



Formalisation du savoir et des outils dans le
domaine des risques majeurs
(DRA-35)

Ω-14

Sécurité des procédés mettant en
œuvre des pulvérulents
combustibles

Ministère de l'Écologie et du Développement
Durable

Direction des Risques Accidentels

Décembre 2004

Sécurité des procédés mettant en œuvre des pulvérulents combustibles

Ω -14

INERIS

Ce document comporte 76 pages (hors couverture).

Direction des Risques Accidentels

DECEMBRE 2004

Auteurs	Qualité	Emargement
J. CHAINEAUX	Adjoint au responsable de l'unité sécurité des procédés, Direction des risques accidentels	Signé
Relecteurs	Qualité	Emargement
R. LÖDEL	Délégué aux prestations privées, Direction des Risques Accidentels	Signé
C. JOLY	Responsable du suivi du volet 1 du programme DRA-35	Signé
B. DEBRAY	Responsable du programme DRA-35	Signé
Vérificateur final	Qualité	Emargement
O. SALVI	Délégué Scientifique de la Direction des Risques Accidentels	Signé
Approbateur	Qualité	Emargement
B. FAUCHER	Directeur de la Direction des Risques Accidentels	Signé

PREAMBULE

Le présent document a été établi :

- au vu des données scientifiques et techniques disponibles ayant fait l'objet d'une publication reconnue ou d'un consensus entre experts,
- au vu du cadre légal, réglementaire ou normatif applicable.

Il s'agit de données et informations en vigueur à la date de l'édition du document, décembre 2004.

Le présent document comprend des propositions ou recommandations. Il n'a en aucun cas pour objectif de se substituer au pouvoir de décision du ou des gestionnaire(s) du risque ou d'être partie prenante.

TABLE DES MATIERES

GLOSSAIRE (CHAPITRE FONCTIONNEL)	7
1. INTRODUCTION	9
1.1 Contexte général.....	9
1.2 Objet du document	9
1.3 Domaine d'application.....	10
1.4 Contenu du document	11
2. PHÉNOMÈNES REDOUTÉS DANS LA MISE EN ŒUVRE D'UN PULVÉRULENT COMBUSTIBLE EN PRÉSENCE D'AIR	12
2.1 Explosion d'ATEX	12
2.1.1 Définition.....	12
2.1.2 Conditions d'occurrence	12
2.1.2.1 Conditions 1 et 2 : l'explosion résulte d'une combustion.....	14
2.1.2.2 Condition 3 : le pulvérulent doit être fin et dispersé dans l'air	14
2.1.2.3 Condition 4 : les proportions de l'air et du pulvérulent doivent être adéquates	14
2.1.2.4 Condition 5 : l'amorçage d'une explosion nécessite une source d'inflammation	15
2.1.2.5 Condition 6 : l'occurrence d'une explosion nécessite un confinement et une quantité minimale d'ATEX contenue dans ce confinement	16
2.1.3 Effets d'une explosion.....	17
2.1.3.1 Effets mécaniques.....	17
2.1.3.2 Effets thermiques.....	17
2.2 Incendie d'une substance solide	18
2.2.1 Définition.....	18
2.2.2 Similitudes et différences entre incendie et explosion	18
2.2.3 Effets d'un incendie.....	18
2.3 Auto-échauffement	19
2.4 Inflammation de gaz de pyrolyse d'un dépôt de produits pulvérulents	19
2.5 Caractéristiques des pulvérulents combustibles	20
2.5.1 Température de début d'oxydation sous air.....	20
2.5.2 Dimension et température critiques d'un stockage	20
2.5.3 Température d'auto-inflammation (TAI) d'un produit en dépôt de 5 mm	20
2.5.4 Température d'auto-inflammation (TAI) d'un produit en nuage.....	21
2.5.5 Energie minimale d'inflammation (EMI)	21
2.5.6 Caractéristiques de violence d'explosion (Kst) et de pression maximale d'explosion (Pmax) 21	
2.5.7 Limites d'explosivité.....	22
2.5.8 Concentration limite en oxygène (CLO)	22
3. RAPPEL RÉGLEMENTAIRE	22

3.1	Prise en compte dans le Code du travail des incendies et des explosions d'ATEX mettant en cause un pulvérulent.....	23
3.1.1	Dispositions générales prévues par le Code du travail.....	23
3.1.2	Dispositions particulières prévues par le Code du travail.....	24
3.1.2.1	Dispositions relatives au risque d'incendie :	24
3.1.2.2	Dispositions relatives au risque d'explosion d'ATEX.....	24
3.2	Prise en compte des explosions d'ATEX et des incendies de pulvérulent dans le Code de l'Environnement.....	26
3.2.1	Prise en compte des incendies et des explosions.....	26
3.2.2	Aspects particuliers aux explosions d'ATEX.....	28
4.	PRINCIPAUX PROCÉDÉS CONCERNÉS ET RISQUES ASSOCIÉS.....	28
4.1	Procédés de manutention.....	29
4.1.1	Description sommaire.....	29
4.1.1.1	Bande transporteuse.....	29
4.1.1.2	Transporteur à chaîne.....	30
4.1.1.3	Vis d'Archimède.....	30
4.1.1.4	Elévateur à godets.....	30
4.1.1.5	Transport pneumatique.....	30
4.1.2	Evaluation sommaire des risques.....	31
4.1.2.1	Possibilités de formation d'ATEX.....	31
4.1.2.2	Sources d'inflammation possibles des ATEX formées.....	31
4.1.3	Eléments d'accidentologie.....	31
4.1.4	Moyens de prévention/détection/protection courants.....	32
4.2	Procédés de stockage.....	33
4.2.1	Description sommaire.....	33
4.2.2	Evaluation sommaire des risques.....	33
4.2.2.1	Possibilités de formation d'ATEX.....	33
4.2.2.2	Sources d'inflammation possibles des ATEX formées.....	34
4.2.2.3	Autres phénomènes redoutés.....	34
4.2.3	Eléments d'accidentologie.....	34
4.2.4	Moyens de prévention/détection/protection courants.....	35
4.2.4.1	Moyens de prévention.....	35
4.2.4.2	Moyens de détection.....	36
4.2.4.3	Moyens de protection.....	36
4.3	Procédés de broyage.....	36
4.3.1	Description sommaire.....	36
4.3.2	Evaluation sommaire des risques.....	37
4.3.2.1	Possibilité de formation d'ATEX.....	37
4.3.2.2	Sources d'inflammation possibles des ATEX formées.....	37
4.3.3	Eléments d'accidentologie.....	37
4.3.4	Moyens de prévention/détection/protection courants.....	38
4.3.4.1	Moyens de prévention.....	38
4.3.4.2	Moyens de détection.....	39
4.3.4.3	Moyens de protection.....	39
4.4	Procédés de mélangeage.....	39
4.4.1	Description sommaire.....	39
4.4.2	Mélangeage à sec.....	39
4.4.2.1	Evaluation sommaire des risques.....	40
4.4.2.2	Eléments d'accidentologie.....	40
4.4.2.3	Moyens de prévention/détection/protection courants.....	40

4.4.3	Mélangeage en phase liquide.....	40
4.4.3.1	Evaluation sommaire des risques	40
4.4.3.2	Retour d'expérience d'accidents	42
4.4.3.3	Détermination des zones à risque.....	42
4.4.3.4	Mesures de prévention et de protection.....	44
4.5	Procédés de dépeussierage.....	45
4.5.1	Description sommaire.....	45
4.5.1.1	Cyclone.....	45
4.5.1.2	Filtre à manches	46
4.5.1.3	dépeussierateur électrostatique.....	48
4.5.1.4	dépeussierateur humide	48
4.5.2	Sécurité des procédés de dépeussierage.....	48
4.5.2.1	Filtre à manches	48
4.5.2.2	Autres procédés de dépeussierage	50
4.6	Procédés de traitement mécanique de surface.....	53
4.6.1	Description sommaire.....	53
4.6.2	Evaluation sommaire des risques	53
4.6.3	Eléments d'accidentologie.....	54
4.6.4	Moyens de prévention/détection/protection courants	55
4.7	Procédés de séchage.....	55
4.7.1	Description sommaire des différents procédés de séchage et de leur principe	55
4.7.1.1	Procédés discontinus	56
4.7.1.2	Procédés continus	57
4.7.2	Sécurité des procédés de séchage	60
4.7.2.1	Evaluation sommaire des risques	60
4.7.3	Eléments d'accidentologie.....	61
4.7.3.1	Cas des atomiseurs.....	61
4.7.3.2	Cas d'autres procédés de séchage	62
4.7.4	Sécurité des procédés où le produit est séché en masse.....	62
4.7.5	Sécurité des procédés où le produit est dispersé dans un flux de gaz.....	63
4.7.5.1	Cas d'un sécheur flash.....	63
4.7.5.2	Cas d'un atomiseur.....	64
4.8	Procédés de combustion/incinération.....	69
4.8.1	Description sommaire.....	69
4.8.2	Evaluation sommaire des risques liés à l'exploitation de procédés de combustion de déchets.....	70
4.8.3	Eléments d'accidentologie.....	70
4.8.4	Moyens de prévention/détection/protection courants	70
4.9	Procédés de revêtement de surface	71
4.9.1	Description sommaire.....	71
4.9.2	Evaluation sommaire des risques	72
4.9.3	Eléments d'accidentologie.....	72
4.9.4	Moyens de prévention/détection/protection courants	73
5.	CONCLUSION	74
	BIBLIOGRAPHIE	75

GLOSSAIRE (CHAPITRE FONCTIONNEL)

Combustibilité : la combustibilité d'une substance est son aptitude à donner lieu à une réaction de combustion en présence d'air (ce mot peut être considéré comme synonyme d'oxydabilité).

Oxydabilité : l'oxydabilité d'une substance est son aptitude à donner lieu à une réaction d'oxydation par l'oxygène de l'air (ce mot peut être considéré comme synonyme de combustibilité)

Atmosphère explosive: une atmosphère explosive (ATEX) est un mélange avec l'air, dans les conditions atmosphériques, de substances combustibles (ou oxydables), sous forme de gaz, vapeurs, brouillards ou poussières, dans lequel, après inflammation, la combustion se propage à l'ensemble du mélange non brûlé.

Nuage de poussière : milieu constitué d'une substance pulvérulente dispersée dans l'air.

Explosion d'ATEX : phénomène par lequel le système réactionnel constitutif d'une atmosphère explosive (mélange air-combustible) donne lieu à une réaction de combustion rapide et fortement exothermique, avec production de gaz portés à haute température dont l'expansion peut produire des effets mécaniques.

Explosivité : l'explosivité d'un mélange air-combustible est son aptitude à donner lieu à une explosion d'ATEX.

Energie minimale d'inflammation : l'énergie minimale d'inflammation (EMI) est la quantité minimale d'énergie qui doit être apportée localement à une ATEX pour que la réaction de combustion puisse s'amorcer.

Source d'inflammation : la source d'inflammation est le phénomène qui apporte l'énergie nécessaire à l'inflammation d'une ATEX.

Pyrolyse : phénomène par lequel une molécule se décompose, en absence d'air, en molécules plus petites sous l'effet d'une température élevée.

Incendie : l'incendie d'une substance solide, pulvérulente ou non, est le phénomène par lequel les gaz qui sont issus de la pyrolyse de cette substance subissent une combustion en présence de l'oxygène de l'air (pour une substance liquide, c'est le phénomène par lequel la vapeur résultant de la vaporisation de cette substance ou les gaz issus de sa pyrolyse subissent une combustion en présence de l'oxygène de l'air).

Flamme : dans le domaine de l'explosion d'ATEX, la flamme est la zone mince où les réactifs constitutifs d'une ATEX (le mélange air-combustible) se transforment en produits de combustion : cette flamme est appelée "flamme de prémélange" ; dans le domaine de l'incendie, la flamme est la zone où les substances combustibles (gaz issus de la pyrolyse d'une substance solide ou liquide, ou vapeurs résultant de la vaporisation d'une substance liquide) subissent une oxydation en présence de l'oxygène de l'air : cette flamme est appelée "flamme de diffusion".

Inflammabilité : l'inflammabilité d'une substance est, soit son aptitude à former, en mélange avec l'air, une ATEX (selon cette définition, les qualificatifs "inflammable", "combustible" et "oxydable" sont équivalents), soit son aptitude à donner lieu à un phénomène d'incendie.*

Granulométrie : Répartition dimensionnelle des grains constitutifs d'un produit pulvérulent.

Auto-échauffement : phénomène par lequel une substance pulvérulente combustible, placée en présence d'air et à une température voisine de l'ambiante, subit en masse une oxydation qui, d'abord lente, s'accélère progressivement en échauffant la substance jusqu'à permettre éventuellement sa combustion vive à température élevée.

Event d'explosion : dispositif de protection passif d'un confinement contre la surpression résultant d'une explosion : équipant la paroi du confinement, ce dispositif a une pression d'ouverture suffisamment faible et une surface suffisamment grande pour que, en cas d'explosion interne, les gaz d'explosion soient déchargés à l'extérieur et pour que la surpression maximale atteinte dans le confinement reste inférieure à la surpression qui l'endommagerait.

Suppresseur d'explosion : dispositif de protection actif d'un confinement contre la surpression résultant d'une explosion : constitué de plusieurs éléments (détecteur d'explosion, centrale de commande et récipient(s) sous pression d'un produit extincteur), ce dispositif est destiné à la détection de l'amorçage d'une explosion dans le confinement, puis au déclenchement de l'injection du produit extincteur, le tout dans un délai suffisamment court pour que la surpression maximale atteinte dans le confinement reste inférieure à la surpression qui l'endommagerait.

Dispositif d'isolement : dispositif de protection contre l'explosion d'une installation constituée d'une capacité reliée à des canalisations : installé sur une canalisation au plus près de la capacité, ce dispositif est destiné à empêcher que la flamme d'une explosion amorcée dans la capacité puisse se propager dans la canalisation. Il doit être associé à un dispositif de protection de la capacité contre la surpression résultant de l'explosion. Il existe des dispositifs passifs (vanne VENTEX, certains types de vanne rotative...) et des dispositifs actifs (vanne à fermeture rapide)

* Cette définition est une alternative équivalente à la définition suivante extraite de la norme NF EN 1127-1 : **Substance inflammable** : Substance sous forme de gaz, de vapeur, de liquide, de solide ou de leurs mélanges, capable de subir une réaction exothermique avec l'air après inflammation.

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE GENERAL

Depuis l'année 2000, le Ministère en charge de l'Environnement (anciennement Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement devenu Ministère de l'Écologie et du Développement Durable) finance un programme d'études et de recherches, intitulé depuis 2003 « Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs » (DRA-35).

L'objet du premier volet de ce programme est de réaliser un recueil global formalisant l'expertise de l'INERIS dans le domaine des risques accidentels. Ce recueil évolutif sera constitué de différents rapports consacrés aux thèmes suivants :

- les phénomènes physiques impliqués en situation accidentelle (incendie, explosion, BLEVE...)
- l'analyse et la maîtrise des risques,
- les aspects méthodologiques pour la réalisation de prestations réglementaires (étude de dangers, analyse critique..).

Chacun de ces documents reçoit un identifiant propre du type « Ω -X » afin de faciliter le suivi des différentes versions éventuelles du document.

In fine, ces documents décrivant les méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels, constitueront un recueil des méthodes de travail de l'INERIS dans le domaine des risques accidentels.

1.2 OBJET DU DOCUMENT

L'objet du présent document est de présenter un état exhaustif des connaissances actuelles de l'INERIS dans le domaine de l'exploitation de procédés mettant en œuvre des pulvérulents combustibles et, plus spécifiquement, de la prévention des risques liés au caractère combustible de ces pulvérulents.

Le présent document a été élaboré, relu et validé par différentes personnes de la Direction des Risques Accidentels (DRA), en particulier de son Unité Sécurité des Procédés (PROC), qui a une longue expérience en la matière (conseil, expertise, enquête après accident).

A ce titre, il doit donc être considéré comme un document de référence, à utiliser dans le cadre de la prévention et de la protection contre les risques d'explosion, d'incendie et d'auto-échauffement, lors de l'exploitation des procédés concernés, que ce soit pour satisfaire aux exigences de réglementations applicables, ou dans le cadre de tierces expertises.

Le présent document doit être considéré comme un document évolutif, qui est à jour à la date de sa rédaction et qui devra être remis à jour à chaque fois que ce sera nécessaire, en particulier lorsque l'expérience acquise dans la mise en œuvre de telle technique et de tel procédé nouveau de prévention ou de protection contre l'explosion, l'auto-échauffement et l'incendie, dans les procédés où sont mis en œuvre des pulvérulents combustibles, aura permis d'établir leur efficacité.

1.3 DOMAINE D'APPLICATION

Les industries les plus variées nécessitent la mise en œuvre de produits pulvérulents combustibles, en tant que matière première, produit intermédiaire, additif, produit fini, ou déchet, par exemple :

- la chimie,
- la pharmacie,
- l'industrie agro-alimentaire,
- la métallurgie,
- la sidérurgie,
- l'industrie du bois,
- la production d'énergie à partir de charbon ou de coke de pétrole,
- le traitement des déchets et des boues de stations d'épuration.

Dans chaque type d'industrie, l'élaboration des produits nécessite l'exploitation de différents procédés où des solides pulvérulents sont impliqués, soit qu'ils y soient introduits sous cette forme, soit que leur formation résulte de l'exploitation du procédé lui-même (en tant que produit, co-produit ou déchet) :

- Stockage,
- Manutention,
- Broyage,
- Tamisage/Filtration,
- Mélangeage,
- Polissage,
- Dépoussiérage,
- Séchage,
- Incinération,
- Revêtement

Quels que soient les procédés concernés, ils présentent a priori un risque d'explosion si les produits mis en œuvre ont une granulométrie suffisamment fine et s'ils peuvent se trouver dispersés dans l'air sous forme de nuage de poussière, dans certaines proportions. Cette possibilité existe en général non seulement à l'intérieur même des équipements, mais aussi à proximité des équipements, dans les locaux de travail.

Dans les procédés où les produits se trouvent en présence d'air, non plus sous forme de nuage mais en masse ou en couche, il existe un risque d'incendie et éventuellement aussi d'auto-échauffement. Ces produits peuvent aussi être à l'origine d'explosions de gaz formés par la pyrolyse des dépôts pulvérulents.

En fait, compte tenu que tous ces phénomènes résultent d'une combustion du pulvérulent mis en œuvre, ils sont interdépendants et l'expérience montre que l'un peut être la conséquence ou à l'origine de l'autre (par exemple, une explosion peut amorcer un incendie, de même qu'un auto-échauffement peut être à l'origine d'une explosion).

1.4 CONTENU DU DOCUMENT

Dans une première partie, sont présentées :

- les caractéristiques des phénomènes d'explosion, d'auto-échauffement et d'incendie mettant en jeu ces produits (définition, conditions d'occurrence, mécanisme, effets)
- les principales caractéristiques des pulvérulents combustibles qui permettent de prédire leur comportement dans les phénomènes d'explosion, d'auto-échauffement et d'incendie.

Dans une seconde partie, sont présentées les obligations générales auxquelles doivent satisfaire les exploitants des procédés concernés, dans le cadre des réglementations suivantes :

- ◆ la réglementation ATEX relative à l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs exposés aux risques des ATEX,
- ◆ la réglementation des installations classées.

Enfin, dans une troisième partie, sont décrits les principaux procédés industriels où sont mis en œuvre des pulvérulents combustibles et qui présentent donc des risques d'explosion et d'incendie ; pour chaque procédé sont présentés :

- ses fonctions, composants essentiels et principaux paramètres de fonctionnement,
- les situations qui peuvent conduire à l'occurrence d'une explosion, d'un auto-échauffement ou d'un incendie,
- l'accidentologie,
- les moyens couramment mis en œuvre pour assurer la prévention des phénomènes redoutés ou la protection contre les effets des phénomènes redoutés.

2. PHENOMENES REDOUTES DANS LA MISE EN ŒUVRE D'UN PULVERULENT COMBUSTIBLE EN PRESENCE D'AIR

L'exploitation de procédés dans lesquels un ou plusieurs pulvérulents combustibles sont mis en œuvre en présence d'air expose a priori au risque d'occurrence des phénomènes dangereux suivants, qui peuvent donner lieu à des accidents graves, aussi bien en terme de dégâts humains que matériels :

- l'explosion d'un pulvérulent dispersé dans l'air,
- l'incendie d'un pulvérulent en masse,
- l'auto-échauffement d'un pulvérulent en masse.
- l'explosion d'un gaz résultant de la pyrolyse d'un dépôts de produits pulvérulents.

Pour chaque phénomène, nous rappelons sa définition, les principales conditions d'occurrence, ainsi qu'éventuellement son mécanisme et ses effets.

2.1 EXPLOSION D'ATEX

2.1.1 Définition

D'une façon générale, une explosion d'ATEX est le phénomène par lequel un système réactionnel constitué d'une atmosphère explosive donne lieu à une réaction chimique de combustion rapide et fortement exothermique, avec production de gaz portés à haute température dont l'expansion peut produire des effets mécaniques.

Dans le présent document, nous nous limiterons au cas où l'ATEX est constituée d'un pulvérulent combustible dispersé dans l'air.

Toutefois, les procédés de séchage qui sont considérés ici peuvent consister à sécher un pulvérulent imprégné d'un liquide inflammable et l'ATEX qui est susceptible de se former dans certaines de ces procédés est dite "hybride", car elle est constituée d'un mélange du pulvérulent et de la vapeur émise par le liquide.

