituer une alternative acceptable lorsqu'il n'y a pas de risque pour l'équipement.

Des systèmes d'isolement d'explosion peuvent s'avérer nécessaires pour raccorder des gaines lorsque la conséquence d'un événement non protégé dans un équipement ou d'un retour de flamme dans un bâtiment est inacceptable. Par exemple, une ponceuse pour grands panneaux peut posséder six points de collecte de la poussière, trois en haut et trois en bas, tous reliés à une gaine commune. Chaque tuyau d'aspiration n'a pas besoin d'un dispositif d'isolement. Un système d'isolement d'explosion serait préférable sur la gaine principale après qu'il ait quitté le bâtiment pour empêcher la propagation dans la ponceuse d'une explosion survenant dans le collecteur de poussière.

3.1.26 Silos (2.6)

Les silos sont également exposés à un risque d'explosion de poussière, même lorsqu'ils renferment des granulés avec très peu de particules fines. Le transfert dans les silos étant continu, les particules tombent au fond, mais les plus fines, qui se trouvent être les plus explosives, restent en suspension. En cas d'opération de transfert prolongée, la concentration de poussière combustible en suspension est supérieure à la concentration minimale d'explosion (CME, ce qui crée un risque d'explosion.

Lorsqu'un collecteur de poussière est monté directement sur un silo (c'est-à-dire avec un tuyau de raccordement court d'un diamètre suffisamment grand), toute explosion s'enflammant dans le collecteur de poussière crée les mêmes effets d'explosion que si l'explosion avait eu lieu dans le silo. Le collecteur de poussière peut donc être considéré comme faisant partie du silo. Si les évents d'explosion, installés sur le silo et le collecteur de poussière, sont dimensionnés sur la base de la somme des deux volumes, ils devraient être adéquats, que l'explosion ait lieu dans le silo ou dans le collecteur de poussière fixé.

Lorsque le collecteur de poussière est séparé du silo par un petit tuyau ou un tuyau allongé, le silo et le collecteur de poussière ne fonctionnent plus comme un seul volume lors d'une explosion. Si une explosion provient d'un collecteur de poussière sans évent d'explosion, le jet de flamme se propage dans le tuyau de raccordement, enflammant tout nuage de poussière combustible à l'intérieur du silo. Cela peut provoquer une explosion beaucoup plus violente dans le silo que si l'explosion du silo provenait d'une source d'ignition conventionnelle (plus faible).

Les canons à air utilisés pour briser les matières responsables de la formation d’une arche peuvent disperser des particules fines dans les matières en vrac dans l’espace libre du silo. Même si le pourcentage de particules fines est très faible (par exemple, 1 % à 2 %), les décharges répétées d'air sous pression provoqueront leur concentration sur le haut de la couche. Le fonctionnement répété des canons à air engendre plus de particules fines sur le haut de la couche et une plus grande concentration de poussière dans l'espace libre à chaque tir de canon à air. Une seule source d'ignition est nécessaire pour une explosion de poussière majeure.

En outre, certains matériaux combustibles tels que le charbon, les grains et le bois peuvent subir un échauffement spontané, et l'introduction d'air sur une longue période peut augmenter la probabilité d'un tel échauffement spontané. L'air introduit dans la combustion incandescente peut provoquer une inflammation ou une explosion de poussière.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Les alternatives aux canons à air incluent l'utilisation de baguettes vibrantes insérées temporairement ou définitivement dans la partie inférieure du silo ou l'utilisation de pavillons et de lances acoustiques.

3.1.27 Elévateurs à godets (2.7)

Il existe deux configurations d'élévateurs à godets, à simple ou double enveloppe : (1) Dans une enveloppe simple, les godets se déplacent vers le haut et vers le bas dans la même enceinte avec une section supérieure et inférieure commune, et (2) dans une double enveloppe, il y a une enceinte séparée pour les godets mobiles montants et descendants, mais toujours une section supérieure et inférieure commune.

Même si les matériaux combustibles en vrac peuvent avoir un très petit pourcentage de particules fines mélangées à des matériaux trop bruts pour constituer un risque d'explosion de poussière, la manipulation de ces matériaux en vrac risque de provoquer une explosion dans une enceinte d'élévateur à godets. En raison du haut degré de turbulence à l'intérieur de l'enceinte de l'élévateur à godets, toute particule fine sera facilement mise en suspension. Etant donné que des particules fines sont continuellement ajoutées à l'espace d'air de l'élévateur et que très peu tombent, la concentration peut dépasser la CME et créer un risque d'explosion de poussière.

Par exemple, les déchets d'extraction non broyés de graines de soja ne sont pas explosifs. L'essentiel de ce produit est brut (taille moyenne des particules d'environ 1 000 microns), mais environ 3 % des particules fines sont inférieures à 75 microns. Cela a suffi à provoquer une explosion et une ignition, après le transport du produit dans un élévateur à godets pendant plusieurs minutes et la libération des particules fines.

3.1.28 Equipement de réduction granulométrique (broyeurs, pulvérisateurs, broyeurs à marteaux, etc.)

Les équipements de réduction granulométrique présentent un risque inhérent d'impact mécanique en présence de poussières combustibles. L'impact mécanique peut créer un échauffement par friction et par impact. Des étincelles peuvent se produire si du métal pénètre accidentellement dans la machine. Il peut en résulter des particules incandescentes qui en quittant l'équipement, se transforment en source d'inflammation en aval de ce dernier ou l'ignition réelle du nuage de poussière dans l'équipement. Ces machines sont le plus souvent de construction robuste et peuvent résister à une explosion interne sans dommage.

