



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE,  
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

**Guide de l'état de l'art sur les silos**  
pour l'application de l'arrêté ministériel relatif aux risques  
présentés par les silos et les installations de stockage de  
céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout  
autre produit organique dégageant des poussières  
inflammables

Version 3

2008

# TABLE DES MATIERES

<b><u>1.</u></b>	<b><u>OBJET ET CONTEXTE</u></b>	<b><u>3</u></b>
<b><u>2.</u></b>	<b><u>APPUI A L'APPLICATION DE L'ARRETE</u></b>	<b><u>4</u></b>
2.1.	ARTICLE 2 : ETUDE DE DANGERS	4
<b><u>2.1.1.</u></b>	<b><u>Analyse des risques</u></b>	<b><u>5</u></b>
<b><u>2.1.2.</u></b>	<b><u>Présentation des phénomènes dangereux</u></b>	<b><u>16</u></b>
<b><u>2.1.3.</u></b>	<b><u>Estimation des effets</u></b>	<b><u>20</u></b>
2.2.	ARTICLES 3 ET 4 : L'ORGANISATION ET LA FORMATION DE L'ENTREPRISE POUR PREVENIR LES RISQUES D'ACCIDENTS	36
2.3.	ARTICLE 5 : PRECURSEURS D'ACCIDENTS	38
2.4.	ARTICLE 6 : PERIMETRE FORFAITAIRE D'ELOIGNEMENT	39
2.5.	ARTICLE 7 : ELOIGNEMENT DES LOCAUX ADMINISTRATIFS	41
2.6.	ARTICLE 8 : ACCES AUX INSTALLATIONS	42
2.7.	ARTICLE 9 : PREVENTION DES RISQUES D'EXPLOSION	43
2.8.	ARTICLE 10 : PROTECTION CONTRE LES RISQUES D'EXPLOSIONS	46
<b><u>2.8.1.</u></b>	<b><u>Principes généraux pour protéger un silo contre les effets d'une explosion</u></b>	<b><u>46</u></b>
<b><u>2.8.2.</u></b>	<b><u>Application aux différents éléments d'un silo</u></b>	<b><u>47</u></b>
2.9.	ARTICLE 11 : MOYENS DE LUTTE CONTRE UN SINISTRE	56
2.10.	ARTICLE 12 : AIRES DE CHARGEMENT / DECHARGEMENT	60
2.11.	ARTICLE 13 : LIMITATION DE L'EMPOUSSIEREMENT DES INSTALLATIONS	61
2.12.	ARTICLE. 14 : PREVENTION DES RISQUES D'AUTO-ECHAUFFEMENT	62
2.13.	ARTICLE 15 : PREVENTION DES RISQUES LIES AUX APPAREILS DE MANUTENTION	66
<b><u>3.</u></b>	<b><u>CONCLUSION</u></b>	<b><u>71</u></b>

# 1. OBJET ET CONTEXTE

---

Le présent guide décline d'une part des moyens permettant d'atteindre les objectifs fixés par l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié<sup>1</sup> relatif aux risques présentés par les silos et les installations de stockage de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables, et d'autre part énonce des éléments méthodologiques pour l'élaboration et la lecture critique des études de dangers.

Ainsi, on trouve dans ce document l'état de l'art sur les mesures de prévention et de protection existantes ou **préconisées** à mettre en place sur des installations mettant en œuvre des produits agro-alimentaires.

Ce document a été rédigé par le groupe de travail national sur les silos du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, suite à des discussions entre les pouvoirs publics (Ministère chargé de l'Environnement, Ministère chargé de l'Agriculture, Ministère de l'Intérieur, de l'Outre-Mer et des Collectivités Territoriales, Ministère chargé du Travail, DRIRE), des représentants d'organismes professionnels (COOP de France-Métiers du Grain, FNA, SNFS, USIPA, ANIA, ANMF) et d'experts (INERIS, TECHNIP, CEDERIT GIAT Industries, SME Environnement, ENSIC Nancy).

Le champ du présent document s'applique aux activités de stockage de produits agro-alimentaires et ne concerne pas les activités ou les équipements annexes tels que les séchoirs ou les stockages de phytosanitaires ou d'engrais, voire la transformation de la farine.

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 d'informations en vigueur en date de l'édition du document. Il convient de noter que ce document peut constituer un appui technique à la réalisation d'une étude de dangers mais nullement se substituer à celle-ci. En effet, toute étude de dangers doit prendre en compte les spécificités propres à l'installation considérée et demeure de la responsabilité de l'exploitant. Le présent guide vient seulement apporter un éclairage technique et méthodologique.

A ce guide sont associées 5 annexes :

- l'ANNEXE A relative aux paramètres d'explosibilité des poussières agro-alimentaires ;
- l'ANNEXE B qui traite des procédures d'intervention dans les silos ;
- l'ANNEXE C concernant les dispositifs de dépoussiérage et les risques associés ;
- l'ANNEXE D qui donne des indications sur l'application de la réglementation ATEX pour les silos ;
- l'ANNEXE E qui complète les principes d'élaboration des études de dangers relatives aux silos.

---

<sup>1</sup> L'arrêté ministériel du 29 mars 2004 a été modifié par l'arrêté du 23 février 2007 publié au JO du 13 mars 2007.

## 2. APPUI A L'APPLICATION DE L'ARRETE

---

### 2.1. ARTICLE 2 : ETUDE DE DANGERS

#### Enoncé de l'article

L'exploitant doit disposer d'une étude de dangers au sens des articles L. 512-1 du code de l'environnement et 3 du décret du 21 septembre 1977 susvisé. Cette étude doit préciser les risques auxquels l'installation peut exposer, directement ou indirectement, les intérêts visés à l'article L. 511-1 du code de l'environnement en cas d'accident, que la cause soit interne ou externe à l'installation.

Cette étude donne lieu à une analyse de risques qui prend en compte la probabilité d'occurrence, la cinétique, l'intensité des effets et la gravité des accidents potentiels selon une méthodologie qu'elle explicite.

Elle définit et justifie les mesures propres à réduire la probabilité et les effets de ces accidents. En particulier, toutes les mesures prises pour l'application des dispositions prévues par les articles 6 à 15 inclus du présent arrêté doivent être justifiées dans l'étude de dangers.

#### **Commentaires**

Le titre Ier du Livre V du Code de l'Environnement, relatif aux installations classées pour la protection de l'environnement, organise l'encadrement par l'Etat français des installations pouvant engendrer des dangers et des nuisances pour l'environnement.

Un « *guide d'élaboration et de lecture des études de dangers pour les établissements soumis à autorisation avec servitudes* » a été publié le 28 décembre 2006, suite à des réflexions menées au sein du groupe de travail " méthodologie des études de dangers ", qui regroupe des représentants des fédérations professionnelles, d'organismes experts, des DRIRE et de la Direction de la Prévention de la Pollution et des Risques du Ministère chargé de l'Environnement.

Ce guide de lecture des études de dangers s'inscrit dans une politique générale d'harmonisation des pratiques d'analyse et de prévention des risques accidentels des installations classées menée par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire.

Sans rappeler ici ni le détail des obligations réglementaires, ni les méthodes ou guides d'élaboration disponibles, toute étude de dangers doit, de façon générale, s'appuyer sur une description suffisante des installations, de leur voisinage et de leur zone d'implantation. Ainsi, les grands principes édictés par le guide du 28 décembre 2006 demeurent applicables (en adaptant) à des installations telles que des silos, qui sont néanmoins rarement classés AS.

Le choix par l'exploitant de la méthode d'analyse des risques est libre et doit être justifié. L'étude de dangers doit présenter les mesures organisationnelles et techniques de maîtrise des risques et expliciter, s'ils sont pertinents, un certain nombre de points clés fondés sur une démarche d'analyse des risques :

- Description et caractérisation de l'environnement (et plans associés);
- Description des installations et de leur fonctionnement ;
- Présentation de l'organisation de la sécurité ;
- Identification et caractérisation des potentiels de dangers ;
- Réduction des potentiels de dangers ;
- Enseignements tirés du retour d'expérience (des accidents et incidents représentatifs) ;

- Evaluation des risques (pouvant contenir, le cas échéant, l'analyse préliminaire et l'étude détaillée de réduction des risques) ;
- Caractérisation et classement des différents phénomènes et des accidents potentiels en termes d'intensité des effets des phénomènes, de gravité des conséquences des accidents, de probabilité et de cinétique de développement en tenant compte des performances des mesures de prévention et de protection ;
- Evolutions et mesures d'amélioration proposées par l'exploitant ;
- Représentation cartographique ;
- Résumé non technique de l'étude de dangers.

Sont développées dans le présent guide :

- L'analyse de risques,
- L'identification et la caractérisation des phénomènes dangereux,
- L'évaluation des effets des phénomènes dangereux et des conséquences des accidents associés/correspondants.

Les points clés que sont l'identification et la caractérisation des potentiels de dangers d'un silo, l'évaluation des risques, le classement des phénomènes dangereux et la définition des mesures de sécurité ont été approfondis en **annexe E** du présent document.

### 2.1.1. Analyse des risques

Afin de mener correctement l'analyse des risques, il est nécessaire d'utiliser des outils formalisés tels que l'APR, l'AMDEC ou l'HAZOP qui s'attachent à identifier l'ensemble des risques inhérents à l'exploitation des installations aussi bien lors de la marche normale que durant les périodes transitoires de démarrage et d'arrêt et pendant les opérations d'entretien et de maintenance. Un travail en groupe, en présence du personnel de la société permet de capitaliser le retour d'expérience de chacun des participants.

La réduction du risque est liée aux mesures de maîtrise des risques mises en place, qui permettent d'abaisser le niveau de gravité pour les mesures de protection et d'abaisser la fréquence d'occurrence pour les mesures de prévention.

Il est important de rappeler que la nouvelle rédaction de l'article 2 de l'arrêté du 29 mars 2004 modifié prend en compte l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation. Cet arrêté ministériel permet la mise en œuvre de l'article 2 de la loi « risques » du 30 juillet 2003, article relatif aux études de dangers.

En particulier, cet arrêté, dit « échelle PIGC » définit une échelle d'évaluation des risques selon les critères de probabilité, gravité et cinétique, harmonisée au niveau national. L'échelle de l'intensité des effets d'un phénomène dangereux, définie à l'article 9 de cet arrêté, est applicable aux études de dangers exigibles après publication de l'arrêté, le 7 octobre 2005 (auparavant, cette échelle était définie dans l'arrêté ministériel dit « arrêté seuils » du 22 octobre 2004, aujourd'hui abrogé). Les seuils d'intensité définis dans l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 doivent donc figurer dans les études de dangers des silos autorisés remises après la date du 7 octobre 2005.

Toutes les autres dispositions de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 sont également applicables aux études de dangers des silos autorisés remises à compter du 7 octobre 2006.

### 2.1.1.1. Evaluation de la gravité :

La gravité potentielle d'un accident, relativement aux intérêts visés à l'article L. 511-1 du Code de l'Environnement, est évaluée conformément à l'annexe 3 de l'arrêté du 29 septembre 2005 (annexe relative à l'échelle d'appréciation de la gravité des conséquences humaines d'un accident à l'extérieur des installations), à partir du nombre de personnes exposées, à l'extérieur de l'établissement, aux différents niveaux d'intensité des effets des phénomènes associés.

Extrait de l'annexe 3 de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 :

Niveau de gravité des conséquences	Zone délimitée par le seuil des effets létaux significatifs	Zone délimitée par le seuil des effets létaux	Zone délimitée par le seuil des effets irréversibles sur la vie humaine
Déastreux	plus de 10 personnes exposées <sup>2</sup>	plus de 100 personnes exposées	plus de 1000 personnes exposées
Catastrophique	moins de 10 personnes exposées	entre 10 et 100 personnes exposées	entre 100 et 1000 personnes exposées
Important	au plus 1 personne exposée	entre 1 et 10 personnes exposées	entre 10 et 100 personnes exposées
Sérieux	aucune personne exposée	au plus 1 personne exposée	moins de 10 personnes exposées
Modéré	pas de zone de létalité hors de l'établissement		présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à « une personne ».

**Rappel :** Dans le cas où les trois critères de l'échelle (effets létaux significatifs, premiers effets létaux, et effets irréversibles pour la santé humaine) ne conduisent pas à la même classe de gravité, c'est la classe la plus grave qui est retenue.

Afin de déterminer la gravité potentielle d'un accident dans les études de dangers des installations soumises à autorisation, le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire a publié le 28 décembre 2006 une fiche intitulée « Eléments pour la détermination de la gravité des accidents » présentant **une méthode possible et indicative** pour compter le nombre de personnes potentiellement exposées en cas d'accident, selon des règles forfaitaires raisonnablement représentatives. **Les cas évoqués sont notamment : Etablissements Recevant du Public, Zones d'Activités, Logements, Voies de circulation, Terrains non bâtis et Cas spéciaux (occupations extrêmement temporaires). Une partie est aussi consacrée à la prise en compte spécifique des salariés des entreprises voisines ou des sous-traitants.** D'autres approches sont possibles à condition d'être raisonnablement conservatoires et d'être correctement expliquées et justifiées dans l'étude de dangers de l'établissement.

**On rappelle aussi que la réglementation exige de considérer l'accident le plus pénalisant en terme de gravité, puisqu'il est impossible de connaître les conditions de l'environnement (moment de la semaine, mois de l'année, etc.) le jour où un accident se produira. Ce dernier doit donc apparaître dans l'étude de dangers quelle que soit la méthodologie utilisée.**

### 2.1.1.2. Evaluation de la probabilité :

<sup>2</sup>Personne exposée : en tenant compte le cas échéant des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'occurrence d'un phénomène dangereux si la cinétique de ce dernier et de la propagation de ses effets le permettent.

La loi « risques » du 30 juillet 2003 permet aux exploitants de disposer du libre choix de la méthode d'évaluation de la probabilité des phénomènes dangereux et des accidents associés. Néanmoins, cette méthode doit être adaptée aux installations, à l'analyse des risques, et être confrontée à l'accidentologie du secteur considéré. Il est possible de quantifier la fréquence d'occurrence des phénomènes dangereux, ou bien d'utiliser une méthode qualitative.

Toutefois, l'évaluation de la probabilité doit être justifiée, et en particulier, nécessite de connaître les caractéristiques des mesures de maîtrise des risques en termes d'efficacité, de cinétique, de testabilité et de maintenance afin de les prendre en compte dans l'évaluation de cette probabilité (article 4 de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005).

L'annexe 1 de l'arrêté ministériel du 29/09/05 fixe 5 classes de probabilité :

Classe de probabilité Type d'appréciation	E	D	C	B	A
qualitative <sup>3</sup> (les définitions entre guillemets ne sont valables que si le nombre d'installations et le retour d'expérience sont suffisants) <sup>4</sup>	« événement possible mais extrêmement probable » : <i>n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années installations..</i>	« événement très improbable » : <i>s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.</i>	« événement improbable » : <i>un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité.</i>	« événement probable » : <i>s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation.</i>	« événement courant » : <i>s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installations, malgré d'éventuelles mesures correctives.</i>
semi-quantitative	Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place, conformément à l'article 4 du présent arrêté				
Quantitative (par unité et par an)	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	

Compte tenu du parc important de silos autorisés, voire déclarés, en France (uniquement pour la rubrique 2160 de la nomenclature des installations classées, on recense actuellement environ un millier établissements autorisés<sup>5</sup>), on a la possibilité d'utiliser, si on ne dispose pas de toutes les informations concernant les mesures de maîtrise des risques, des méthodes qualitatives afin d'évaluer la probabilité.

<sup>3</sup> Ces définitions sont conventionnelles et servent d'ordre de grandeur de la probabilité moyenne d'occurrence observable sur un grand nombre d'installations\*années. Elles sont inappropriées pour qualifier des événements très rares dans des installations peu nombreuses ou faisant l'objet de modifications techniques ou organisationnelles. En outre, elles ne préjugent pas l'attribution d'une classe de probabilité pour un événement dans une installation particulière, qui découle de l'analyse de risque et peut être différent de l'ordre de grandeur moyen, pour tenir compte du contexte particulier ou de l'historique des installations ou de leur mode de gestion.

<sup>4</sup> Un retour d'expérience mesuré en *nombre d'années \* installations* est dit suffisant s'il est statistiquement représentatif de la fréquence du phénomène (et pas seulement des événements ayant réellement conduit à des dommages) étudié dans le contexte de l'installation considérée, à condition que cette dernière soit semblable aux installations composant l'échantillon sur lequel ont été observés les données de retour d'expérience. Si le retour d'expérience est limité, les détails figurant en italique ne sont en général pas représentatifs de la probabilité réelle. L'évaluation de la probabilité doit être effectuée par d'autres moyens (études, expertises, essais) que le seul examen du retour d'expérience.

<sup>5</sup> Informations obtenues grâce à la base de données Gidic.