2.1.2 Conditions d'occurrence

Il existe 6 conditions nécessaires à l'occurrence de l'explosion d'une ATEX air-pulvérulent :

1. présence d'air,
2. présence du pulvérulent combustible,
3. le pulvérulent doit être de granulométrie suffisamment fine, c'est-à-dire sous forme de grains de dimension moyenne inférieure à 300 μm , et dispersé dans l'air sous forme de nuage,

4. existence de proportions adéquates entre l'air et le pulvérulent (un tel mélange constitue l'ATEX),
5. présence d'une source d'inflammation dans l'ATEX,
6. présence d'un confinement suffisant de l'ATEX et d'un volume suffisant d'ATEX par rapport au volume de ce confinement,

Le schéma suivant [1] (appelé "hexagone de l'explosion de poussière") rassemble les conditions nécessaires à l'occurrence de l'explosion d'une ATEX, conditions qui sont examinées en détail dans la suite :

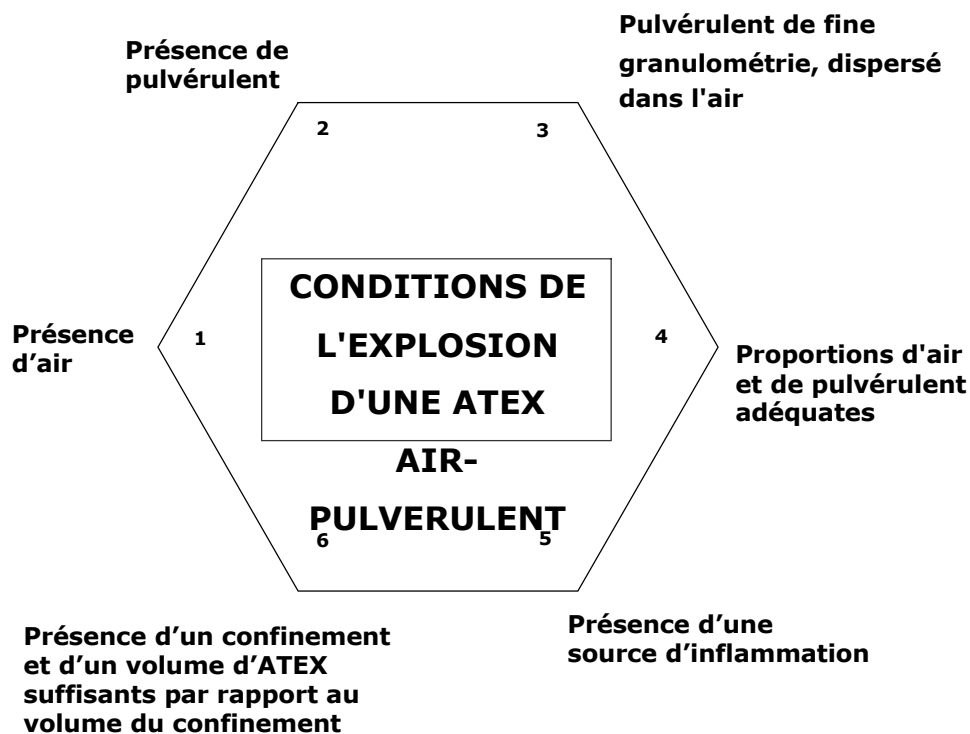
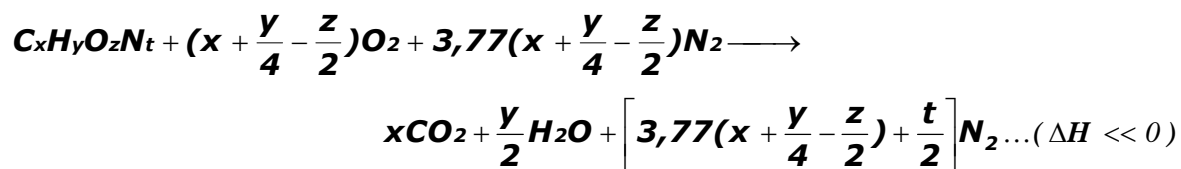


Figure 1 : Hexagone de l'explosion de poussières

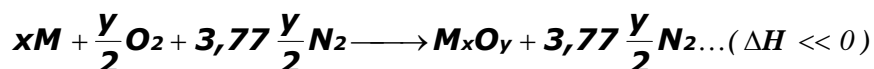
2.1.2.1 Conditions 1 et 2 : l'explosion résulte d'une combustion

Dans l'hypothèse où le pulvérulent est hydrocarboné, de formule type $C_xH_yO_zN_t$, la réaction de combustion stoechiométrique dans l'air s'écrit :



L'équation ci-dessus doit être considérée comme résumant le phénomène de combustion, mais elle ne rend pas compte du très grand nombre de réactions élémentaires qui interviennent en réalité. De plus, il est établi que ce n'est pas la molécule de pulvérulent elle-même qui subit la réaction de combustion, mais bien les gaz issus de la pyrolyse de cette molécule : la combustion se produit donc en phase gazeuse.

Dans le cas où le pulvérulent est un métalloïde ou un métal M, la réaction s'écrit :



Au contraire du cas précédent et selon la volatilité du métalloïde ou du métal, la combustion se produit généralement en phase hétérogène, gaz-liquide ou gaz-solide.

2.1.2.2 Condition 3 : le pulvérulent doit être fin et dispersé dans l'air

La réaction de combustion du pulvérulent dans l'air n'est capable de se produire dans les conditions d'une explosion que si la granulométrie du pulvérulent est suffisamment fine (dimension moyenne des grains inférieure à 300 μm) et si ces grains sont dispersés dans l'air sous forme de nuage.

2.1.2.3 Condition 4 : les proportions de l'air et du pulvérulent doivent être adéquates

Pour que la combustion puisse se produire dans les conditions d'une explosion, il existe une condition relative à la composition du mélange d'air et de pulvérulent : un mélange de composition stoechiométrique remplit cette condition et c'est d'ailleurs pratiquement pour cette composition que la température des gaz brûlés est la plus élevée.

Supposons que, à un mélange stœchiométrique, on ajoute de l'air (ce qui entraîne une diminution de la proportion de pulvérulent) : étant inutile à la combustion, cet excès d'air ne libère aucune énergie mais consomme celle nécessaire pour l'échauffer jusqu'à la température de la flamme. La température de la flamme diminue donc et cette diminution est d'autant plus importante que l'excès d'air augmente. Il existe une quantité d'air ajouté pour laquelle la température de la flamme a tellement diminué que le transfert d'énergie au mélange imbrûlé n'est plus suffisamment efficace et que la flamme ne peut plus se propager : la limite inférieure d'explosivité (LIE) est alors atteinte ; elle s'exprime en g/m^3 pour les solides pulvérulents.

Si l'on suppose que c'est un excès de pulvérulent et non un excès d'air, qui est ajouté à un mélange de composition stœchiométrique, la température de la flamme diminue pour la même raison que précédemment (à la différence que, lorsque le pulvérulent en excès est une molécule organique, il subit une pyrolyse qui le transforme en gaz combustibles tels que CO , CH_4 , et H_2) et il existe une quantité de pulvérulent ajouté pour laquelle la température de la flamme a tellement diminué que la flamme ne peut plus se propager : la limite supérieure d'explosivité (LSE) est atteinte ; elle s'exprime dans la même unité que la LIE.

Le domaine de concentration compris entre la LIE et la LSE est le domaine d'explosivité.

Les limites d'explosivité sont parfois appelées « limites d'inflammabilité » ; en fait, si l'on considère l'explosivité et l'inflammabilité comme étant respectivement l'aptitude d'une ATEX à exploser et son aptitude à propager une flamme, on peut considérer que ces mots sont synonymes :

- en effet, dans le domaine étudié ici, toute explosion résulte de la propagation d'une flamme,
- il est possible que la propagation d'une flamme se produise sans entraîner une explosion, mais c'est alors dû à l'environnement de l'ATEX et non pas à sa propre composition ; autrement dit, si une ATEX est inflammable, il est toujours possible de trouver des conditions de confinement pour lesquelles l'inflammation de cette ATEX produira son explosion.

2.1.2.4 Condition 5 : l'amorçage d'une explosion nécessite une source d'inflammation

Pour enflammer une ATEX, il faut qu'une quantité suffisante d'énergie lui soit apportée localement par une source d'inflammation.

La valeur de la quantité minimale d'énergie nécessaire est appelée l'énergie minimale d'inflammation (EMI) ; elle dépend de la nature du combustible et aussi de la composition de l'ATEX et elle est minimale pour une composition voisine de la composition stœchiométrique.

Pour les combustibles pulvérulents, elle est généralement comprise entre 0,1 et 100 J ; de plus, elle dépend de la granulométrie (elle est d'autant plus faible que la granulométrie est fine) et du taux d'humidité du pulvérulent (elle est d'autant plus faible que ce taux est faible).

Dans le cas d'une ATEX hybride (cf. § 2.1.1), la vapeur présente étant caractérisée par une EMI toujours nettement inférieure à celle du pulvérulent, il faut donc s'attendre à ce que l'EMI de l'ATEX hybride soit inférieure à l'EMI du pulvérulent seul.

L'expérience montre qu'il existe de nombreuses situations où une ATEX est susceptible de recevoir localement une énergie au moins égale à la valeur de l'EMI et donc capable d'enflammer cette ATEX.

Citons les sources d'inflammation les plus souvent mises en cause dans les explosions accidentelles :

- les flammes nues (briquet, chalumeau, brûleur...) ;
- une surface portée à température élevée et en contact avec l'ATEX, par le biais du phénomène d'auto-inflammation ; le phénomène d'auto-échauffement (cf. § 2.3) peut également être à l'origine de l'inflammation d'une ATEX ;
- les étincelles électriques produites par les matériels électriques standards (interrupteur, moteur...) ;
- les étincelles ou points chauds produits par le choc ou le frottement entre deux solides (pièces métalliques, par exemple) ;
- certaines étincelles de décharge électrostatique, pour les pulvérulents dont l'EMI est inférieure à 1 J. Au contraire, pour les pulvérulents dont l'EMI est sensiblement supérieure à 1 J, les phénomènes de décharge électrostatique ne libèrent pas suffisamment d'énergie pour constituer une source d'inflammation.

2.1.2.5 Condition 6 : l'occurrence d'une explosion nécessite un confinement et une quantité minimale d'ATEX contenue dans ce confinement

Si l'on admet qu'une explosion s'accompagne nécessairement d'effets de pression, ces effets ne peuvent être produits que si l'ATEX initiale est au moins partiellement confinée et si son volume représente une fraction suffisante du volume du confinement : en effet, la combustion produit des gaz chauds dont l'expansion est à l'origine d'une augmentation de la pression dans le confinement et, selon que la pression maximale atteinte en fin de combustion est supérieure ou inférieure à la pression de rupture de l'élément le plus fragile du confinement, l'explosion produira ou non des effets mécaniques.

Dans le cas d'une ATEX de composition voisine de la composition stoechiométrique, remplissant la totalité du volume d'un confinement de forme compacte résistant à la surpression d'explosion, la pression maximale développée par l'explosion de l'ATEX, enflammée au centre du récipient à la pression de 1 bar et à la température ambiante, est un peu inférieure à 10 bar.

Les paramètres suivants conditionnent la valeur que peut prendre la surpression maximale développée par l'explosion entre 0 et 10 bar :

- la composition de l'ATEX par rapport à la composition stoechiométrique,
- la forme allongée du confinement,
- la limitation du volume de l'ATEX par rapport à celui du confinement,

- le degré de confinement de l'ATEX (lorsque l'ATEX est contenue dans un confinement qui n'est pas complètement fermé mais seulement partiellement fermé).

Enfin, si l'ATEX n'est pas confinée, son inflammation ne produit pas d'effet mécanique mais seulement des effets thermiques qui ne doivent pas être négligés.

2.1.3 Effets d'une explosion

L'explosion d'une ATEX peut produire non seulement des effets mécaniques, mais aussi des effets thermiques.

2.1.3.1 Effets mécaniques

Les effets mécaniques, ou effets de pression, sont liés à l'expansion des gaz de combustion et se traduisent par l'émission d'une onde aérienne de surpression, dont l'intensité dépend du degré de confinement de l'ATEX et qui peut s'accompagner de la projection de débris.

Une explosion survenant au cours de l'exploitation des procédés envisagés ici produit des effets mécaniques dont la nature et l'intensité dépendent des caractéristiques de ces procédés, ainsi que des équipements correspondants :

- les procédés sont exploités à une pression égale ou peu supérieure à la pression atmosphérique,
- les ATEX se forment soit à l'intérieur des équipements, soit dans les locaux où ces équipements sont installés et où les pulvérulents ont formé des dépôts,
- au contraire des ATEX gazeuses, il n'existe guère de procédé dont l'exploitation peut conduire à la formation à l'air libre d'un volume important d'ATEX,
- la pression de rupture des équipements ne dépasse généralement pas quelques centaines de millibars et elle est encore plus faible pour les locaux,
- à cause des dimensions limitées de la plupart des équipements envisagés ici, il est rare qu'une explosion survenant au cours de l'exploitation de l'un des procédés envisagés ici produise des effets à l'extérieur du site,
- une exception notable à cette règle concerne les silos de céréales ou de sucre à cellules verticales : plusieurs accidents (Metz 1982, Blaye 1998) ont montré que ce type d'installation de grande hauteur pouvait être entièrement détruite par une explosion se développant à l'intérieur des cellules elles-mêmes et projetant des débris jusqu'à plusieurs centaines de mètres.

2.1.3.2 Effets thermiques

Les effets thermiques sont liés à la production de gaz de combustion dans la flamme :

- Une personne qui se trouverait dans l'ATEX initiale et même dans un volume 10 fois plus grand (volume correspondant à celui occupé par les gaz de combustion en fin d'explosion, qui peut être encore augmenté si le souffle de l'explosion soulève des poussières et augmente ainsi le volume de l'ATEX) subirait très probablement un effet létal,

- en revanche, la durée de la combustion est suffisamment brève pour que soit indemne de tout effet thermique une personne qui se trouverait en dehors du volume occupé par les gaz de combustion et qui ne serait donc exposée qu'au flux rayonné par la flamme.

2.2 INCENDIE D'UNE SUBSTANCE SOLIDE

2.2.1 Définition

L'incendie d'une substance solide est le phénomène par lequel les gaz qui sont issus de la pyrolyse de cette substance subissent une combustion en présence de l'oxygène de l'air.

2.2.2 Similitudes et différences entre incendie et explosion

Comme dans une explosion, l'énergie libérée dans un incendie provient d'une combustion.

Cependant, les deux phénomènes présentent des différences essentielles :

- à l'amorçage d'une explosion, le mélange de combustible et de comburant préexiste ; au contraire, à l'amorçage d'un incendie, le mélange de combustible et d'air ne préexiste pas mais il se réalise par diffusion, au fur et à mesure de la production de gaz combustibles, sous l'effet de la pyrolyse de la substance solide,
- une explosion résulte de la propagation d'une flamme de prémélange, tandis qu'un incendie résulte du maintien d'une flamme de diffusion,
- le rendement énergétique d'un incendie est nécessairement moins bon que celui d'une explosion, parce que les réactifs se mélangent moins efficacement,
- dans un incendie, ce sont la production de gaz combustibles et le mélange de ces gaz avec l'air qui imposent à l'ensemble du phénomène une cinétique bien plus lente que dans une explosion.

2.2.3 Effets d'un incendie

Les effets d'un incendie sont essentiellement :

- l'émission d'un flux thermique,
- l'émission de fumées toxiques.

Parce qu'un incendie est un phénomène plus durable qu'une explosion, le flux rayonné par la flamme d'un incendie correspond à une énergie très importante qui peut être suffisante pour entraîner la pyrolyse de substances combustibles soumises à ce flux et donc pour permettre la propagation de l'incendie, par simple rayonnement.

L'échauffement qui résulte du rayonnement d'un incendie peut par exemple être à l'origine de phénomènes dangereux tels que l'éclatement d'une capacité sous pression.

2.3 AUTO-ECHAUFFEMENT

Lorsqu'une substance pulvérulente combustible est contenue en masse dans un récipient sous air, ou présente à l'état de dépôt sur une surface, son auto-échauffement est le phénomène par lequel cette substance subit une oxydation qui, d'abord lente, s'accélère progressivement en l'échauffant.

Une masse ou un dépôt de substance pulvérulente combustible est un milieu à l'intérieur duquel l'air pénètre et où le contact entre les molécules d'oxygène et les grains de substance est d'autant meilleur que la surface spécifique de ces grains est grande. C'est parce qu'un tel milieu a une faible conductivité thermique que la chaleur produite par la combustion entraîne un échauffement progressif du dépôt (auto-échauffement) et une accélération du phénomène d'oxydation.

De combustion lente et sans flamme au départ, le phénomène peut s'emballer et évoluer vers une combustion vive du dépôt, s'accompagnant d'une flamme ou au moins d'incandescences, qui peuvent alors constituer la source d'inflammation d'une ATEX poussiéreuse, si une telle ATEX se forme à proximité du dépôt en cours de combustion.

Selon l'oxydabilité de la substance, le phénomène d'emballement peut démarrer dès la température ambiante ou seulement à partir d'une température supérieure à l'ambiante.

Comme l'incendie, le phénomène d'auto-échauffement est très proche de celui de l'explosion puisqu'il résulte de la libération d'une énergie de combustion et qu'il peut être à l'origine d'une explosion. De même, l'auto-échauffement produit des gaz de pyrolyse et de combustion, en particulier, dans des conditions de sous-oxygénation, du CO, particulièrement toxique.

Pour plus de détails sur les différents aspects du phénomène d'auto-échauffement, nous renvoyons le lecteur au site Internet de l'INERIS sur lequel sera prochainement disponible le rapport intitulé "Connaissance des phénomènes d'auto-échauffement des solides combustibles".

2.4 INFLAMMATION DE GAZ DE PYROLYSE D'UN DEPOT DE PRODUITS PULVERULENTS

Lorsqu'un produit pulvérulent en dépôt se trouve exposé à une élévation de température soit du fait d'un auto-échauffement soit parce qu'il se trouve sur une surface chaude, celui-ci peut produire des gaz de pyrolyse dont l'accumulation peut conduire à la formation d'une ATEX gazeuse. L'échauffement à l'origine de la pyrolyse ou une autre source d'énergie ponctuelle (étincelle, point chaud) peut alors enflammer cette ATEX et conduire à une explosion ou un incendie. Ce cas particulier ne sera pas développé dans la suite du présent document.

2.5 CARACTERISTIQUES DES PULVERULENTS COMBUSTIBLES

Pour caractériser plus précisément les risques d'explosion, d'auto-échauffement ou d'incendie dans une installation où est mis en œuvre un pulvérulent combustible, il est nécessaire de connaître, et si besoin de déterminer expérimentalement, certaines caractéristiques d'inflammabilité et d'explosibilité du produit.

Les caractéristiques concernées font l'objet des § 2.5.1 à 2.5.8 ci-après. Il est important de souligner que celles-ci dépendent très largement de la granulométrie du produit, qu'il convient toujours de préciser en regard d'une des caractéristiques suivantes.

2.5.1 Température de début d'oxydation sous air

Cette caractéristique permet de préciser le risque d'auto-échauffement et résulte d'un essai d'analyse thermique différentielle (ATD), généralement couplé à un essai d'analyse thermogravimétrique (ATG).

Cet essai renseigne sur la température à partir de laquelle une oxydation exothermique démarre et sur l'intensité de cette exothermie ; selon le résultat de cet essai, le produit peut être classé comme :

- très oxydable si sa température de début d'oxydation est inférieure à 250°C,
- moyennement oxydable si elle est comprise entre 250 et 400°C,
- peu oxydable si elle est supérieure à 400°C.

2.5.2 Dimension et température critiques d'un stockage

A moins que le produit soit peu oxydable, il est nécessaire de déterminer expérimentalement :

- la dimension critique d'un stockage du produit en deçà de laquelle, pour une température donnée, il n'y a pas à craindre d'auto-échauffement,
- la température critique d'un stockage du produit en deçà de laquelle, pour une dimension donnée, il n'y a pas à craindre d'auto-échauffement,

Ces caractéristiques sont obtenues à partir d'une série d'essais effectués en étuve isotherme, à différentes températures et sur des échantillons du produit de forme cubique et de volume variable entre quelques cm³ et quelques dizaines de dm³.

2.5.3 Température d'auto-inflammation (TAI) d'un produit en dépôt de 5 mm

La connaissance de la température d'auto-inflammation (TAI) d'un dépôt de 5 mm d'épaisseur du pulvérulent est indispensable pour pouvoir déterminer la classe de température des matériels électriques sur lesquels un dépôt de ce pulvérulent peut s'accumuler (cf. § 4.7.5.2.3.2), conformément aux directives ATEX [5 et 6] et à la norme CENELEC EN 50 281 [7].

La détermination expérimentale de la TAI d'un dépôt de pulvérulent fait l'objet d'un projet de norme européenne en cours d'élaboration à l'heure d'écriture du présent rapport.

2.5.4 Température d'auto-inflammation (TAI) d'un produit en nuage

Lorsqu'une ATEX est portée à une température élevée (plusieurs centaines de degrés généralement), l'échauffement correspondant peut être suffisant pour entraîner, après un certain délai d'induction, son inflammation spontanée, c'est-à-dire son auto-inflammation.

La température la plus faible pour laquelle l'auto-inflammation d'une ATEX se produit dépend de la composition de cette ATEX ; la valeur minimale de cette température est appelée la TAI.

La TAI d'un pulvérulent en suspension dans l'air sous forme d'ATEX est toujours supérieure à la TAI du même produit sous forme de dépôt.

Il existe une norme (NF EN 61241-2-1)[8] pour la détermination expérimentale de la TAI d'un pulvérulent en suspension dans l'air.

2.5.5 Energie minimale d'inflammation (EMI)

L'énergie minimale d'inflammation (EMI) d'un pulvérulent est la valeur minimale de l'énergie qu'il faut apporter localement à une ATEX sous forme de nuage pour amorcer sa combustion et permettre la propagation d'une flamme.