Les évents d'explosion ne sont généralement pas nécessaires, mais la propagation des explosions vers d'autres parties de l'installation doit être envisagée et des techniques d'isolement d'explosion peuvent être nécessaires.

L'entretien régulier de ces équipements permet de garantir une lubrification adéquate, de maintenir un dégagement suffisant, d'éviter l'accumulation et l'inflammation de poussière et de débris ou un mauvais fonctionnement.

3.1.29 Fabrication additive (impression 3D) (2.10)

La fabrication additive, plus connue sous le nom d'impression 3D, est de plus en plus importante dans la fabrication de pièces complexes. Des composants sont produits pour diverses applications allant des jouets à l'aéronautique.

Les figures 12, 13 et 14 illustrent des représentations schématiques des principales catégories technologiques et de leurs caractéristiques. L'impression 3D mentionnée dans la Figure 14 est plus représentative des imprimantes de bureau que les imprimantes industrielles.

La fusion sur lit de poudre semble être la méthode la plus courante utilisée avec les poudres métalliques. Elle implique l'utilisation de données de conception numérique pour créer un composant couche par couche, en déposant alternativement une couche de matière de 20 à 100 microns d'épaisseur (0,02 à 0,1 mm) puis en fusionnant le modèle du composant dans la couche et en répétant la séquence jusqu'à ce que le « build », la pièce en cours de création, soit terminé. Pour les poudres métalliques, la fusion s'effectue avec un faisceau laser ou un faisceau d'électrons, tandis que les polymères/plastiques peuvent être fusionnés avec un laser ou un liquide de liaison pulvérisé sur la couche de poudre.

La figure 15 est un schéma représentant la technologie de frittage sélectif par laser qui produit le produit réel. La distribution de la couche de poudre se fait par une barre juste au-dessus de la surface de la plate-forme de construction ou de la couche précédente.

Les procédés de dépôt de matière utilisent des poudres ou des méthodes d'extrusion pour construire le produit couche par couche. Une technique utilise la dispersion sélective d'une poudre à travers un jet d'aérosol, suivie d'une fusion avec de la chaleur ou un faisceau d'électrons (projection de matériau). Ces procédés projettent de petites quantités individuelles de matière et ne créent généralement pas de nuages de poussière dans l'équipement.

Enfin, il existe une utilisation de résines plastiques liquides dans un bassin, où le mécanisme de mise en forme utilise des faisceaux lumineux (laser, UV) pour fusionner le polymère dans la forme requise (stéréolithographie). Une méthode utilise des résines liquides à point éclair élevé (plus de 100 °C) et des liquides de nettoyage à point éclair modéré (85 °C).