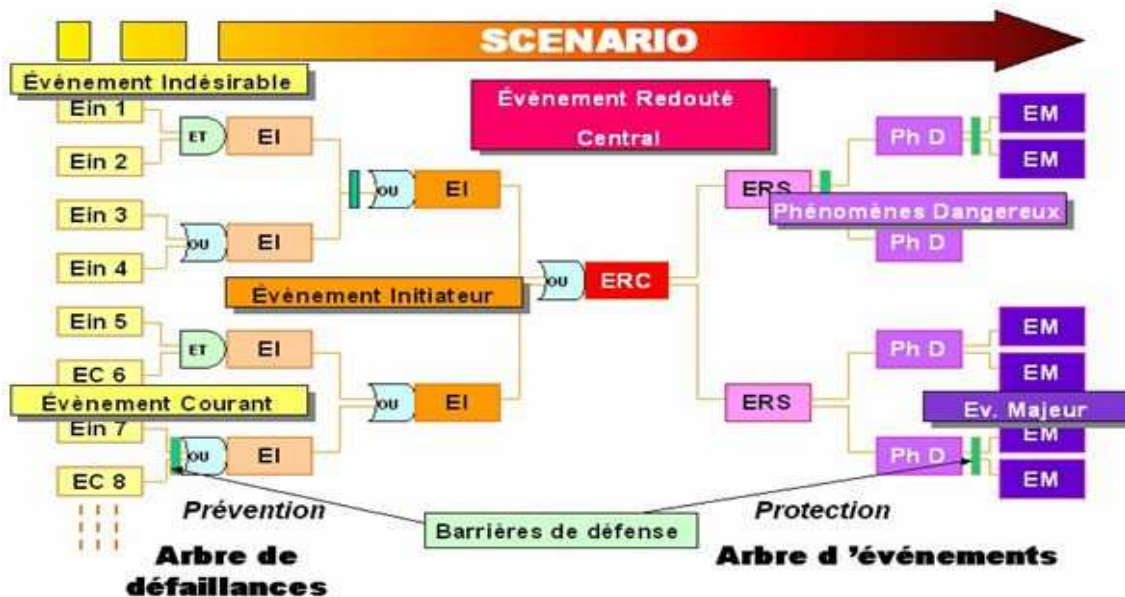
En effet, le retour d'expérience basé sur l'accidentologie recueillie par le BARPI et correctement collecté peut être représentatif, compte-tenu du nombre d'établissements, sous réserve de mise à jour pour les accidents les plus récents. Cependant, même si la collecte des données s'améliore constamment, cette approche ne semble pas complètement pertinente notamment pour les événements les moins graves pour lesquels les investigations ne sont pas développées suffisamment et plus généralement pour tous ceux pour lesquels l'inspection ou les services de secours ne sont pas prévenus. Ainsi, les exploitants et les organisations professionnelles ont un rôle complémentaire important à jouer dans la gestion du retour d'expérience sur défaillances élémentaires et incidents, ainsi que dans la hiérarchisation et le partage des enseignements correspondants. En général, il convient de conserver une démarche analytique, mais proportionnée à la complexité des sites, notamment pour les sites de stockage tels que les silos, qui ne possèdent pas des configurations de même complexité que les sites Seveso de la pétrochimie par exemple.

A titre informatif, de 1997 à fin 2005, 95 accidents de silos ont été recensés en France par le BARPI : 86% environ donnant lieu à incendie, et 7% à explosion. Par ailleurs, 6 accidents concernent des épandages de grains à la suite d'effondrement ou de rupture de cellules (hors explosion)<sup>6</sup>.

De plus, une prise en compte des enseignements tirés du retour d'expérience nécessite de considérer les améliorations techniques, organisationnelles et réglementaires apportées suite aux accidents successifs (notamment les accidents de Metz le 18 octobre 1982 et de Blaye le 20 août 1997).

**Il est à noter que la fréquence d'occurrence du phénomène dangereux est à distinguer de la probabilité des accidents potentiels (plus faible): en effet, la probabilité d'atteindre les cibles extérieures est inférieure à la probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux. A titre conservatoire, pour des phénomènes dangereux à cinétique très rapide comme les explosions, on conservera la fréquence d'occurrence du phénomène dangereux comme probabilité d'accident.**

Parmi les méthodologies semi-quantitatives d'évaluation de la fréquence d'occurrence des phénomènes dangereux et des accidents, l'INERIS propose une représentation de scénarii (chemins) d'accident selon des méthodes arborescentes telles que celle du « nœud papillon ». Ces représentations permettent d'apporter une lisibilité de la démonstration de la maîtrise des risques, en montrant clairement l'action des mesures de sécurité sur le déroulement d'un accident.



<sup>6</sup> Un bilan accidentologique complet et détaillé concernant les silos est disponible sur le site du BARPI à l'adresse : [http://aria.ecologie.gouv.fr/frame.jsp?contexte=barpi\\_2860.jsp](http://aria.ecologie.gouv.fr/frame.jsp?contexte=barpi_2860.jsp)



*Figure 1 : Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon*

Dans cette représentation, chaque chemin conduisant d'une défaillance (*événements indésirable ou courant*) à l'apparition de dommages au niveau des *cibles (effets majeurs)* désigne un scénario d'accident particulier pour un même événement redouté central.

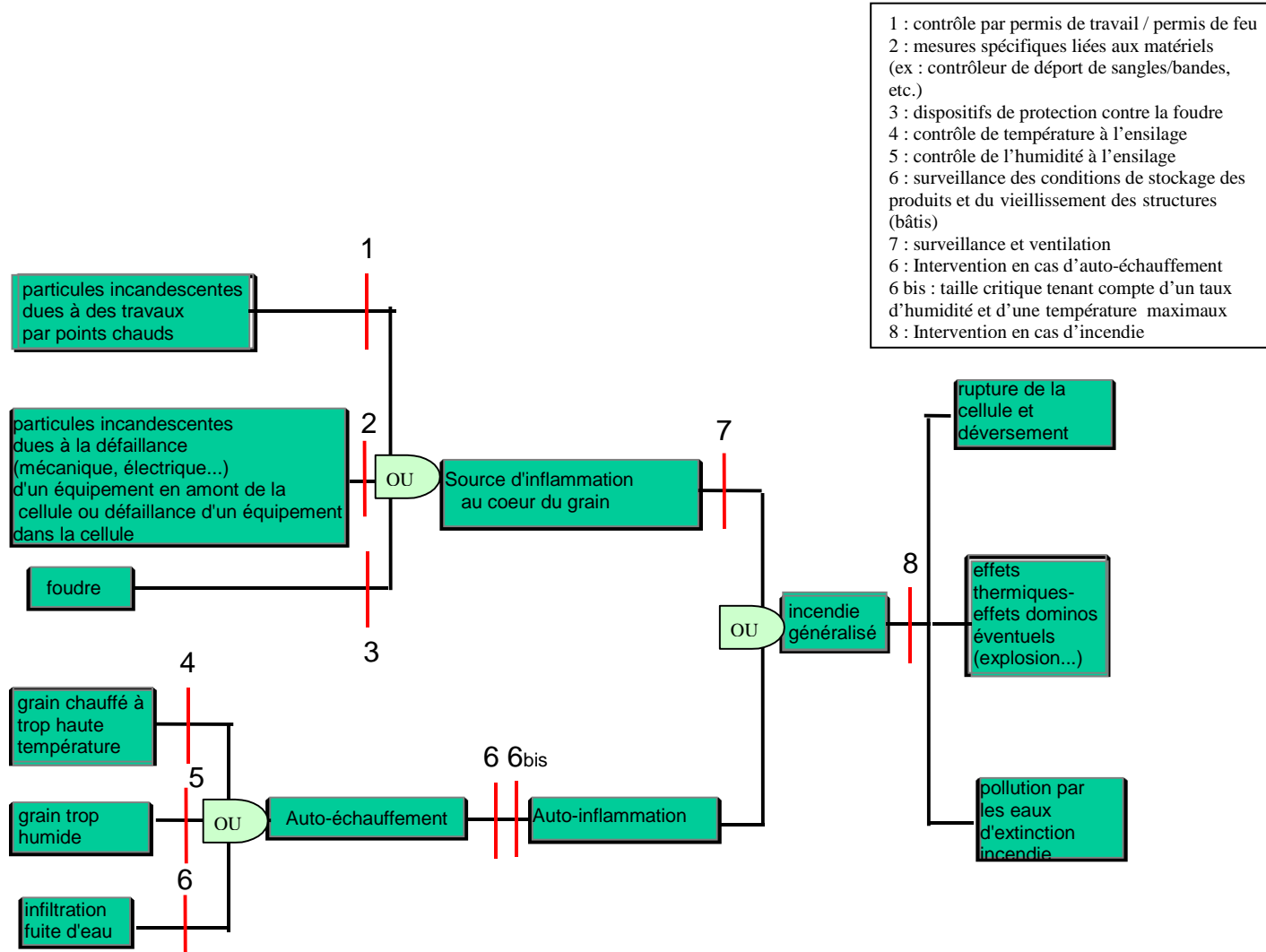
Il est à souligner que la représentation papillon n'a aucun caractère obligatoire et qu'elle n'intervient seulement que comme une représentation formelle au terme d'une analyse de risque complète et rigoureuse.

A titre d'exemple, cette représentation est reprise ci-après pour illustrer les phénomènes dangereux suivants :

- auto-inflammation de produit en cellule,
- explosion d'une tour de manutention.

A noter que les mesures de sécurité citées dans ces arbres sont données à titre d'exemple et doivent être déclinées au cas par cas.

Figure 2 : Représentation du scénario d'auto-inflammation du produit en cellule selon le modèle du nœud papillon



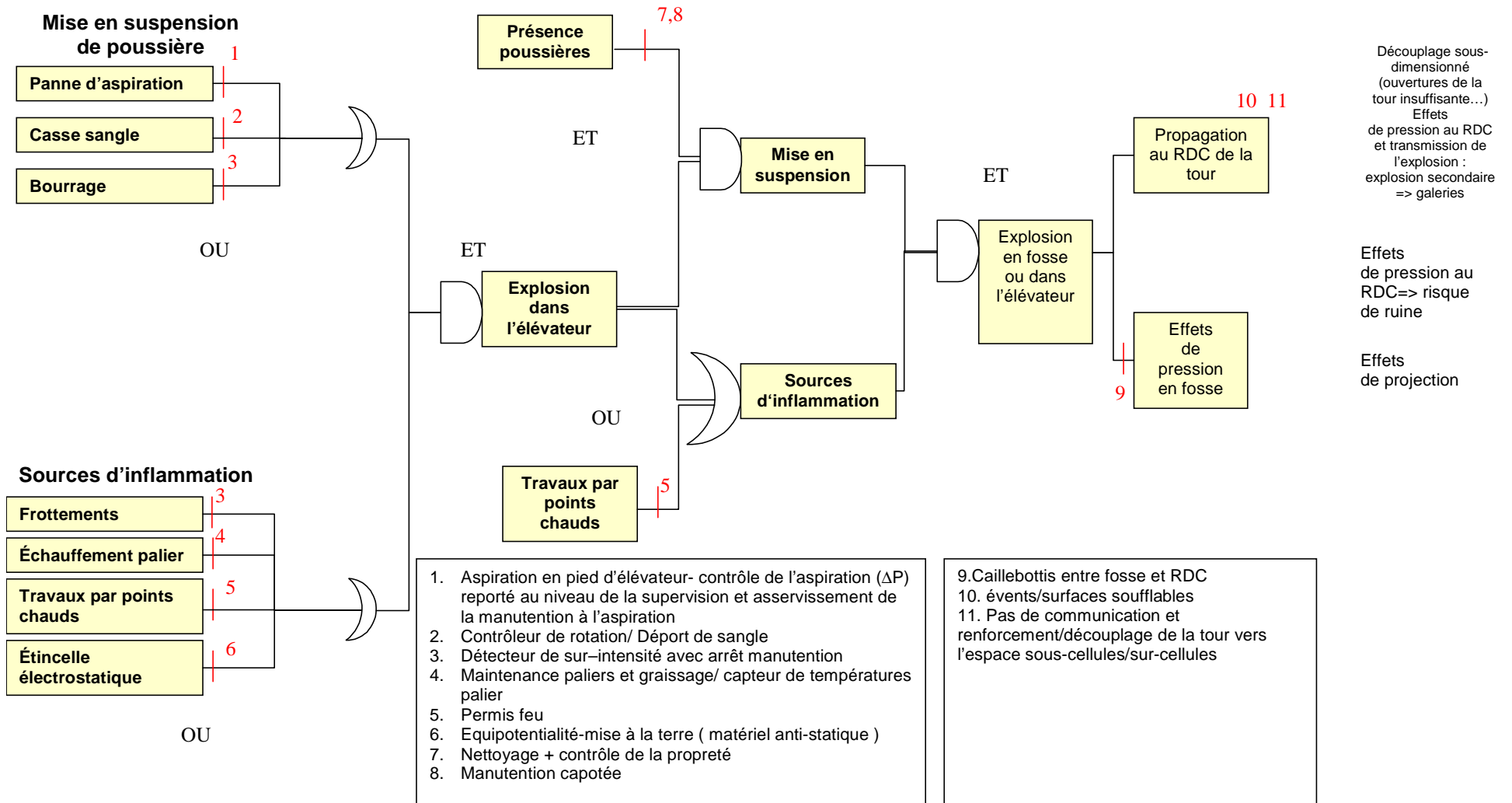


Figure 3 : Représentation du scénario d'explosion d'une tour de manutention d'un silo vertical selon le modèle du nœud papillon

Dans le cadre des méthodes semi-quantitatives et quantitatives d'évaluation de la probabilité, les performances des mesures de maîtrise des risques doivent être évaluées et justifiées. Plus généralement, pour être prises en compte dans l'évaluation de la probabilité, les mesures de sécurité indépendantes doivent répondre à quatre critères :

- Efficacité ;
- Cinétique ;
- Maintenabilité ;
- Testabilité.

L'INERIS a par exemple proposé deux méthodes d'évaluation de la performance des mesures de maîtrise des risques<sup>7</sup> : l'une adaptée aux mesures techniques et la seconde méthode concernant les mesures organisationnelles, à travers des critères d'efficacité, d'indépendance, de temps de réponse et enfin, par l'attribution d'un niveau de confiance :

- **L'indépendance** : il faut s'assurer que la mesure de sécurité est bien indépendante du procédé, des autres dispositifs et de l'exploitation.
- **L'efficacité ou Capacité de réalisation** : l'efficacité est l'aptitude d'une mesure de sécurité à remplir la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie, pendant une durée donnée. Cette aptitude peut s'exprimer en pourcentage d'accomplissement de la fonction définie et en considérant un fonctionnement normal (non dégradé). Elle est liée au dimensionnement du dispositif. L'évaluation en terme de capacité de réalisation passe par l'étude de trois critères :
  - Concept éprouvé ;
  - Dimensionnement adapté ;
  - Résistance aux contraintes spécifiques.
- **Le temps de réponse** : le temps de réponse est l'intervalle de temps entre le moment où une mesure de sécurité est sollicitée et le moment où la fonction de sécurité assurée par cette mesure de sécurité est réalisée dans son intégralité (qui correspond à la capacité de réalisation de la mesure de maîtrise des risques). Le temps de réponse est à comparer à la cinétique du phénomène.
- **Le niveau de confiance (ou intégrité de sécurité)<sup>8</sup>** : c'est la probabilité de défaillance à la sollicitation de la mesure de sécurité, dans son environnement d'utilisation, soit la probabilité qu'elle n'assure pas la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie lorsqu'elle est sollicitée. Cette probabilité est calculée pour une capacité de réalisation et un temps de réponse donnés. La probabilité de défaillance est liée aux paramètres suivants :
  - Type d'architecture ;
  - Principe de sécurité positive ;
  - Tolérance à la première défaillance ;
  - Comportement sur défaut (mise hors service, blocage ou dérive possible) ;
  - Maintien dans le temps de la qualité de la mesure (existence de procédures de tests réguliers, de maintenance préventive, de procédures d'installation ou d'inspection/audits internes).

Dans le cas des mesures de maîtrise des risques fondées sur une intervention humaine, c'est-à-dire, les mesures constituées d'au moins une intervention humaine s'opposant à l'enchaînement d'événements susceptibles d'aboutir à un accident, le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire a publié, le 28 décembre 2006, une

---

<sup>7</sup> OMEGA 10 – Evaluation des dispositifs de prévention et de protection utilisés pour réduire les risques d'accidents majeurs et OMEGA 20-démarche d'évaluation des barrières humaines de sécurité (date de publication : 10/10/06).

<sup>8</sup> Le niveau de confiance est une adaptation des exigences des normes NF EN 61508 et 61511 relatives à la sécurité des systèmes (architecture des systèmes pour équipements de sécurité...)

fiche (n°7) indicative permettant de prendre en compte ces mesures de sécurité dans l'évaluation de la probabilité, selon les mêmes critères (efficacité, cinétique, maintenabilité et testabilité) que pour les mesures techniques, mais déclinés différemment.

Ainsi, ces mesures doivent tout d'abord répondre au même critère d'indépendance et sont regroupées en deux catégories : **les mesures de pré-dérive** (ex : contrôle d'une température avant la mise en œuvre du process) et **les mesures de rattrapage de dérive** (ex : extinction d'un incendie par un opérateur).

**Pour évaluer la performance de ces mesures, des pré-requis sont indispensables : la formation et l'habilitation des opérateurs, la coordination et la communication opérationnelle des acteurs (notamment dans le cas d'un travail d'équipe), l'entraînement et les exercices, l'encadrement du recours à la sous-traitance, ainsi que le critère de disponibilité des opérateurs. Ces critères sont impératifs pour considérer qu'une mesure de ce type est efficace.**

En ce qui concerne l'évaluation du niveau de confiance des mesures de sécurité fondées sur une intervention humaine, le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, a fixé une valeur maximale de 1 qui ne peut être dépassée que dans des cas très exceptionnels devant être justifiés par l'exploitant : par exemple, pour les mesures de pré-dérive, si un autre opérateur fait le contrôle (ou la vérification).

Enfin, la cinétique de ces mesures de sécurité regroupe le temps de détection, le temps d'intervention, mais aussi le temps entre les contrôles (si la détection se fait lors de rondes, sans autre alarme).

Dans le cas d'une mesure de sécurité alliant intervention humaine et automatisme technique, on doit considérer la fonction de sécurité dans son ensemble par rapport au scénario de développement des événements et le niveau de confiance de la mesure doit être évalué en prenant en compte l'ensemble de la chaîne assurant la fonction de sécurité :  $NC_{global} = \min(NC)$ .

*Dans le cas particulier des silos, ces principes peuvent être déclinés à travers trois exemples particuliers :*

- a. *les événements normalisés (mesure technique) ;*
- b. *le découplage et surfaces soufflables ou événements associés (mesure technique) ;*
- c. *le nettoyage (mesure organisationnelle) ;*

*Le cas des permis de feu est évoqué à la fin de cette partie.*

a. Les événements normalisés

Des surfaces soufflables peuvent aussi jouer le rôle d'événements.

<b>Fonction de sécurité :</b> Maintenir l'intégrité du volume et éviter les projections en cas d'explosion.	<b>Commentaires</b>
<b>Description (détection, action de sécurité)</b>	- Dispositif passif. - Quand l'explosion survient, l'événement s'ouvre en restant solidaire de l'enceinte.