La valeur de l'EMI est déterminée expérimentalement et elle correspond à une composition voisine de la composition stœchiométrique.

Il est nécessaire de déterminer la valeur de l'EMI d'un pulvérulent, afin de savoir quelles sources d'inflammation sous forme d'étincelle (électrique, électrostatique ou mécanique) sont susceptibles d'être actives, c'est-à-dire d'enflammer une ATEX ; en particulier, un pulvérulent caractérisé par une faible valeur d'EMI pourra être enflammé par un phénomène électrostatique (cas du soufre par exemple).

La détermination expérimentale de l'EMI d'un pulvérulent fait l'objet d'un projet de norme européenne (NF EN 13821)[9].

2.5.6 Caractéristiques de violence d'explosion (Kst) et de pression maximale d'explosion (Pmax)

La caractéristique Kst est nécessaire à la définition de certains moyens de protection contre les effets d'une explosion (événement ou suppresseur d'explosion). La détermination expérimentale de Kst fait l'objet d'un projet de norme en cours d'approbation (PR NF EN 14034-2)[11].

La caractéristique Pmax est nécessaire à la définition d'un matériel résistant à la surpression développée par une explosion. La détermination expérimentale de Pmax fait l'objet d'un projet de norme en cours d'approbation (NF EN 14034-1)[12].

2.5.7 Limites d'explosivité

La limite inférieure d'explosivité (LIE) d'un pulvérulent est la limite de concentration en pulvérulent d'une suspension de ce pulvérulent dans l'air en dessous de laquelle l'atmosphère est trop peu concentrée en pulvérulent pour qu'une flamme puisse s'y propager.

De même, la limite supérieure d'explosivité (LSE) d'un pulvérulent est la limite de concentration en pulvérulent d'une suspension de ce pulvérulent dans l'air au-dessus de laquelle l'atmosphère est trop concentrée en pulvérulent pour qu'une flamme puisse s'y propager.

La connaissance de la LSE ne présente pas d'intérêt car elle correspond à des suspensions de pulvérulent très denses.

La connaissance de la LIE présente davantage d'intérêt ; cependant, elle dépend de plusieurs paramètres (taux d'humidité, granulométrie du pulvérulent, énergie de la source d'inflammation utilisée, ...) pour pouvoir être considérée comme une caractéristique intrinsèque.

Une méthode de détermination expérimentale de la LIE fait toutefois l'objet d'un projet de norme en cours d'approbation (PR NF EN 14034-3)[13].

A défaut de disposer d'une valeur mesurée, il est possible de considérer qu'une valeur estimée de la LIE des pulvérulents est comprise entre 20 et 50 g/m³.

2.5.8 Concentration limite en oxygène (CLO)

La concentration limite en oxygène (CLO) d'un système pulvérulent-air-gaz inerte est la concentration la plus faible en oxygène des mélanges pulvérulent-air-gaz inerte, en dessous de laquelle aucun mélange n'est explosif, quelle que soit leur concentration en pulvérulent.

Cette caractéristique est nécessaire à la mise en œuvre de l'inertage comme mesure de prévention de la formation d'ATEX.

La détermination expérimentale de CLO fait l'objet d'un projet de norme en cours d'approbation (PR NF EN 14034-4)[14].

3. RAPPEL REGLEMENTAIRE

Il est rappelé au chapitre 2 que l'exploitation de procédés dans lesquels un pulvérulent combustible est mis en œuvre en présence d'air expose aux phénomènes dangereux suivants :

- l'explosion d'un pulvérulent dispersé dans l'air,
- l'incendie d'un pulvérulent en masse (éventuellement précédé par son auto-échauffement),

Une explosion et un incendie produisent différents types d'effets (cf. § 2.1.3 et 2.2.3 respectivement), qui peuvent entraîner des conséquences graves pour les personnes comme pour les biens, au moins à l'intérieur du site d'exploitation et dans certains cas aussi à l'extérieur.

La nécessité de limiter les effets possibles d'une explosion d'ATEX explique que la prévention de telles explosions soit traitée explicitement à la fois dans le Code du Travail et dans le Code de l'Environnement.

De même, la nécessité de limiter les effets possibles d'un incendie explique que la prévention des incendies soit traitée explicitement à la fois dans le Code du Travail et dans le Code de l'Environnement.

3.1 PRISE EN COMPTE DANS LE CODE DU TRAVAIL DES INCENDIES ET DES EXPLOSIONS D'ATEX METTANT EN CAUSE UN PULVERULENT

Pour les incendies comme pour les explosions d'ATEX, le Code du travail définit à la fois des dispositions générales et des dispositions particulières.

3.1.1 Dispositions générales prévues par le Code du travail

Les dispositions générales peuvent être considérées comme résultant de l'application en droit français de la directive européenne 89/391/CEE[15], qui concerne "la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail".

Ces dispositions portent sur les obligations suivantes auxquelles est soumis un chef d'entreprise :

- évaluer, pour les travailleurs travaillant sur son site, les risques de toute nature auxquels ils sont exposés, pour leur santé et pour leur sécurité, en particulier les risques d'incendie et d'explosion (art. L.230-2),
- élaborer et tenir à jour un document unique formalisant l'évaluation des risques (art. R.230-1 pris en application du décret 2001-1016 du 5 novembre 2001).

Bien que plus spécifique, la directive européenne 98/24/CE[16], qui concerne "la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs contre les risques liés à des agents chimiques sur le lieu de travail" s'applique également ; en effet, au sens de cette directive, un pulvérulent combustible peut être considéré comme un agent chimique dangereux puisqu'un incendie comme une explosion d'ATEX font partie des phénomènes dangereux auxquels un tel pulvérulent peut donner lieu.

Cette directive a été transposée dans les articles R231-54 à R231-54-9 du Code du travail, et l'article R231-54-7 stipule en particulier que :

"L'employeur prend des mesures techniques et définit les mesures d'organisation du travail appropriées afin d'assurer la protection des travailleurs contre les dangers découlant des propriétés chimiques et physico-chimiques des agents chimiques. Ces mesures portent, notamment, sur le stockage, la manutention et l'isolement des agents chimiques incompatibles. A cet effet, il prend les mesures pour empêcher la présence sur le lieu de travail de concentrations dangereuses de substances inflammables..."

"Lorsque les mesures prévues à l'alinéa précédent ne sont pas réalisables au regard de la nature de l'activité, l'employeur prend, par ordre de priorité, les dispositions nécessaires pour :

1° Eviter la présence sur le lieu de travail de sources d'ignition susceptibles de provoquer des incendies ou des explosions..."

2° Atténuer les effets nuisibles pour la santé et la sécurité des travailleurs en cas d'incendie ou d'explosion résultant de l'inflammation des substances inflammables..."

3.1.2 Dispositions particulières prévues par le Code du travail

3.1.2.1 Dispositions relatives au risque d'incendie :

Les dispositions particulières relatives au risque d'incendie concernent diverses obligations,

- en matière de dispositions constructives telles que la mise en place de moyens d'évacuation des locaux de travail en cas d'incendie (art. R235-4),
- en matière de protection des travailleurs, lors d'un incendie déclaré, telles que l'installation d'alarmes d'incendie et la mise à disposition d'extincteurs (art. R232-12).

3.1.2.2 Dispositions relatives au risque d'explosion d'ATEX

Les dispositions particulières relatives au risque d'explosion d'ATEX ont été adoptées plus récemment que celles relatives à l'incendie puisqu'elles résultent de la transposition en droit français de la directive 1999/92/CE [6] du 16 décembre 1999, qui concerne "les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque des ATEX".

Applicable depuis le 1^{er} juillet 2003, la directive 1999/92/CE a été transposée en droit français par les textes suivants :

- les décrets 2002-1553 et 2002-1554 du 24 décembre 2002,
- deux arrêtés du 8 juillet 2003 et un arrêté du 28 juillet 2003.

Les décrets ont été insérés dans le titre 3 du livre 2 du Code du travail aux chapitres II – Aménagement des lieux de travail – Prévention des incendies (articles R.232-12-23 et suivants) et V – Dispositions applicables aux opérations de construction dans l'intérêt de l'hygiène et de la sécurité au travail (articles R.235-4-1 et suivants) ; ils concernent la prévention des explosions dans les lieux de travail et complètent les dispositions déjà existantes en matière de prévention des incendies et d'évacuation.

Ils imposent au chef d'entreprise d'évaluer les risques spécifiques créés par les ATEX et de prendre les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et la protection de la santé des travailleurs exposés aux effets néfastes résultant des explosions d'ATEX. Ceci s'apparente à une obligation de résultats en matière de sécurité, associée à une certaine liberté concernant les moyens à mettre en œuvre pour répondre à cette exigence de sécurité.

Les arrêtés datés du 8 juillet 2003 complètent ces deux décrets en transposant les annexes de la directive. Ils concernent en particulier :

- la définition des zones où des ATEX dangereuses peuvent se former,
- les prescriptions minimales visant à améliorer la santé et la sécurité des travailleurs exposés aux risques des ATEX,
- les critères de sélection des appareils et des systèmes de protection utilisés dans des emplacements où des ATEX peuvent se présenter,
- le panneau de signalisation des emplacements dangereux.

Le troisième arrêté, daté du 28 juillet 2003, fixe les conditions d'installation des matériels électriques dans les zones ATEX (il a remplacé l'arrêté du 19 décembre 1988).

Les nouvelles dispositions du Code du travail en matière d'ATEX concernent toute installation où sont mis en œuvre des produits combustibles, en particulier à l'état de solide pulvérulent.

Pour les ATEX susceptibles de se former à partir de pulvérulents combustibles, les emplacements dangereux sont classés en zones conformément aux définitions suivantes :

" Les emplacements dangereux sont classés en zones en fonction de la fréquence et de la durée de la présence d'une atmosphère explosive.

Zone 20

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

Zone 21

Emplacement où une atmosphère explosive sous forme de nuage de poussières combustibles est susceptible de se présenter occasionnellement en fonctionnement normal.

Zone 22

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

Il est par ailleurs précisé que :

"Les couches, dépôts et tas de poussières combustibles doivent être traités comme toute autre source susceptible de former une atmosphère explosive".

Par ailleurs, la réglementation ATEX n'a pas défini de zone particulière pour les emplacements où peuvent se présenter des ATEX hybrides (cf. § 2.1.1) et il faut donc, si nécessaire, classer ces emplacements en zone 0, et/ou 20, en zone 1 et/ou 21 et/ou encore en zone 2 ou 22, selon la fréquence d'apparition de ces ATEX

Ajoutons que la directive 1999/92/CE fait référence à la directive 94/9/CE [5], concernant "le rapprochement des législations des Etats membres pour les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosible". Cette dernière directive a été transposée en droit français par le décret 96-1010 du 10 novembre 1996, pris par le Ministère chargé de l'industrie et qui définit des catégories de matériels destinés à être utilisés en atmosphère explosible.

3.2 PRISE EN COMPTE DES EXPLOSIONS D'ATEX ET DES INCENDIES DE PULVERULENT DANS LE CODE DE L'ENVIRONNEMENT

3.2.1 Prise en compte des incendies et des explosions

Les incendies et les explosions sont deux phénomènes susceptibles d'être mis en cause dans des accidents industriels néfastes à l'environnement et, à ce titre, ils sont pris en compte dans le Livre V du Code de l'Environnement, qui concerne la prévention des pollutions, des risques et des nuisances et dont le Titre I contient les principes législatifs relatifs aux Installations Classées (IC).

Les incendies et les explosions ne sont traités que de façon générale dans le Code de l'Environnement, tandis que l'auto-échauffement d'un pulvérulent combustible est un phénomène trop spécifique pour y être traité explicitement.

Adopté plus récemment que le Code du travail, Le Code de l'Environnement a repris les principes de textes réglementaires antérieurs sur la prévention des risques, dont ceux relatifs à la législation des IC, à savoir principalement :

- le décret n° 77- 1133 du 21 septembre 1977 pris pour l'application de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées,
- l'arrêté du 10 mai 2000 relatif à la prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou des préparations dangereuses présentes dans certaines catégories d'installations classées, pour la protection de l'environnement soumises à autorisation.

La nomenclature des installations classées recense,

- d'une part des substances dangereuses (dont certaines substances combustibles solides),
- d'autre part des activités dangereuses (dont l'agro-alimentaire, la chimie, le traitement des déchets).

En 1992 a été entrepris un travail de refonte de l'ancienne nomenclature qui a consisté à simplifier les rubriques existantes, en les regroupant voire en les supprimant, et à en introduire de nouvelles.

Le principe de la législation des IC consiste à :

- imposer certaines prescriptions aux exploitants qui mettent en œuvre les substances de la nomenclature ou qui pratiquent les activités de la nomenclature,
- hiérarchiser ces prescriptions en distinguant les IC soumises à déclaration des IC soumises à autorisation et en fixant des seuils de classement en fonction des quantités des substances dangereuses mises en œuvre ou en fonction d'autres critères quantitatifs dans le cas des activités dangereuses,
- réunir les prescriptions applicables aux IC soumises à déclaration dans des arrêtés de prescription ou "arrêtés-types",
- réunir les prescriptions applicables à chaque IC soumise à autorisation dans un arrêté pris par le préfet du département où se trouve l'IC.

Dans la nouvelle nomenclature des substances dangereuses, la rubrique 1450 intitulée "solides facilement inflammables" s'applique notamment aux pulvérulents combustibles. Par ailleurs, seules deux rubriques citent explicitement des solides pulvérulents combustibles : la rubrique 1520, "Dépôts de houille, coke, etc." et la rubrique 1523, "Fabrication industrielle, fusion et distillation, emploi et stockage soufre".

En ce qui concerne les activités, l'ancienne nomenclature contient la rubrique 89 intitulée "broyage, concassage criblage, déchiquetage, ensachage, pulvérisation, trituration, nettoyage, tamisage, blutage, mélange, épiluchage ou décortication de substances végétales ou de tous produits organiques naturels" et l'arrêté-type correspondant contient des prescriptions explicites contre l'incendie et l'explosion.

Toujours dans la nomenclature des activités dangereuses, seule la rubrique 2160 de la nouvelle nomenclature, intitulée "Silos et installations de stockage de céréales, grains, produits alimentaires ou tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables", traite spécifiquement d'une activité impliquant un pulvérulent combustible.

S'il n'y a finalement que peu de rubriques de l'ancienne comme de la nouvelle nomenclature qui traitent explicitement de la prévention des risques d'incendie ou d'explosion dans les procédés mettant en œuvre des pulvérulents combustibles, il faut l'attribuer au fait que ces phénomènes ne sont pas réputés avoir des conséquences suffisamment importantes pour qu'elles donnent lieu à des effets dits majeurs pour l'environnement et les riverains des sites où sont exploités ces procédés.

Il n'y a en fait qu'un accident qui a eu, dans le passé, des conséquences graves sur l'environnement du site, c'est l'explosion du silo de Blaye en août 1998 (cf § 4.1.3). Et c'est aussi pourquoi l'arrêté-type du 18 décembre 2000 relatif aux installations soumises à déclaration de la rubrique 2160, de même que l'arrêté du 20 février 2004 relatif aux installations soumises à autorisation de la même rubrique, sont des textes réglementaires très complets en matière de dispositions relatives à la prévention des risques d'explosion et d'incendie et de mesures de protection.

3.2.2 Aspects particuliers aux explosions d'ATEX

S'il est un aspect par lequel la réglementation IC aborde systématiquement la question de la prévention des explosions d'ATEX, c'est celui des "installations électriques des établissements réglementés au titre de la législation sur les IC et susceptibles de présenter des risques d'explosion".

En effet, l'arrêté du 31 mars 1980 régit les IC dans lesquelles "une ATEX est susceptible d'apparaître, notamment en raison de la nature des substances solides (...) mises en œuvre, stockées, utilisées, produites, ou pouvant apparaître au cours des opérations".

Au titre de cet arrêté, un exploitant doit identifier les zones où des ATEX peuvent apparaître ; deux types de zone sont définies, qui ne sont pas identiques aux trois zones de la réglementation ATEX ; d'après les critères de fréquence et de durée de présence de l'ATEX, et bien que les notions de fonctionnement normal ou de dysfonctionnement des installations ne soient pas introduites dans l'arrêté précité, on peut admettre que :

- le premier type correspond à l'ensemble des zones 20 et 21 de la réglementation ATEX,
- le second type correspond à la zone 22 de la réglementation ATEX.

Dans chaque type de zone, l'exploitant ne peut installer que des matériels électriques qui correspondent à certaines normes de construction, pour ne pas constituer une source d'inflammation des ATEX.

Pour assurer une meilleure applicabilité de chacune des réglementations IC et ATEX, il serait souhaitable, à terme, d'harmoniser les définitions des zones introduites par ces deux réglementations.

4. PRINCIPAUX PROCÉDES CONCERNES ET RISQUES ASSOCIÉS

Le présent chapitre rassemble les principaux procédés qui mettent en œuvre des pulvérulents et où les phénomènes d'explosion, d'auto-échauffement et/ou d'incendie sont a priori à craindre lorsque le pulvérulent mis en œuvre est combustible.

- Manutention
- Stockage
- Broyage
- Tamisage/Filtration
- Mélangeage
- Polissage
- Dépoussiérage
- Séchage

- Revêtement (projection électrostatique, projection métallique (choopage), flocage...)
- Incinération

Pour chaque procédé, sont indiqués successivement :

- son principe et ses principales conditions de marche,
- une évaluation sommaire des risques présentés par le procédé,
- quelques accidents significatifs survenus au cours de l'exploitation du procédé,
- les moyens de prévention, de détection et de protection les plus couramment utilisés.

4.1 PROCÉDES DE MANUTENTION

Les pulvérulents présentent généralement une bonne fluidité qui permet leur mise en œuvre par différents procédés de manutention :

- bande transporteuse,
- transporteur à chaînes (reddlers),
- vis d'Archimède,
- élévateur à godets,
- transport pneumatique,

4.1.1 Description sommaire

4.1.1.1 Bande transporteuse

Une bande transporteuse se présente comme un tapis roulant, relevé sur ses bords qui se déplace en boucle entre deux tambours : le produit est déversé sur la bande à proximité d'un des tambours et transporté horizontalement ou avec une faible déclivité jusqu'au second tambour où il est déversé au point d'utilisation ou sur une autre bande. La mise en suspension du pulvérulent est inévitable, aussi bien aux endroits où il est déversé sur la bande, par exemple à partir d'une trémie, qu'aux endroits où il chute de la bande, par exemple pour être repris par une autre bande. Chaque bande peut être équipée d'un capotage afin de contenir le nuage formé à l'intérieur.

4.1.1.2 Transporteur à chaîne

Un transporteur à chaîne (reddler) est constitué d'une chaîne rectiligne qui se déplace en boucle entre deux tambours, par glissement sur une surface fixe, et aux maillons de laquelle sont fixées à intervalles réguliers des barres perpendiculaires à la chaîne ; le pulvérulent déversé sur cette surface à proximité d'un des tambours est entraîné par les barres et transporté horizontalement ou avec une faible déclivité jusqu'au second tambour où il est déversé au point d'utilisation ou sur un autre reddler. Comme pour la bande transporteuse, la mise en suspension du pulvérulent est inévitable et le capotage du reddler permet de limiter cette mise en suspension.

4.1.1.3 Vis d'Archimède

Une vis d'Archimède se présente comme une hélice, en tôle dont l'axe est horizontal ou à faible déclivité et qui est placée dans une auge de forme hémicylindrique et de même diamètre ; lorsque le pulvérulent est déversé dans l'auge à l'une de ses extrémités, la rotation de l'hélice assure son transport vers l'autre extrémité. Comme pour la bande transporteuse, la mise en suspension du pulvérulent est inévitable, d'autant plus que, à cause de la rotation de la vis, elle se produit sur toute la longueur de l'auge, qu'il est alors indispensable de capoter pour limiter la formation d'un nuage de poussière à proximité de l'équipement.

4.1.1.4 Elévateur à godets

Un élévateur à godets se présente comme une bande transporteuse disposée verticalement ou selon une forte déclivité et à laquelle sont fixés à intervalles réguliers des godets : le pulvérulent est déversé dans chaque godet à la base de l'élévateur puis transporté jusqu'en haut et déversé à nouveau, soit à son point d'utilisation, soit dans un second élévateur. Comme pour une bande transporteuse, la mise en suspension du pulvérulent est inévitable au moins aux endroits où le pulvérulent est déversé, mais aussi à cause du fait qu'un reliquat peut tomber des godets renversés lors de leur retour à la base de l'élévateur. Le capotage d'un élévateur à godets est impératif pour limiter la présence d'un nuage à l'intérieur.

4.1.1.5 Transport pneumatique

Un transport pneumatique (TP) est constitué d'une canalisation d'environ 10 cm de diamètre intérieur, dont l'une des extrémité est reliée au refoulement d'un ventilateur. Un piquage équipe la canalisation juste en aval du ventilateur et permet l'introduction du pulvérulent à l'intérieur de la canalisation. Le flux d'air débité dans la canalisation par le ventilateur entraîne le pulvérulent vers l'autre extrémité qui est elle-même raccordée à l'équipement dans lequel est déversé le pulvérulent. C'est à cette extrémité que le flux d'air est séparé du flux de pulvérulent, généralement au moyen d'un cyclone ou d'un filtre à manches (cf. § 4.6). La canalisation peut présenter des coudes qui sont alors caractérisés par de grands rayons de courbure, afin d'éviter toute accumulation du pulvérulent qui pourrait conduire au bouchage de la canalisation et aussi pour limiter l'effet d'abrasion de canalisation par les grains de pulvérulent.

Le débit du ventilateur et sa pression de refoulement sont choisis en fonction de la densité du pulvérulent et du débit souhaité du transport du pulvérulent ; selon la concentration du flux d'air en pulvérulent, on distingue des TP en phase diluée ou en phase dense.