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

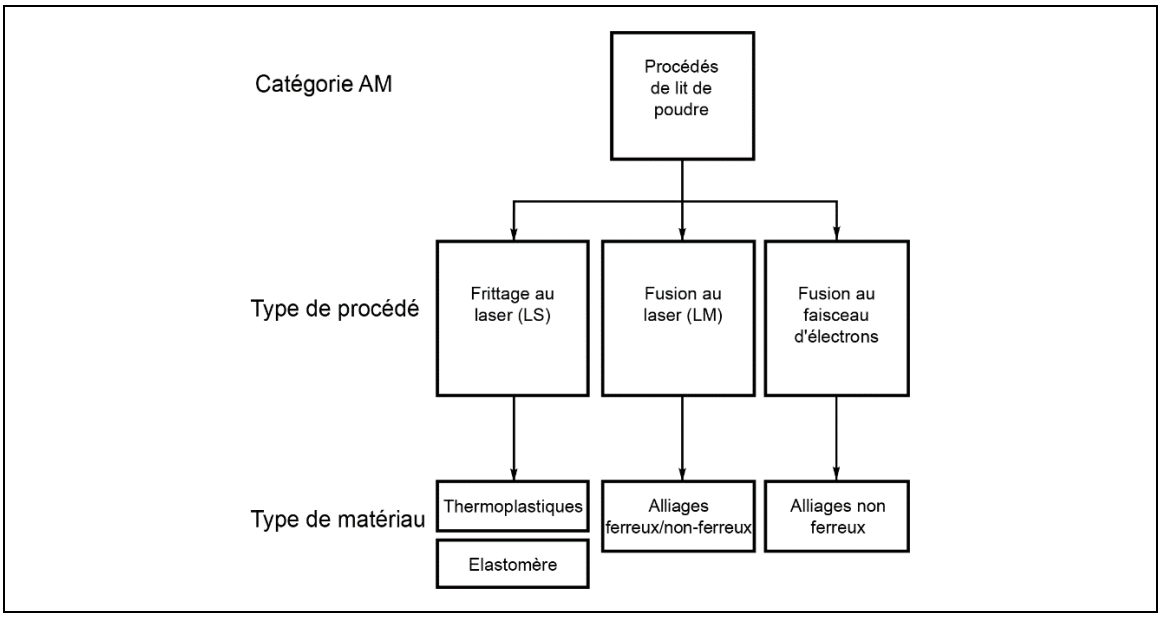

Fig. 12. Procédés de fusion sur lit de poudre

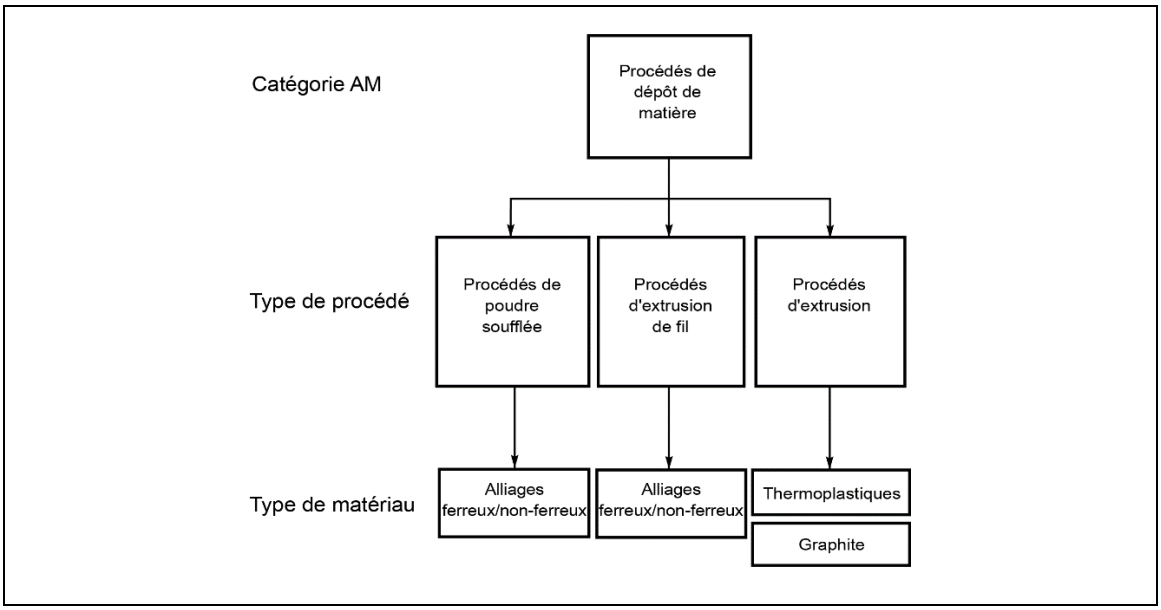

Fig. 13. Procédés de dépôt de matière

Le matériau de construction peut être une poudre fine de métal, de plastique, de céramique ou de verre. Les poudres d'alliage métallique couramment utilisées incluent le cobalt-chrome, l'aluminium-titane, le magnésium, l'inox (fer et chrome plus autres additifs moins importants) et l'Inconel (alliage de nickel, chrome et fer et autres métaux comme additifs moins importants). L'explosivité du matériau (Kst) varie en fonction du métal ou de l'alliage et doit généralement être considérée comme une poussière combustible jusqu'à ce qu'un test démontre le contraire.

La figure 16 montre des exemples d'imprimantes industrielles classiques. Les modèles ProX 300 et Concept M2 ont une enveloppe de construction (chambre pour la partie d'impression) d'environ 250 x 250 x 300 mm. Le prix d'une imprimante industrielle peut atteindre 500 000 US$ ou plus.

3.1.29.1 Risques potentiels

Du point de vue de la sécurité des personnes, les problèmes incluent les fumées et les particules fines nécessitant une ventilation adéquate ; les matériaux corrosifs et irritants nécessitant un équipement de protection personnel (gants, lunettes, etc.) ; les surfaces chaudes ; la lumière laser ou UV et les hautes tensions.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