<b>Indépendance</b>	OK
<b>Efficacité (concept éprouvé, résistance aux contraintes spécifiques)</b>	<p>Concept éprouvé :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- répond à des normes de dimensionnement<sup>9</sup> ;</li> <li>- répond à des normes de conception et d'installation.</li> </ul> <p>L'efficacité dépend impérativement des critères cités plus haut et :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- des caractéristiques des produits stockés ;</li> <li>- de la méthode d'évaluation de la résistance de l'enceinte (éléments fragiles pris en compte...) ;</li> <li>- des procédures de contrôle : espace libéré à tout moment pour laisser se développer la flamme.</li> </ul>
<b>Temps de réponse</b>	Le respect des normes de construction permet un temps d'ouverture suffisamment rapide.
<b>Niveau de confiance (NC)</b>	A déterminer au cas par cas
<b>Maintien dans le temps</b>	<p>Vieillessement de l'événement influe sur le maintien de la fonction : éviter les projectiles.</p> <p>Vieillessement de l'enceinte influe sur le maintien de la fonction : maintenir l'intégrité.<sup>10</sup></p> <p>Inspection visuelle</p>

b. Le découplage et les surfaces soufflables ou événements associés

<b>Fonction de sécurité : Limiter l'explosion à un volume</b>	<b>Commentaires</b>
<b>Description (détection, action de sécurité)</b>	<p>Ces dispositifs sont constitués d'une surface soufflable et d'une paroi de découplage.</p> <p>Lors de l'explosion :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la surface soufflable est projetée ;</li> <li>- la paroi de découplage résiste à la pression d'explosion ;</li> <li>- la flamme ne passe quasiment pas au volume contigu.</li> </ul>
<b>Indépendance</b>	OK (à noter que la paroi découplage et la surface soufflable sont dépendants entre elles)
<b>Efficacité (concept éprouvé, résistance aux contraintes spécifiques)</b>	<p>Concept éprouvé : largement mis en œuvre dans l'industrie agro-alimentaire française. Pas de normes de dimensionnement.</p> <p>L'efficacité de ces dispositifs dépend :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- du dimensionnement : inertie des surfaces soufflables (&lt; 30kg/m<sup>2</sup>). Surfaces déterminées selon les normes d'événements. En particulier pour le dimensionnement, les hypothèses prises doivent être justifiées et conservatoires en cas d'incertitude.</li> <li>- de la méthode d'évaluation de la résistance de l'enceinte, de la paroi de découplage, de la surface soufflable.</li> <li>- de leur construction (respect du cahier des charges) et de la limitation des ouvertures.</li> <li>- des mesures organisationnelles et techniques de fermeture des portes quand celles-ci sont intégrées à la paroi mais également impérativement de la fermeture de toutes les trappes et ouvertures diverses pouvant mettre en communication des volumes (y compris lors de la manutention).</li> </ul>
<b>Temps de réponse</b>	Non concerné
<b>Niveau de confiance (NC)</b>	A déterminer au cas par cas
<b>Maintien dans le temps</b>	Contrôle de l'état des dispositifs et notamment maintien de la fermeture de la porte

<sup>9</sup> Les domaines d'application des normes ne permettent pas d'atteindre des Pstat d'ouverture très faibles (moins de 100mbar).

<sup>10</sup> En ce qui concerne le découplage d'appareillage, le guide du Center for Chemical Process Safety intitulé «Layer of protection analysis - Simplified process risk assessment » propose un niveau de confiance maximal de 2 pour cette mesure de sécurité.

De plus, les événements peuvent être soumis à une inspection conformément au chapitre 11 de la norme NFPA 68 (édition 2007) afin de maintenir leur efficacité.

<b>Fonction de sécurité :</b> Contrôler régulièrement la propreté et nettoyer les surfaces et les volumes susceptibles de s'empoussiérer	<b>Commentaires</b>	<b>Points en suspens / remarques</b>
<b>Description (détection, action de sécurité)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nettoyage régulier des surfaces/volumes dans lesquels des poussières sont susceptibles de se déposer ;</li> <li>-Contrôle à un rythme adapté de la propreté permettant de s'assurer que les paramètres de sécurité demeurent dans l'enveloppe normale de fonctionnement.</li> </ul>	
<b>Indépendance</b>	La phase de contrôle/vérification de la propreté permet l'indépendance, si le contrôle de propreté est effectué par une personne différente de celle qui assure le nettoyage.	
<b>Efficacité</b>	<p>L'efficacité dépend :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- des volumes et surfaces désignés comme devant être nettoyés (dépend du capotage et des dispositifs d'aspiration présents sur les manutentions sous réserve qu'ils soient entretenus, vérifiés, et également des dispositifs de cloisonnement des volumes) ;</li> <li>- des compétences du personnel ;</li> <li>- de l'accessibilité et de la manoeuvrabilité /ergonomie des outils (est-ce que les outils sont disponibles facilement sur le site ? etc.) ;</li> <li>- de l'adéquation de l'organisation (rôles clairement définis, etc.) ;</li> <li>- de l'adéquation/adaptation des outils et du nombre de personnes affectées au nettoyage, par rapport au nombre de surfaces/volumes concernés (présence d'équipements -centrales, aspirateurs, colonne d'aspiration centralisée...- adaptés par rapport à la taille et la configuration des silos, nombre d'opérateurs, temps affecté) ;</li> <li>- de l'accès aux parties à nettoyer.</li> </ul>	<p>Importance du contrôle des aptitudes du personnel saisonnier et intérimaire qui pourrait être chargé du nettoyage à certaines périodes de l'année.</p> <p>Parfois les opérateurs sont peu nombreux, il faut donc veiller à ce que l'organisation assure que le nettoyage soit effectué selon les procédures en vigueur.</p>
<b>Cinétique</b>	Sans objet normalement pour les mesures de contrôle. Néanmoins, le rythme des nettoyages et la vérification de la propreté doivent être réalisés à une fréquence adaptée à la vitesse d'empoussièrment : notamment dans les périodes d'ensilage, de suractivité ou en mode dégradé de fonctionnement.	Si la fonction de sécurité consiste à nettoyer en cas de constat visuel d'une fuite de grain, ou d'empoussièrment important non prévu, il est nécessaire d'intégrer la durée du contrôle et la durée de la période entre deux vérifications dans la cinétique de mise en œuvre de ce nettoyage, qui est aussi fonction de la disponibilité du personnel pour effectuer le nettoyage.
<b>Maintenabilité et testabilité</b>	<p>Dépend :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- du maintien dans le temps des compétences du personnel (adéquation du contenu de la formation, plan de formation adapté au personnel, vérification de l'acquisition des compétences, existence d'une consigne, habilitation/sensibilisation des saisonniers, etc.) ;</li> <li>- des évolutions des outils, des équipements et conditions de travail.</li> </ul>	

### c. Le nettoyage

Enfin, on rappelle que le nettoyage est une mesure de sécurité absolument nécessaire, mais pas suffisante à elle seule pour exclure totalement de l'analyse les incendies et les explosions.

Dans le cadre du **permis de feu pour travaux par points chauds**, l'opération de travaux est encadrée par une procédure (on peut se référer au document « permis de feu » BARPI-COOP de France mis en ligne sur le site du BARPI). Il est vérifié, préalablement aux travaux, l'absence de matières combustibles dans la zone, et postérieurement aux travaux, l'absence de point chaud résiduel.

La fiche 7 (« mesures de maîtrise des risques fondées sur une intervention humaine ») validée par le MEEDDAT le 28 décembre 2006 indique que, concernant le permis de feu, comme il est difficile a priori de définir de façon appropriée la fréquence de l'événement initiateur auquel cette mesure de maîtrise des risques cherche à s'opposer (ici : non respect de la procédure, etc.), on pourra donc forfaitairement considérer que cet événement initiateur a une classe de fréquence A (événement : apparition du point chaud lors d'une intervention).

Le permis de feu pourra alors être coté conformément aux règles décrites dans la fiche pour les mesures de pré-dérive (NC = 0, 1 ou 2 en cas d'un deuxième contrôle par une tierce personne). Néanmoins, on insiste sur la nécessité d'une véritable analyse de risques liée aux travaux avant la délivrance du permis de feu.

### 2.1.2. Présentation des phénomènes dangereux

Les dangers inhérents à la manutention et au stockage des produits agro-alimentaires sont de 3 types (cf. annexe E pour les aspects relatifs aux potentiels de danger) :

- L'auto-inflammation de produits stockés en vrac ;
- l'incendie ;
- l'explosion.

#### 2.1.2.1. L'auto-inflammation de produits stockés en vrac

Cette situation peut se présenter dans les cas suivants :

- suite à des phénomènes de fermentation aérobie (grains stockés trop humides) ;
- ou lorsque les farines étuvées à moins de 7 ou 8 % (source : guide ANMF) ou les grains, poussières sont stockés :

- à des températures trop élevées ;
- ou sur des surfaces chaudes/ ou en contact de points chauds ;
- ou dans des volumes de taille spécifique > taille critique ;
- ou après un dysfonctionnement du séchoir en amont ;
- ou suite à une cueillette faite avant maturation ;
- voire stockés sur une durée trop longue.

Dans un stockage de grande taille, deux phénomènes dangereux sont à prendre en compte :

- **L'auto-échauffement** qui est une élévation naturelle de la température de tout ou d'une partie du stockage sans action extérieure (produit trop chaud et/ou trop humide).
- **L'auto-inflammation** qui est un phénomène de combustion consécutif d'une partie du tas de grain, qui résulte d'un auto-échauffement ou de la présence d'une source d'ignition extérieure.



L'auto-échauffement est à considérer pour les céréales et autres produits organiques (voir chapitre du présent guide relatif à l'article 14 ), et est à exclure pour le sucre cristallisé.

En effet, le sucre fond pour une température de 180°C. Or, il est constaté que pour tous les produits fusibles :

- En se liquéfiant ceux-ci diminuent leurs surfaces spécifiques. Les réactions de fixation d'oxygène n'ont alors plus de terrain pour se réaliser. Cela diminue considérablement le dégagement de chaleur.
- Le même processus améliore considérablement la conductibilité. Les échanges de chaleur avec l'extérieur sont alors favorisés et la température s'uniformise à la température des parois.
- La combinaison de ces deux phénomènes **fait** qu'un échauffement et **donc** l'élévation de température qui en résulte n'est plus possible au point de fusion.

Le retour d'expérience et l'accidentologie depuis qu'ils sont mis en place par le BARPI ne dénombrent, dans les stockages de sucre, aucun feu couvant similaire à ce qu'on peut constater pour les stockages de céréales. Cela est aussi confirmé par le retour d'expérience des exploitants qui n'ont jamais relevé sur leurs stockages des températures excédant les 50°C.

Enfin, il convient de souligner que les cellules ayant un taux de rotation élevé peuvent ne pas être concernées par les phénomènes d'auto-échauffement dans certaines conditions et en mode de fonctionnement normal. A titre indicatif, on peut indiquer que les phénomènes de fermentation produisant un auto-échauffement peuvent se développer en 3 à 4 jours et l'auto-inflammation sous des délais de l'ordre de 4 à 5 jours, soit un délai total de 7 à 9 jours<sup>11</sup>.

Le BARPI indique, dans une récente étude, que les accidents liés à un auto-échauffement des produits dans les cellules ou autres capacités de stockage peuvent provenir de différentes causes: une étanchéité défectueuse des stockages (deux accidents), l'ensilage de produits chauds, une panne de ventilation sont des facteurs favorisants. De plus, dans deux cas, l'absence de thermométrie constitue un facteur qui retarde la détection. Il faut également souligner les risques d'une "aération" intempestive des produits en phase d'auto-échauffement (deux cas).

### 2.1.2.2. L'incendie

L'incendie intervient lorsque la combustion est amorcée par une source d'inflammation d'énergie suffisante ou suite à un auto-échauffement non maîtrisé. Il survient soit dans les cellules de stockage suite à un auto-échauffement, soit dans les tours de manutention, généralement suite à des défauts de matériel, de la manutention, etc.

Ainsi, les phénomènes d'auto-échauffement des produits ne constituent donc pas l'unique source d'inflammation, et donc, de départ de feu, dans des cellules de stockage. En effet, il existe notamment des risques liés à la foudre, aux travaux de maintenance, de réparation, aux dysfonctionnements dans les séchoirs en amont (très courants), sans compter le risque de propagation aux cellules d'un incendie provenant d'une autre partie de l'installation.

Concernant le cas spécifique du sucre, on rappelle que celui-ci se liquéfie lors d'un incendie et cela peut s'assimiler à un feu de nappe. Il convient toutefois de remarquer que l'énergie nécessaire pour généraliser ce phénomène à l'ensemble du stockage est très grande et qu'il n'a jamais été constaté de feu de nappe étendu dans l'accidentologie. Les zones de combustion restent localisées.

---

<sup>11</sup> La durée de 3 à 5 jours généralement avancée pour des auto-échauffements correspond au temps nécessaire pour passer d'une température de 70°C à l'auto-inflammation pour un stockage de taille supérieure à sa taille critique. Cet ordre de grandeur provient du retour d'expérience et de tests que l'INERIS a réalisés sur la luzerne et les céréales.

Dans le cas de la meunerie, compte tenu de la structure des installations et des matériaux mis en œuvre, les principales zones où le risque incendie est présent sont:

- les zones constituant la structure des bâtiments (si ceux-ci sont de constitution en bois : plancher ou poutrason, les panneaux sandwich en polyuréthane...);
- les zones de stockage : emballage vide (sacs kraft polypropylène), suremballage (plastique, film étirable), palettes vides, matières premières et produits finis en sacs sur palettes, huiles et hydrocarbures ;
- les zones comportant les matériels à risque (armoires et installations électriques, courroies et sangles...).

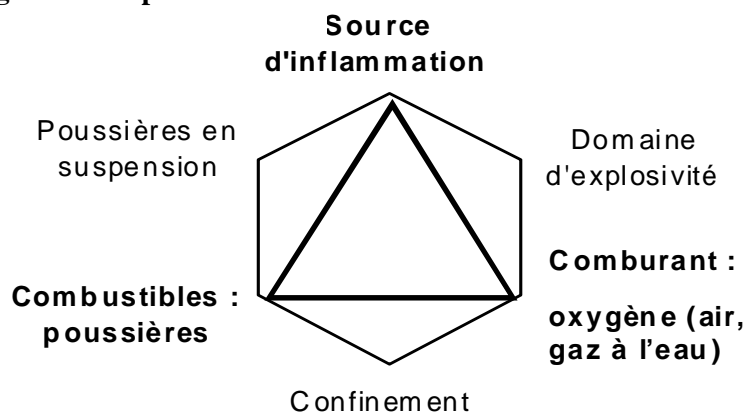
### 2.1.2.3. L'explosion

Ce phénomène survient lorsque des poussières en suspension ou des gaz inflammables (issus de la fermentation anaérobie, de l'auto-échauffement) sont enflammés par une source d'inflammation d'énergie suffisante.

Pour qu'une explosion de poussières se produise, il est indispensable de réunir simultanément les conditions d'occurrence suivantes :

- Présence d'un produit combustible (poussières agro-alimentaires) ;
- Présence d'un gaz comburant, comme, par exemple, l'oxygène de l'air ;
- Création d'une source d'inflammation d'énergie suffisante ;
- Formation d'un nuage de gaz combustibles, ou de poussières combustibles en suspension ;
- Teneur en combustible comprise entre la Concentration Minimale d'Explosion (CME) et la Concentration Supérieure d'Explosibilité (CSE) ;
- Mélange suffisamment confiné.

**On parle d'hexagone de l'explosion.**



*Figure 4. Hexagone de l'explosion.*

L'explosion représente environ 13 % des accidents de silos enregistrés dans la base ARIA du BARPI et constitue la typologie d'accidents la plus redoutable en raison de sa cinétique et de la gravité des conséquences<sup>12</sup>.

Si les sources d'ignition peuvent être d'origines multiples, **l'empoussièremment** est la cause initiale de ces accidents. Des systèmes de dépoussiérage compliqués et insuffisants comme par exemple à la malterie de METZ, des installations non nettoyées comme à ALBERT dans la Somme, créent les

<sup>12</sup> Ces commentaires sont extraits d'une étude accidentologique, disponible sur le site du BARPI:

[http://aria.ecologie.gouv.fr/frame.jsp?contexte=/barpi\\_2860.jsp](http://aria.ecologie.gouv.fr/frame.jsp?contexte=/barpi_2860.jsp)

conditions idéales pour la survenue d'explosions. Celles-ci peuvent se propager dans l'ensemble du silo comme à BLAYE ou à METZ après mise en suspension des poussières accumulées dans les autres parties du silo.

A défaut de surfaces soufflables aménagées dans les parois pour l'évacuation des gaz de combustion générés par l'explosion, la pression augmente dans les équipements ou structures (cellules, tour de travail...) jusqu'à entraîner leur rupture accompagnée d'effets de souffle et de projections de débris. L'absence de "découplage" des différents volumes de l'installation favorise la propagation du souffle de l'explosion, la mise en suspension dans l'air des poussières déposées et leur allumage en régime de déflagration voire de détonation dans certains cas. Ces configurations constituent des facteurs d'aggravation des conséquences de ce type d'accident.

Parmi les causes les plus fréquentes, on peut citer l'importance des **phases de travaux**. Si les travaux ne constituent pas en eux-mêmes la cause de l'accident, ils peuvent générer des situations entraînant la mise en suspension des poussières et leur allumage par des points chauds résultant de l'emploi de matériels tels que chalumeau, appareils de meulage, de tronçonnage.

Des **défaillances d'organisation** sont ainsi fréquemment relevées : absence de permis de feu et maintien en service dans la zone de travaux d'un élévateur non dépoussiéré, analyse et prise en compte insuffisantes des risques. Des défaillances sont aussi attribuées au **matériel** : dysfonctionnement d'une sonde de niveau dans un boisseau de pesage d'une sucrerie, ruptures de roulements de palier d'élévateur, dont l'un dans un silo plat, ayant entraîné des étincelles à la suite de frottements.

La puissance de l'explosion peut conduire à la rupture des enceintes avec risque d'envelissement, à la projection de fragments et à l'émission d'une onde de pression aérienne dans l'environnement.

Les paramètres d'explosivité sont présentés dans le tableau suivant. Ils ne constituent pas une liste exhaustive mais sont ceux qui paraissent les plus utiles.