4.1.2 Evaluation sommaire des risques

4.1.2.1 Possibilités de formation d'ATEX

La manutention d'un pulvérulent combustible au moyen de l'un des équipements décrits aux paragraphes précédents provoque la mise en suspension inévitable du pulvérulent, au moins à proximité des emplacements où le pulvérulent est déversé (bande transporteuse, redler), voire même sur toute la longueur de l'équipement (transport pneumatique, élévateur à godets).

Consécutivement, une ATEX peut se former à proximité de ces emplacements, non seulement à l'intérieur de l'équipement lorsque ce dernier est capoté, mais aussi à proximité de l'équipement dans le local de travail où il est installé, lorsque l'équipement n'est pas capoté.

Pendant, même dans le cas où l'équipement est capoté, il n'est jamais complètement étanche et il est inévitable que des dépôts de pulvérulent s'accumulent à la longue sous les équipements ou même jusqu'à une certaine distance de ces équipements, dans les locaux où ils sont installés. De tels dépôts doivent être considérés comme des ATEX potentielles, conformément à la réglementation ATEX.

En ce qui concerne les TP (cf. § 4.1.1.5), il s'agit de systèmes étanches et une ATEX ne peut se former à l'extérieur qu'en cas de dysfonctionnement (débranchement accidentel de la canalisation par exemple). En revanche, une ATEX peut être présente à l'intérieur de la canalisation d'un TP en phase diluée, de même que celle d'un TP en phase dense, lors des phases transitoires de démarrage et d'arrêt.

4.1.2.2 Sources d'inflammation possibles des ATEX formées

En ce qui concerne les sources d'inflammation possibles des ATEX formées, les équipements décrits aux § 4.1.1.1 à 4.1.1.4 peuvent donner lieu à un échauffement intense par frottement de pièces mécaniques en mouvement (grippage de paliers, frottement de la bande sur une tôle de capotage...), qui peut être suffisant pour enflammer une ATEX.

Contrairement aux équipements décrits aux § 4.1.1.1 à 4.1.1.4, le fonctionnement d'un TP induit le frottement à grande vitesse des grains de pulvérulent contre la paroi interne de la canalisation et entraîne donc le chargement électrostatique des équipements et des grains, avec le risque associé d'étincelle de décharge électrostatique entre des éléments de l'équipement chargés à des potentiels différents, ou entre un élément et le pulvérulent lui-même.

4.1.3 Eléments d'accidentologie

L'accidentologie relative aux explosions de poussières fait état de nombreux accidents survenus dans des silos et impliquant des matériels de manutention (base de données ARIA du BARPI [17]). Environ une explosion de poussière sur quatre dans l'industrie agroalimentaire concerne un élévateur.

Diverses explosions sont survenues dans les élévateurs à godets de grand débit (de type portuaire), suite à l'échauffement d'un organe mécanique. Ces équipements sont particulièrement sensibles aux explosions en raison de la vitesse de défilement de la bande supportant les godets : en effet, d'une part davantage de pulvérulent est mis en suspension entraînant la présence plus fréquente d'une ATEX de plus grand volume et, d'autre part, l'énergie libérée en cas d'échauffement est plus importante.

Plusieurs accidents ont résulté de l'inflammation d'une ATEX suite à un choc d'un corps étranger (silex, pièce métallique) avec l'équipement de manutention.

Enfin, divers accidents sont survenus avec des transporteurs à bande et vis d'Archimède : départ de feu à la suite de l'échauffement d'un organe mécanique par frottement (palier, roulement...) et d'un échauffement consécutif du pulvérulent. Dans différents types d'industries, des incendies ont détruit des bandes transporteuses sur plusieurs dizaines de mètres.

Exemples d'accidents survenus dans des silos relevés sur le site du BARPI :

N° 9867 14/02/1996

CANADA - 00 - THUNDER BAY

63.1 - Manutention et entreposage

Une explosion et un incendie se produisent sur un ancien élévateur de grain. 2 personnes sont blessées. L'explosion provoque un trou dans un des murs de l'élévateur. Une pièce de métal dans les lames du broyeur d'une trémie provoque le sinistre. Les équipes de secours sont retardées dans leur avancée par les ingénieurs qui doivent déterminer si la structure est saine avant de laisser pénétrer une personne à l'intérieur.

N° 24388 03/04/2003

FRANCE - 09 - MOULIN-NEUF

15.6 - Travail des grains ; fabrication de produits amylacés

Une explosion se produit dans une minoterie alors qu'un ouvrier effectue une soudure sur une vis d'Archimède étanche dans le secteur fabrication. L'installation pratiquement vide ne contenait que 300 kg de farine. Les pompiers interviennent 20 mn après l'explosion. L'employé est gravement blessé. Une mélangeuse à farine, un élévateur, une bascule circuit, un tamiseur à farine et la toiture sont détruits. Un périmètre de sécurité est mis en place. De la poussière issue d'un silo ou de la farine serait à l'origine de la déflagration qui a fortement endommagé le bâtiment. L'inspection des installations classées propose un projet d'arrêté de suspension d'exploitation des installations. Les dommages matériels sont évalués à 248 KEuros.

4.1.4 Moyens de prévention/détection/protection courants

L'analyse des risques justifie l'adoption de mesures de prévention des explosions à l'intérieur des systèmes de manutention des pulvérulents, de même que dans les locaux d'exploitation :

- à l'intérieur des installations :
 - ✓ détection de l'échauffement de paliers mécaniques,
 - ✓ mise à la terre des équipements,
 - ✓ éviter l'association conducteur-isolant (par exemple les canalisations métalliques revêtues à l'intérieur d'une peinture isolante),
 - ✓ découplage des équipements pour éviter la propagation des incendies,
 - ✓ aspiration des poussières à leur point de chute et dans le corps des élévateurs,
 - ✓ mise en place de contrôleurs de rotation pour détecter les frottements anormaux.
- à l'extérieur : élimination des dépôts de pulvérulent à l'extérieur des équipements par de fréquents nettoyages.

Les élévateurs à godets (au moins les plus grands dont le retour d'expérience montre qu'ils peuvent subir des explosions) doivent être protégés contre l'explosion (par évent ou par suppresseur).

4.2 PROCÉDES DE STOCKAGE

4.2.1 Description sommaire

Les procédés de stockage de pulvérulents sont caractérisés à la fois par :

- la variété de volume et de forme des contenants (stockage en silo à cellules cylindriques verticales, en silo plat, en big bag...),
- les conditions dans lesquelles le produit séjourne dans le contenant (durée maximale de séjour, température...).

Les procédés de stockage sont par ailleurs liés aux procédés de manutention qui sont mis en œuvre pour le remplissage du contenant et pour le soutirage du produit stocké (cf. § 4.1).

4.2.2 Evaluation sommaire des risques

4.2.2.1 Possibilités de formation d'ATEX

Les possibilités de formation d'ATEX dans la mise en œuvre de procédés de stockage dépendent largement des procédés de manutention des pulvérulents qui leur sont associés et cet aspect a déjà été traité au § 4.1.2.

En ce qui concerne le contenant de stockage proprement dit, l'opération qui consiste à le remplir d'un pulvérulent ne peut guère être effectuée sans mise en suspension dans l'air de ce pulvérulent et il faut considérer que la suspension qui se forme dans le ciel du contenant peut être suffisamment concentrée en fines particules pour constituer une ATEX (au contraire, la vidange gravitaire d'un contenant de stockage ne provoque pas la formation d'une ATEX dans le ciel de ce contenant).

Il est par ailleurs inévitable que des dépôts de pulvérulent s'accumulent à la longue, dans les locaux où sont installés les contenants de stockage, parce que la liaison entre ces contenants et les équipements de manutention n'est jamais parfaitement étanche : la mise en suspension de ces dépôts peut former une ATEX dont le volume dépend de la masse de pulvérulent contenue dans le dépôt.

4.2.2.2 Sources d'inflammation possibles des ATEX formées

Parmi les sources d'inflammation possibles des ATEX qui se forment dans le ciel des contenants de stockage, il faut compter les phénomènes de décharge électrostatique, d'autant plus si les pulvérulents mis en œuvre sont isolants et si le procédé de manutention mis en œuvre est générateur de charges électrostatiques ; cette dernière condition est remplie dans tous les procédés où les grains de pulvérulent sont véhiculés dans un flux d'air et frottent à grande vitesse sur la paroi de l'équipement de manutention, comme dans un transport pneumatique (cf. § 4.1.1.5).

4.2.2.3 Autres phénomènes redoutés

Lorsqu'un pulvérulent combustible est stocké en masse, il est susceptible de donner lieu à un phénomène d'auto-échauffement (cf. § 2.3) qui peut :

- entraîner une combustion vive du produit, que ce soit sous forme de feu couvant ou de feu ouvert,
- constituer une source d'inflammation d'une ATEX présente à proximité.

Les circonstances dans lesquelles un feu couvant amorcé dans un silo peut constituer une source d'inflammation d'une ATEX présente à proximité peuvent correspondre au scénario suivant :

- le pulvérulent stocké est le siège d'un auto-échauffement qui l'échauffe suffisamment pour amorcer un feu couvant,
- la zone en combustion se propage et atteint la surface du stockage.

Il faut noter que les pulvérulents fusibles (matière thermoplastique, sucre) ne sont pas sujet à auto-échauffement.

4.2.3 Eléments d'accidentologie

Les accidents dans des unités de stockage de produits pulvérulents sont fréquents. Ainsi, depuis l'accident survenu dans le silo de BLAYE [18] le 20 août 1997 (11 morts et 1 blessé), le Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles (BARPI) a recensé 124 accidents survenus dans des silos Français (hors bois et plastiques). 6 d'entre eux ont entraîné le décès de 6 personnes. Des explosions sont à l'origine de 8 accidents. Les incendies représentent 84 % des sinistres.

Il arrive fréquemment qu'un stockage de pulvérulent combustible (particulièrement ceux mis en œuvre dans l'industrie céréalière ou agroalimentaire) donne lieu à un phénomène d'auto-échauffement suffisant pour conduire à une prise en feu du produit. Les exemples qui suivent, extraits de la base de donnée du BARPI accessible sur Internet, illustrent ce type d'accident.

N° 11983

12/02/1998

FRANCE - 95 - SAINT-OUEN-L'AUMONE

63.1 - Manutention et entreposage

Un feu interne apparaît dans une cellule en béton d'un silo contenant 2 000 t de luzerne déshydratée. Il est décidé de vidanger la capacité. Le sinistre s'aggravant 5 jours plus tard, de l'azote puis de la mousse sont injectés en partie haute de la cellule pour inerte et prévenir l'envol de poussières. Puis de l'azote est injecté durant 5 jours à raison de 50 m³/h en partie basse pour étouffer le feu. Le produit est désensilé après refroidissement complet. La circulation fluviale est interrompue pendant l'intervention. Des mesures conservatoires sont imposées. La remise en exploitation est subordonnée à l'élucidation de l'origine du sinistre et à la mise en oeuvre de mesures de sécurité.

N° 20378

28/03/2001

FRANCE - 51 - PONTFAVERGER-MORONVILLIERS

15.7 - Fabrication d'aliments pour animaux

Un auto-échauffement se produit dans une cellule métallique contenant 500 t de granulés de luzerne déshydratée. Dès que les sondes de températures décèlent l'anomalie, l'exploitant introduit de l'azote dans le stockage pour ralentir le phénomène d'autocombustion. Les pompiers déversent de la mousse sur le stockage par une trappe située au sommet de la cellule. Celle-ci sera vidangée dans les 48 h qui suivent ; 200 t de granulés sont perdues. L'auto-échauffement observé pourrait être dû à une entrée d'humidité par une ouverture résultant de la rupture d'une soudure entre une passerelle et le corps de la cellule.

4.2.4 Moyens de prévention/détection/protection courants

4.2.4.1 Moyens de prévention

Le premier moyen de prévention de l'auto-échauffement consiste à s'interdire de stocker un produit pulvérulent à une température supérieure à la température critique de stockage qui correspond à la dimension et à la forme de son contenant (cf. § 2.4.2) ou à réduire la taille du stockage pour l'adapter aux conditions de température locales.

Un deuxième moyen de prévention consiste à interdire les entrées d'air par le bas du stockage. On limite l'apport de comburant à la réaction d'oxydation à l'origine de l'auto-échauffement.

4.2.4.2 Moyens de détection

Pour détecter un phénomène d'auto-échauffement, il est possible de détecter une élévation de température du stockage ou la production de gaz de combustion sous-oxygénée (CO).

La détection du CO est réalisée par analyse de gaz prélevés en continu ou de manière ponctuelle à l'aide d'un analyseur infra-rouge spécifique ou d'une cellule électrochimique.

Le suivi de température peut être fait à l'aide d'une sonde thermique (thermocouple) ou d'une caméra infra-rouge.

4.2.4.3 Moyens de protection

Une fois que le phénomène est amorcé, il se poursuit tant que de l'air est présent dans le silo. Pour enrayer le phénomène, la seule mesure efficace consiste à introduire dans le silo un gaz inerte, en quantité suffisante pour abaisser la teneur en oxygène et empêcher la combustion du produit.

Avant d'entreprendre la vidange du silo, il faut alors attendre un refroidissement du produit suffisant pour que, lorsqu'il est remis en présence d'air, la combustion ne soit pas réactivée.

Enfin, en cas d'explosion, la structure peut être protégée des effets de surpression par la présence d'un évent

4.3 PROCÉDES DE BROYAGE

4.3.1 Description sommaire

Le broyage d'un produit est une opération destinée à réduire sa granulométrie. Elle est réalisée industriellement dans différents types de broyeurs où, quel que soit le procédé utilisé, le broyage résulte de la mise en œuvre d'une énergie mécanique.

Les principaux procédés de broyage sont :

- le broyage par écrasement (à marteaux, à boulets, à couteaux, à cylindre...),
- le broyage à jet d'air,
- le broyage par attrition.

Le broyage par écrasement est adapté à des produits dont la granulométrie initiale est grossière ; il consiste à écraser le produit à broyer au moyen de marteaux, de boulets, de couteaux... ou entre deux cylindres tournant sur eux-mêmes selon des axes parallèles et au contact l'un de l'autre.

Le broyage à jet d'air et le broyage par attrition sont réservés à des produits qui se trouvent initialement sous forme de grains de granulométrie suffisamment fine pour pouvoir être entraînés par un jet d'air :

- le broyage à jet d'air consiste à projeter un jet d'air chargé de grains du produit à broyer contre un matériau dur, de façon que le grain se casse en grains plus petits sous la violence du choc.
- le broyage par attrition consiste à faire se rencontrer deux jets d'air chargés de grains du produit : c'est la violence du choc entre les grains eux-mêmes qui produit des grains de granulométrie inférieure.

4.3.2 Evaluation sommaire des risques

4.3.2.1 Possibilité de formation d'ATEX

Dans le broyage par écrasement, il y a toujours une proportion suffisante de fines pour que, si le broyage est effectué sous air, il faille considérer qu'une ATEX est présente en permanence dans le broyeur (l'intérieur du broyeur constitue alors une zone 20 au sens de la réglementation ATEX).

Au contraire, le broyage à jet d'air comme le broyage par attrition nécessitent de grands débits d'air, de sorte que le pulvérulent est suffisamment dilué pour qu'il n'y ait à craindre de formation d'ATEX, ni, a fortiori, d'explosion ou d'incendie.

Dans la suite, sont seulement traités les risques d'incendie et d'explosion inhérents au broyage par écrasement.

4.3.2.2 Sources d'inflammation possibles des ATEX formées

Le broyage par écrasement est un procédé où une énergie mécanique importante est mise en œuvre, suffisante en tout cas pour échauffer le produit, au point qu'il est parfois nécessaire de le refroidir pour éviter son auto-inflammation.

Si des corps étrangers durs sont introduits inopinément dans le broyeur, il faut s'attendre à ce que des étincelles de friction soient produites et ces étincelles peuvent avoir une énergie suffisante pour enflammer l'ATEX qui serait présente dans le broyeur. Ces corps étrangers peuvent aussi être à l'origine d'élévations ponctuelles de température du fait des frottements qu'ils induisent.

Enfin, le bourrage du broyeur peut également, dans certaines conditions, conduire au démarrage d'un feu.

4.3.3 Eléments d'accidentologie

L'expérience montre que le broyage par écrasement d'un produit combustible sous air peut conduire à deux types de phénomènes :

- soit un incendie du produit dans le broyeur ; pour autant que le produit soit facilement oxydable, ce phénomène peut être amorcé par l'échauffement qui résulte du broyage lui-même,

- soit une explosion de l'ATEX contenue dans le broyeur.

Les exemples d'accidents suivants tirés du site Internet du BARPI illustrent ces phénomènes.

N° 13087

19/05/1998

FRANCE - 22 - PLOUVARA

24.1 - Industrie chimique de base

Un feu se déclare dans le broyeur de carcasses d'animaux d'une usine d'équarrissage. Une machine et une petite partie de la toiture sont endommagées. Des farines très déshydratées à 80 / 100 °C étaient traitées au moment de l'accident. Des étincelles liées à la présence de fragments métalliques auraient enflammé des poussières.

N° 13240

07/07/1998

FRANCE - 74 - DOUSSARD

20.1 - Sciage, rabotage, imprégnation du bois

Dans un établissement produisant de la farine de bois, une explosion suivie d'un incendie se produit dans un broyeur à sciure. Le feu se propage aux dépoussiéreurs, aux ventilateurs et au silo de 80 m³. L'exiguïté et l'encombrement des lieux compliquent l'intervention. La production est interrompue pendant 2 mois.

4.3.4 Moyens de prévention/détection/protection courants

Il est nécessaire de prendre des mesures adaptées pour tenter d'empêcher qu'un incendie ou une explosion se produise, ou au moins pour limiter leur propagation qui peut être lourde de conséquences, pas nécessairement pour le broyeur lui-même mais au moins pour les équipements auxquels il est relié (cf. § 4.3.4.3).

4.3.4.1 Moyens de prévention

Pour les produits qui sont caractérisés par une valeur d'EMI faible (entre 10 et 100 mJ), ou qui s'enflamment à basse température, il faut renoncer à les broyer sous air et recourir à un broyage sous gaz inerte.

Si le broyage est effectué sous air, il faut limiter l'échauffement du produit dans le broyeur et éviter d'introduire des corps étrangers durs avec le produit à broyer.

4.3.4.2 Moyens de détection

La mesure de la température du produit en sortie de broyeur permet de contrôler l'absence d'un début de combustion.

Cette mesure doit être complétée par la détection de particules incandescentes en sortie de broyeur.

4.3.4.3 Moyens de protection

Par principe, un broyeur présente généralement une résistance mécanique élevée. Il faut toutefois s'assurer que le broyeur résiste à la pression maximale susceptible d'être développée par l'explosion d'une ATEX interne, soit une dizaine de bars.

Il faut également installer des dispositifs d'isolement permettant d'empêcher que la flamme d'une explosion se propage du broyeur vers les équipements auxquels il est relié, à savoir la trémie de recette du produit broyé (une écluse rotative peut convenir) et vers le système de dépoussiérage destiné à retenir les fines.

4.4 PROCÉDES DE MÉLANGEAGE

4.4.1 Description sommaire

Dans de très nombreuses industries, il est fréquent que l'élaboration d'un produit requiert une étape de préparation d'un mélange de deux constituants ou plus. Le procédé de mélangeage dépend de l'état de ces constituants :

- s'il ne s'agit que de solides pulvérulents, le mélangeage est effectué à sec,
- au contraire, si l'un au moins des constituants est liquide, le mélangeage consiste à homogénéiser la phase liquide à laquelle ont été incorporés les solides.

Le mélangeage présente un risque d'explosion si l'un des pulvérulents mis en œuvre est inflammable et/ou si l'un au moins des liquides mis en œuvre est inflammable.

Dans la suite, nous présentons successivement le cas du mélangeage à sec, puis le cas du mélangeage en phase liquide

4.4.2 Mélangeage à sec

Le mélangeage à sec est effectué dans un mélangeur qui se présente comme une capacité cylindrique à axe vertical ou horizontal, dans laquelle la fonction de mélangeage est obtenue, après introduction de tous les constituants,

- soit par un organe d'agitation disposé selon l'axe du mélangeur et entraîné en rotation par un moteur,
- soit par la mise en rotation du mélangeur lui-même selon son axe (alors nécessairement horizontal).

4.4.2.1 Evaluation sommaire des risques

Il faut considérer que la rotation de l'organe d'agitation ou du mélangeur lui-même met en suspension les fines des constituants à mélanger et que le mélangeur contient une ATEX si le mélangeage est effectué sous air.

4.4.2.2 Eléments d'accidentologie

Plusieurs accidents au cours d'opérations de mélangeage sont répertoriés dans les bases de données d'accidents. Dans plusieurs cas l'inflammation du pulvérulent se produit lorsqu'un opérateur l'introduit manuellement dans le mélangeur. La cause invoquée est un phénomène électrostatique (étincelle qui jaillit dans le nuage lui-même ou entre le nuage et la masse du mélangeur).

Des accidents ont été observés même lorsque le ciel du mélangeur est inerté : dans ce cas, il faut admettre que ce qui s'enflamme, c'est l'ATEX qui se forme à l'interface entre l'atmosphère inertée et l'air ambiant, à partir du pulvérulent combustible.

Dans tout les cas, si l'inflammation se produit au moment où l'opérateur est en train d'effectuer l'opération manuelle d'introduction d'un pulvérulent et se trouve donc au-dessus de la trappe du mélangeur, il est brûlé plus ou moins gravement parce que sa position le rend très vulnérable aux effets thermiques de la flamme.

Enfin, des défauts mécaniques, notamment des pales de mélangeur ont été à l'origine d'inflammations d'ATEX.

4.4.2.3 Moyens de prévention/détection/protection courants

Parmi les moyens de prévention envisageables on peut citer :

- La détection de l'échauffement de pièces en mouvement ;
- La prévention des risques électrostatiques notamment par une mise à la terre efficace ;
- La maintenance préventive des pièces en mouvement.