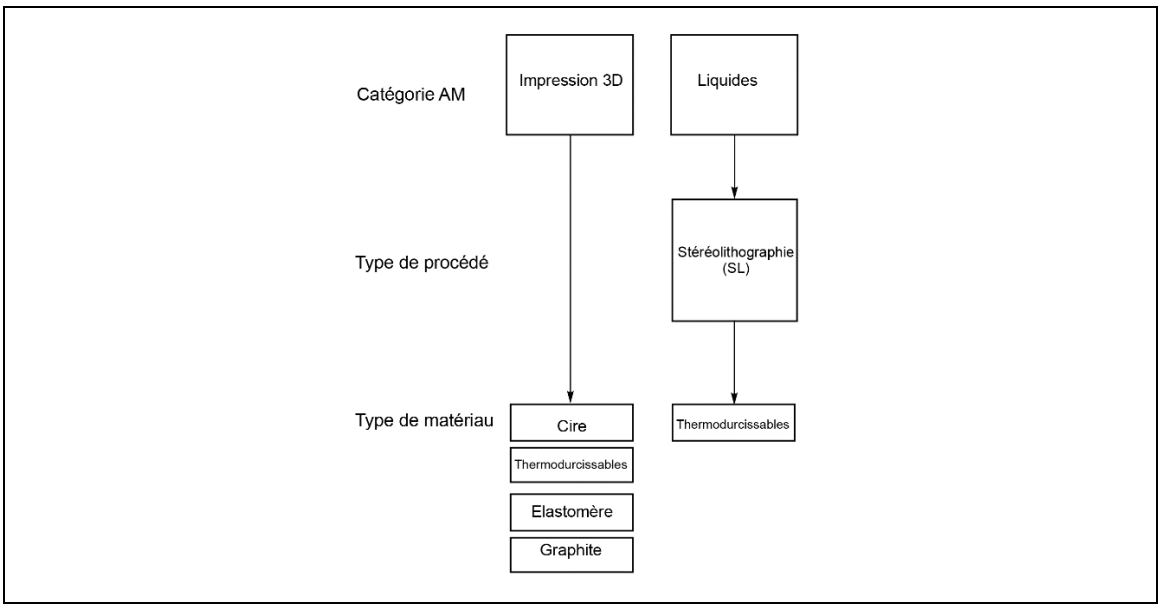

Fig. 14. Impression 3D et procédés liquides

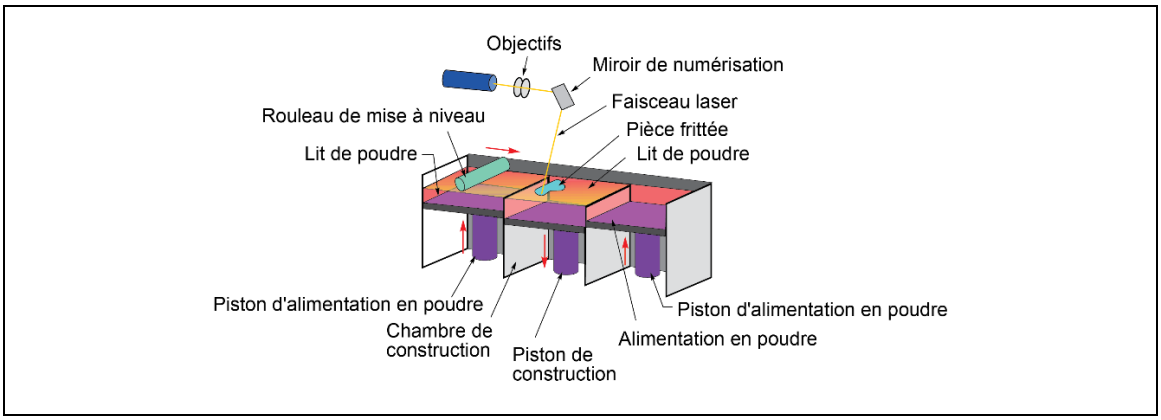

Fig. 15. Conception SLS (Chemical Engineering Progress, mai 2014)

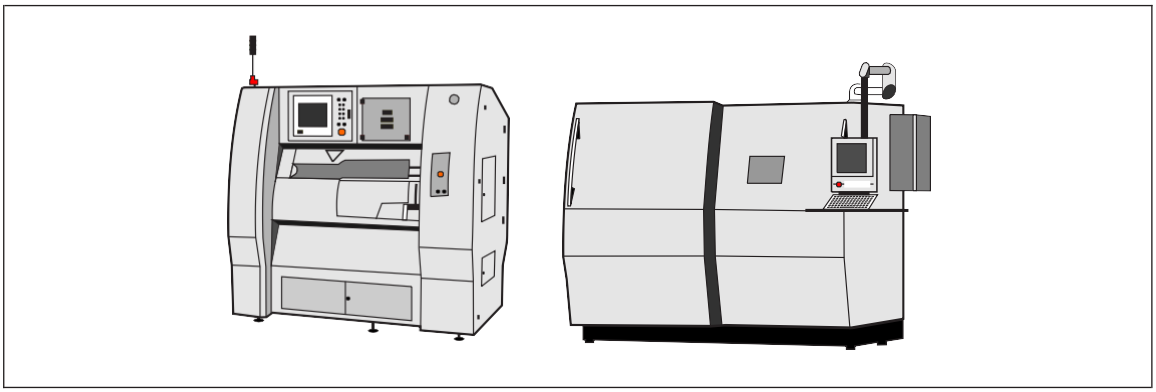

Fig. 16. Systèmes 3D à l'échelle industrielle : imprimantes laser Prox300 et Concept M2 (Source : brochures des fabricants)

Les principaux risques comprennent la poussière combustible manipulée sous forme de poudre fine (souvent 50 microns ou moins) et le liquide qui peut brûler utilisé par certains systèmes. Seuls les risques associés aux opérations de poudre sont traités ici, en insistant sur les poudres métalliques.

Les procédés à base de métal fonctionnent dans une atmosphère à faible teneur en oxygène (moins de 1 % d'oxygène) pour des raisons liées à la qualité du produit et ne présentent donc pas de risque d'explosion dans la chambre de construction ou dans le système de recirculation de l'atmosphère inerte.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Ce système peut inclure des cartouches filtrantes ou des panneaux filtrants dont la construction est principalement ou complètement combustible. La plupart des filtres sont utilisés pour deux ou trois cycles de construction, puis remplacés. Certains systèmes identifient les fumées du processus laser comme des « condensats métalliques hautement inflammables » nécessitant une manipulation et des précautions particulières pour empêcher l'inflammation, ce qui peut entraîner des combustions spontanées dans les filtres lorsqu'ils sont retirés et exposés à l'air.

Etant donné que la plupart des machines industrielles actuelles n'ont besoin que de petites quantités de matériau (jusqu'à plusieurs centaines de kilogrammes au maximum), les poudres de procédé sont manipulées dans des conteneurs en carton épais ou des bouteilles en plastique d'une taille maximale d'environ 7,6 L. L'accumulation statique lors du transfert de ces poudres est possible et les fabricants recommandent généralement la liaison équipotentielle et la mise à la terre du personnel, des conteneurs et des machines au cours de ces opérations. En ce qui concerne la manutention, étant donné l'échelle actuelle de ces systèmes, le contrôle des sources d'ignition par mise à la terre, liaison équipotentielle, etc. est plus pratique que l'inertage de l'opération.

Les équipements de production nécessitent probablement d'autres méthodes de manutention et doivent être évalués en fonction des propriétés des poudres concernées, comme pour les autres poussières combustibles.