Paramètre	Définition	Ordre de grandeur	Utilité
Kst en bar.m.s <sup>-1</sup>	<b>Paramètre des explosions de poussières liée à la valeur maximale de la montée en pression</b> par unité de temps obtenue dans des conditions d'essai standard lors d'une explosion de poussières dans une enceinte normalisée.	La gamme habituelle pour les produits agro-alimentaires varie de 50 bar.m.s <sup>-1</sup> à un peu plus de 200 bar.m.s <sup>-1</sup> (classe d'explosion ST1).	Elle caractérise la violence d'explosion des poussières et permet de dimensionner les mesures de protection contre l'explosion (évent, suppresseur d'explosion).
Température minimale d'inflammation en nuage ou en couche en °C (TMI)	Température minimale d'un nuage ou d'une couche de poussières inflammable à partir de laquelle l'inflammation se produit d'elle-même.	Température de l'ordre de quelques centaines de °C.	Choix des températures maximales de surface des corps chauffés ou des températures de fonctionnement des procédés.
Domaine d'explosivité	Domaine entre la concentration inférieure et supérieure de concentration autorisant une explosion (pas uniquement en volume confiné).	Cf. annexe A.	Détermination du domaine d'explosivité.
Pression maximale en bar (Pmax)	Pression maximale atteinte pendant l'explosion dans des conditions normalisées	Moins de 10 bars.	Aide au dimensionnement de l'évent et au calcul de la pression réduite.
Energie minimale d'inflammation (EMI) (Joules)	Energie minimale délivrée dans une étincelle électrique capable d'enflammer un nuage de poussières.	EMI de l'ordre de quelques dizaines de mJ.	Lutte contre les sources d'inflammation d'origine électrostatique.

*Tableau 1 : Caractéristiques d'explosivité des poussières agro-alimentaires*

Pour plus de précisions, il est donné en annexe A, une étude bibliographique concernant les caractéristiques d'explosivité des poussières agro-alimentaires. Il revient en tout état de cause à l'étude de dangers de justifier les hypothèses prises sur les caractéristiques des poussières.

Il est rappelé que le paramètre Kst correspond bien à un paramètre lié à la valeur **maximale** de la montée en pression, pour un produit donné, dans des conditions normalisées (« montée en pression par unité de temps obtenue dans des conditions d'essai standard lors d'une explosion de poussières dans une enceinte normalisée »). **La valeur de ce paramètre ne peut être estimée en fonction de l'empoussièrement constaté d'un volume quelconque donné, et ne peut être corrélée à cet empoussièrement.**

### 2.1.3. Estimation des effets

#### 2.1.3.1. Auto-inflammation

Cette situation initiale engendre une combustion (d'abord très lente) de la masse stockée qui libère d'autant plus d'énergie que la température locale est élevée. On aboutit, si rien n'est fait, à un feu couvant très étendu, difficile à maîtriser, qui peut former une atmosphère explosive par dégagement de CO dans le ciel du silo.

Le retour d'expérience (incendie d'un silo de granulés de luzerne à Saint-Ouen l'Aumône, février 1998) sur des feux dans des installations de stockage de produits agro-alimentaires montre que les conséquences en termes de flux thermique radiatif restent a priori limitées. En revanche, la dégradation des structures suite au dégagement de chaleur excessif est possible.

La libération de CO (résultant d'une mauvaise combustion) et de gaz de pyrolyse ainsi que la formation de mélanges hybrides poussières/gaz créent un risque d'explosion et génèrent des risques d'intoxication<sup>13</sup>. Ces dangers sont particulièrement à prendre en compte lors des opérations d'extinction.

Il existe peu d'outils de modélisation bien adaptés pour simuler ces phénomènes.

#### 2.1.3.2. Explosion de poussières

Les paragraphes ci-après présentent différentes méthodes permettant de calculer les effets d'une explosion de poussières.

##### a. Détermination des effets de pression

La physique associée au phénomène d'explosion de poussières ainsi que le retour d'expérience indiquent que les effets d'une explosion se renforcent lorsque le front de flamme parvient à se propager **d'un volume à un autre** par les interconnexions au sein d'une même installation.

Afin de déterminer les effets de pression, deux cas seront étudiés pour une installation :

- une explosion dans un volume, explosion dite « primaire » ;
- ou une explosion dans un volume faisant suite à une propagation. On parle d'« explosion secondaire » lorsque l'explosion primaire qui se propage rencontre un nuage ou un dépôt de poussières, et enflamme ceux-ci, créant ainsi une nouvelle explosion (dite « secondaire »).

Pour déterminer si pour un volume, on doit étudier le scénario d'explosion primaire et le scénario de propagation d'explosion, il convient d'étudier :

- les interconnexions dans les installations : ce sont les communications entre espaces dans lesquels est susceptible de se propager une explosion de poussières.

---

<sup>13</sup> En terme de retour d'expérience, on peut se référer à l'ouvrage « Dust explosions in the process industries », Rolf Eckhoff qui met en lumière 20-30 explosions de ce type dans une installation russe (Tomylovo, Knibyshev).

- La protection des différents volumes contre les risques d'explosion qui nécessite que les espaces soient découplés les uns des autres, par une séparation physique par exemple, et que chaque volume découplé ait une surface soufflable ou éventable suffisante. Ces notions sont développées dans les chapitres suivants.

La protection d'un volume par des événements ou des surfaces soufflables consiste en l'aménagement, sur les parois de ce volume, de surfaces plus fragiles que la structure du volume ; en cas d'explosion, ces surfaces se rompent prioritairement sous l'effet de la surpression, permettant à celle-ci de s'évacuer vers l'extérieur et évitant ainsi la destruction du volume.

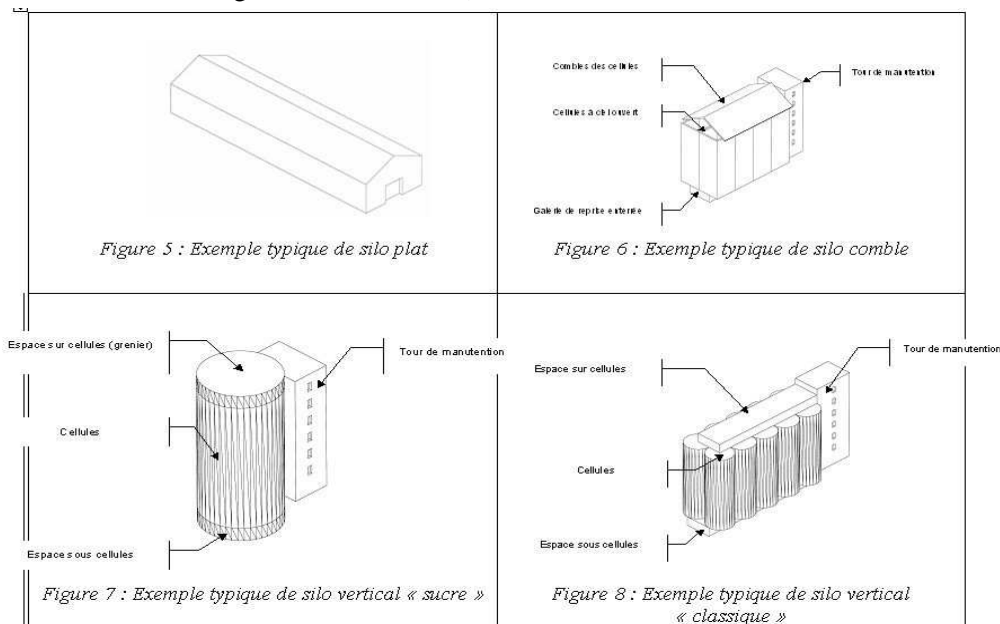
On distingue :

- **les événements** : surfaces normalisées, de pression de rupture en cas d'explosion connue (le matériau et la surface de l'événement sont fixés par le constructeur, selon des normes de dimensionnement et des normes de construction, pour conduire à une certaine pression de rupture ; ce type de surface est souvent rencontré sur les filtres à poussières par exemple). L'événement doit rester solidaire des parois sur lesquelles il est attaché et ne pas se fragmenter.
- **Les surfaces soufflables**, qui peuvent être des éléments du volume plus fragiles que la structure de celui-ci et de pression de rupture relativement faible (vitres, bardages...).

S'agissant de l'étude des interconnexions, on distingue différents types de configurations de silos :

- Silo plat,
- Silo comble (sans galerie supérieure, cellules ouvertes avec ensilage par passerelle),
- Silo vertical « sucre » et le silo vertical « classique ».

Les schémas ci-après représentent les différents types de configurations, dont certaines présentent plus d'interconnexions et moins de surfaces soufflables que les autres (passages entre la tour de manutention et les cellules, galeries enterrées...).



Certains silos verticaux présentent parfois des interconnexions assez particulières :

- les cellules et/ou as de carreaux (espace interstitiel formé par plusieurs cellules) communiquent entre eux sous la galerie supérieure, par des ouvertures situées sur le haut des fûts de cellules. Ces ouvertures ne sont pas visibles depuis la galerie supérieure puisque celle-ci couvre l'ensemble des cellules. Ce type d'interconnexion sert généralement à évacuer la surpression créée lors de l'ensilage des cellules, lorsque ces dernières ne sont pas munies de « mises à l'air libre » (munies ou non d'extracteurs d'air pour la ventilation du grain), de manches à air ou de systèmes d'aspiration des poussières.

- Il est possible de trouver sur certains sites des connexions directes entre la tour de manutention et les cellules de stockage voisines, notamment lorsque celles-ci sont ensilées directement depuis l'élévateur de la tour par une jetée directe.

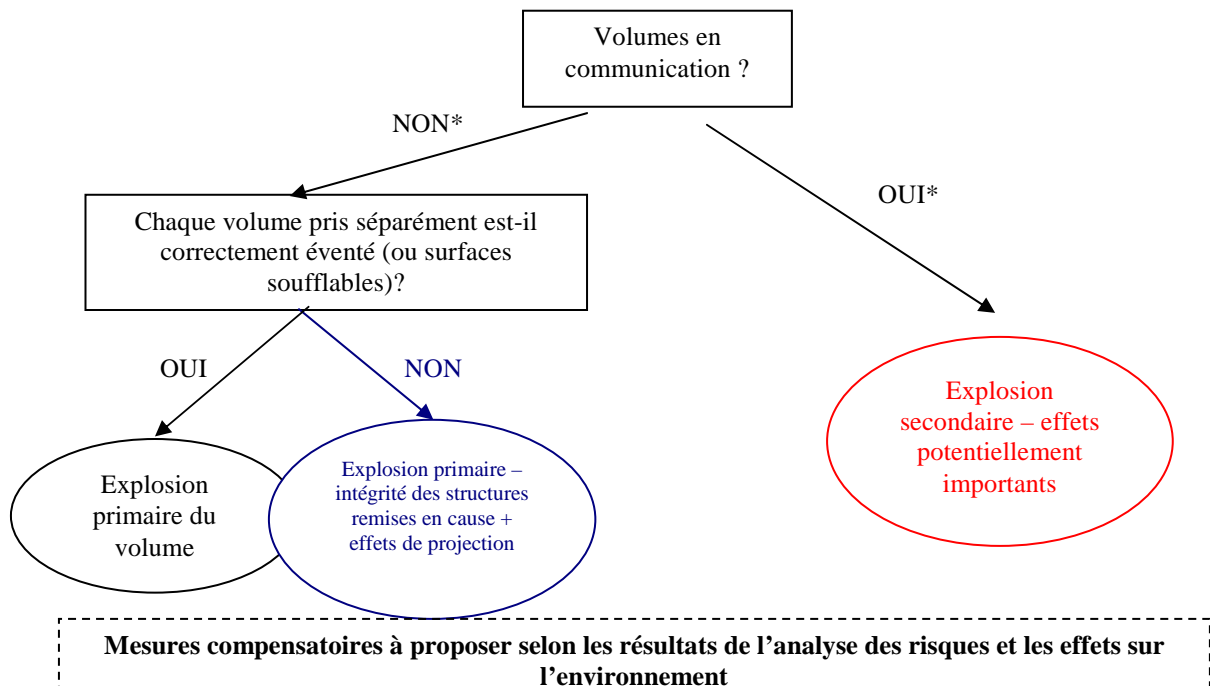
Ces types de configurations particulières doivent être examinés avec attention dans les études de dangers, car elles sont susceptibles d'accroître le risque de propagation d'explosion. Toutes les mesures nécessaires pour réduire la probabilité d'occurrence d'une explosion en cellule et/ou toute propagation d'explosion d'un volume à l'autre devront notamment être étudiées.

Certains silos possèdent des galeries sous-cellules enterrées. Dans les nouveaux silos, du fait de la difficulté à éventer ces volumes, cette configuration n'est pas recommandée.

**Les silos plats**, d'un seul volume, ne présentent en général pas d'interconnexions et présentent un toit soufflable. Ils sont à ce titre naturellement protégés contre le phénomène de propagation.

**Les silos combles** possèdent généralement une toiture soufflable permettant d'évacuer la pression des explosions et par conséquent, ils sont naturellement protégés contre les phénomènes de propagation hors propagation aux espaces sur-cellules. Néanmoins, certaines conditions peuvent renforcer l'intensité des explosions primaires (toiture basse, encombrement des espaces sur-cellules...).

Le logigramme ci-dessous permet de visualiser de façon simplifiée et générale les différents cas possibles d'explosion ou de propagation d'explosion, compte-tenu de la présence ou de l'absence de découplages et/ou de surfaces soufflables (ou d'événements), et de différencier l'explosion primaire de l'explosion secondaire :



\* : Le « oui » ou le « non » s'apprécient au regard de la présence de découplage et de la justification de l'efficacité de ce découplage.

La présence (ou l'absence) de communications entre différents volumes et la présence (ou l'absence) d'événements ou de surfaces soufflables dans ces volumes doivent donc faire l'objet d'un examen attentif lors de l'élaboration et de l'examen d'une étude de dangers. Ces informations peuvent permettre de déduire les phénomènes dangereux possibles, et de justifier qu'une propagation d'explosion est ou non possible.

Il convient de souligner qu'un bon découplage résulte de la combinaison d'une cloison de séparation assez résistante pour permettre d'isoler le volume et d'une surface soufflable (ou d'un évent) suffisamment importante pour évacuer le souffle d'une explosion se produisant dans ce volume. Ce découplage doit résister à la surpression d'explosion induite par l'explosion primaire considérée. Il est donc à dimensionner en conséquence. Dans le cas contraire, il y a lieu d'envisager une explosion secondaire dans le volume adjacent.

Ainsi, on étudiera les conséquences d'une explosion primaire :

- dans le cas d'un volume correctement protégé et découplé contre les risques d'explosion ;
- ou lors de la première phase d'une succession d'explosions.

L'étude des conséquences d'une explosion « secondaire » s'effectuera sur la base de l'étude des interconnexions dans les installations (voir formules de calculs au point 3 suivant).

Dans les paragraphes ci-après sont présentées les méthodes permettant de déterminer les effets de pression dans le cas d'une explosion de poussière. Quelles que soient les méthodes utilisées, la modélisation introduit toujours un certain nombre d'incertitudes.

Il est possible de distinguer 3 grands types de méthode d'évaluation :

1. La méthode équivalent TNT,
2. Les méthodes s'appuyant sur des normes de dimensionnement d'événements,
3. Les méthodes associant un calcul de Brode pour l'énergie et un indice multi-énergie pour les effets de pression<sup>14</sup>.

### 1. La méthode équivalent TNT :

Cette méthode figure dans les études de dangers les plus anciennes. Elle ne correspond pas à l'état de l'art. Par conséquent, il ne faudrait pas utiliser cette méthode pour modéliser les explosions de poussières.

*Pour mémoire* : cette méthode est basée sur une estimation de l'énergie disponible, **Ed**, pour la pressurisation de l'enceinte jusqu'à sa rupture puis sur une répartition forfaitaire de cette énergie entre l'onde de pression aérienne d'une part et la projection des fragments d'autre part.

Elle ignore totalement (entre autres) la contribution de la combustion interne à l'impulsion communiquée aux fragments et les éventuelles explosions secondaires.

Cette démarche souvent consiste à estimer **Ed** l'énergie disponible sur la base de l'énergie de combustion disponible **Ec** (calculée sur la base de concentrations de poussières) en appliquant un rendement à la manière de "l'équivalent TNT", souvent 10%.

**Ed** est alors répartie entre l'énergie disponible pour l'onde de pression aérienne (souvent 60%), pour la projection des fragments (20% par exemple) puis les pertes (20%). On applique enfin l'abaque de "l'équivalent TNT" pour les effets de l'onde aérienne.

Cette méthode permet aussi de déterminer la vitesse initiale des fragments à partir du théorème de l'énergie cinétique appliqué aux fragments. La trajectoire peut alors être calculée soit à l'aide d'un logiciel de balistique simple dont la valeur d'entrée est la vitesse initiale des projectiles ou assez simplement par simplification de l'équation de la dynamique des projectiles en négligeant le freinage aérodynamique pour obtenir une solution analytique simple.

---

<sup>14</sup> L'IRSN précise qu'une autre méthode de détermination des effets de pression (explosion primaire ou secondaire) a été mise au point par le TNO : « A quantitative risk assessment tool for the external safety of industrial plants with a dust explosion hazard », M.M. Van der Voort, A.J.J.Klein, M. de Maaijer, A.C.Van den Berg, J.R.Van Deursen, N.H.A. Versloot, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 20, Issues 4-6, pp.375-386, 2007.

Les défauts de cette méthode sont :

- la quantité de poussières offerte à la combustion est extrêmement difficile à déterminer dans l'état actuel des connaissances ;
- le choix d'un rendement pour le passage de **Ec** à **Ed** est arbitraire.
- Le rendement de conversion de **Ed** en énergie de projection des fragments est également arbitraire et on montre facilement qu'il peut varier de manière considérable d'une situation à l'autre. L'une des raisons à cela est que la projection des fragments n'a pas pour origine l'énergie de l'explosion mais son impulsion.

## 2. Les méthodes utilisant les normes de dimensionnement d'événements :

Ces méthodes sont à utiliser pour des volumes comportant des surfaces d'événements conçues selon les normes ou des surfaces soufflables légères.

La VDI 3673 et la NFPA 68 traitent toutes les deux des effets de surpression dans l'environnement lors de l'explosion. Elles reposent toutes les deux sur le même principe :

- un calcul de longueur de flamme (à l'aide de la même formule),
- le suivi d'un calcul de surpression (à l'aide de la même formule) au 1/4 (respectivement au 1/5) de la longueur de flamme.
- Une loi de décroissance en  $\frac{1}{r^2}$  pour la VDI 3673 et en  $\frac{1}{r}$  pour la NFPA 68 permet alors d'avoir une estimation des zones de surpression.

Néanmoins si les formules et les méthodes de calcul sont très semblables les domaines d'application ne sont pas les mêmes.