En terme de protection, il est possible de protéger le mélangeur par un suppresseur d'explosion.

4.4.3 Mélangeage en phase liquide

4.4.3.1 Evaluation sommaire des risques

Le mélangeage en phase liquide est effectué dans un mélangeur qui se présente comme une capacité cylindrique à axe vertical, dans laquelle la fonction de mélangeage est obtenue par un organe d'agitation disposé selon l'axe du mélangeur et entraîné en rotation par un moteur.

Le ou les constituants solides peuvent être introduits dans le mélangeur avant que tout liquide y ait été préalablement introduit ou au contraire, ils peuvent être incorporés au(x) liquide(s) préalablement introduits dans le mélangeur.

De la même façon, si l'un au moins des constituants liquides est inflammable et si le point d'éclair du mélange est inférieur à la température à laquelle est réalisé le mélangeage, l'atmosphère qui surmonte le mélange est une ATEX, dès lors que le mélangeage est effectué sous air.

Dans bien des industries, il arrive que la préparation d'un produit comprenne une étape qui consiste à mélanger des constituants liquides et solides dans un mélangeur.

Parmi les constituants du mélange, il arrive souvent que les liquides mis en œuvre soient des solvants inflammables et que certains solides soient des pulvérulents combustibles.

Enfin, il est encore fréquent que ces pulvérulents soient introduits manuellement par un opérateur qui les déverse à partir de sacs, par la trappe ouverte d'un mélangeur contenant déjà une phase liquide maintenue agitée.

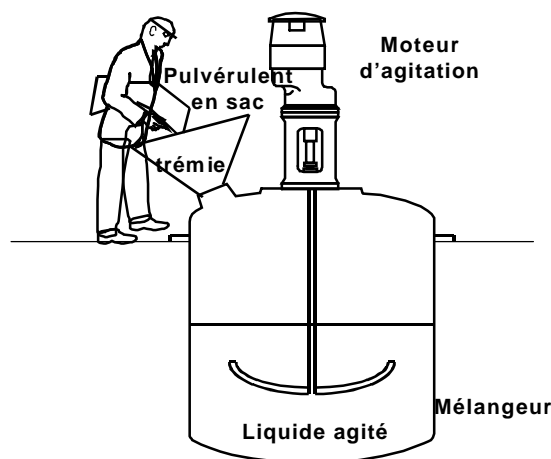


Figure 2 : Schéma d'un mélangeur en cours de chargement par un opérateur

4.4.3.1.1 Identification des ATEX potentielles

Si le solvant mis en œuvre a un point d'éclair inférieur à la température ambiante et si le mélangeur est sous air, il faut considérer que l'atmosphère qui surmonte le liquide constitue une ATEX.

Si au contraire le mélangeur est inerté, aucune ATEX ne sera présente à l'intérieur du mélangeur.

Dans les deux cas, que le mélangeur soit inerté ou non, une ATEX est présente à proximité de la trappe ouverte, voire dans la totalité de la trémie, au moment où l'opérateur introduit les pulvérulents combustibles.

4.4.3.1.2 Identification des sources d'inflammation potentielles

Différentes sources d'inflammation sont susceptibles de se présenter, en fonctionnement normal ou anormal et d'enflammer les ATEX présentes.

C'est le cas en particulier des étincelles d'origine électrostatique associées à la présence de l'opérateur ou encore à l'opération de déversement du produit pulvérulent, susceptibles de générer et d'accumuler des charges électrostatiques.

4.4.3.2 Retour d'expérience d'accidents

L'analyse d'accidents survenus lors de l'exploitation de tels mélangeurs montre qu'il est relativement fréquent que l'opérateur soit plus ou moins gravement brûlé, par suite de l'inflammation de l'ATEX présente lors de l'opération d'introduction.

- il est arrivé que l'ATEX présente dans la totalité d'un mélangeur non inerté soit enflammée et que l'opérateur soit gravement brûlé,
- même si le mélangeur est inerté, il arrive également que l'ATEX présente à proximité de la trappe ouverte soit enflammée et que l'opérateur soit brûlé.

4.4.3.3 Détermination des zones à risque

A titre d'exemple, nous indiquons dans ce chapitre quelles types de zones doivent être identifiées, en fonction des emplacements où des ATEX peuvent se former et peuvent être enflammées, soit en fonctionnement normal, soit en situation de dysfonctionnement.

4.4.3.3.1 Cas d'un mélangeur non inerté

Emplacement	Type de zone	Remarques
Volume interne du mélangeur	Zone 0	Une ATEX se forme systématiquement à l'intérieur d'un mélangeur non inerté soit au chargement soit en cours d'opération.
Intérieur de la trémie d'introduction	Zone 0	La mise en suspension des pulvérulents combustibles au moment du chargement induit la formation d'une ATEX dans la trémie d'introduction.

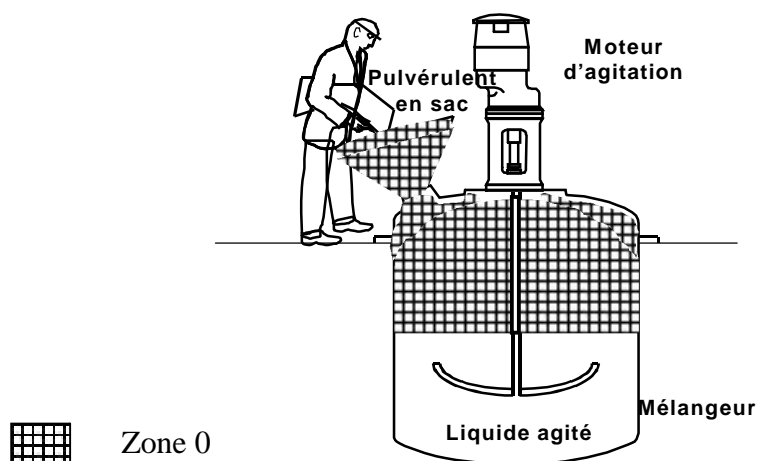


Figure 3 : Représentation des zones à risques dans le cas de l'opération de chargement d'un mélangeur (cas d'un mélangeur non inerté)

4.4.3.3.2 Cas d'un mélangeur inerté

Emplacement	Type de zone	Remarques
Volume interne du mélangeur	Zone 2	Une ATEX peut se former en cas de dysfonctionnement du système d'inertage
Intérieur de la trémie d'introduction	Zone 0	Le retour d'expérience d'accidents montre que, même quand le mélangeur est inerté, il arrive que l'opérateur soit brûlé par les effets thermiques qui résultent d'une inflammation de l'ATEX qui s'est formée dans la trémie

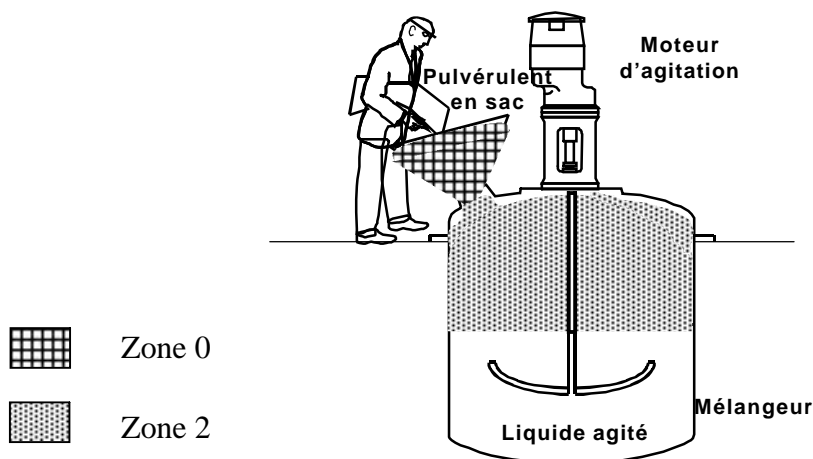


Figure 4 : Représentation des zones à risques dans le cas de l'opération de chargement d'un mélangeur (cas d'un mélangeur inerte)

La zone 0 identifiée dans la trémie de chargement du mélangeur ne s'étend pas, dans le cas général, au-delà du volume de cette trémie.

4.4.3.4 Mesures de prévention et de protection

Compte tenu de sa présence au dessus de la trémie, l'opérateur est très vulnérable aux effets thermiques produits par l'inflammation de l'ATEX formée et il est donc indispensable de mettre en place des mesures de prévention et de protection.

Une première mesure de prévention consiste à inerte le mélangeur, afin d'empêcher qu'une ATEX puisse s'y former.

Cependant, cette mesure n'est pas suffisante puisqu'elle ne permet pas d'éviter l'inflammation de l'ATEX qui se forme dans la trémie; elle doit donc être complétée par une mesure de protection destinée à isoler l'opérateur de l'ATEX qui se forme dans la trémie lors de l'opération d'introduction.

Le mélangeur doit être équipé d'un dispositif d'introduction automatique qui peut être par exemple constitué d'un sas équipé de deux vannes pilotées.

La procédure d'introduction consiste alors à introduire manuellement le pulvérulent dans le sas préalablement inerté, à inerte à nouveau le sas dans lequel de l'air a été introduit avec le pulvérulent, puis à transférer le pulvérulent du sas dans le mélangeur, par ouverture de la vanne inférieure du sas.

4.5 PROCÉDES DE DEPOUSSIERAGE

Nombreux sont les procédés mettant en œuvre des pulvérulents, dont l'exploitation génère au moins la mise en suspension de très fines particules, et éventuellement aussi leur production : le broyage, la manutention, le polissage, le mélangeage, certains procédés de séchage... Que ce soit pour des raisons d'hygiène ou de sécurité vis-à-vis des risques d'explosion, il est nécessaire de capter puis d'isoler ces particules en mettant en œuvre des procédés de captage et de dépolluage.

Ces procédés fonctionnent selon des principes différents et peuvent être répartis en 2 catégories :

- les dépollueurs à sec, qui comprennent eux-mêmes les cyclones, les filtres à manches et les dépollueurs électrostatiques,
- les dépollueurs humides.

4.5.1 Description sommaire

4.5.1.1 Cyclone

Un cyclone est un contenant de forme cylindrique ou tronconique et d'axe vertical, qui comporte trois orifices (schéma de la figure 5) :

- un orifice disposé en haut de la surface cylindrique, auquel est raccordée, tangentiellement à cette surface, la canalisation amenant le flux d'air empoussiéré au cyclone,
- un orifice disposé au centre du couvercle, auquel est raccordée, perpendiculairement à ce couvercle, la canalisation véhiculant le flux d'air dépollué sortant du cyclone,
- un orifice disposé à la base du cyclone, auquel est raccordée la canalisation d'évacuation du pulvérulent accumulé dans le cyclone, éventuellement via une vanne rotative.

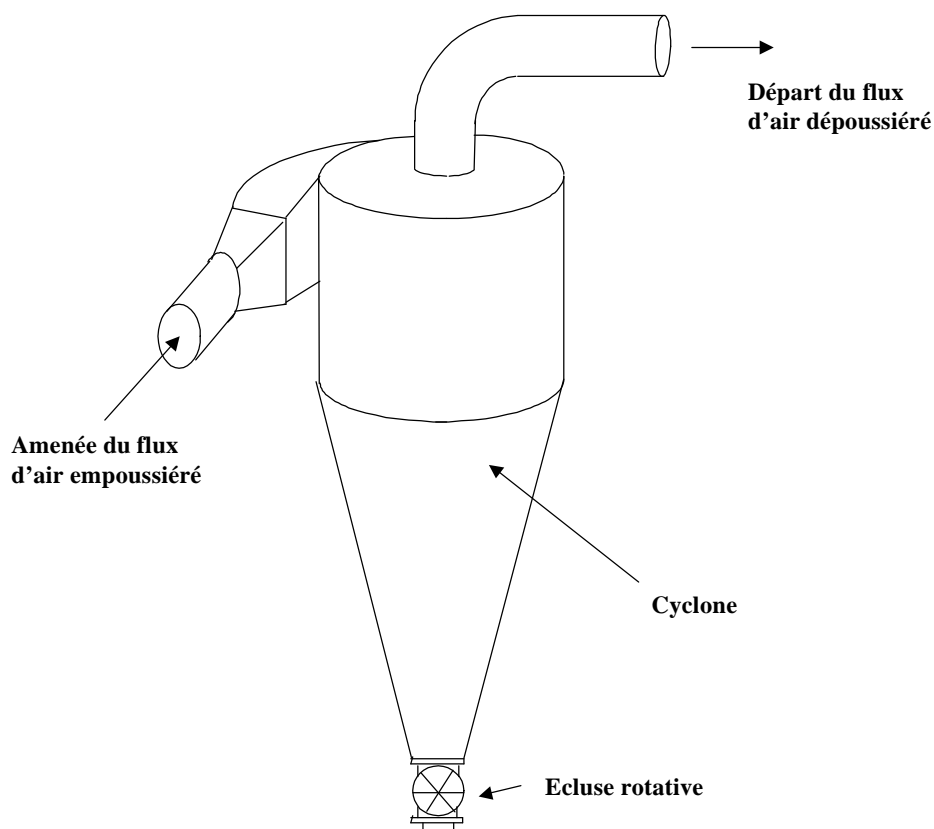


Figure 5 : Schéma d'un cyclone

A leur arrivée dans le cyclone, les grains de pulvérulent sont séparés de l'air par effet gravitaire, c'est-à-dire qu'ils tombent dans le bas du cyclone, d'autant plus facilement qu'ils sont plus gros et donc plus lourds.

Un cyclone est donc un dispositif qui permet de débarrasser un flux d'air des grains de pulvérulent les plus grossiers mais il ne permet pas de retenir les grains les plus fins, de sorte qu'un moyen de dépoussiérage plus efficace, comme un filtre à manches, doit souvent lui être associé.

4.5.1.2 Filtre à manches

Un filtre à manches fonctionne sur le même principe qu'un aspirateur domestique, à la différence près qu'il est fixe et qu'il peut retenir une grande quantité de pulvérulent. En effet les manches, qui jouent le même rôle que le sac de l'aspirateur, ont une surface très importante.

Le schéma ci-après présente les principaux éléments d'un filtre à manches, et tous les équipements associés, nécessaires à son fonctionnement.

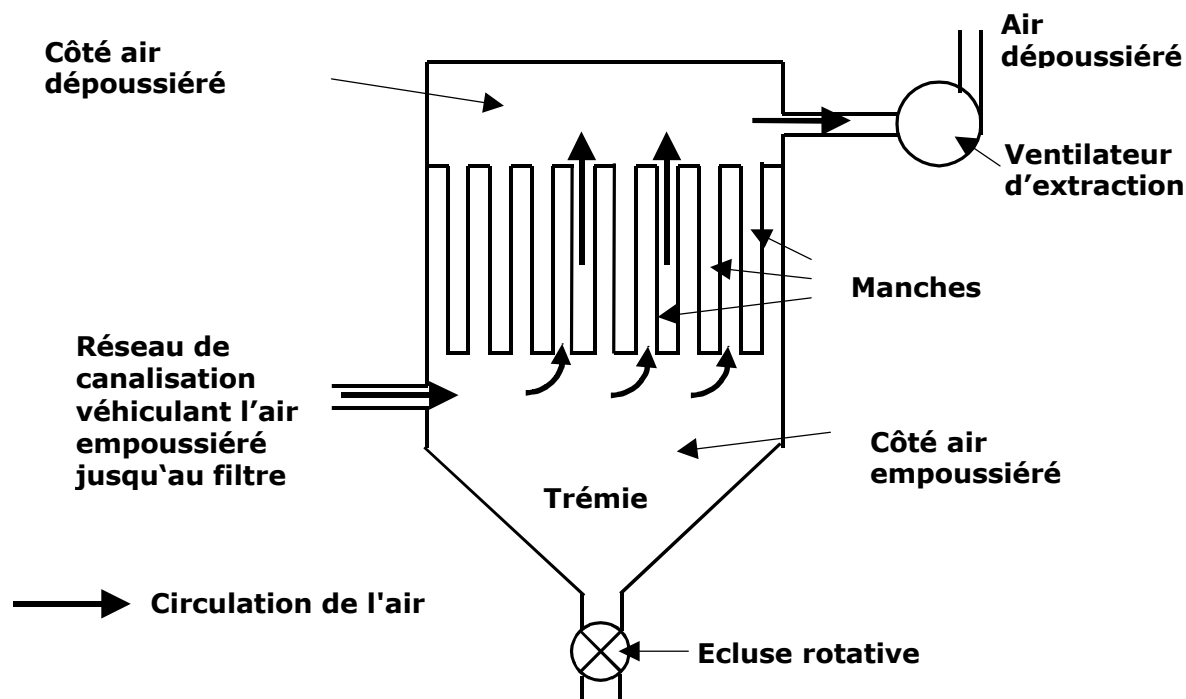


Figure 6 : Schéma d'un filtre à manches et de ses équipements associés

Un filtre est constitué d'un caisson dans lequel les manches sont disposées verticalement, et qui est constitué de deux parties distinctes :

- la partie à laquelle est relié le réseau de canalisation qui véhicule l'air empoussiéré jusqu'au filtre,
- la partie à laquelle est relié la canalisation qui véhicule l'air dépoussiéré sortant du filtre.

L'aspiration et le rejet de l'air dépoussiéré sont assurés par un ventilateur d'aspiration, généralement placé sur la canalisation d'air dépoussiéré.

Afin de maintenir l'efficacité de l'aspiration, le filtre doit être équipé d'un système de décolmatage des manches, qui consiste à produire alternativement une contre-pression d'air qui fait tomber les grains de pulvérulent accumulés sur les manches. Une trémie, placée sous les manches dans la partie inférieure du filtre, permet de recueillir le pulvérulent tombant des manches à chaque décolmatage.

L'isolement entre la trémie du filtre et l'extérieur peut être assuré par une vanne rotative, placée à la base de la trémie et utilisée pour vider le filtre.

4.5.1.3 dépoussiéreur électrostatique

Un dépoussiéreur électrostatique se présente comme une capacité à l'intérieur de laquelle sont disposées des électrodes maintenues à des potentiels différents entre lesquelles s'établit un champ électrique. La séparation entre l'air et les grains de pulvérulent résulte de l'action d'une force électrostatique s'exerçant sur les grains qui, chargés par influence, sont attirés par l'électrode de charge opposée et sur laquelle ils se fixent.

4.5.1.4 dépoussiéreur humide

Un dépoussiéreur humide se présente comme une capacité contenant de l'eau à travers laquelle on fait barboter le flux d'air à dépoussiérer ou comme un dispositif de pulvérisation d'eau sur le flux à dépoussiérer (la pulvérisation a souvent lieu à contre-courant). Les grains de pulvérulent sont retenus dans l'eau et s'y accumulent sous forme de boues.

4.5.2 Sécurité des procédés de dépoussiérage

Le procédé de dépoussiérage par filtre à manches est mis en œuvre dans de très nombreuses industries et cette raison justifie qu'il soit traité séparément dans un premier temps. Les autres procédés de dépoussiérage sont traités ensemble dans un second temps.

4.5.2.1 Filtre à manches

4.5.2.1.1 Evaluation sommaire des risques

4.5.2.1.1.1 Possibilité de formation d'ATEX

Selon le niveau d'empoussièrement du flux d'air empoussiéré aspiré jusqu'au filtre, ce flux constitue ou non une ATEX. A noter que ce niveau peut varier dans le temps, selon le débit de production des fines particules de pulvérulent aux points d'aspiration de l'air empoussiéré, débit qui peut lui-même ne pas être constant et dépendre des phases de fonctionnement du procédé générant les particules.

Lors de chaque cycle de décolmatage, les grains de pulvérulent accumulés sur les manches sont remis en suspension et tombent dans le fond de la trémie : une ATEX se forme alors certainement dans la partie « air empoussiéré » du filtre.

Côté « air dépoussiéré », aucune ATEX n'est présente en fonctionnement normal. Cependant, si une manche vient à se rompre ou à se démancher, l'air empoussiéré peut passer du côté « air dépoussiéré ». Dans ce cas, si le pulvérulent est présent en concentration suffisante dans l'air, une ATEX peut se former dans la partie « air dépoussiéré » du filtre.

Le fait que le filtre fonctionne en dépression par rapport à la pression atmosphérique évite qu'il se produise une fuite d'air empoussiéré vers l'extérieur. Il n'y a donc pas à considérer, à priori, de risque de formation d'une ATEX à l'extérieur du filtre.

4.5.2.1.1.2 Sources d'inflammation possibles des ATEX formées

Le fait que de l'air empoussiéré soit aspiré et véhiculé dans le réseau d'aspiration jusqu'au filtre rend possible le chargement électrostatique des grains de pulvérulent ou de matériaux en contact avec ces grains et isolés de la terre. Bien qu'il soit possible en principe d'empêcher un tel phénomène (par exemple par l'usage de manches antistatiques), il faut considérer qu'une décharge électrostatique reste une source d'inflammation possible de l'ATEX présente dans le filtre côté air empoussiéré, à condition toutefois que l'EMI du pulvérulent soit inférieure à 10 mJ, valeur estimée de l'énergie qui est susceptible d'être libérée dans ce type de décharge.

Par ailleurs, il faut noter que des manches antistatiques mal montées, c'est-à-dire non reliées à la terre, sont susceptibles de conduire à des décharges d'énergie élevée, supérieure à l'énergie minimale d'inflammation de poussières courantes et d'être en définitive plus dangereuses que des manches non antistatiques.

L'ATEX présente dans le filtre côté air empoussiéré peut également être enflammée par des particules incandescentes qui seraient produites en même temps que les fines particules de pulvérulent (cas d'un dépoussiérage relié à un broyeur ou à une installation de polissage) et véhiculées jusqu'au filtre par le flux d'air empoussiéré.