Le processus de nettoyage de la chambre de construction nécessite généralement des aspirateurs portables, qui doivent être adaptés aux opérations à risques impliquant des poussières de métal ou de plastique combustibles.

Les pièces terminées sont extraites de l'équipement et l'excès de poudre est éliminé manuellement ou mécaniquement, ou soufflé à l'air, puis sont envoyées vers d'autres processus de finition. Certains plastiques sont nettoyés à l'aide de jets d'eau haute pression dans une boîte à gants. La purge de l'air peut provoquer un petit risque d'incendie local ou un système de collecte de poussière associé peut présenter un risque d'explosion de poussière.

3.1.29.2 Protection

Comme indiqué précédemment, les machines de traitement des poudres de métaux combustibles fonctionnent dans des atmosphères inertes et ne présentent aucun risque d'explosion de poussière. Les machines de traitement d'autres poudres combustibles doivent être évaluées pour comprendre comment le procédé est utilisé et si des nuages importants de poussière combustible peuvent être créés.

Les enceintes de la machine contiennent entièrement les poudres combustibles et il n'est donc pas nécessaire d'utiliser des équipements électriques antidéflagrants pour l'environnement des machines.

Si des opérations de récupération de poudre sont effectuées par tamisage ou autres méthodes, elles doivent être conduites dans des hottes à ventilation adéquate. De même, le nettoyage du produit pour enlever la poudre des espaces intérieurs doit également être effectué dans des hottes ou des enceintes appropriées.

Nettoyer les poudres à l'aide d'aspirateurs portables adaptés. Il n'existe pas de normes claires pour la certification des aspirateurs destinés à la collecte de poussières de métal ou de toute autre poussière combustible. Il semble que la plupart d'entre eux sont conçus pour être utilisés dans des zones à risques de poussière comme pour les autres équipements électriques.

La norme EN 60335 Partie 2-69, « Particular Requirements for Wet and Dry Vacuum Cleaners », couvre dans son ensemble la certification des équipements utilisés dans les zones 22. L'annexe CC de ce document aborde spécifiquement des modifications de la norme principale nécessaire pour une utilisation dans la zone 22. La clause 24.1 de l'annexe CC stipule que « les composants situés dans les enceintes contenant de la poussière combustible collectée doivent être adaptés à la zone 20. »

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

4.0 REFERENCES

4.1 FM Global

Fiche technique 1-44, *Damage Limiting Construction*
Fiche technique 5-1, *Electrical Equipment in Hazardous Locations*
Fiche technique 5-8, *Static Electricity*
Fiche technique 5-20, *Electrical Testing*
Fiche technique 6-9, *Industrial Ovens and Dryers*
Fiche technique 7-10, *Wood Processing and Woodworking Facilities*
Fiche technique 7-17, *Explosion Protection Systems*
Fiche technique 7-32, *Ignitable Liquid Operations*
Fiche technique 7-59, Inerting and Purging of Tanks, Process Vessels and Equipment
Fiche technique 7-73, *Dust Collectors and Collection Systems*
Fiche technique 7-75, *Grain Storage and Milling*
Fiche technique 7-78, *Industrial Exhaust Systems*
Fiche technique 10-3, *Hot Work Management*

Hot Work Management Kit (P9601)

4.2 Autres

Air Movement and Control Association (AMCA). *Classifications for Spark Resistant Construction*. AMCA 99040186, dernière version.

American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test Method for Limiting Oxygen (Oxidant) Concentration of Combustible Dust Clouds. E2931.

American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts.* Standard E1515, dernière version.

American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Method for Minimum Ignition Energy of a Dust Cloud in Air.* ASTM E2019, dernière version.

American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise of Combustible Dusts.* Standard E1226, dernière version.

Bhatia, S. K. and S. Sharma. « 3D Printed Prostics Roll off the Presses. » *Chemical Engineering Progress,* Mai 2014.

Comité européen de normalisation (CEN). *Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds - Part 1: Determination of the Maximum Explosion Pressure* P_{max} *of Dust Clouds.* EN 14034-1.

Comité européen de normalisation (CEN). *Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds - Part 2: Determination of the Maximum Rate of Explosion Pressure Rise* $(dP/dt)_{max)}$ *of Dust Clouds.* EN 14034-2.

Comité européen de normalisation (CEN). *Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds. Part 3: Determination of the Lower Explosion Limit (LEL) of Dust Clouds.* (Also called minimum explosible concentration, MEC). EN 14034-3.

Comité européen de normalisation (CEN). *Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds. Part 4: Determination of the Limiting Oxygen Concentration (LOC) of Dust Clouds.* EN 14034-4.

Comité européen de normalisation (CEN). *Fire and Explosion Prevention and Protection for Bucket Elevators.* TR16829 (preliminary).

Comité européen de normalisation (CEN). *Household and Similar Electrical Appliances - Safety,* Part 2-69: Particular Requirements for Wet and Dry Vacuum Cleaners, Including Power Brush for Commercial Use. EN 60335-2-69.

Comité européen de normalisation (CEN). *Potentially Explosive Atmospheres - Explosion Prevention and Protection - Determination of Minimum Ignition Energy of Dust/Air Mixtures.* EN 13821.

Holbrow, P., G. A. Lunn, and A. Tyldesley. « Explosion Venting of Bucket Elevators » *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* Vol. 15, No. 5, 2002.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

International Organization for Standardization (ISO). *Explosion Protection Systems – Part 1: Determination of Explosion Indices of Combustible Dusts in Air.* ISO 6184/1, dernière version.