La norme EN 14491, parue en mai 2006, n'est pas fondée sur les mêmes règles de calcul. La formule utilisée pour les effets de pression a pour données d'entrée : l'aire de la surface d'événement et la pression réduite d'explosion. La loi de décroissance est en  $(\frac{1}{r})^{1,35}$ .

Les domaines de validité donnés dans les deux guides VDI 3673 et NFPA 68 et dans la norme EN14491 sont repris dans le tableau ci-après<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> L'IRSN précise que les normes VDI 3673 et NFPA 68 utilisent une formule de calcul issue d'essais d'explosions de poussières, réalisés dans des enceintes vides cubiques ayant des volumes compris entre 0,3m<sup>3</sup> et 250m<sup>3</sup>, alors que la norme NF EN 14491 reprend une formule de calcul fondée sur des essais réalisés par l'armée norvégienne et destinés à évaluer les distances de sécurité autour de casemates d'explosifs. **La formule de la norme NF EN 14491 ne prend pas en compte l'éventualité d'une explosion secondaire de poussières à l'extérieur de l'enceinte, contrairement à la norme VDI 673.**



Références des normes		VDI 3673	NFPA 68 (éd. 2007)	EN14491
Caractéristiques des poussières	$P_{max}$ (bar)	[0 ; 9]	[0 ; 9]	[0 ; 9]
	$K_{St}$ (bar.m.s <sup>-1</sup> )	[0 ; 200]	[0 ; 200]	[0 ; 200]
Caractéristiques des enceintes.	$V$ (m <sup>3</sup> )	[0 ; 250]	[0.3 ; 10000]	[0 ; 250]
	$P_{red,max}$ (bar)	[0,1 ; 1]	[0,1 ; 1]	[0,1 ; 1]
	$P_{stat}$ (bar)	[0 ; 0,1]	[0 ; 0,1]	[0 ; 0,1]
	$L/D$	[1 ; 2]	≤ 6	[1 ; 2]
Résultats.	Longueur de flamme $L_F$ .	Même formule de calcul que la norme EN 14 491.	$L_F = 8 * (V/n)^{1/3}$ Dans le cas de poussières agricoles, avec n = nombre d'événements.	Décharge horizontale : $L_F = 10 * V^{1/3}$ Décharge verticale : $L_F = 8 * V^{1/3}$
	Distance de surpression maximale ( $P_{max}$ )	$\frac{L_F}{4}$	$\frac{L_F}{5}$	
	Loi de décroissance.	en $\frac{1}{r^2}$	en $\frac{1}{r}$	en $(\frac{1}{r})^{1,35^{16}}$

Tableau 2. Synthèse des domaines d'application des normes VDI 3673, NFPA 68 et EN 14491 pour les distances d'effets suite à une explosion

Il convient de noter que les domaines de validité des normes citées dans ce tableau diffèrent des domaines mentionnés dans le tableau « Synthèse des domaines d'application des normes d'événements pour les explosions de poussières » du chapitre 2.8.1 : il s'agit en effet dans un cas des domaines d'application des formules de calculs permettant d'évaluer les effets des surpressions (tableau ci-dessus) et dans l'autre cas (tableau du chapitre 2.8.1) des domaines d'application des formules de calculs permettant de dimensionner les surfaces d'événements. Les normes citées permettent en effet d'une part de calculer des effets de surpression, et d'autre part de dimensionner des surfaces d'événements.

<sup>16</sup> Le chiffre 1,35 dépend de l'angle relativement à la surface d'événement.

### 3. Les méthodes associant un calcul de Brode pour l'énergie et un indice multi-énergie pour les effets de pression.

Ces méthodes reposent :

- sur l'équation de Brode pour déterminer l'énergie disponible d'explosion ;
- sur la méthode multi-énergie pour évaluer l'atténuation des effets de pression.

Cette démarche a l'avantage de définir l'énergie « disponible » par rapport aux spécificités du contenant (pression de rupture et volume).

S'agissant du choix de l'indice, bien qu'il puisse être majorant, seul l'indice 10 semble adapté puisqu'on a affaire à un phénomène d'éclatement et de propagation d'onde de choc. Les indices inférieurs correspondent à des explosions de gaz à l'air libre en milieu encombré.

#### *Cas des silos plats :*

Dans le cas des silos plats de type hangar (partie stockage), la formule de calcul proposée ci-dessous n'est pas adaptée.

En effet, dans de grands volumes, il y a lieu de considérer l'interaction front de pression/structure qui libère des surfaces ouvertes en coïncidence avec la propagation de l'onde de choc et diminue le niveau de pression.

Les modélisations effectuées donnent des effets à 140 et 50 mbars en général compris dans le champ proche du silo et notamment dans les zones forfaitaires réglementaires. Il en va de même dans le cas des modélisations d'incendie dans la partie stockage du silo.

Néanmoins pour les silos plats disposant d'une tour de manutention et/ou d'une galerie de reprise et en l'absence de découplage, il convient bien sûr de s'intéresser aux phénomènes de propagation possibles dans ces volumes.

**Pour les silos verticaux**, l'application de cette méthode se déroule en deux étapes.

#### **Etape 1 : Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières**

La détermination de l'énergie de l'explosion de poussières s'effectue à partir de l'équation de Brode simplifiée (en Joules)<sup>17</sup> :

$$E = 3 * V * (P_{ex} - P_{atmosphérique})$$

Avec :

- V : volume de l'enceinte considérée en m<sup>3</sup>
- $P_{ex} - P_{atmosphérique}$  = Pression relative de l'explosion **en Pa**,
- $P_{ex}$  : pression absolue de l'explosion.

Dans une approche dimensionnante, on retiendra comme pression relative  $P_{ex} - P_{atm}$  de l'explosion :

- dans le cas d'une explosion **primaire** :

---

<sup>17</sup> Il est à noter que d'autres auteurs ont proposé des corrélations plus récentes pour déterminer l'énergie libérée en cas d'éclatement : Prugh, Boudreaux, Admaczyk, Aslanov et Golinskii, Baum, etc.

Si le volume est correctement éventé :  $P_{ex} - P_{atm} = P_{redmax}$  (la pression d'explosion réduite utilisée pour calculer la surface d'évent<sup>18</sup>).

Si le volume est non éventé :  $P_{ex} - P_{atm} = 2 * P_{rupture}$  (où  $P_{rupture}$  est la pression statique de rupture de l'enceinte).<sup>19</sup>

- 5 bars dans le cas d'une explosion **secondaire**. Cette valeur est prise sur la base du retour d'expérience.

Afin de déterminer  $P_{ex}$ , on fournit dans le Tableau 3 des ordres de grandeurs de la résistance des éléments en fonction de leur constitution.

Nature de la paroi	Surpression de ruine (statique) Prupture
Tour de manutention en béton	100 à 300 mbar
Tour de manutention en bardage métallique ou en fibrociment	15 à 100 mbar
Tour de manutention en palplanches (tôles résistantes, type profils Omega)	300 à 1000 mbar
Cellules en béton : parois	150 à 1000 mbar
Cellules en béton : toits	100 à 400 mbar
Cellule métalliques : parois	300 à 1000 mbar
Cellules métalliques : toits	100 à 200 mbar
Galeries sur-cellules en béton	100 mbar
Briques	100 à 300 mbar
Tuiles	5 mbar
Verre simple/armé	3 à 25 mbar
Plaque polyester transparente (fixations crochets)	10 mbar
Polycarbonate avec des fixations crochets	10 mbar
Plaque amiante-ciment (fixations crochets)	10 à 100 mbar

Tableau 3: Ordre de grandeurs de la résistance des matériaux

Le tableau précédent a été réalisé à partir d'une synthèse des informations reportées dans plusieurs références (Lannoy, 1984, Clancy, 1972, INRS, 1994, BIT, 1993), dans le document « Etude du comportement d'éléments de silos à grains soumis à une onde de pression interne » réalisé par GIAT Industries (décembre 2004) et dans diverses analyses d'accidents (Lechaudel et al., 1995, Michaélis et al., 1995).

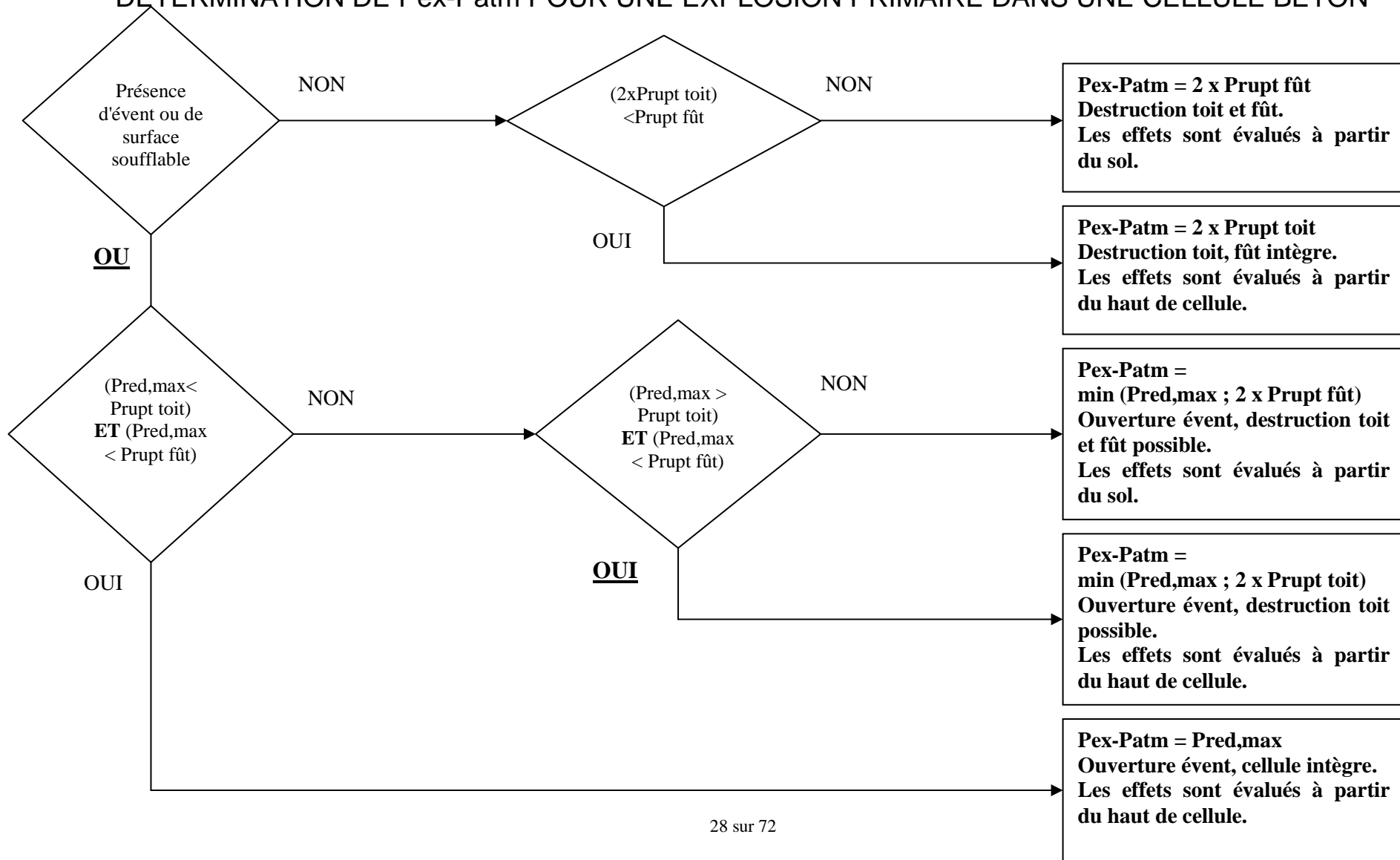
#### **Principes à retenir pour l'évaluation des distances d'effets :**

Lors de l'évaluation des zones d'effets d'une explosion primaire en cellule béton, il convient de regarder dans un premier temps si le fût de la cellule va résister à la surpression :

<sup>18</sup> Cette notion est définie dans la partie relative à l'article 10 (paragraphe 2.8.2).

<sup>19</sup> 2 constitue un coefficient d'amplification dynamique pour prendre en compte le développement de l'explosion.

## DETERMINATION DE Pex-Patm POUR UNE EXPLOSION PRIMAIRE DANS UNE CELLULE BETON



Dans une première approche, une méthode globale simple de détermination de la résistance peut être réalisée de la façon suivante :

$$P_{\text{rupture}} = \frac{\text{Résistance en traction} \times \text{épaisseur de la structure}}{\text{Rayon de la cellule}}$$

avec Résistance en traction pour du béton prise égale à environ 2 MPa.

$$P_{\text{rupture}} = 20 \cdot E/R \text{ (en bar)}$$

Cette méthode ne prend néanmoins pas en compte l'effet de flexion de la structure, ni le vieillissement de la structure. Elle est donnée à titre indicatif, et doit être adaptée ou utilisée au cas par cas (d'autres méthodes sont possibles).

En cas d'explosion primaire dans l'as de carreau, si l'as de carreau n'est pas suffisamment éventé relativement aux normes, cela peut provoquer une explosion secondaire dans les cellules voisines.

## **Étape 2 : Détermination des distances des effets de surpression**

L'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif à « l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation » définit les valeurs de référence suivantes relatives aux seuils d'effets de surpression :

- 300 mbar : seuil des dégâts très graves sur les structures ;
- 200 mbar : seuil des effets létaux significatifs délimitant la zone des dangers très graves pour la vie humaine et seuil des effets dominos sur les structures ;
- 140 mbar : seuil des effets létaux délimitant la zone des dangers graves pour la vie humaine et seuil des dégâts graves sur les structures ;
- 50 mbar : seuil des effets irréversibles délimitant la zone des dangers significatifs pour la vie humaine et seuil des dégâts légers sur les structures ;
- 20 mbar : seuil des effets délimitant la zone des effets indirects par bris de vitres sur l'homme et seuil des destructions significatives de vitres.

La détermination des distances des effets de surpression s'effectue en appliquant la méthode multi-énergie indice 10, qui peut être majorante dans certains cas. Cette formule, respectant la physique du phénomène, donne les surpressions d'une onde de choc résultant d'un éclatement, en fonction de l'énergie d'explosion définie à l'étape 1.

Le tableau suivant donne les formules associées aux effets de surpression :

Valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression	Distance des effets de surpression suivant la méthode multi-énergie indice 10.
300 mbars	$0,028 E^{1/3}$
200 mbars	$0,032 E^{1/3}$
140 mbars	$0,05 E^{1/3}$
50 mbars	$0,11 E^{1/3}$

Tableau 4 : Distance des effets de surpression suivant la méthode multi-énergie indice 10

Comme indiqué par l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005, compte-tenu des dispersions de modélisations pour les faibles surpressions, la distance correspondant au seuil à 20 mbars peut être prise comme égale au double de la distance à 50 mbars.

Les éléments donnés ci-avant sur le calcul des effets d'une explosion de poussières ne constituent tout au plus que des ordres de grandeur. Cependant, ils peuvent être suffisants dans bon nombre de cas.

En conclusion, le choix de la méthode peut s'effectuer selon les critères suivants :

- Les méthodes s'appuyant sur les normes citées précédemment (VDI 3673, NFPA 68 ou EN 14491) dans le cas d'explosion primaire pour les volumes entrant dans le champ d'application de ces normes.
- Les méthodes associant un calcul de Brode pour l'énergie et un indice multi-énergie 10 pour les effets de pression dans le cas d'explosion primaire pour les volumes n'entrant pas dans le champ d'application des normes, le cas des explosions secondaires voire dans le cas précédent.

En synthèse à cette partie, on trouve dans le tableau ci-dessous les méthodes de détermination des effets de pression en fonction des situations étudiées<sup>20</sup>.

Type de scénario	Types de configuration	Méthodes
Explosion primaire	Conséquences d'une explosion dans un volume où débiterait une explosion	<p>Méthodes s'appuyant sur des normes de dimensionnement d'événements (VDI 3673, NFPA 68 ou EN 14491) pour les volumes entrant dans le champ d'application des normes.</p> <p>Méthodes associant un calcul de Brode pour l'énergie et un indice multi-énergie 10 pour 10 bars max (ou l'abaque TM5-1300) pour les volumes n'entrant pas dans le champ d'application des normes</p> <p>Cas d'un volume :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- correctement éventé contre les risques d'explosion  <math>P_{ex} - P_{atm} =</math> pression d'explosion réduite utilisée pour calculer la surface d'évent</li> <li>- non éventé  <math>P_{ex} - P_{atm} = 2 * \text{pression statique de rupture de l'enceinte}</math></li> </ul>
Propagation d'explosion	Volume non correctement découplé contre les risques d'explosion	Méthodes associant un calcul de Brode pour l'énergie et un indice multi-énergie, avec : $P_{ex} - P_{atm} = 5 \text{ bars}$

Tableau 5 : Questions à se poser lors du calcul d'effets sur l'environnement.

Des outils de modélisations représentatifs des phénomènes mis en jeu peuvent être utilisés afin d'affiner les résultats donnés par les différentes formules de calculs en fonction des enjeux liés à la maîtrise de l'urbanisation.

<sup>20</sup> Les valeurs utilisées sont données à titre indicatif et souvent issues du retour d'expérience ; il s'agit d'être vigilant quant à leur utilisation dans les études de dangers.

### Exemple d'application

Dans le cas d'un silo interconnecté disposant de cellule d'un volume de 2100 m<sup>3</sup>, l'application de la formule est la suivante.

#### Etape 1 : Détermination de l'énergie de l'explosion de poussières

L'énergie est déterminée pour une cellule de stockage. En effet, le retour d'expérience indique que les distances d'effets maximum sont obtenues après des propagations successives d'explosion qui débouchent dans les cellules.

$$E = 3 * V * (P_{ex} - P_{atmosphérique})$$

NB : **la formule s'exprime en Pascal (Pa)**. Pour mémoire, approximativement 100 Pa = 1 mbar (ou 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa)<sup>21</sup>.