4.5.2.1.1.3 Autres phénomènes que l'explosion

Au cas où une explosion s'amorcerait dans le filtre, il faut s'attendre à ce qu'elle soit suivie d'un incendie du pulvérulent déposé sur les manches ou contenu dans la trémie.

Cependant, l'opération de filtration n'échauffe pas le pulvérulent et il n'y a pas a priori de risque d'auto-échauffement (sauf s'il y a accumulation de poussière dans le bas du filtre). Un tel risque pourrait toutefois exister si le pulvérulent mis en œuvre est caractérisé par un volume critique de stockage à la température ambiante qui soit inférieur au volume pouvant s'accumuler dans la trémie.

4.5.2.1.2 Eléments d'accidentologie

L'accidentologie fait état de nombreuses explosions accidentelles de filtres à manches non protégés. Ces accidents ont provoqué la destruction du filtre, voire du ventilateur, éventuellement suivi de l'incendie des manches. Dans plusieurs cas, le personnel a été soumis à des effets mécaniques (projection de débris) ou thermiques (brûlures par la flamme sortant du filtre).

On recense aussi des cas d'explosions initiées par une étincelle provoquée par une manche antistatique déconnectée de la terre.

Les accidents ci-dessous extraits de la base de données du BARPI sont illustratifs de ces phénomènes.

N° 19109

13/08/2002

FRANCE - 51 - SERMAIZE-LES-BAINS

15.8 - Autres industries alimentaires

Un incendie se déclare dans un filtre à manche d'une unité de déshydratation de luzerne. Une alarme se déclenche en salle de commande. Un opérateur se rend sur place, constate de la fumée, arrête les lignes de séchage et avertit le gardien pour qu'il alerte les pompiers. Ceux-ci interviennent pour refroidir le caisson du filtre qui se consume lentement. Il n'y a pas eu d'explosion. Le filtre et ses commandes sont détruits. Une analyse de défaillance est réalisée par l'exploitant sans pouvoir déterminer l'origine de l'incendie. Les capteurs infrarouges en amont du filtre sont contrôlés, des rondes supplémentaires mises en place après réparation du filtre et redémarrage de l'unité. Des essais réalisés à chaud ne permettent pas de trouver d'éventuels frottements de pièces dans l'installation.

N° 16889

17/01/1999

FRANCE - 76 - SANDOUVILLE

24.1 - Industrie chimique de base

Dans une usine fabriquant du caoutchouc, une explosion de poussières et un incendie se produisent dans un cyclofiltre associé à un broyeur contenant 1 t de produit antioxydant. Deux opérateurs déclenchent le POI et maîtrisent rapidement le feu avec une petite lance. Le cyclofiltre est endommagé, la toiture et le bardage du bâtiment sont soufflés, des flexibles d'aspiration et les enveloppes de luminaires proches du cyclofiltre ont fondus. Les dommages sont évalués à 3,3 MF. Une expertise conclut à une inflammation d'origine électrostatique (étincelle après rupture de la continuité électrique entre une manche filtrante et son support). L'exploitant installe un détecteur-éjecteur de métal sur l'entrée d'air du broyeur, un détecteur d'étincelles en sortie du broyeur, une sonde de température et une injection d'eau incendie dans le cyclofiltre, ainsi que des vannes à fermeture rapide. Les manches filtrantes perdant leurs propriétés antistatiques en vieillissant seront régulièrement remplacées.

4.5.2.1.3 Moyens de prévention/détection/protection courants

La prévention des incendies et explosions dans les filtres à manche repose sur la prévention des sources électrostatiques (usage de manches ES (antistatiques) correctement montées).

La protection passe par l'utilisation systématique d'événements destinés à évacuer une éventuelle surpression et par le découplage du filtre du reste de l'installation par des vannes à fermeture rapide ou des vannes rotatives antidéflagrantes.

4.5.2.2 Autres procédés de dépoussiérage

4.5.2.2.1 Evaluation sommaire des risques

4.5.2.2.1.1 Possibilité de formation d'ATEX

Pour qu'une ATEX puisse se former dans un cyclone, il faut non seulement que la concentration en pulvérulent du flux d'air à dépoussiérer appartienne au domaine d'explosivité, mais il faut également que la proportion de fines particules soit suffisante ; en effet, les plus grosses particules ont un effet refroidisseur de la flamme et peuvent l'empêcher de se propager si elles sont trop abondantes.

Par rapport à un filtre à manches et en absence de cycle de décolmatage, la possibilité de formation d'une ATEX dans un dépoussiéreur électrostatique ne dépend que du niveau d'empoussièrement du flux d'air véhiculé jusqu'au dépoussiéreur.

Lorsqu'un dépoussiéreur humide est utilisé pour dépoussiérer de l'air chargé de poussières métalliques, il faut envisager que ces poussières réagissent avec l'eau pour former de l'hydrogène ; la possibilité de cette réaction de même que sa cinétique dépendent de la nature du métal. En fonctionnement normal du filtre, le débit de production d'hydrogène peut être insuffisant, mais, lorsque le filtre est arrêté, une ATEX peut se former dans le ciel du filtre. Ce risque peut être réduit par ventilation du filtre.

4.5.2.2.1.2 Sources d'inflammation possibles des ATEX formées

Le principe de fonctionnement d'un dépoussiéreur électrostatique suppose la présence d'une différence de potentiel entre deux électrodes, qui soit suffisante pour charger par influence les particules présentes dans le flux d'air à dépoussiérer. L'intensité de cette différence de potentiel et la distance entre les électrodes doivent cependant être ajustées de façon à éviter l'occurrence de claquages entre les électrodes, car les arcs électriques produits libéreraient probablement une énergie suffisante pour constituer la source d'inflammation d'une ATEX qui serait présente dans le dépoussiéreur.

4.5.2.2.2 Eléments d'accidentologie

L'accidentologie contient quelques exemples d'incendies ou d'explosions accidentelles de différents types de dépoussiéreurs (cyclones, électrofiltres). On recense aussi des cas d'explosion accidentelle de dépoussiéreurs humides, par suite d'une accumulation d'hydrogène, résultant d'une hydrolyse d'un pulvérulent métallique.

Les exemples suivants illustrent les risques causés par différents types de dispositifs de filtration.

N° 12273

01/04/1997

FRANCE - 21 - DIJON

90.0 - Assainissement, voirie et gestion des déchets

Lors du redémarrage de l'incinérateur de boues d'une station d'épuration, une explosion se produit dans l'électrofiltre humide installé récemment. Le four est remis en service 3 semaines plus tard en by-pass du filtre. Une accumulation de CO serait à l'origine de l'accident. L'exploitant prévoit : la mise en place d'un ventilateur de triage, d'un analyseur de CO supplémentaire couplé à une alarme et d'une injection d'air frais au sommet du four.

N° 14639

03/12/1998

FRANCE - 36 - ARDENTES

20.3 - Fabrication de charpentes et de menuiseries

Dans une parqueterie, une explosion se produit en amont du ventilateur d'aspiration de poussières de bois. Un échauffement et des étincelles dus au blocage d'une pièce métallique dans le ventilateur en seraient l'origine. La trappe de nettoyage de celui-ci fait office d'évent mais le souffle endommage les conduites d'aspiration et un mur de recouplement. Un début d'incendie se déclare dans le cyclone placé en aval mais ne se propage pas à la chambre à poussières. Les conséquences matérielles sont limitées, la perte d'exploitation est évaluée à 250 KF.

N° 15013

01/02/1999

FRANCE - 59 - BOUCHAIN

40.1 - Production et distribution d'électricité

Dans une centrale électrique, un incendie se déclare sur un dépoussiéreur électrostatique lors de la remise en service de la tranche N°1. Les pompiers parviennent difficilement à maîtriser l'incendie à cause de la structure volumineuse et close du dépoussiéreur. Celui-ci est détruit et ses structures sont tordues et affaissées. Selon une première hypothèse, l'origine du sinistre est due aux poussières combustibles accumulées et enflammées lors du redémarrage de l'installation. La remise en service de la tranche n'est pas envisageable dans l'immédiat. Les dommages sont évalués à 30 MF. Une expertise est effectuée.

4.5.2.2.3 Moyens de prévention/détection/protection courants

Les quelques mesures suivantes sont envisageables pour prévenir ou se prémunir des conséquences d'incendies ou d'explosions dans les dispositifs de filtration.

- Protection d'un cyclone par évent si présence possible d'une ATEX ;
- Réglage de la différence de potentiel et de la distance inter-électrodes pour éviter les arcs électriques dans un dépoussiéreur électrostatique ;
- Surveillance de la teneur en hydrogène dans le ciel d'un dépoussiéreur humide ;
- Dans le cas d'un laveur humide, il faut être mis en garde contre le risque d'amorçage d'un incendie par la résistance de chauffage destinée à mettre hors gel le laveur. Le niveau de l'eau dans ces filtres doit être tel que les résistances de chauffage soient toujours immergées (utilisation d'un contrôleur de niveau par exemple).

4.6 PROCÉDES DE TRAITEMENT MÉCANIQUE DE SURFACE

Les procédés de traitement mécanique de surface consistent à projeter un matériau granulaire et abrasif sur la surface à traiter, une projection suffisamment violente étant généralement obtenue par entraînement dans un jet d'air comprimé.

Chaque procédé est désigné d'un terme caractérisant l'état de surface obtenu, qui dépend de la nature, de l'importance du caractère abrasif et de la granulométrie du matériau utilisé :

- décapage,
- grenailage,
- polissage...

4.6.1 Description sommaire

Une installation de traitement mécanique de surface se présente sous la forme d'une enceinte fermée, dans laquelle se trouve l'objet à traiter. Il est soumis à un jet d'air comprimé chargé du matériau de traitement, qui provient d'un pistolet manié par un opérateur ou d'un dispositif automatique.

Les grains du matériau de traitement frappent la surface de l'objet et lui confèrent un certain état de surface ou en arrachent de fines particules ; simultanément, selon la nature du matériau, certains grains peuvent se fragmenter en plusieurs grains de plus petites dimensions.

Après avoir rebondi sur les parois internes de l'enceinte, le matériau de traitement, ajouté des particules extraites de la surface de l'objet traité, tombe dans une trémie disposée en point bas pour être recueilli et éventuellement recyclé.

Dans le même temps, les plus fines particules sont évacuées de l'enceinte par entraînement dans un flux d'air : ce flux est aspiré par un ventilateur d'extraction, associé à un ensemble de dépoussiérage (cf. § 4.5.2.1) qui maintient l'enceinte en dépression par rapport à l'extérieur.

4.6.2 Evaluation sommaire des risques

Pour autant que le matériau de traitement soit combustible, ou que les particules extraites de la surface de l'objet traité le soient, les risques spécifiques à une installation de traitement mécanique de surface sont :

- le risque d'explosion d'une ATEX qui se formerait dans l'enceinte ou dans le filtre associé,
- le risque d'auto-échauffement du matériau recueilli dans la trémie,

A noter que ces risques n'intègrent pas ceux qui sont spécifiques à d'autres procédés déjà traités par ailleurs (stockage d'un pulvérulent, dépoussiérage d'un air empoussiéré).

4.6.3 Eléments d'accidentologie

L'accidentologie présente quelques cas d'incendie et d'explosion dans des installations de grenailage et de polissage, comme le montrent les quelques exemples suivants tirés de la base de données du BARPI.

N° 19682

11/11/2000

FRANCE - 73 - HERMILLON

27.4 - Production de métaux non ferreux

Dans l'atelier de grenailage d'une usine de production de poudre d'aluminium, une explosion avec atomisation du métal fondu a lieu la nuit sur un tamis en ligne. Un accident comparable s'était déjà produit en mai 1998 ; les expertises réalisées et les dispositions prises depuis par l'exploitant ont permis de limiter les conséquences de l'événement. Il n'y a ni victime, ni impact sur l'environnement et seul le tamis est endommagé. Des mesures correctives complémentaires sont prises dans l'attente des résultats de l'enquête effectuée pour déterminer les circonstances exactes de ce nouvel incident.

N° 23842

09/01/2003

FRANCE - 53 - SAINT-SATURNIN-DU-LIMET

28.7 - Fabrication d'autres ouvrages en métaux

Un incendie se déclare vers 18h45 dans un atelier de polissage d'une usine. Le polissage engendre des poussières d'aluminium, de bandes abrasives et de pâte à polir. Le feu prend au niveau d'une machine à polir (lustrage de bouchons en aluminium) équipée d'un aspirateur non muni de détecteur d'incendie. Un opérateur intervient avec un extincteur CO₂, mais le feu se propage dans les gaines d'aspiration. Les employés sont évacués. Les services EDF interviennent pour sécuriser les installations électriques (réseau haute tension). Dix minutes après l'appel, les pompiers arrivent sur le site et mettent en place des lances à eau et une moto pompe. Le sinistre est maîtrisé vers 20 h. L'atelier séparé en 2 parties est partiellement endommagé (200 m² sur 10 000 m² de l'entreprise) : une partie du toit s'effondre et toutes les machines présentes sont détériorées. Les eaux d'extinction polluées seulement par des matières en suspension s'écoulent dans les caniveaux et rejoignent la lagune. On ne note aucune pollution atmosphérique et aquatique car il n'y a pas de produits chimiques stockés dans cet atelier. L'activité polissage doit être momentanément sous-traitée. Le nettoyage de l'atelier sinistré sera réalisé par une société agréée pour le désamiantage. Les déchets contenant de l'amiante lié (fibro-ciment) seront évacués vers un centre de classe 1. Le redémarrage de la zone non sinistrée de l'atelier est soumis à l'avis d'un expert bâtiment, l'incendie ayant pu occasionner des dégâts sur le mur mitoyen. De nombreux moyens de prévention et protection incendie seront mis en place : modification du système d'aspiration et de filtration de l'air avec détection incendie, cloisonnement des machines par des murs coupe-feu, mise en place d'extincteur de CO₂, de gaines en inox et d'un arrêt coup de poing, coupure automatique des aspirateurs en cas de détection de chaleur...

4.6.4 Moyens de prévention/détection/protection courants

Quelques mesures de prévention ou de protection sont envisageables face au risque présenté par les installations de polissage :

- Protection des filtres associés contre l'explosion
- Protection de l'enceinte si la concentration dépasse la LIE
- Détection des étincelles

4.7 PROCÉDES DE SECHAGE

4.7.1 Description sommaire des différents procédés de séchage et de leur principe

Il existe plusieurs procédés qui permettent d'obtenir un produit sec pulvérulent, à partir de ce même produit plus ou moins imprégné d'eau ou d'un liquide organique volatil tel que de l'alcool.

Parmi ces procédés, il est bon de distinguer les procédés discontinus des procédés continus, certains d'entre eux pouvant d'ailleurs être exploités à la fois en mode discontinu et en mode continu. Pour chaque procédé exploité en mode discontinu ou continu, le tableau 1 indique le principe de fonctionnement.

Type de procédé de séchage d'un pulvérulent	Procédé exploité en mode discontinu	Procédé exploité en mode continu
Séchage en étuve	X	
Séchage sous vide	X	
Séchage en lit fluidisé	X	X
Séchage en sécheur rotatif		X
Séchage en sécheur à bande		X
Séchage en sécheur "flash"		X
Séchage par atomisation		X

Tableau 1 : principaux procédés discontinus ou continus de séchage d'un pulvérulent

4.7.1.1 Procédés discontinus

- sécheur en lit fixe (ou en étuve) : le produit est déposé en couches minces sur les plateaux ajourés superposés d'une enceinte climatique et il est séché par un flux d'air chaud qui le traverse et qui circule autour des plateaux ;
- sécheur sous vide : le produit est placé dans une enceinte étanche (bi-cône, essoreuse...), qui est mise en rotation et maintenue à la température ambiante sous vide partiel, afin de favoriser l'évaporation du ou des liquides qui imprègnent le produit ;
- sécheur en lit fluidisé : un sécheur discontinu en lit fluidisé fonctionne sur le même principe qu'un sécheur en lit fixe, à la différence que le lit de produit est fluidisé par de l'air chaud qui passe entre les grains de pulvérulent (l'épaisseur de ce lit unique représente une quantité de produit voisine de celle contenue dans toutes les couches du lit fixe).

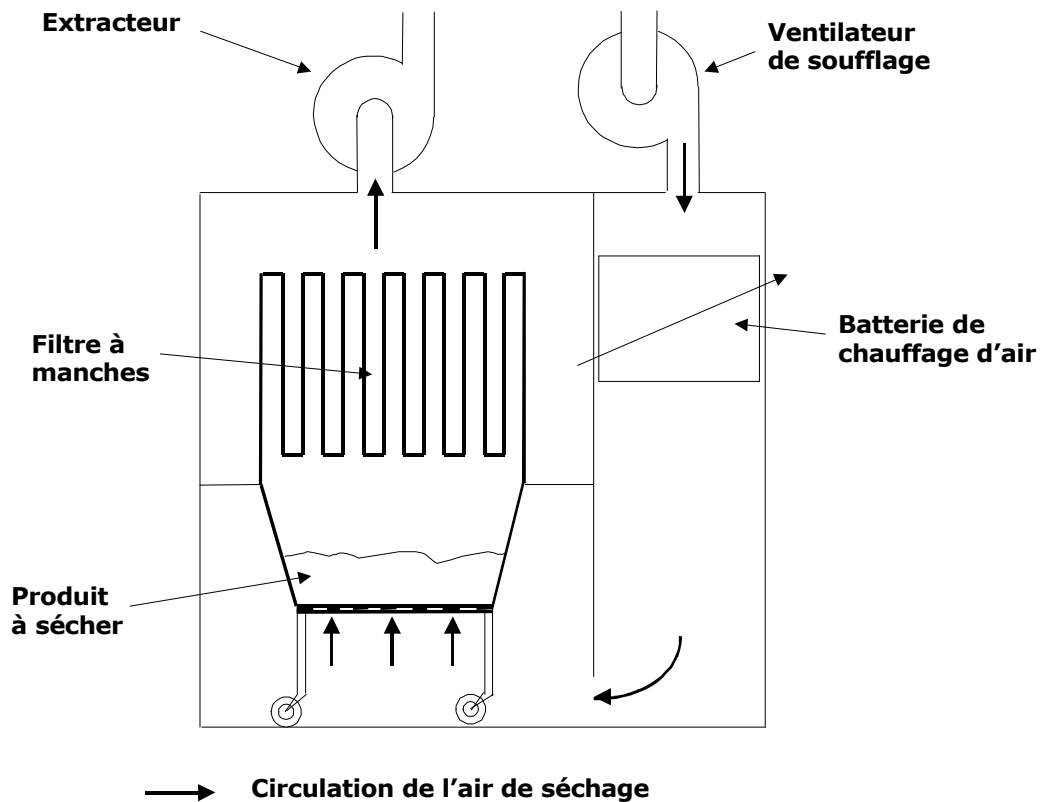


Figure 7 : sécheur en lit fluidisé discontinu

4.7.1.2 Procédés continus

- sécheur en lit fluidisé : un sécheur continu en lit fluidisé fonctionne sur le même principe qu'un sécheur discontinu, à la différence que les grains du produit à sécher progressent depuis le point où ils pénètrent dans le sécheur, jusqu'au point où les grains de produit séché en sont extraits.

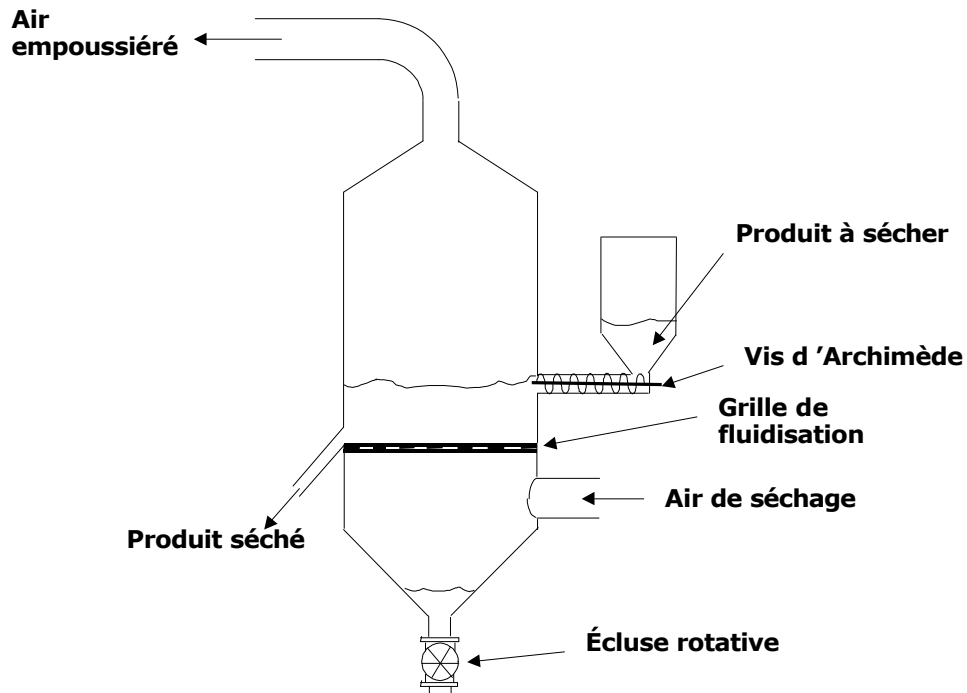


Figure 8 : schéma d'un sécheur en lit fluidisé continu

- sécheur rotatif : il se présente comme une capacité cylindrique dont l'axe est légèrement incliné sur l'horizontale ; le produit est introduit à l'extrémité la plus élevée de la capacité qui a été mise en rotation autour de son axe et il est séché par un flux d'air chaud qui est insufflé dans le cylindre, soit à la même extrémité que le produit (sécheur à co-courant), soit à l'extrémité opposée (sécheur à contre-courant) et qui ressort de l'autre côté.