National Fire Protection Association (NFPA). *Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installation in Chemical Process Areas.* NFPA 499, dernière version.

National Fire Protection Association (NFPA). *Recommended Practice on Static Electricity.* NFPA 77, dernière version.

National Fire Protection Association (NFPA). *Standard on Explosion Prevention Systems.* NFPA 69, dernière version.

National Fire Protection Association (NFPA). *Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting.* NFPA 68, dernière version.

University of Exeter, Centre for Additive Layer Manufacturing. What is additive layer manufacturing? http://emps.exeter.ac.uk/engineering/research/calm/whatis. Consulté le 16 octobre 2016.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Directive VDI 2263 Part 8.1, *Dust Fires and Dust Explosions; Hazards, Assessment, Protective Measures; Fire and Explosion Protection on Elevators.* 2011.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Directive VDI 3673, Part 1, « Pressure Venting of Dust Explosions. » Dernière version.

ANNEXE A GLOSSAIRE

Agréé FM : les mentions « agréé FM » de cette fiche technique signifient que le produit ou le service satisfait aux critères d'agrément de FM Approvals. Se reporter au Guide des produits agréés FM pour obtenir la liste complète des produits et services agréés FM.

A_v : surface d'évent d'explosion

Bara : bar, absolu (unité de pression).

Barg : bar, jauge (unité de pression).

CME : concentration minimale d'explosion, la concentration la plus basse à laquelle une poussière peut exploser. (Les termes LIE [limite inférieure d'explosivité] ou LII [limite inférieure d'inflammabilité] ont la même signification, mais ne sont pas souvent utilisés dans le cadre d'explosions de poussière.)

Collecteur de poussière ouvert : dispositif conçu et utilisé pour éliminer la poussière de l'air de transport lorsque le matériau filtrant n'est pas enfermé ou dans une enceinte.

Collecteur filtrant : dispositif (enceinte) qui extrait les matériaux secs et solides de l'air en faisant passer l'air à travers un matériau filtrant sec. Par exemple, les enceintes équipées de filtres à manche, de filtres à cartouche (généralement un filtre plissé de forme cylindrique, similaire aux filtres à air automobiles), de filtres à tambour rotatif et de filtres de panneau. (Voir la fiche technique 1-45, *Air Conditioning and Ventilating Systems* et la fiche technique 7-73, *Dust Collectors and Collection Systems*, pour plus d'informations sur les types de filtres.)

Construction anti-explosion : construction conçue pour minimiser les dommages dus à une déflagration (explosion) dans l'équipement ou le bâtiment. Il peut s'agir d'une construction résistant à la pression, soufflable ou d'une combinaison des deux. La plupart du temps, il s'agit d'évents réalisés avec des panneaux ou d'enceintes (bâtiments ou équipements) libérant la pression à une pression inférieure à la pression de résistance de l'enceinte.

EMI (énergie minimale d'inflammation) : quantité minimale d'énergie thermique libérée à un point d'un mélange combustible pour provoquer une propagation de flamme dans des conditions d'essai spécifiées. La valeur la plus basse de l'EMI, appelée LMIE, se trouve à un mélange optimal. Cette valeur est généralement considérée comme étant l'EMI.

Equipement ou enceinte faible : structure incapable de résister à des pressions d'explosion supérieures à 0,2 barg sans être endommagée ou détruite. Cela inclut la plupart des pièces, des bâtiments et de nombreux équipements de traitement nord-américains.

Equipement robuste : équipement capable de résister à des pressions d'explosion supérieures à 0,2 barg sans être endommagé ou détruit. Cela inclut la plupart des équipements de traitement construits ou utilisés en Europe.

Equipotentialité : connexion électrique entre deux objets conducteurs pour minimiser toute différence de potentiel électrique entre eux.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Flegmatisation : procédé de mélange de poussières inertes avec des poussières combustibles pour réduire ou éliminer le risque d'explosion.

Forte source d'ignition : une forte ignition peut fournir plus de 100 joules d'énergie.

a) Les exemples d'une forte source d'ignition incluent une flamme nue, un arc électrique ou de soudage, ou une explosion de gaz ou de poussière.

b) A l'inverse, les étincelles de frottement, de chocs mécaniques ou d'électricité statique, les cigarettes ainsi que les surfaces chaudes et les composants électriques surchauffés ne sont pas considérés comme des sources d'ignition fortes.

Isolement contre les explosions : système ou dispositif unique qui empêchent la propagation des effets d'explosion d'un volume à un volume adjacent.

K_{st} *:* la constante d'explosivité de la poussière, définie comme le taux maximal d'augmentation de pression d'une explosion de poussière dans un équipement de 1 mètre cube. Les unités sont en bars mètres par seconde (bar m/s). La méthode de test utilisée pour obtenir cette constante est standardisée dans le monde entier. Cette valeur (K_{st}) est utilisée dans tous les dimensionnements modernes d'évents d'explosion de poussière pour caractériser la réactivité (c'est-à-dire l'explosivité) d'une poussière particulière. Seules les unités métriques sont utilisées pour cette constante.

Limitation des explosions : méthodes utilisées pour réduire les dommages postérieurs à une explosion.

Limite d'élasticité : pression à laquelle une enceinte sera déformée sans rompre.

Liquide qui peut brûler : tout mélange liquide ou liquide capable d'alimenter un feu, y compris les liquides inflammables, les liquides combustibles ou toute autre référence à un liquide capable de brûler. Un liquide qui peut brûler doit avoir un point de feu.