Parois des cellules béton : 150 à 1000 mbar	} Parois : 600 mbar
Toits des cellules béton : 100 à 400 mbar	

Avec V = 2100 m<sup>3</sup>, en prenant en compte une pression de rupture du toit de cellule à égale à 2\*200 mbar (c'est-à-dire avec l'hypothèse : fût de cellule résistant, l'explosion a lieu en haut de cellule) :

$$E = 3 * V * (P_{ex} - P_{atmosphérique}) \quad \text{avec } (P_{ex} - P_{atmosphérique}) = 2 * P_{rupture} = 2 * 0,4 * 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Rightarrow E = 5,04 * 10^8 \text{ J}$$

#### Etape 2 : Détermination des distances des effets de surpression (en partie haute de cellule)

Distance d'effets à 20 mbar = 176 m  
 Distance d'effets à 50 mbar = 0,11E<sup>1/3</sup> = 88 m  
 Distance d'effets à 140 mbar = 0,05E<sup>1/3</sup> = 40 m  
 Distance d'effets à 200 mbar = 0,032E<sup>1/3</sup> = 25 m  
 Distance d'effets à 300 mbar = 0,028E<sup>1/3</sup> = 22 m

Le tableau ci-dessous reprend ces résultats et donne pour le même volume les distances obtenues pour le volume non éventé non découplé (explosion secondaire), pour le volume découplé non éventé (selon que le fût de cellule résiste ou non : explosion du toit de cellule ou des parois de cellule) et pour le volume découplé et éventé (pour une Pred de 200 mbars). Etant donné l'imprécision des résultats les distances ont été arrondies.

	<b>Explosion secondaire</b>	<b>Explosion en cas de fût de cellule résistant</b>	<b>Explosion en cas de fût de cellule non résistant</b>	<b>Explosion en volume éventé</b>
<b>Surpression P<sub>ex</sub> - P<sub>atm</sub> considérée</b>	5 bars ou 5*10 <sup>5</sup> Pa	2*P <sub>rupture</sub> = 2*0,4*10 <sup>5</sup> Pa (rupture du haut de cellule)	2*P <sub>rupture</sub> = 2*0,6*10 <sup>5</sup> Pa (rupture des parois de cellule, en pied)	200 mbars ou 0,210 <sup>5</sup>
<b>Energie</b>	3,15*10 <sup>9</sup> J	5,04*10 <sup>8</sup> J	7,56*10 <sup>8</sup> J	1,26*10 <sup>8</sup> J
<b>Distance d'effet à 20 mbars</b>	322 m	176 m	200 m	110 m
<b>A 50 mbars</b>	161 m	88 m	100 m	55 m
<b>A 140 mbars</b>	73 m	40 m	46 m	25 m
<b>A 200 mbars</b>	47 m	25 m	29 m	16 m
<b>A 300 mbars</b>	41 m	22 m	26 m	Non atteint

<sup>21</sup> Il est rappelé que 1 bar = 1 013 h Pa.

Tableau 6. Application de la méthode proposée.

**Nota :** Certaines méthodes de modélisation (et notamment celle décrite précédemment) considèrent, lors d'une explosion de cellule, que l'onde de surpression est de forme sphérique centrée sur le toit de la cellule. Les effets au sol sont alors évalués en retranchant la hauteur des cellules à la distance d'effets calculée en tête. Il convient de souligner que ce raisonnement ne peut être accepté que s'il est démontré que le fût de la cellule résistera à l'onde de surpression partant du toit (si le fût résiste, il canalise en effet l'explosion vers le haut). Si la distance effet < hauteur de la cellule, distance d'effet en pied de cellule = 0 m, sinon distance d'effet en pied de cellule =  $\sqrt{\text{distance effet}^2 - \text{hauteur cellule}^2}$ . Si le fût de la cellule n'est pas suffisamment résistant, il conviendra de considérer une explosion se produisant au niveau du sol (cas majorant), avec toujours une onde de surpression de forme sphérique.

Bien sûr, le raisonnement doit être adapté pour les cas de silos implantés à proximité de tiers situés en hauteur (immeubles, etc.).

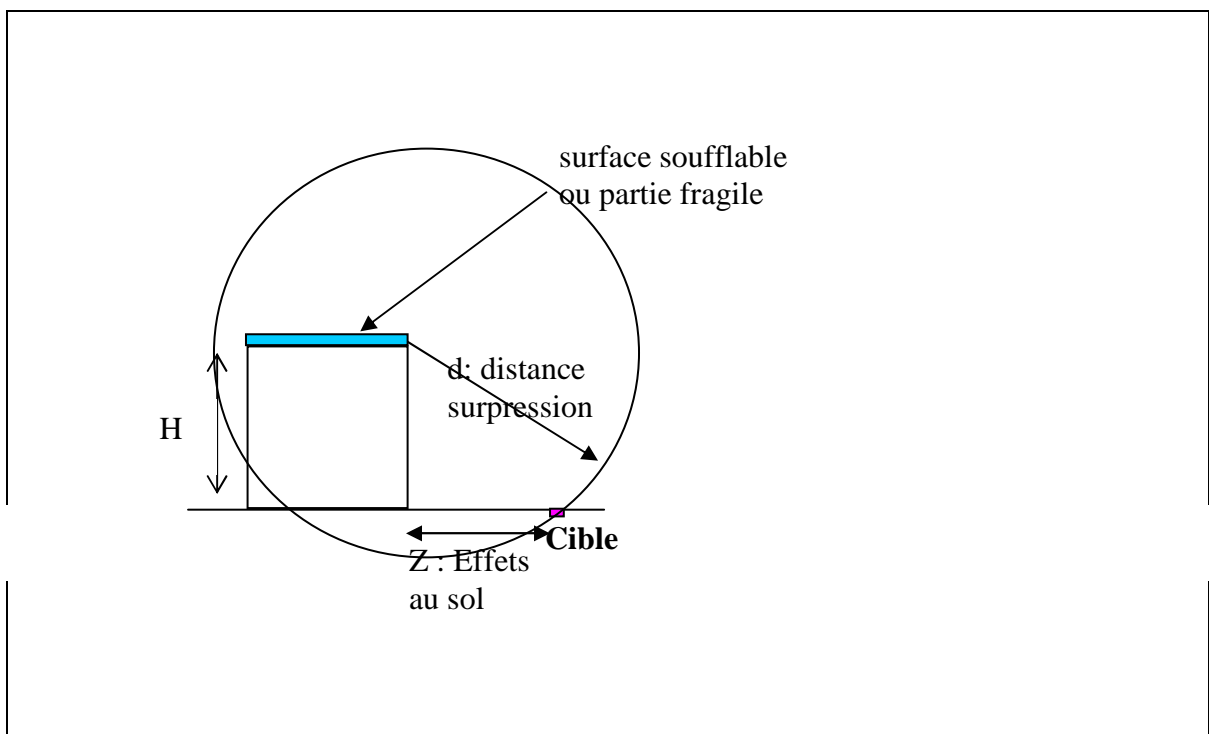


Figure 9. Calcul des distances d'effets

**Exemple d'application :** d'après le théorème de Pythagore : si  $d > H$  alors :

$$d^2 = H^2 + (Z)^2 \text{ d'où } Z = \sqrt{d^2 - H^2}$$

Pour les exemples précédents avec  $H = 30 \text{ m}$  :

- pour l'explosion en cas de fût de cellule résistant :  $d_{140 \text{ mbar}} = 40 \text{ m}$  et  $d_{50 \text{ mbar}} = 88 \text{ m}$  donc en appliquant la formule ci-dessus  $Z_{140 \text{ mbar}} = 26 \text{ m}$  et  $Z_{50 \text{ mbar}} = 83 \text{ m}$
- pour l'explosion en volume éventé :  $d_{140 \text{ mbar}} = 25 \text{ m}$  et  $d_{50 \text{ mbar}} = 55 \text{ m}$  donc en appliquant la formule ci-dessus  $Z_{140 \text{ mbar}} = 0 \text{ m}$  et  $Z_{50 \text{ mbar}} = 46 \text{ m}$



b. De l'ensevelissement sous le produit

Dans la mesure où l'on ne peut pas a priori déterminer les modalités d'éventration d'une cellule, seul un calcul permettant d'accéder à un ordre de grandeur de cette distance peut être envisagé.

A cette fin, on pose **les hypothèses simplificatrices** suivantes :

- 1) Le problème posé est monodirectionnel, c'est-à-dire que l'on assimile la paroi longitudinale au silo au plan debout tangent extérieurement à l'ensemble des cylindres alignés qui forment les cellules.
- 2) Les cellules sont supposées pleines à ras bord de grain.
- 3) Les quantités de grain que l'explosion pourrait éparpiller dans l'atmosphère sont négligées. En d'autres termes, tout le grain contenu dans la cellule est supposé disponible pour ensevelir personnes et biens au voisinage immédiat du silo.
- 4) Principe de conservation des surfaces.

Cette approche est un calcul approximatif qui mérite d'être approfondi et affiné dans les cas qui l'exigent.

Dans ces conditions, il y a lieu de tenir compte de l'angle de talutage naturel du grain, et le problème se ramène à calculer la distance  $d_E$  qui est le pied d'un triangle rectangle dont la section est égale à celle de la section transversale de la cellule, conformément au schéma suivant.

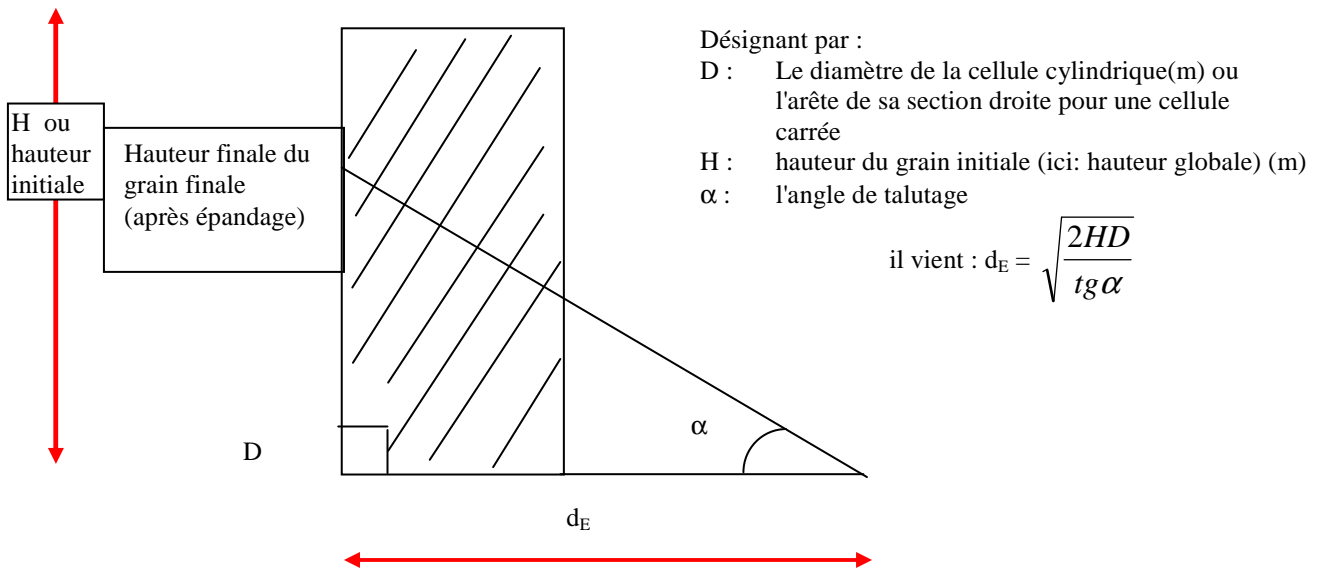


Figure 10: Distance d'ensevelissement sous le produit

La formule de calcul suivante :  $\tan\alpha = H/d_E$  (avec  $d_E$  : distance/pied du tas) s'applique au cas des silos plats : lorsque les tas de produits dépassent des parois des cases de stockage, les produits peuvent, en cas de rupture de parois, s'épandre à l'extérieur du silo. L'angle de talutage du produit est de l'ordre de 25° pour les céréales et de 30° pour le sucre.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs disponibles dans la littérature pour différents produits.

Produit	Angle indicatif de talutage (en degrés)
Blé	22-26
Maïs	21-24
Orge	27
Farine	20

Sucre	30-33
-------	-------

*Tableau 7. Angle de talutage pour différents produits.*

Ces valeurs sont tirées de différentes sources : INTBTP (1975), Lumbroso (1970), Reimbert (1959).

Le retour l'expérience montre que cet angle peut varier dans certains cas.

### **Vieillessement des structures**

D'expérience, des signes de vieillissement des structures peuvent en premier lieu affecter l'aspect extérieur des différents pignons, façades ou parties exposées à la vue, sous forme d'éclatements, épaufrures au voisinage d'armatures non suffisamment enrobées. Selon les cas, ces armatures sont susceptibles d'être plus ou moins corrodées, la rouille y étant soit superficielle, soit installée depuis plus longtemps et pouvant présenter, en surface, des écailles d'un certain volume.

Sans traitement adapté visant à stopper la progression du phénomène, la corrosion irait croissant, en affectant d'une part la solidité de l'armature et d'autre part, en accélérant le processus de ruine, la rouille contribuant à dénuder des parties croissantes d'armatures en faisant éclater l'enrobage sur des surfaces de plus en plus grandes.

Les signes de détérioration peuvent également se manifester sous la forme de désordres amenant, le cas échéant, à l'apparition de jours ou de lézardes dans divers éléments de la structure.

Dans le cas particulier des silos métalliques, une attention particulière doit être portée aux joints et aux déformations qui peuvent altérer la résistance des matériaux.

Ces deux types de désordre amènent bien souvent à des actions correctives.

En terme de prévention, une surveillance a minima visuelle des structures des silos (quel que soit le type : vertical, plat, en béton, métallique...) est à préconiser, à une fréquence adaptée à l'âge et à la configuration des silos. Un enregistrement de ces opérations de contrôle doit être réalisé par l'exploitant.

Une attention particulière doit être portée aux silos verticaux : une surveillance a minima visuelle à une fréquence adaptée (annuelle dans le cas des silos les plus anciens) est nécessaire. Il peut également être possible, selon l'âge des silos, leur configuration, leur structure, ou selon leur environnement proche, etc., de réaliser à une fréquence inférieure (de quelques années à 10 ans) des contrôles techniques plus poussés (pachométrie pour obtenir la position des armatures du béton...). En cas de doute (détection de fissures), ces examens de structure sont nécessaires.

Dans le cas des silos de sucre, la surveillance de l'état des structures est généralement réalisée dans le cadre des exigences liées à la sécurité sanitaire des aliments ; les professionnels du secteur préconisent en effet, pour les stockages en silos, un contrôle au moins annuel de l'état des parois des trémies et un contrôle de l'état des parois des silos une fois tous les deux ans ou après déstockage complet.

### c. Des effets de flamme

Le flux thermique dégagé par une explosion de poussières est intense. Malgré une vitesse de propagation de la flamme élevée et donc un temps d'exposition réduit, les effets sont susceptibles d'entraîner la mort des personnes qui se trouvent sur le trajet de la flamme (la position des événements doit donc être optimisée par rapport aux trajets de déplacements des personnels et des équipements de sécurité ou des installations susceptibles de créer des effets domino).

#### d. Des projections de débris

En ce qui concerne les projectiles, la prédiction de leur taille et de leur poids est difficile et nécessite des calculs sophistiqués.

La circulaire du 24 juillet 2007 relative à la prise en compte des effets de projection dans les études de dangers des installations classées puis dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Technologiques précise ainsi : *« seuls les effets dominos générés par les fragments sur des installations et équipements proches ont vocation à être pris en compte dans les études de dangers. »*

L'arrêté ministériel du 29 septembre 2005, relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation, mentionne aussi la disposition suivante : *« compte-tenu des connaissances limitées en matière de détermination et de modélisation des effets de projection, l'évaluation des effets de projection d'un phénomène dangereux nécessite, le cas échéant, une analyse au cas par cas, justifiée par l'exploitant. Pour la délimitation des zones d'effets sur l'homme ou sur les structures des installations classées, il n'existe pas à l'heure actuelle de valeur de référence. Aussi, cette délimitation s'appuie sur une analyse au cas par cas comme mentionné au premier alinéa ».*

Ainsi, une évaluation, au moins qualitative, basée sur des études bibliographiques notamment, ou sur le retour d'expérience fourni par l'accidentologie, pourra être nécessaire dans le cas d'installations situées dans un environnement vulnérable (présence de tiers fixes à proximité, notamment dans les périmètres forfaitaires réglementaires de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié ou de l'arrêté préfectoral d'autorisation d'exploiter de l'établissement, ou dans les zones d'effets de surpression évaluées par l'étude de dangers). En tout état de cause, il revient à l'exploitant d'estimer la criticité des phénomènes dangereux susceptibles de conduire à des effets de projections portant atteinte à des tiers, et à définir le cas échéant, puis à mettre en œuvre, l'ensemble des mesures nécessaires à la protection des intérêts visés à l'article L. 511-1 du Code de l'Environnement.

Un ordre de grandeur des effets possibles peut néanmoins être trouvé dans le guide de l'INERIS intitulé « Notice de lecture des études de dangers de stockage de produits agro-alimentaires » daté de février 2001 : ce guide présente en effet, notamment dans son annexe A, les résultats en termes d'effets de surpressions et de projections de plusieurs modélisations d'explosions réalisées dans différentes configurations d'installations.

## 2.2. ARTICLES 3 ET 4 : L'ORGANISATION ET LA FORMATION DE L'ENTREPRISE POUR PREVENIR LES RISQUES D'ACCIDENTS

### Enoncé des articles

#### **Article 3**

L'exploitation doit se faire sous la surveillance d'une personne nommément désignée par l'exploitant et spécialement formée aux spécificités du silo et aux questions de sécurité.

Le personnel doit recevoir une formation spécifique aux risques particuliers liés à l'activité de l'établissement. Cette formation doit faire l'objet d'un plan formalisé. Elle doit être mise à jour et renouvelée régulièrement.

#### **Article 4**

Les consignes de sécurité et les procédures d'exploitation de l'ensemble des installations comportent explicitement la liste détaillée des contrôles à effectuer en marche normale, à la suite d'un arrêt pour travaux de modification ou d'entretien des installations et à la remise en service de celles-ci en cas d'incident grave ou d'accident. Les consignes de sécurité sont tenues à jour et affichées dans les lieux fréquentés par le personnel. Les procédures d'exploitation sont tenues à jour et mises à la disposition de l'inspection des installations classées.

Dans les zones où il existe un risque d'incendie ou d'explosion, il est interdit de fumer.

La réalisation de travaux susceptibles de créer des points chauds dans ces zones doit faire l'objet d'un permis de feu, délivré et dûment signé par l'exploitant ou par la personne qu'il aura nommément désignée et par le personnel devant exécuter les travaux.