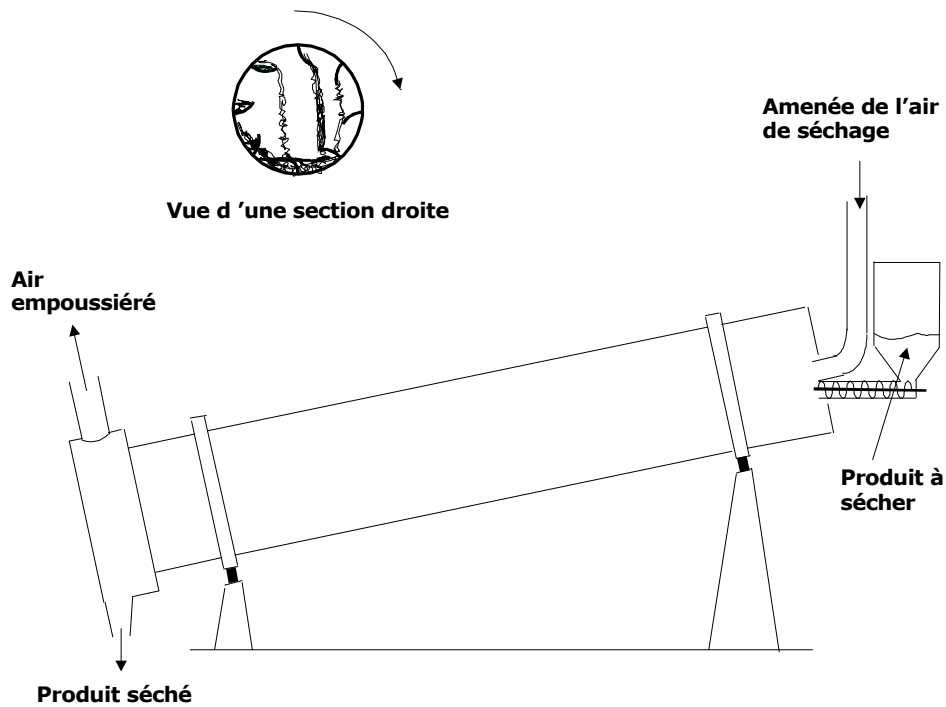


Figure 9 : Schéma d'un sécheur rotatif

- sécheur à bande : le produit est déposé sur la face supérieure d'un convoyeur à bande qui défile en boucle entre deux cylindres ; la bande pénètre dans un tunnel où elle est traversée par un flux d'air chaud vertical et à la sortie duquel, le produit séché est déversé dans une trémie.

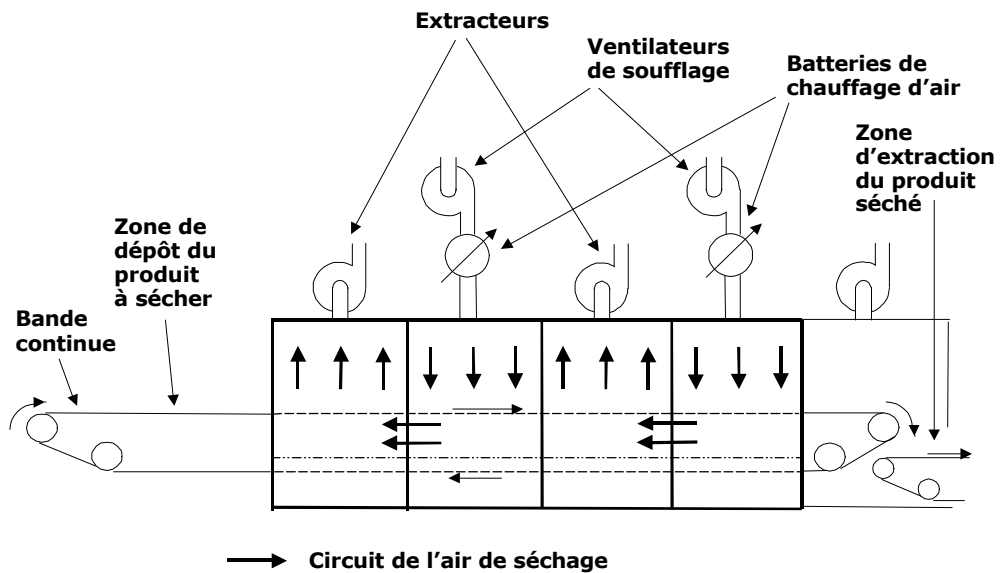


Figure 10 : Schéma d'un sécheur à bande

- sécheur flash : un sécheur flash est constitué d'une canalisation verticale dans laquelle débite un flux de gaz chaud ascendant et à la base de laquelle est introduit le produit à sécher : en haut de la canalisation, le gaz contient les grains du produit séché qui sont retenus dans un cyclone, tandis que le gaz peut être recyclé à la base du sécheur.

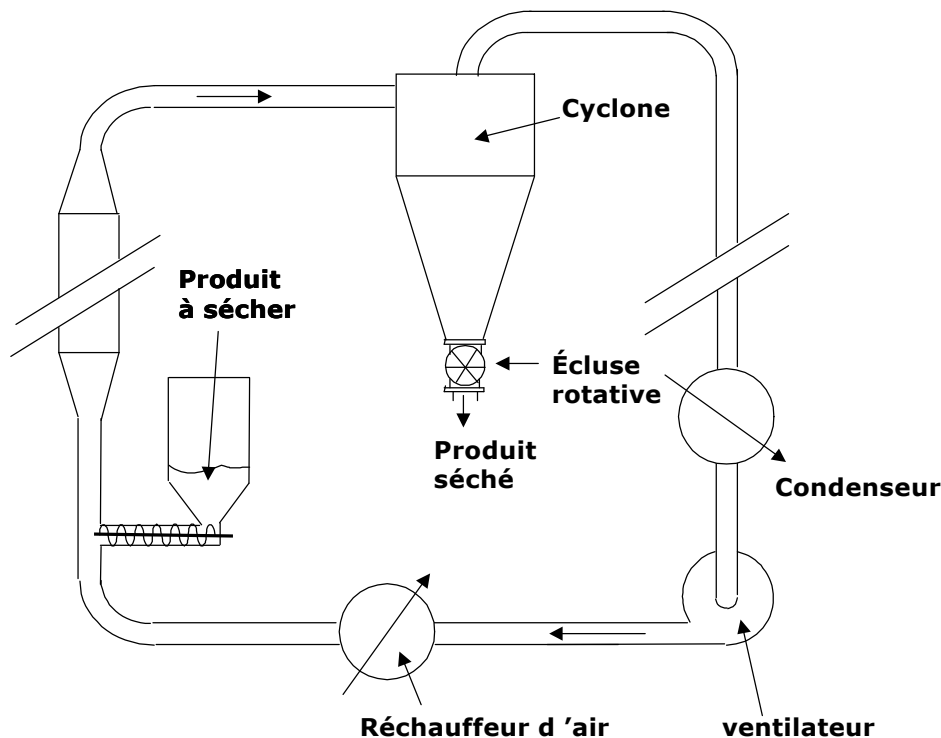


Figure 11 : Schéma d'un sécheur flash

- atomiseur : Le séchage par atomisation consiste à produire de fines gouttelettes d'une solution aqueuse du produit au sommet d'un atomiseur, puis à y faire tomber ces gouttelettes, à contre-courant ou à co-courant d'un flux d'air chaud, de façon à évaporer complètement l'eau et à recueillir le produit sec à la base de l'atomiseur (le schéma est représenté sur la figure 12).

4.7.2 Sécurité des procédés de séchage

4.7.2.1 Evaluation sommaire des risques

Qu'ils soient continus ou discontinus, tous les procédés de séchage sont exploités dans l'une et/ou l'autre des conditions suivantes :

- le produit à sécher est mis en présence d'un gaz (de l'air généralement) qui est plus ou moins chaud (à l'exception du sécheur sous vide),
- le produit peut se trouver en couche plus ou moins épaisse, en lit fluidisé ou en suspension dans l'air,

- dans les procédés où le produit est séché en couche ou en lit fluidisé, l'air de séchage se charge de fines particules au point qu'il faut adjoindre au sécheur une installation de dépoussiérage,
- si le produit à sécher est imprégné d'un liquide inflammable, la concentration de l'air de séchage en vapeur émise par ce liquide doit être prise en compte au même titre que la concentration de l'air de séchage en pulvérulent, pour apprécier le risque de formation d'une ATEX ; si une ATEX se forme dans ces conditions, elle est dite "hybride" (cf. § 2.1.1).

Ces conditions d'exploitation entraînent que :

- les procédés de séchage présentent a priori des risques d'explosion et d'incendie importants,
- ces risques doivent être caractérisés très précisément afin que des mesures de prévention et de protection adaptées puissent être prises.

Dans la suite, est d'abord présentée l'accidentologie relative à l'ensemble des procédés de séchage ; puis la sécurité de ces procédés est présentée, après une séparation en deux groupes, le groupe des procédés où le produit est séché en masse et le groupe des procédés où le produit est dispersé dans un gaz de séchage.

4.7.3 Eléments d'accidentologie

4.7.3.1 Cas des atomiseurs

Parmi les procédés de séchage, les atomiseurs sont ceux qui donnent lieu au plus grand nombre d'accidents (depuis une vingtaine d'années, l'INERIS a eu à expertiser plusieurs accidents survenus dans des atomiseurs).

Ces accidents se sont produits en France comme à l'étranger :

- en France, le BARPI [2] signale qu'un incendie a entièrement détruit en 1984 une tour destinée à la préparation d'aliments pour animaux ; plus récemment, une explosion s'est produite dans une tour de fabrication de lait en poudre, en l'endommageant fortement et en entraînant un début d'incendie ; enfin, une explosion s'est produite dans une tour de fabrication de produits dérivés de l'amidon : les 9 événements d'explosion de 0,64 m² de surface unitaire n'ont pas suffi à empêcher que la partie supérieure de la tour soit endommagée. Un début d'incendie a été rapidement enrayé par injection de vapeur

- en Allemagne, sur une période récente, 4 explosions ont été recensées par l'institut allemand BIA [3] : 2 d'entre elles ont concerné des tours pour la préparation de lait en poudre, une autre a concerné une tour pour la préparation d'un produit gras dérivé du lait et une dernière a concerné une tour destinée à la préparation de stéarate de glycérine. Dans 2 cas, l'électricité statique a été identifiée comme la source d'inflammation la plus probable (dans un cas, une étincelle de décharge serait apparue au niveau de la buse de pulvérisation). Dans 3 cas sur 4, la tour était protégée contre l'explosion. Dans 2 cas, il s'agissait d'événements d'explosion, qui ont protégé efficacement la tour dans 1 cas et moins efficacement dans l'autre où une explosion secondaire s'est produite à l'extérieur de la tour. Dans le dernier cas, la tour était équipée d'un dispositif suppresseur d'explosion qui a fonctionné mais qui était sous-dimensionné puisqu'il n'a pas suffi à empêcher la tour de subir des dégâts matériels très importants.

4.7.3.2 Cas d'autres procédés de séchage

On recense quelques accidents sur d'autres types de procédés de séchage comme les lits fluidisés ou les sècheurs flash, comme l'illustrent les accidents suivants :

N° 23885

06/01/2002

FRANCE - 04 - CHATEAU-ARNOUX-SAINT-AUBAN

24.1 - Industrie chimique de base

Un feu se déclare dans une usine chimique fabriquant des copolymères de PVC à l'intérieur d'un dernier étage de séchage par fluidisation. L'incendie reste localisé au niveau du séchoir fluidisé, du filtre à manches qui sépare l'air et le produit et du ventilateur de sortie. Il est maîtrisé en début d'après-midi par le service incendie de l'usine. Les conséquences sont limitées à des dégâts matériels et à une perte de production. L'examen et l'analyse des résidus de produits semblent montrer que l'incendie a pour origine une décomposition exothermique de produit accumulé sur une partie de la sole de fluidisation, entre 2 chicanes. Des essais de stabilité thermique du produit ont été mis en œuvre dans des conditions opératoires proches des conditions industrielles pour confirmer cette hypothèse. Le séchoir fluidisé n'a pas été remis en service, il a été remplacé par un séchoir rotatif désaffecté, ce qui a permis de reprendre la production de l'atelier.

4.7.4 Sécurité des procédés où le produit est séché en masse

Dans tous les procédés où le produit est séché en masse (sècheur en lit fixe ou fluidisé, à bande, rotatif et sous vide) le risque principal vient du fait que le produit est chauffé.

4.7.5 Sécurité des procédés où le produit est dispersé dans un flux de gaz

4.7.5.1 Cas d'un sécheur flash

4.7.5.1.1 Possibilité de formation d'ATEX

Si le gaz chaud mis en œuvre est de l'air, le flux d'air chargé du produit à sécher peut constituer une ATEX si la granulométrie du produit est suffisamment fine et si sa concentration appartient au domaine d'explosivité. En cas d'ATEX hybride, le domaine d'explosivité doit être évalué en tenant compte de la vapeur du liquide inflammable présente dans le flux d'air.

4.7.5.1.2 Sources d'inflammation possibles des ATEX formées

Le flux de gaz chaud débitant dans le sécheur est moins rapide que celui débitant dans un TP (cf. § 4.1.1.5), mais il est suffisant pour que le frottement des grains de pulvérulent contre la paroi interne du sécheur entraîne le chargement électrostatique de ces grains, avec le risque associé d'étincelle de décharge électrostatique entre des éléments de l'équipement chargés à des potentiels différents, ou entre un élément et le pulvérulent lui-même.

Si le gaz chaud mis en œuvre est de l'air et si ce flux d'air est suffisamment chargé en pulvérulent pour constituer une ATEX, une étincelle de décharge électrostatique jaillissant dans cette ATEX est capable de l'enflammer dans la mesure où l'énergie de l'étincelle est supérieure à l'EMI du produit concerné.

4.7.5.1.3 Moyens de prévention/protection courants

Un moyen efficace pour empêcher la formation d'une ATEX consiste à utiliser un gaz inerte comme gaz de séchage, de l'azote par exemple ; comme le principe du procédé permet, après séparation du produit séché, que le gaz de séchage soit recyclé, la consommation de gaz inerte peut demeurer limitée.

La prévention des risques d'explosion repose alors sur l'inertage du circuit de séchage ; or, de l'air peut entrer dans ce circuit, au moins au niveau de l'alimentation du produit et de son extraction, à la base du cyclone. Comme dans tous les cas où la sécurité vis-à-vis du risque d'explosion repose sur l'efficacité de l'inertage, il est nécessaire de vérifier de façon au moins indirecte que la teneur en oxygène de l'atmosphère du circuit reste inférieure à la valeur de la CLO du pulvérulent mis en œuvre (cf. § 2.5.8).

A défaut de prévenir la formation d'une ATEX par inertage, il faut envisager qu'une ATEX se forme dans le sécheur et il n'est alors pas possible de garantir que cette ATEX ne sera pas enflammée par un phénomène électrostatique : le sécheur et éventuellement aussi le cyclone doivent alors être protégés contre les effets d'une explosion et le moyen le plus couramment employé est la protection par évent d'explosion.

4.7.5.2 Cas d'un atomiseur

4.7.5.2.1 Description d'un atomiseur

La partie essentielle d'un atomiseur est la tour d'atomisation : de forme cylindrique ou tronconique, elle peut avoir un volume interne plus ou moins important, d'autant plus grand que le débit horaire du produit préparé est grand (typiquement de 50 à 1000 m³).

Le flux d'air chaud pénètre dans la tour à une température de 250 à 300°C. Il peut être à contre-courant ou à co-courant du flux de produit :

- dans le cas du flux à contre-courant, le produit pulvérulent sec se trouve, à la base de la tour, en présence d'air chaud,
- dans le cas du flux à co-courant, le produit pulvérulent sec se trouve en présence d'air humide et c'est au niveau de la buse d'injection que l'air est le plus chaud.

Les buses de pulvérisation, toujours placées en haut de la tour, peuvent être fixes ou rotatives. La température d'injection du liquide est généralement comprise entre l'ambiante et 40°C.

En dehors de la tour d'atomisation proprement dite, un atomiseur comporte des éléments associés nécessaires à son fonctionnement (schéma de la figure 12) :

- l'unité de chauffage de l'air,
- la sortie de l'air de séchage et les équipements de dépoussiérage,
- les équipements de recette et de stockage du produit séché.

Situés à la base de la tour, les équipements de recette du produit séché, comprennent généralement un lit fluidisé, fixe ou vibrant, destiné à parfaire le séchage du produit ; ces équipements peuvent être « découplés » de la tour elle-même par une écluse rotative, ou être en communication directe avec elle.

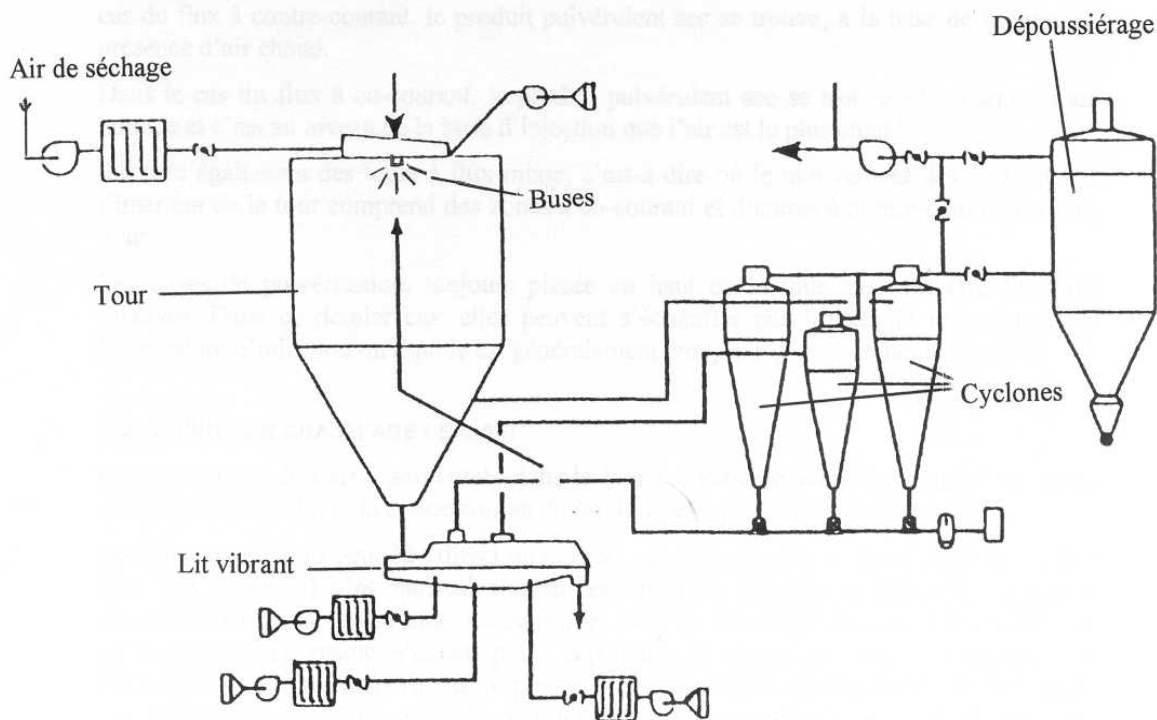


Figure 12 : Schéma d'une installation de tour d'atomisation à co-courant, équipée d'un lit vibrant [19]

Dans la suite, seule la sécurité de la tour d'atomisation est traitée en détail, celle des éléments associés (lit fluidisé, cyclone, dépoussiérage) ayant déjà été traitée par ailleurs.

4.7.5.2.2 Evaluation sommaire des risques

L'expérience acquise lors de l'analyse d'accidents survenus dans des atomiseurs permet de caractériser précisément les risques d'explosion et d'incendie inhérents à leur exploitation.

4.7.5.2.2.1 Possibilités de formation d'une ATEX

Dans une tour à co-courant, le risque de formation d'une ATEX existe principalement dans la partie inférieure de la tour, tandis que, dans une tour à contre-courant, on peut considérer qu'une ATEX est présente dans tout le volume de la tour.

4.7.5.2.2.2 Sources d'inflammation possibles des ATEX formées

En ce qui concerne les sources d'inflammation, le risque le plus important est sans doute l'auto-inflammation d'un dépôt, en particulier dans la partie supérieure d'une tour à co-courant, au niveau des buses, ou également dans l'espace d'isolement à double paroi de la tour, lorsque la paroi interne est percée. Ce risque est lié à la présence d'un dépôt inconnu ou d'épaisseur incontrôlée et à une température de l'air en entrée de tour trop élevée ou encore à un mauvais contrôle de cette température.

D'autres sources doivent également être envisagées : échauffement du palier de rotation de la buse, défaut du matériel d'éclairage présent dans la tour, particules incandescentes véhiculées par l'air de chauffage en cas de chauffage direct.

A priori, le risque d'inflammation par décharge électrostatique est faible (bien qu'il ait été mis en cause lors de certains accidents), car le milieu est humide.

4.7.5.2.2.3 *Caractérisation des risques d'incendie*

Il existe un risque d'incendie dans toutes les parties de l'installation où se trouvent, en présence d'air, des masses significatives du produit séché, c'est-à-dire :

- en bas de la tour, dans les équipements de recette du produit et en particulier dans le lit fluidisé et dans le silo de stockage,
- dans le ou les cyclones et dans le filtre, sur la sortie de l'air de séchage.

Enfin, il existe un risque d'auto-échauffement du produit recueilli en bas de la tour.

4.7.5.2.3 Moyens de prévention/détection/protection courants

4.7.5.2.3.1 *Prévention/détection d'un incendie*

Pour prévenir l'occurrence d'un incendie dans la tour, une mesure efficace consiste à placer une sonde de température dans la gaine de sortie d'air, afin de détecter l'échauffement qui précède un début d'incendie.