Mise à la terre : connexion électrique entre un objet conducteur et la terre qui minimise la différence de potentiel électrique entre l'objet et la terre.

$P_{blast,\ max}$ *:* pression localisée résultant de la boule de feu et de la pression d'une explosion avec évents.

Plaque tubulaire : plaque de montage pour les filtres à cartouche ou les filtres à manches et tubulaires.

P_{max} *:* pression maximale développée dans la sphère de 20 litres lors du test des caractéristiques d'explosibilité de la poussière par la méthode ASTM E1226. Ce facteur est utilisé pour aider à dimensionner les évents d'explosion.

Poussière : petites particules solides capables d'être suspendues dans l'air par coulage, soufflage, meulage, etc. Dans le cadre de cette fiche technique, elle fait uniquement référence aux poussières combustibles.

Poussière combustible : tout matériau organique (agricole, plastique, chimique, charbon, etc.), toute particule métallique non oxydée ou tout autre matériau oxydable (p. ex. stéarate de zinc) doivent être considérés comme combustibles. Les tests impliquant l'application d'une étincelle, d'une flamme de feu d'allumettes, d'une flamme de bec Bunsen ou d'un brûleur de Meker sur de petites couches ou un tas de matériaux peuvent aider à identifier ces matériaux. Cela peut cependant produire des faux négatifs.

Poussière explosive : établi par la norme ASTM E1226, Standard Test Method for the Explosibility of Dust Clouds ou norme internationale équivalente (par ex. EN 14034-1, Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds - Part 1: Determination of the Maximum Explosion Pressure P_{max} of Dust Clouds, et EN 14034-2, Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds - Part 2: Determination of the Maximum Rate of Explosion Pressure Rise $[dP/dt]_{max}$) of Dust Clouds). Une poussière qui ne s'enflamme pas dans les tests de couche ou de tas peut être considérée comme explosive dans un test de type E1226.

P_{red} *:* pression d'explosion la plus élevée dans un équipement protégé par des évents d'explosion ; exprimée habituellement en barg.

Prévention des explosions : méthodes utilisées pour empêcher une explosion en contrôlant l'air, le carburant, la source d'ignition ou une combinaison de ces méthodes.

Psia : livres par pouce carré, absolu (unité de pression).

Psig : livres par pouce carré, jauge (unité de pression).

P_{stat} *:* pression de décharge d'évent d'explosion ; exprimée habituellement en barg.

Résistance limite : pression à laquelle une enceinte est éventrée (rupture).

Résistance nominale : pression à laquelle un équipement peut être exposé sans risque de dommage (car un facteur de sécurité a été appliqué à la limite d'élasticité).

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Séparateur d'air et de matières : terme général désignant un dispositif conçu pour séparer les poudres de l'air dans lequel elles sont transportées. Il s'agit généralement d'un cyclone ou d'un collecteur de poussière.

Vannes à double clapet : agencement de deux robinets-vannes ou de deux vannes papillon en série. Un seul dispositif est ouvert à la fois. Cette vanne est souvent utilisée lorsque le matériau déchargé d'un équipement est acheminé par gravité vers un autre équipement (c'est-à-dire non transporté de manière pneumatique), tel qu'un collecteur de poussière se déchargeant dans une trémie en dessous, un mélangeur de matériau ou un broyeur se déchargeant dans un système de transport pneumatique.

ANNEXE B HISTORIQUE DE REVISION DU DOCUMENT

Avril 2017. Révision intermédiaire. La recommandation 2.7.2.3 sur la protection des élévateurs à godets a été modifiée pour plus de clarté.

Janvier 2017. Révision intermédiaire. Les modifications suivantes ont été apportées :

A. Ajout d'un nouveau matériau sur la fabrication additive (impression 3D).

B. Elargissement des critères de conception des évents d'explosion et ajout de critères de protection contre les incendies pour les élévateurs à godets.

C. Ajout d'un nouveau matériau sur les collecteurs de poussière ouverts.

D. Informations étendues sur l'application correcte des systèmes d'évent avec arrête-flamme (tubes et tuyaux de décharge).

E. Modifications éditoriales.

Octobre 2014. Révision intermédiaire. La définition d'une poussière explosive a été modifiée pour s'aligner sur les pratiques de l'industrie en supprimant la limite de taille de particules spécifique.

Janvier 2014. Changements éditoriaux mineurs.

Avril 2013 Changements éditoriaux mineurs.

Janvier 2012. La terminologie relative aux liquides qui peuvent brûler a été révisée, afin d'offrir une clarté et une cohérence accrues en ce qui concerne les recommandations de prévention des sinistres de FM Global en matière de risques de liquides qui peuvent brûler.

Mars 2009. Changements éditoriaux mineurs apportés au cours de cette révision.

Janvier 2009. L'équation de la section 2.4.2.2.1 a été corrigée.

Mai 2008. Le document a été réorganisé pour plus de clarté et de facilité d'utilisation, en particulier les recommandations. Ajout de conseils en matière de construction et emplacement sur les lieux préférés pour les activités présentant un risque associé à la poussière. Accent mis sur les éléments d'élimination ou de réduction des risques d'explosion.

Ajout de réducteurs comme méthode d'isolement.

Les critères des ventilateurs et des souffleries situés dans des flux de poussière fugitive, où ils peuvent devenir une source d'ignition dans une atmosphère pouvant dépasser la CME, ont été affinés.