### **Commentaires**

#### Formation

Il convient, en application de cet article, concernant l'organisation et la formation de l'entreprise :

- de définir les rôles et les responsabilités de l'encadrement intermédiaire (chef d'équipe, chef de poste...) et des opérateurs dans le cadre de la prévention des risques d'accident.
- D'organiser la formation spécifique du responsable du site ainsi que du personnel permanent et intérimaire à la prévention du risque d'accident majeur (incendie, explosion de poussières notamment) qui doit être distincte de la formation à la prévention dans le cadre de la sécurité et santé au travail<sup>22</sup>.
- De former le personnel (personnel intérimaire, saisonnier, salarié ou encore sous-traitant : tous types de pratiques d'externalisation) aux situations d'urgence. Ce personnel doit aussi pouvoir bénéficier d'exercices et de tests.

Les opérations de maintenance ainsi que les procédures liées aux fonctionnements transitoires, aux marches dégradées et au redémarrage doivent, faire l'objet de procédures écrites et d'enregistrement.

L'exploitant peut s'engager dans une **démarche volontaire** de mise en place d'un Système de Management de la Sécurité en mettant en œuvre une approche structurée et basée sur des référentiels existants.

---

<sup>22</sup> En effet, pour mémoire, l'intervention d'entreprises extérieures est réglementée par ailleurs par le Code du Travail: le décret n°92-158 du 20 février 1992 fixe des prescriptions particulières d'Hygiène et de Sécurité applicables aux travaux effectués dans un établissement par une entreprise extérieure (circulaire DRT 93-14 du 18/03/93 et 96-5 du 10/04/96) ; l'arrêté du 19 mars 1993 fixe la liste des travaux dangereux pour lesquels il est établi un Plan de Prévention ; l'arrêté du 26 avril 1996 aborde les règles de sécurité applicables aux opérations de chargement et de déchargement effectuées par une entreprise extérieure. Enfin, en matière de Santé – Sécurité au Travail (formation, consignes, signalisation), l'arrêté du 4 novembre 1993 et l'arrêté du 8 juillet 2003 fixent des obligations de l'employeur envers les salariés.

Dans le cadre de guides de bonnes pratiques, les syndicats professionnels proposent entre autres un programme de formation à mettre en œuvre ainsi que le contenu de diverses procédures.

### **Interdiction de fumer**

L'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié n'impose pas une interdiction de fumer dans l'ensemble de l'établissement, à la condition que les zones dans lesquelles fumer est autorisé soient délimitées, signalées et protégées. L'interdiction de fumer concernerait donc a minima les zones en contact avec les produits stockés ou situées à proximité des stockages, ainsi que les zones contenant des équipements de manutention ou de traitement des produits (zones de chargement et déchargement, tour, galeries, etc.).

Par ailleurs, la législation actuelle interdit de fumer dans l'ensemble des lieux publics depuis le 1<sup>er</sup> février 2007<sup>23</sup>.

### **Plan de prévention avant travaux, permis de feu**

Dans le cas d'intervention sur des dispositifs de sécurité, l'exploitant s'assure :

- préalablement aux travaux, que ceux-ci, combinés aux mesures palliatives prévues, n'affectent pas la sécurité des installations,
- à l'issue des travaux, que la fonction de sécurité assurée par lesdits éléments est intégralement restaurée.
- pour toute intervention d'un prestataire extérieur, aussi petite et courante soit-elle, il est nécessaire d'élaborer un plan de prévention.

La réalisation de travaux susceptibles de créer des points chauds doit faire l'objet d'un permis de feu, délivré et dûment signé par l'exploitant ou par la personne qu'il aura nommément désignée et par le personnel devant exécuter les travaux.

Une consigne relative à la sécurité des travaux par points chauds est établie et respectée ; elle précise notamment les dispositions qui sont prises avant, pendant et après l'intervention. Le permis de feu est délivré après avoir soigneusement inspecté le lieu où se dérouleront les travaux, ainsi que l'environnement immédiat.

Le permis de feu est établi pour une unité de temps, de lieu et de tâche. En particulier, le permis de feu ne doit pas dépasser la demi-journée pour une tâche donnée et un lieu donné lorsque le site est en exploitation ; une journée lors d'un arrêt total et enfin une semaine peut être envisagée s'il y a arrêt total d'exploitation, stockage vide et zone sécurisée (nettoyage complet). Le permis de feu doit être renouvelé aussi souvent que nécessaire.

Il est recommandé que le personnel du site assure un suivi, tout au long des travaux, des opérateurs extérieurs qui interviennent.

Le permis rappelle notamment :

- les motivations ayant conduit à la délivrance du permis de feu (notamment la désignation du travail à exécuter) ;
- la durée de validité et les services concernés (demandeur, sécurité, exécutant, entretien) ;
- l'alerte en cas d'incendie et/ou accident et la vérification finale (ronde effectuée 2h après la fin des travaux par exemple) ;
- la nature des dangers ;
- le type de matériel pouvant être utilisé ;
- les mesures de prévention à prendre : arrêt total de l'ensemble des moyens de manutention et d'aspiration, zones dans lesquelles ont lieu les travaux définies et signalées par l'exploitant

---

<sup>23</sup> En matière de protection des travailleurs, une instruction du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, prise en application du décret n° 2006-1386 du 15 novembre 2006, stipule les conditions de l'interdiction de fumer au sein des établissements agricoles : note de service de la DGFAR/SDTE/N2006-5032, en date du 26 décembre 2006.

entièrement dépoussiérées dans un rayon suffisant ou à défaut dans un rayon de 10 mètres dans toutes les directions, bâches ignifugées réparties à proximité de la zone de travail, surveillance mise en place après la fin des travaux suivant une fréquence et une durée fixées par l'exploitant, surveillance des conductions de chaleur possibles, etc.

- les moyens de protection mis à la disposition du personnel effectuant les travaux, par exemple au minimum la proximité d'un extincteur adapté au risque, les moyens d'alerte, un surveillant de sécurité, une ventilation forcée, des écrans, bâches, protection de voisinage, ainsi qu'un contrôle d'atmosphère.

Le BARPI a rédigé avec COOP de France-Métiers du Grain un canevas très complet destiné à mener une réflexion, en terme d'analyse des risques, avant de délivrer un permis de feu et disponible sur internet.

A titre d'exemple, voici un extrait de permis de feu, de la partie relative aux moyens de prévention et de protection à prévoir (*source : guide ANMF*) :

Risques particuliers : _____	
_____	
<b>MISE EN SÉCURITÉ</b>	<b>MOYENS DE PROTECTION</b>
<input type="checkbox"/> Protection ou évacuation des produits et poussières inflammables à moins de 15 m du lieu de travail <input type="checkbox"/> Délimitation et signalisation de la zone dangereuse <input type="checkbox"/> Consignation (fermeture de toutes les ouvertures possibles) - séparation des sources d'énergie <input type="checkbox"/> Vidange <input type="checkbox"/> Nettoyage - dégazage <input type="checkbox"/> Isolation totale de tuyauterie <input type="checkbox"/> Démontage de tuyauterie	<input type="checkbox"/> Contrôle d'atmosphère <input type="checkbox"/> Écrans, bâches, protection de voisinage <input type="checkbox"/> Ventilation forcée <input type="checkbox"/> Extincteurs à proximité <input type="checkbox"/> Surveillant de sécurité <input type="checkbox"/> Moyens d'alerte (téléphone) <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

### 2.3. ARTICLE 5 : PRECURSEURS D'ACCIDENTS

#### Enoncé de l'article

L'exploitant d'un silo est tenu de déclarer dans les meilleurs délais à l'inspection des installations classées les accidents ou incidents (incendies, explosions...) survenus du fait du fonctionnement de cette installation, qui sont de nature à porter atteinte aux intérêts mentionnés à l'article L 511-1 du code de l'environnement. Tout événement susceptible de constituer un précurseur d'explosion, d'incendie doit notamment être signalé dans un registre tenu à la disposition de l'inspection des installations classées.

L'exploitant réalise annuellement une analyse des causes possibles de ces événements afin de prévenir l'apparition de tels accidents. Cette analyse est tenue à la disposition de l'inspection des installations classées.

Les événements précurseurs d'incendie et d'explosion peuvent être identifiés à partir de l'étude de dangers :

- à chaque fois qu'une mesure de sécurité associée à un des phénomènes dangereux ne remplit pas ou remplit partiellement sa fonction (défaillance d'une mesure de sécurité en prévention ou en protection) ;
- à chaque fois qu'une séquence accidentelle non définie dans l'étude de dangers se produit et qu'une analyse rétrospective montre qu'elle aurait pu conduire à un phénomène dangereux ;
- plus généralement, il faut signaler toutes les dérives détectées sur le site en matière de gestion de la sécurité (organisation comprise).

Exemples d'évènements précurseurs d'accident à inscrire dans le registre:

- dysfonctionnement de l'asservissement entre manutention et aspiration (au démarrage de la manutention ou à l'arrêt de l'aspiration) ;
- apparition d'une source d'inflammation potentielle sur un équipement : par exemple échauffement dû à un déport de bande non détecté ;
- non respect des conditions prévues par un permis de feu ou intervention par point chaud sans permis de feu ;
- explosion ou départ de feu en pied d'élévateur sans propagation ni conséquence ;
- intervention ayant entraîné un départ de feu ;
- échauffement sur un matériel électrique ou mécanique à une température supérieure aux paramètres pris en compte pour déterminer l'adéquation du matériel dans une zone potentiellement à atmosphère explosive ;
- dépassement de la consigne sur un auto-échauffement non maîtrisé avant transition vers l'auto-inflammation [dans le cas d'une cellule inférieure à la taille critique, mais également dans le cas d'une cellule supérieure à la taille critique] , etc.

De plus, une fois le recueil et l'enregistrement de ces évènements effectués, la nature et les causes des dysfonctionnements relevés doivent être analysées.

L'analyse des causes des évènements nécessite un recul constructif et doit permettre de remettre en cause la fiabilité des mesures de sécurité ; ainsi, cette étude doit être proportionnée aux enjeux, depuis le simple constat jusqu'à l'enquête accident. La détermination des modalités de traitement, des délais ainsi que de la périodicité des bilans à réaliser incombent à l'exploitant.

Une gestion du retour d'expérience est non seulement composée du recueil des évènements susceptibles de constituer un précurseur d'explosion, d'incendie, mais aussi de l'identification des causes possibles de ces évènements et enfin, de la mise en place de mesures correctives si des carences en matière de sécurité ont été décelées.

Ce système de retour d'expérience doit ainsi permettre de détecter la vulnérabilité de l'établissement vis-à-vis d'évènements pour lesquels aucune parade n'a été planifiée (notamment dans le cas d'une analyse des risques défailante ou incomplète).

Il est à noter que plusieurs fédérations et organisations professionnelles (COOP de France-Métiers du Grain entre autres) ont mis en place des banques de données sur le retour d'expérience, qui peuvent compléter celle du BARPI.

## **2.4. ARTICLE 6 : PERIMETRE FORFAITAIRE D'ELOIGNEMENT**

### **Enoncé de l'article**

Pour les nouvelles installations, la délivrance de l'autorisation d'exploiter est subordonnée à l'éloignement des capacités de stockage (à l'exception des boisseaux visés à l'article 1er du présent arrêté) et des tours de manutention :

- par rapport aux habitations, aux immeubles occupés par des tiers, aux immeubles de grande hauteur, aux établissements recevant du public, aux voies de communication dont le débit est supérieur à 2 000 véhicules par jour, aux voies ferrées sur lesquelles circulent plus de 30 trains de voyageurs par jour, ainsi qu'aux zones destinées à l'habitation par des documents d'urbanisme opposables aux tiers. Cette distance est alors au moins égale à 1,5 fois la hauteur des capacités de stockage et des tours de manutention sans être inférieure à une distance minimale. Cette distance minimale est de 25 m pour les silos plats et de 50 m pour les silos verticaux.
- par rapport aux voies ferrées sur lesquelles circulent moins de 30 trains de voyageurs par jour et aux voies de communication dont le débit est inférieur à 2 000 véhicules par jour (sauf les voies de desserte de l'établissement). Cette distance est au moins égale à 10 m pour les silos plats et à 25 m pour silos verticaux.

Les dispositions de l'article 6 ne concernent que les installations nouvelles autorisées après la date de publication de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié et les installations existantes faisant l'objet d'une nouvelle autorisation (les installations existantes étant les installations qui bénéficient de l'antériorité ou les installations régulièrement autorisées avant la date de publication de l'arrêté). Ainsi, les installations bénéficiant de l'antériorité ne sont pas concernées par l'application de ces distances d'éloignement forfaitaires.

### ***Conditions de l'antériorité***

On rappelle à ce sujet que la régularité de la mise en service est à examiner en fonction de la date de publication du décret de nomenclature du 30 juillet 1985 qui a créé la rubrique 376<sup>bis</sup> relative aux silos (remplacée le 29 décembre 1993 par la rubrique 2160 de la nomenclature des installations classées). Pour les silos construits et mis en service avant le 30 juillet 1985 et qui n'étaient pas soumis, à cette date, à la loi n°76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées ou à la loi du 19 décembre 1917, ils peuvent bénéficier donc du régime des droits acquis et ne seraient pas soumis aux dispositions de l'article 6 de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié.

On rappelle d'ailleurs que l'article L. 513-1 du Code de l'Environnement exige que les installations, qui après avoir été régulièrement mises en service sont soumises, en vertu d'un décret relatif à la nomenclature des installations classées, à autorisation ou à déclaration, peuvent continuer à fonctionner sans cette autorisation ou déclaration à condition que l'exploitant se fasse connaître du préfet dans l'année suivant la publication du décret de nomenclature (pour les silos, le décret du 30 juillet 1985).

Par ailleurs, après le 31 juillet 1985, toute modification notable de type extension, même antérieure à 1993, devait faire l'objet d'une déclaration au Préfet et le cas échéant, d'une nouvelle demande d'autorisation conformément aux dispositions combinées des articles L. 512-15 du Code de l'Environnement et 20 du décret du 21 septembre 1977. Si cela n'a pas été le cas, alors l'extension est considérée comme une installation nouvelle au regard de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié et doit donc respecter les distances d'éloignement forfaitaires prévues à l'article 6 et l'éloignement des locaux administratifs des capacités de stockage, exigé par l'article 7.

De plus, l'article 17 de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié stipule alors que les bâtiments existants (donc hors extension) doivent mettre en place des dispositions compensatoires appropriées permettant d'assurer la protection des intérêts visés à l'article L. 511-1 du Code de l'Environnement (après une analyse critique et avis du CSIC).

Enfin, les installations, qui, concernées par d'autres rubriques (comme la 2260 ou 376<sup>ter</sup> ou 89), étaient déjà des ICPE soumises à la loi n°76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées ou à la loi du 19 décembre 1917, sont soumises à un régime différent : dans ce cas, toute extension (dont tous les types de stockage) construite après l'entrée en vigueur de l'article R. 512-33 du Code de l'Environnement (ex-article 20 du décret du 21 septembre 1977) devait faire l'objet d'une déclaration en préfecture, pouvant déboucher sur une obligation de dépôt d'une demande d'autorisation d'exploiter (dans le cadre de l'article L. 514-2 du Code de l'Environnement), en tant que nouvelle installation et si celle-ci n'a pas été accordée avant le 30 mars 2004, est considérée comme installation nouvelle au regard de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié.

### ***Hauteurs à prendre en compte***

Afin d'appliquer le périmètre forfaitaire d'éloignement de l'article 6, il faut considérer les distances suivantes, pour un silo vertical ou un silo plat, en distinguant les deux entités 'tour' et 'capacités de stockage' des silos :



- pour une tour de manutention, une distance forfaitaire de  $1,5 \times \text{hauteur de la tour}$ , avec un minimum de 25 mètres autour de la tour si c'est un silo plat et de 50 mètres si le silo est vertical,
- pour les capacités de stockage, une distance de  $1,5 \times \text{hauteur des capacités de stockage}$ , avec un minimum de 25 mètres autour des cellules d'un silo plat, et de 50 mètres autour des cellules d'un silo vertical.

A noter que le calcul  $1,5 \times \text{hauteur}$  n'est pas réalisé en prenant  $1,5 \times \text{hauteur de la tour}$  pour l'ensemble [tour + capacités de stockage] du silo, mais pour chaque entité distincte.

La hauteur  $h$  à prendre en compte dans le calcul est le point le plus haut de la tour ou des capacités de stockage pour les silos verticaux (sauf appendices techniques tels que relais, élévateurs à l'air libre...), et la hauteur au faitage dans le cas des silos plats. En cas de cellules surélevées, il faut considérer la hauteur de la paroi retenant les produits, sans compter la hauteur entre le sol et le bas de cellule (la surélévation). Si les cellules sont à fond conique, il faut considérer la hauteur la plus importante de produit, y compris la partie « conique ».

### ***Notion de tiers***

Pour ce qui est de la notion de tiers, le recueil de textes d'avril 1999 concernant la réglementation sur les silos précisait à la page 21 que la définition de tiers a été établie par une circulaire DPPR/SEI du 16 octobre 1997 (non publiée au JO) :

« Pour l'administration, hormis le conjoint, les enfants de l'exploitant et ses employés logés par ses soins, toute personne étrangère à l'exploitation a la qualité de tiers par rapport à l'installation».

Ainsi, au titre de l'article 6 de l'arrêté du 29 mars 2004 modifié, la maison d'habitation de l'exploitant (en personne) n'est pas considérée comme une habitation occupée par un tiers, même si sa famille y vit également.

En revanche, sont considérés comme des habitations ou des locaux occupés par des tiers :

- l'habitation du gardien ou du chef de silo (s'il n'est pas l'exploitant en personne), dès lors que des personnes extérieures à l'établissement y résident (famille en particulier),
- les établissements industriels exploités par un exploitant différent. »

Par ailleurs, les voies fluviales et chemins de halage ne sont pas compris dans la dénomination « voies de communication » ; ce terme est employé pour qualifier le réseau routier. En effet, le réseau routier étant plus dense que le réseau fluvial, il a été considéré que les voies fluviales pouvaient être écartées de l'article 6, étant a priori moins exposées aux risques que le réseau routier.