Pour tenir compte du fait qu'une sonde de température ne permet pas de détecter un échauffement très rapidement, il peut s'avérer utile d'installer un détecteur de CO pour assurer une détection précoce d'un début d'incendie.

Si le chauffage de l'air de séchage est direct, il faut également installer un détecteur d'étincelle afin de détecter les particules incandescentes qui pourraient être envoyées dans la tour.

Il convient d'insister sur la nécessité de maintenir la tour propre, exempte de tout dépôt afin d'éviter les sources d'inflammation liées à un autoéchauffement.

Enfin, pour éviter la propagation d'un éventuel incendie, il faut éliminer au maximum les manchons de liaison en matière inflammable.

4.7.5.2.3.2 *Prévention du risque d'explosion*

Pour prévenir ce risque dans la tour elle-même, il faut chercher à supprimer toutes les sources d'inflammation, en commençant par les plus probables :

- Pour prévenir le phénomène d'auto-échauffement, il faut en premier lieu éviter l'accumulation de dépôts d'épaisseur supérieure à 1 cm, non seulement au niveau de la buse mais aussi sur la paroi interne de la tour,
- Il faut également limiter la température de l'air de séchage en haut de la tour à la plus faible des valeurs suivantes : 2/3 de la TAI du nuage et valeur de la TAI d'un dépôt de 5 mm du pulvérulent considéré diminuée de 75°C.

Pour lutter contre les sources d'inflammation d'origine électrique, il faut éviter autant que possible la présence d'appareils électriques dans la tour, par exemple l'éclairage. Il faut aussi établir des liaisons équipotentielles entre des éléments isolés et mettre à la terre les éléments de la tour.

Pour lutter contre les sources d'inflammation d'origine électrostatique, il faut éviter le revêtement interne de la tour par un produit isolant (peinture) de même qu'il faut éviter que la paroi interne de la base de la tour se recouvre d'un dépôt du produit, si ce produit est lui-même un isolant.

4.7.5.2.3.3 *Autres moyens de prévention*

La maintenance des installations, la formation du personnel d'exploitation et l'élaboration et le respect de consignes de sécurité sont des mesures de prévention qui comptent parmi les plus importantes et qu'il est indispensable de rappeler.

En effet, l'exploitation d'un atomiseur nécessite l'emploi de dispositifs destinés à détecter des dérives de fonctionnement ou des phénomènes précurseurs d'incendie ou d'explosion (sonde de température, détecteurs d'étincelle...) et la maintenance de ces détecteurs est indispensable. Parmi ces dispositifs, ceux qui sont à considérer comme « éléments importants pour la sécurité » (EIPS) doivent faire l'objet d'une liste précise et exhaustive.

De plus, la formation du personnel d'exploitation permettra de le rendre attentif à toute dérive ou phénomène anormaux.

Enfin l'application de consignes de sécurité telles que le respect de la procédure de permis de feu doit permettre de prévenir efficacement la présence de certaines sources d'inflammation.

4.7.5.2.3.4 *Moyens de protection contre l'incendie*

Compte tenu de la difficulté de supprimer à coup sûr toutes les sources d'inflammation qui peuvent apparaître dans un atomiseur, il faut mettre en place des moyens de protection contre l'incendie.

4.7.5.2.3.4.1 Protection de la tour

Dans le cas d'un chauffage d'air direct, en plus d'un détecteur d'étincelle, il faut asservir l'arrêt l'injection du liquide à sécher et le déclenchement d'une injection d'eau d'un débit suffisant à la détection d'étincelle, d'élévation de température ou de CO.

4.7.5.2.3.4.2 Protection du lit vibrant

Dans les lits vibrants, le risque principal est le risque d'incendie. Il faut disposer une sonde de température en sortie de lit et un système d'arrosage asservi à la détection d'une température trop élevée.

Notons encore que la sortie d'air du lit fluidisé va généralement vers le même cyclone que la sortie d'air chaud et qu'un incendie pourrait également se propager à partir de là.

4.7.5.2.3.5 Moyens de protection contre l'explosion

Il faut également protéger la tour, le lit et le filtre contre l'explosion, soit par événement, soit par suppresseur.

4.7.5.2.3.5.1 Protection par événement.

Pour définir la surface d'événement à installer, il faut tenir compte des paramètres suivants :

- le volume de la tour,
- la valeur de Kst du produit atomisé,
- la pression maximale admissible dans la tour Pred,
- le type de tour (à co-courant ou à contre-courant),
- la présence d'un lit fluidisé à sa base,
- le volume de l'ATEX, à fixer en fonction de l'équipement de recette,
- l'emplacement de la tour dans l'atelier d'exploitation (distance entre la tour et les murs de l'atelier).

Notons qu'actuellement, la tendance est de construire des tours ayant une valeur de Pred relativement élevée (supérieure à 0,6 bar).

Au contraire, les tours anciennes sont souvent peu résistantes ($Pred \leq 0,2$ bar) et ne peuvent donc être protégées que par des événements de grande surface, s'ouvrant à des pressions inférieures ou égales à 100 mbar. Elles sont donc difficiles, voire impossibles à protéger par événement.

De plus, il n'est pas possible de protéger par événement une tour qui est située trop loin des murs de l'atelier, avec des canalisations en prolongement des événements. Une solution peut consister à déplacer un mur de l'atelier pour que l'événement débouche à l'extérieur, sans canalisation de prolongement.

4.7.5.2.3.5.2 Protection par suppresseur d'explosion

La protection d'une tour par suppresseur d'explosion n'est guère possible que pour une tour de petites dimensions (volume inférieur à 200 m³).

4.7.5.2.3.5.3 Moyens de découplage

En plus de moyens de protection de la tour contre l'explosion, il faut également installer des moyens de découplage, afin d'éviter qu'une explosion se propage aux autres parties de l'installation :

- par une vanne rotative ou une vanne guillotine à fermeture rapide, ou un supprimeur, entre le bas de la tour et le lit fluidisé,
- par un supprimeur ou une vanne à fermeture rapide, entre la tour et le 1^{er} cyclone sur la sortie d'air.

Par ailleurs, les manchons souples de liaison entre les équipements doivent être en matière difficilement inflammable ou protégés contre l'incendie.

4.8 PROCÉDES DE COMBUSTION/INCINÉRATION

4.8.1 Description sommaire

Les procédés industriels qui réalisent la combustion de pulvérulents combustibles peuvent être séparés en deux types principaux :

- ceux dont l'objectif principal est de réaliser la combustion d'un pulvérulent défini et relativement homogène, pour récupérer l'énergie de combustion, dans des conditions énergétiques optimales (ex : combustion de charbon pulvérisé en centrale thermique),
- ceux dont l'objectif principal est l'élimination de déchets combustibles de toute nature (éventuellement à faible potentiel énergétique) et dont l'objectif secondaire est de récupérer l'énergie de combustion (ex : incinération d'ordures ménagères).

Un caractère commun à ces procédés réside dans le fait que, en régime établi, la température qui règne dans la chambre de combustion est suffisamment élevée pour qu'en présence d'air, le combustible subisse une oxydation très rapide et qu'il ne puisse donc pas s'accumuler d'ATEX.

Cependant, chaque type de procédé peut présenter des risques d'explosion spécifiques :

- les procédés des premier et second types présentent des risques de formation d'ATEX, qui sont moins liés au procédé de combustion lui-même qu'aux procédés associés tels que le stockage du produit (risque d'auto-échauffement) ou sa manutention entre les installations de stockage et les installations de combustion : pour ces risques spécifiques, nous renvoyons le lecteur aux chapitres correspondants du présent document.
- les procédés du second type sont généralement mis en œuvre pour traiter des déchets caractérisés à la fois par une grande hétérogénéité et par un faible pouvoir calorifique ; en partie pour cette raison, les procédés de combustion sont moins bien optimisés que ceux du premier type et ce sont donc lors de leur exploitation que des risques d'accumulation d'ATEX peuvent apparaître, tout au moins au cours de certaines phases de l'exploitation. Ainsi, la non maîtrise des conditions de combustion peut conduire à une combustion incomplète avec formation de CO ou de gaz inflammables issus de la pyrolyse du déchet.

4.8.2 Evaluation sommaire des risques liés à l'exploitation de procédés de combustion de déchets

Les risques à prendre en compte sont essentiellement ceux qui résultent d'une combustion dans des conditions de sous-oxygénation : les déchets traités subissent alors une pyrolyse, avec production de gaz inflammables tels que CO.

Tant que la température de la chambre de combustion reste suffisante, le retour à des conditions normales de combustion par un apport d'air suffisant entraînera une combustion immédiate des gaz inflammables produits, sans qu'une ATEX puisse se former.

Au contraire, si la pyrolyse des déchets précède un arrêt du procédé avec refroidissement de la chambre de combustion, une contraction de l'atmosphère contenue dans l'installation d'incinération permettra à l'air d'y pénétrer et de former une ATEX par mélange avec les gaz inflammables produits.

4.8.3 Eléments d'accidentologie

Il existe plusieurs cas d'explosions accidentelles survenues dans des procédés du deuxième type, selon le mécanisme suivant :

- fonctionnement de l'installation dans les conditions d'une combustion sous-oxygénée,
- formation de gaz inflammables produits par la pyrolyse des déchets,
- formation d'une ATEX par mélange de ces gaz inflammables avec de l'air introduit dans l'installation et accumulation de cette ATEX dans des zones mortes de l'installation,
- inflammation de cette ATEX lors du redémarrage de l'installation et explosion en milieu confiné.

L'exemple qui suit illustre ce genre de scénario, même si l'origine du CO formé n'est pas précisée dans ce cas.

N° 12273

01/04/1997

FRANCE - 21 - DIJON

90.0 - Assainissement, voirie et gestion des déchets

Lors du redémarrage de l'incinérateur de boues d'une station d'épuration, une explosion se produit dans l'électrofiltre humide installé récemment. Le four est remis en service 3 semaines plus tard en by-pass du filtre. Une accumulation de CO serait à l'origine de l'accident. L'exploitant prévoit : la mise en place d'un ventilateur de triage, d'un analyseur de CO supplémentaire couplé à une alarme et d'une injection d'air frais au sommet du four.

4.8.4 Moyens de prévention/détection/protection courants

Les principaux moyens de prévention d'une explosion consistent à :

- en fonctionnement stabilisé de l'installation, vérifier l'absence de CO dans les fumées de combustion au moyen d'un détecteur, afin d'apprécier la qualité de la combustion (la présence de CO est toujours le signe d'une combustion sous-oxygénée),
- en phase transitoire, le même détecteur de CO peut être utilisé pour mettre en évidence la production de gaz inflammables et donc la formation possible d'une ATEX,
- avant tout redémarrage, balayer à l'air les différentes parties de l'installation et en particulier les zones mortes, afin d'éliminer les ATEX qui pourraient s'être formées au cours de la phase d'arrêt.
- maintenir en permanence la chambre de combustion sous légère dépression.

4.9 PROCÉDES DE REVÊTEMENT DE SURFACE

Il existe différents procédés de revêtement de surface dans lesquels le produit de revêtement est projeté à l'état pulvérulent sur la surface à revêtir, puis le film de produit obtenu est soumis éventuellement à une opération de cuisson au cours de laquelle le film est rendu continu par simple fusion ou par polymérisation.

4.9.1 Description sommaire

Les principales caractéristiques de ces procédés sont les suivantes :

- Chaque procédé est généralement désigné par rapport à la nature du produit de revêtement :
 - procédé de peinture lorsque le produit est un pulvérulent organique fusible ou polymérisable (poudre epoxy...)
 - procédé de flocage lorsque le produit est un pulvérulent organique fibreux,
 - procédé de shoopage lorsque le produit est un pulvérulent métallique (aluminium),
- le produit est mis en suspension dans un jet d'air comprimé puis projeté sur la surface à revêtir, à partir d'une buse de pulvérisation,
- une partie du produit pulvérisé n'est pas déposée sur la surface à revêtir, et doit donc être récupérée ; pour des raisons d'hygiène si l'application est manuelle et au moins pour des raisons de sécurité, la récupération du produit est effectuée par aspiration à la source, dans des conditions qui permettent de limiter le plus possible la quantité de produit mis en suspension dans l'air,
- le rendement du procédé est obtenu à partir du rapport de la quantité de produit déposée à la quantité totale du produit pulvérisé ; pour améliorer ce rendement, certains procédés utilisent le principe d'une pulvérisation électrostatique, dans laquelle les grains de pulvérulent reçoivent une charge électrique de signe opposée à celle de la surface à revêtir, de sorte qu'ils sont soumis à une force électrostatique qui les attire vers la surface à revêtir,

4.9.2 Evaluation sommaire des risques

Une ATEX se forme entre la buse de pulvérisation et la surface à revêtir. Une source d'inflammation d'énergie suffisante peut alors enflammer cette ATEX. Parmi les sources d'inflammation potentielles, nous pouvons citer [20] :

- Une étincelle entre les électrodes du pistolet et les éléments de l'équipement mis à la terre (par exemple les parois de la cabine) ;
- Une étincelle entre les électrodes et le subjectile (la surface à revêtir) ;
- Une étincelle de décharge provoquée par des décharges électrostatiques induites par friction ou par influence (pièces isolées du convoyeur par encrassement des crochets pistolets ou réservoirs de poudre mal raccordés à la masse, etc.) ;
- La proximité de surfaces chaudes (parois du four, subjectile préchauffé) ;
- La proximité de sources d'ignition (brûleurs du four, radiants).

Par ailleurs, les équipements annexes tels que les filtres sont sensibles aux incendies ou explosions. Les risques concernant ces équipements ont été largement décrits dans les chapitres précédents.

4.9.3 Eléments d'accidentologie

Une soixantaine d'accidents de cabines de peinture est recensée par le BARPI au cours des dix dernières années. Ce recensement inclut de nombreuses installations de peinture solvantée et il n'est pas toujours possible de savoir de quel type de procédé il s'agit. Parmi ces accidents un certain nombre est attribuable à des procédés d'application de peinture en poudre.

L'exemple qui suit montre que les risques ne se limitent pas aux périodes de fonctionnement du procédé.

N° 26000

27/11/2003

FRANCE - 51 - EPERNAY

34.2 - Fabrication de carrosseries et remorques

Un feu se déclare à 12 h dans une usine de fabrication de remorques, alors que 2 peintres venaient de quitter une cabine de peinture pour nettoyer leur matériel. Lors de la vidange des circuits de distribution de peinture, des vapeurs du diluant utilisé pour le nettoyage des installations ont été enflammées par une décharge électrique au niveau de la buse électrostatique de l'équipement de pulvérisation. L'incendie s'est ensuite propagé au solvant liquide, puis à une armoire métallique et aux câblages électriques de la cabine. Une utilisation inadaptée des extincteurs à poudre ne permet pas de maîtriser l'incendie qui gagne la cabine par la porte passe-piétons et se propage jusqu'aux filtres. Le sinistre génère une épaisse fumée noire. Le chef d'atelier alerte tardivement les pompiers (30 à 45 min plus tard) ; ces derniers maîtrisent le sinistre avec une lance à mousse. Durant l'intervention, la circulation dans la rue est interrompue. Les peintres atteints de légères brûlures sont hospitalisés. L'accident est dû à la non neutralisation des énergies au niveau du pistolet d'application de peinture en cours de nettoyage. La façade de la cabine, son éclairage intérieur, le câblage électrique sont endommagés ainsi que 2 moteurs et les 2 équipements de pulvérisation. L'installation est remise en service 6 jours après le sinistre. Les déchets sont éliminés dans un établissement de traitement agréé. A la suite de l'accident l'exploitant a prévu : une formation des opérateurs de l'atelier à la manipulation des extincteurs, l'installation d'un nouveau système de distribution de peinture informatisé et doté de sécurités permettant notamment la neutralisation des énergies lors des phases de nettoyage du matériel, la mise en place de couverture anti-feu à proximité de chaque cabine à peinture.

4.9.4 Moyens de prévention/détection/protection courants

Parmi les moyens de prévention envisageables, on peut citer :

- L'utilisation de pistolets électrostatiques adaptés à l'EMI de la poudre de peinture pulvérisée
- La protection des filtres
- La ventilation des cabines de peinture
- La détection de flammes qui déclenche l'injection automatique d'un agent extincteur dans le pistolet.

5. CONCLUSION

De nombreux procédés mettent en œuvre ou produisent des solides pulvérulents combustibles. Nous avons montré tout au long de ce document que ces procédés présentent des risques d'explosion et d'incendie, dont nous avons détaillé les mécanismes. Ces risques sont conditionnés à la fois par les caractéristiques des produits mis en jeu et par la configuration et les caractéristiques du procédé utilisé.

Les exemples d'accidents cités permettent de situer les enjeux de ce type de risques qui concernent une très grande variété d'industries. C'est donc logiquement que les législations, concernant tant la santé et la sécurité des travailleurs que l'environnement, les abordent et définissent les obligations des entreprises concernées. Celles-ci impliquent d'évaluer les risques et de mettre en place des moyens de prévention et de protection adaptés.

Dans une troisième partie, sont donc décrits les principaux procédés industriels où sont mis en œuvre des pulvérulents combustibles et qui présentent donc des risques d'explosion et d'incendie ; pour chaque procédé sont présentés :

- ses fonctions, composants essentiels et principaux paramètres de fonctionnement,
- les situations qui peuvent conduire à l'occurrence d'une explosion, d'un auto-échauffement ou d'un incendie,
- des éléments d'accidentologie,
- les moyens couramment mis en œuvre pour assurer la prévention des phénomènes redoutés ou la protection contre les effets des phénomènes redoutés.

L'incendie implique la coexistence d'un combustible, d'un comburant et d'une source d'inflammation. Dans le cas de l'explosion, il faut en plus que le combustible et le comburant forment un mélange explosif et, pour que des effets de surpression aient lieu, il faut que ce mélange soit au moins partiellement confiné. La prévention repose donc sur la maîtrise ou la suppression de ces différentes conditions : maîtrise des sources d'inflammation, inertage, maîtrise de la mise en suspension des particules. En ce qui concerne la protection, celle-ci repose sur la capacité des installations à évacuer les surpressions par des événements, à ne pas propager l'incendie ou l'explosion en mettant en œuvre des moyens de découplage, à arrêter le phénomène dangereux : extinction de l'incendie ou suppression de l'explosion.

BIBLIOGRAPHIE

Références citées dans le texte :

- [1] G. Ronchail, R.Lödel, Inflammabilité et explosivité des poussières d'origine agricole ou alimentaire - Mécanismes et caractérisation, in Technologie des pulvérulents dans les IAA, coordonné par J.P.Melcion, J.L.Ilari, éditions Tec & Doc, p.159
- [2] BARPI, Accidents concernant des tours d'atomisation, ref. n°ED4021 (07/2000)
- [3] Caisse Centrale des Mutuelles Agricoles « Etude pratique sur la sécurité incendie et explosion des tours d'atomisation de lait »
- [4] Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit (BIA), Rapport 11/97 (1997)
- [5] Directive 94/9/CE du Parlement européen et du Conseil, du 23 mars 1994, concernant le rapprochement des législations des États membres pour les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles, Journal officiel n° L 100 du 19/04/1994 p. 0001 - 0029
- [6] Directive 1999/92/CE du Parlement européen et du Conseil, du 16 décembre 1999, concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives (quinzième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE), Journal officiel n° L 023 du 28/01/2000 p. 0057 - 0064.
- [7] Normes NF EN 50 281, Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles
- [8] Normes NF EN 61241, Matériels électriques pour utilisation en présence de poussières combustibles
- [9] NF EN 13821, Atmosphères explosibles - Prévention et protection contre l'explosion - Détermination de l'énergie minimale d'inflammation des mélanges poussière/air - février 2003.
- [11] PR NF EN 14034-2, Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussières - Partie 2 : détermination de la vitesse maximale de montée en pression de l'explosion (dp/dt)_{max} des nuages de poussières, (juin 2004)
- [12] NF EN 14034-1, Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussières - Partie 1 : détermination de la pression maximale d'explosion P_{max} des nuages de poussière, (février 2005) [8] C. Zockoll, VDI Bericht n° 1272, p. 411-27, (1996)
- [13] PR NF EN 14034-3, Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussières - Partie 3 : détermination de la limite inférieure d'explosivité LIE des nuages de poussières, (juin 2004)
- [14] PR NF EN 14034-4, Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussières - Partie 4 : détermination de la concentration limite en oxygène, (janvier 2001)

[15] Directive 89/391/CEE du Conseil, du 12 juin 1989, concernant la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail, Journal officiel n° L 183 du 29/06/1989 p. 0001 – 0008

[16] 98/24/CE, qui concerne "la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs contre les risques liés à des agents chimiques sur le lieu de travail"

[17] Base de données ARIA du BARPI : <http://aria.environnement.gouv.fr>

[18] F.Masson, Explosion d'un silo de céréales à Blaye, rapport de synthèse, INERIS, 1998, disponible sur www.ineris.fr

[19] C.Zockoll, VDI Bericht n°1272, p411-27, 1996

[20] Cabines d'application par projection de peinture en poudre, guide pratique de ventilation, n°9.2, édition INRS, 2004, ref : ED 928, disponible sur le site Internet de l'INRS : www.inrs.fr

Autres documents utiles :

Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006), Connaissance des phénomènes d'auto-échauffement des solides combustibles, S.Evanno, INERIS 2002.

Electricité statique, édition INRS, 2004, ref : ED 874, , disponible sur le site Internet de l'INRS

VDI-Richtlinie: VDI 2263, Blatt 5, Staubbrände und Staubexplosionen - Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen - Explosionsschutz bei Wirbelschichtanlagen, 2002

Étude et Recherche DRA 14, Évaluation des performances des barrières techniques de prévention et de protection pour réduire les risques majeurs, Organes de décharge de l'explosion, INERIS, 2001

Guide de l'état de l'art sur les silos, INERIS, http://aida.ineris.fr/guide_silo/index.htm