Simplification des critères de protection des équipements dont la robustesse est inconnue.

Résolution des incohérences avec d'autres fiches techniques, notamment la fiche technique 7-73, *Dust Collectors.*

Simplification de la section Recommandations.

Mai 2006. Changements éditoriaux mineurs apportés au cours de cette révision.

La nouvelle section 3.2.3.9.1, Masse type de l'évent réalisé avec des panneaux (inertie) a été ajoutée.

Mai 2005. Ajout de recommandations pour la mise en œuvre d'une gestion d'un programme de changement.

Janvier 2005. Modifications éditoriales mineures

Mai 2004. Modifications éditoriales mineures, Mai 2003 Modifications éditoriales mineures

Janvier 2001. Le document a été réorganisé pour proposer un format cohérent.

Août 1995. Révisions majeures mettant en œuvre la technologie de dimensionnement des évents basée sur le K_{st} et abandonnant la méthode précédente de surface d'évent par volume protégé.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

Cette fiche technique inclut de nombreuses nouvelles recommandations qui n'étaient pas dans l'édition 1976, mais de nombreux emplacements nécessiteront une protection inférieure à celle requise par la version précédente. Les exceptions suivantes s'appliquent aux exigences générales de protection contre les explosions :

- L'évent d'explosion n'est pas nécessaire pour les cyclones qui manipulent des poussières dont le K_{st} est inférieur à 80 (faiblement explosif) et possédant une sortie de gaz ouverte sur la partie supérieure, dont le diamètre est égal ou supérieur à 45 % du diamètre du cyclone.
- Les systèmes fonctionnant à une pression inférieure à 0,1 bara ne nécessitent aucune protection.
- Les séchoirs par atomisation nécessitent une valeur réduite d'évent d'explosion par rapport aux autres équipements ayant le même volume. Remarque : la surface d'évent d'explosion des séchoirs par atomisation et des autres équipements est désormais calculée à l'aide du logiciel FM Global Research DustCalc.

ANNEXE C INFORMATIONS DE RECHERCHE SUR LES RISQUES D'EXPLOSION DE POUSSIERE

Consulter l'article suivant :

Tamanini, F. and Valiulis, J.V. « Improved guidelines for the sizing or vents in dust explosions », Journal of Loss Prevention in the Process Industries (Vol. 9. No. 1. 1996), 105-118

ANNEXE D BIBLIOGRAPHIE

1. Alfert, F., et K. Fuhre. Flame and Dust Free Venting of Dust Explosions by Means of a Quenching Pipe. CMI-Report No. 89-25820-1. Chr. Michelsen Institute (Norway), 1989.

2. Bartknecht, W. Dust Explosions: Course, Prevention, Protection. Springer-Verlag, New York, NY, 1989.

3. Cooper, M. G., et. al. « On the Mechanisms of Pressure Generation in Vented Explosions. » Combustion and Flame (1986) 65: 1-14.

4. Cubbage, P. A., et W. A. Simmonds. « An Investigation of Explosion Reliefs for Industrial Drying Ovens. I-Top Reliefs in Box Ovens. » Transactions of the Institute of Gas Engineers (1955) 105: 470-526.

5. DeGood, R. « Isolation: Another Way to Take the Bang out of Explosions. » CPI Equipment Reporter (Jan-Feb 1988).

6. Eckoff, R. K. Dust Explosions in the Process Industries. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1991.

7. Green, D. W., et R. H. Perry. Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition (Chemical Engineers Handbook). New York McGraw-Hill, 2007.

8. Hurlimann, H. « Results from Real Scale Explosion Tests. » Third International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Basel, Switzerland, 1980.

9. Lunn, G. A. Dust Explosion Prevention and Protection Part 3 — Venting of Weak Explosions and the Effect of Vent Ducts. Rugby: Institute of Chemical Engineers, 1988.

10. Pineau, J. P. « Protection Against Fire and Explosion in Milk Powder Plants. » Europex First International Symposium, Antwerp, Belgium, April 16–19, 1984.

11. Siwek, R. « A Review of Explosion Isolating Techniques. » Europex International Seminar, March 1996.

12. Siwek, R. « New Knowledge About Rotary Air Locks in Preventing Dust Ignition Breakthrough. » Plant Operations Progress (July 1989) Vol. 8, No. 3: 165-176.

13. Siwek, R., et O. Skov. « Modellberechnung zur Dimensionierung von Explosionsklappen auf der Basis von praxisnahen Explosionsversuchen. » VDI Berichte (1988) 701: 569-616.

14. van Wingerden, C. J. M., et H. J. Pasman. « Explosion Venting of Partially Filled Enclosures. » Conference on Flammable Dust Explosions, St. Louis, Missouri, USA, November 2–4, 1988.

15. van Wingerden, K. « Prediction of pressure and flame effects in the direct surroundings of installations protected by dust explosion venting. » Journal of Loss Prevention in the Process Industries (Vol. 6, No. 4, 1993): 241-249.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.

16. WirknerBott, I., et. al. « Dust Explosion Venting: Investigation of the Secondary Explosion. » Paper presented at the Seventh International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Taormina, Italy, 1992.

17. Zeeuwen, J. P., et G. G. M. van Laar. « Explosion Venting of Enclosures Partially Filled with Flammable DustAir Mixtures. » International Symposium on Control of Risks in Handling and Storage of Granular Foods, Paris, France, April 2426, 1985.

©2008-2017 Factory Mutual Insurance Company. Tous droits réservés.