Enfin, la présence de personnes extérieures aux silos (pour le cas des voies navigables : pêcheurs, péniches...) n'est pas souhaitable dans les périmètres de dangers du silo. Mais la "traversée" de ces zones ne peut généralement pas être empêchée (chemins de halage, péniches...) ; il convient donc d'éviter le stationnement des personnes, a minima par la mise en place de panneaux d'information. Cette information doit être faite dès lors que l'étude de dangers de l'établissement met en évidence des risques pour les voies navigables, mais elle peut également être réalisée spontanément par l'exploitant d'un établissement situé en bordure de voie.

## **2.5. ARTICLE 7 : ELOIGNEMENT DES LOCAUX ADMINISTRATIFS**

### **Enoncé de l'article**

Tout local administratif doit être éloigné des capacités de stockage et des tours de manutention. Cette distance est d'au moins 10 m pour les silos plats et 25 m pour silos verticaux.

On entend par local administratif, un local où travaille du personnel ne participant pas à la conduite directe de l'installation (secrétaire, commerciaux...).

Les locaux utilisés spécifiquement par le personnel de conduite de l'installation (vestiaires, sanitaires, salles des commandes, poste de conduite, d'agrèage et de pesage...) ne sont pas concernés par le respect des distances minimales fixées au 1<sup>er</sup> alinéa du présent article.

Pour les silos existants et dans le cas où les locaux administratifs ne peuvent être éloignés des capacités de stockage et des tours de manutention pour des raisons de configuration géographique, l'étude de dangers définit de plus les mesures de sécurité complémentaires éventuelles à mettre en œuvre.

Il importe en tout premier lieu de se rappeler dans le jugement que l'on fait de la participation ou non d'un local à la conduite directe des installations, que l'objectif premier est d'éviter la présence permanente de personnes « non indispensables » à proximité des installations (type accident de Blaye).

Au sens de l'article 7 de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié, l'ensemble des locaux associés au circuit des produits (ponts bascule et bureau associé, salles de commande...) n'est pas considéré comme un local administratif.

A l'inverse, **les salles de réunion ou de repos** ne sont pas associées au circuit des produits et constituent donc des locaux administratifs au sens de l'article 7. **Les salles accueillant régulièrement des personnes extérieures à l'exploitation du silo** (commerciaux, réunions de la société...) sont des locaux administratifs mais un bureau accueillant temporairement un chauffeur ou un client (bureau du chef de silo par exemple) pourra être considéré comme participant à la conduite directe des installations.

**Les logements de fonction** ne participent pas à la conduite directe des installations.

**Les ateliers d'entretien et de maintenance** non utilisés par le personnel spécifique de l'établissement, **les aires de lavage, les postes essence** ne participent pas à la conduite directe des installations.

Les zones d'ensachage sont directement associées au circuit des produits et ne sont donc pas des locaux administratifs. Toutefois, compte tenu de l'effectif significatif de travailleurs dans ces zones pour certaines installations, l'exploitant doit veiller à les éloigner le plus possible de la manutention et à les protéger contre les risques d'incendie et d'explosion.

Dans le cadre d'un projet de construction de silos, il convient néanmoins de mettre tout en œuvre pour protéger les tiers tout autant que le personnel travaillant sur le site : il est donc préférable d'éloigner, dans la mesure du possible, les locaux participant à la conduite directe des installations des capacités de stockage. Et dans le cadre de modifications d'installations existantes (construction de cellules supplémentaires, d'un local de commande...), il est bien sûr préférable de ne pas réduire, via le nouveau projet, ces distances d'éloignement.

Cet éloignement minimal peut en effet se justifier par la nécessité de maintenir ce type de locaux (salle de commande très souvent...) en état en cas d'explosion, de manière à pouvoir assurer les manœuvres, notamment de mise en sécurité, sur les installations et équipements.

## 2.6. ARTICLE 8 : ACCES AUX INSTALLATIONS

### Enoncé de l'article

Sans préjudice de réglementations spécifiques, toutes dispositions doivent être prises afin que les personnes non autorisées ou en dehors de toute surveillance ne puissent pas avoir accès aux installations (clôture, panneaux d'interdiction de pénétrer, etc.).

Les dispositifs doivent permettre l'intervention des services d'incendie et de secours et l'évacuation rapide du personnel.

L'objectif de cet article est d'éviter tout accès non autorisé aux installations. La mise en place d'une clôture et la fermeture à clé des installations répondent à cet objectif.

Néanmoins, l'article 8 laisse la possibilité, essentiellement pour les cas problématiques où une clôture ne peut être mise en place (présence d'un canal, d'une voie d'accès, rachat de terrain impossible, ...etc.), de mettre en œuvre des solutions alternatives à la clôture du site. Ces mesures alternatives doivent permettre d'assurer qu'aucun accès à l'intérieur des installations n'est possible en dehors des périodes d'exploitation (fermeture à clé de toutes les installations, détection anti-intrusion, fossé infranchissable, obstacle naturel, etc.).

## 2.7. ARTICLE 9 : PREVENTION DES RISQUES D'EXPLOSION

### Enoncé de l'article

L'exploitant met en place les mesures de prévention adaptées aux silos et aux produits, permettant de limiter la probabilité d'occurrence d'une explosion ou d'un incendie, sans préjudice des dispositions du code du travail. Il assure le maintien dans le temps de leurs performances.

Dans les locaux de l'établissement susceptibles d'être à l'origine d'incendies notamment lorsqu'ils ont été identifiés dans l'étude de dangers, les installations électriques, y compris les canalisations, doivent être conformes aux prescriptions de l'article 422 de la norme NF C 15-100 relative aux locaux à risque d'incendie.

Le silo est efficacement protégé contre les risques liés aux effets de l'électricité statique, des courants vagabonds et de la foudre.

Les appareils et systèmes de protection susceptibles d'être à l'origine d'explosions notamment lorsqu'ils ont été identifiés dans l'étude de dangers, doivent au minimum :

- appartenir aux catégories 1D, 2D ou 3D pour le groupe d'appareils II (la lettre "D" concernant les atmosphères explosives dues à la présence de poussières) telles que définies dans le décret n°96-1010 du 19 novembre 1996, relatif aux appareils et aux systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosible;
- ou disposer d'une étanchéité correspondant à un indice de protection IP 5X minimum (enveloppes «protégées contre les poussières » dans le cas de poussières isolantes, norme NF 60-529), et posséder une température de surface au plus égale au minimum : des 2/3 de la température d'inflammation en nuage, et de la température d'inflammation en couche de 5 mm diminuée de 75°C.

L'exploitant doit tenir à la disposition de l'Inspection des Installations Classées un rapport annuel. Ce rapport est constitué des pièces suivantes :

- l'avis d'un organisme compétent sur les mesures prises pour prévenir les risques liés aux effets de l'électricité statique et des courants vagabonds ;
- l'avis d'un organisme compétent sur la conformité des installations électriques et du matériel utilisé aux dispositions du présent arrêté.

Un suivi formalisé de la prise en compte des conclusions du rapport doit être tenu à la disposition de l'Inspection des installations classées.

Le silo ne doit pas disposer de relais, d'antenne d'émission ou de réception collective sous ses toits, excepté si une étude technique justifie que les équipements mis en place ne sont pas source d'amorçage d'incendie ou de risque d'explosion de poussières. Les conclusions de cette étude doivent être prises en compte dans l'étude préalable relative à la protection contre la foudre.

Sans préjudice des dispositions du Code du Travail énoncées dans **l'annexe D**, l'analyse de risques au titre du Code de l'Environnement doit permettre d'étudier l'ensemble des scénarii et des phénomènes dangereux et ce, quelle que soit la probabilité d'occurrence de ces phénomènes. Ainsi, dès l'instant où des poussières inflammables en suspension peuvent être présentes, dans le cadre d'un mode de fonctionnement normal ou dégradé, à l'arrêt, au démarrage, en phase de travaux, y compris en cas d'accident, cet événement doit être étudié dans l'étude de dangers. Les prescriptions de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié permettent de répondre à un objectif

de prévention contre l'apparition de source d'inflammation, non seulement en phase de fonctionnement normal, mais aussi dans toutes les configurations précitées.

Certaines mesures de sécurité proposées dans le cadre de la protection des travailleurs peuvent néanmoins constituer des mesures de maîtrise des risques d'accidents pouvant avoir des conséquences sur les intérêts visés à l'article L. 511-1 du Code de l'Environnement. Une démonstration est néanmoins nécessaire.

Pour mémoire, sont données ici quelques bonnes pratiques :

- matériels électriques a minima étanches aux poussières et organes mécaniques mobiles protégés contre la pénétration des poussières et convenablement lubrifiés et vérifiés ;
- sources d'éclairages fixes ou mobiles protégées par des enveloppes résistantes au choc et compatibles avec les zones dans lesquelles elles sont employées ;
- état des dispositifs d'entraînement, de rotation et de soutien des élévateurs et des transporteurs et état des organes mécaniques mobiles contrôlés à une fréquence adaptée déterminée par l'exploitant ;
- mise à la terre systématique de tous les équipements principaux ;
- association conducteur / isolant évitée autant que possible ;
- moteurs des extracteurs d'air des cellules de stockage (lorsqu'il y en a) disposant de moteurs à axes déportés, ou fixés de façon résistante (écrous freins...), pour éviter toute chute à l'intérieur des cellules ;
- nettoyage / tri par séparateur magnétique en amont du stockage de façon à éliminer les corps étrangers qui peuvent se trouver dans le produit (cailloux, pièces métalliques...) ;
- qualité anti-statique des manches de filtre et des liaisons non métalliques des transports pneumatiques (plastique, plexiglas....).

En particulier concernant les moteurs d'extracteurs d'air des cellules de stockage, ceux-ci doivent être impérativement répertoriés dans la liste des équipements vérifiés annuellement par l'organisme de contrôle et dépoussiérés régulièrement pour éviter toute chute de poussières enflammées à l'intérieur des silos, voire si possible déplacés et placés à l'extérieur des cellules. En effet, un moteur de ce type a généré un accident grave en juillet 2007 à Mouy (77).

**Important :** la prise de terre des installations électriques doit être connectée à celle de l'installation de protection contre la foudre car la séparation ne peut jamais être garantie en cas de choc de foudre. L'interconnexion doit être connue et maîtrisée. Cette règle est rappelée dans les normes NF C 17-100 (§ 2.4.3), NF C 17-102 (§ 3.2) et le guide UTE C 15-443 (§ 8.3). De plus, la norme NF C 15-100 impose la mise en place d'un parafoudre de type 1 (dit parafoudre d'équipotentialité) pour éviter les dommages des installations électriques en cas de foudroiement.

Enfin, il est nécessaire d'ajouter que **l'interdiction de l'utilisation de lampes baladeuses non ATEX** à l'intérieur des cellules est une mesure de sécurité absolument fondamentale en ce qui concerne la prévention des risques incendie et explosion.

**Recommandations concernant les bandes et les sangles :**

Pour les sangles et bandes, une note de la Commission Européenne donne la possibilité aux fabricants de les certifier en tant que « composant ». Par composant, on entend les pièces qui sont essentielles au fonctionnement sûr des appareils et systèmes de protection mais qui n'ont pas de fonctionnement autonome. En application de la norme EN 13463-5, les courroies de transport ne doivent pas être en mesure de générer une décharge électrostatique capable d'enflammer en cours de fonctionnement et les matériaux utilisés dans la construction ne doivent pas être combustibles et/ou ne pas entretenir ni propager de combustion. Il est à noter que le choix des courroies de transport montées dans un assemblage bénéficiant d'un marquage ATEX conforme à la directive

94/9/CE est de la responsabilité de l'assembleur. De ce fait, les courroies peuvent être d'un type non certifié si l'assembleur le considère ainsi.

En matière de risque électrostatique, comme l'inflammation d'un nuage de poussières combustibles n'est à priori pas envisageable dans les conditions normales d'exploitation en vertu des énergies minimales d'inflammation considérées (ex : EMI > à 10 mJ en l'absence de mécanisme de charge élevé), il n'est pas obligatoire que les courroies soient constituées d'un matériau réputé « antistatique ».

### **Courants vagabonds**

Les courants vagabonds sont constitués de courants électriques non désirés, qui peuvent circuler dans le sol ou dans des structures conductrices d'électricité en contact avec le sol (béton armé, tuyauteries, équipements métalliques...).

Ils sont occasionnés principalement par les retours à travers le sol des courants transportés par ligne à haute tension, des courants de traction des trains, mais aussi des connexions de terre ou de réactions électrochimiques à l'interface eau/métal ou métal/eau (ces courants peuvent causer de graves corrosions aux ouvrages métalliques et en particulier aux conduites en acier, en fonte et en béton armé). Des raccordements défectueux de câblages (boîtes de dérivations brisées ou non étanches...), des défauts d'isolement (gainages perforés par des coups d'arcs ou par des coups de foudre...) ou des appareils défectueux (moteurs électriques mal isolés, brûleurs de chauffage insuffisamment protégés contre les pertes de courant et les inductions...) peuvent être la source de courants se propageant dans les conduites et les structures métalliques.

Il est à noter que les phénomènes dangereux liés à ce type d'événements sont complexes à analyser car ces événements sont temporaires et difficilement prévisibles. Lorsque ces courants sont dus à des problèmes inhérents à l'installation électrique ou à des appareils utilisés en aval du branchement avec le réseau de distribution, le problème peut être résolu en améliorant l'installation, en particulier en remplaçant les câbles abîmés, en faisant vérifier et réparer les appareils présentant des pertes, en installant de nouvelles mises à la terre.

Le respect des règles de l'art en matière d'installations électriques avec obligatoirement : **la mesure de la prise de terre, la vérification de la continuité du conducteur de protection ainsi que l'interconnexion équipotentielle des masses métalliques**, constitue donc une mesure de protection suffisante dans le cas général (appareils défectueux, défauts d'isolement, perturbations électromagnétiques, etc.). **Actuellement, c'est en tout état de cause une réponse suffisante aux exigences de la réglementation.** Pour les cas particuliers (lignes haute tension, traction électrique, protection cathodique, etc.), il conviendrait de se référer aux règles spécifiques proposées dans les guides professionnels (UIC, GESIP, réglementation « pétrole »). Pour mémoire, l'UIC prévoit, par exemple, des dispositions pour lutter contre la formation d'étincelles électriques aux postes de chargement et déchargement des camions et wagons citernes dans les industries concernées.

### **Electricité statique**

En ce qui concerne l'électricité statique, générée par exemple par le contact ou la séparation de corps solides, l'accumulation de charges peut entraîner des risques d'inflammation. Ainsi, la prévention des décharges électrostatiques peut être assurée par la limitation des parties plastiques ainsi que par la continuité et la mise à la terre des éléments métalliques et plus largement de l'ensemble des installations électriques.

Des éléments techniques complémentaires concernant les caractéristiques du matériel sont précisés en **annexe D**.

## 2.8. ARTICLE 10 : PROTECTION CONTRE LES RISQUES D'EXPLOSIONS

### Enoncé de l'article

L'exploitant met en place les mesures de protection adaptées aux silos et aux produits permettant de limiter les effets d'une explosion et d'en empêcher sa propagation, sans préjudice des dispositions du Code du Travail. Il assure le maintien dans le temps de leurs performances.

Dans le cas de présence de tiers tels que définis dans le premier alinéa de l'article 6 du présent arrêté, soit dans les distances d'éloignement forfaitairement définies à l'article 6 précité, soit dans les zones des effets létaux et irréversibles mises en évidence par l'étude de dangers, et dans le cas des silos portuaires, ces mesures de protection consistent :

- en des dispositifs de découplage qui doivent concerner la tour de manutention et les communications avec les espaces sur-cellules ou sous-cellules, ainsi que les communications entre ces espaces et les cellules de stockage ;
- et des moyens techniques permettant de limiter la pression liée à l'explosion dans les volumes découplés (dans la tour de manutention, les espaces sur-cellules et sous-cellules si la galerie est non enterrée) tels que des événements de décharge ou des parois soufflables, dimensionnés selon les normes en vigueur.

Si la configuration du site ne permet pas de mettre en œuvre ce découplage, un dispositif technique de protection d'efficacité équivalente permettant d'éviter la propagation des explosions, doit être mis en place.

Dans les silos existants, en cas d'impossibilité technique de mise en place des surfaces soufflables ou des événements dans des espaces sous-cellules et des tours de manutention en béton, les équipements présents dans les volumes non éventés (élévateurs, transporteurs, dépoussiéreurs, nettoyeurs, émotteurs, séparateurs, broyeurs, filtres, etc.) doivent au minimum :

- être rendus aussi étanches que possible et être équipés d'une aspiration (excepté pour les filtres), afin de limiter les émissions de poussières inflammables,
- et (excepté pour les transporteurs) :
- posséder des surfaces éventables ou être dimensionnés de façon à résister à l'explosion ou être équipés d'un dispositif de suppression de l'explosion;
- et/ou disposer d'un découplage permettant d'éviter que l'explosion ne se propage dans une canalisation ou par une alimentation ou disposer d'un dispositif d'isolation de l'explosion.

Pour les silos dont le dossier de demande d'autorisation est déposé après le 1er juillet 2007, ces mesures de protection consistent également en des dispositifs de découplage entre cellules.

Dans le cas de l'absence de tiers ou présence de voies de communication moins fréquentées (moins de 2 000 véhicules par jour ou 30 trains de voyageurs par jour), dans les zones définies ci-dessus, l'exploitant doit avoir fait la démonstration d'une maîtrise suffisante des risques d'explosion, et doit mettre en place les mesures appropriées à ces risques.

### 2.8.1. Principes généraux pour protéger un silo contre les effets d'une explosion

L'objet de ce chapitre est de dresser l'état de l'art sur les mesures de protection à mettre en œuvre et d'indiquer les bonnes pratiques, connues et éprouvées qui permettent d'atteindre l'objectif de l'article 10 : objectif de protection contre l'explosion primaire et contre la propagation d'explosion (l'explosion secondaire).

La physique associée au phénomène d'explosion de poussières ainsi que le retour d'expérience indiquent que les effets d'une explosion peuvent se renforcer **lorsque le front de flamme parvient à se propager d'un volume à un autre, ceci d'autant plus que les volumes sont de forme allongée** (par exemple, géométries associées à des galeries sous-cellules ou à des boisseaux

intercalaires). En effet, ce type de situation conduit à renforcer les apports de poussières dans les cellules et le niveau d'agitation interne de telle manière que la violence de l'explosion s'en trouve renforcée.

Comme indiqué dans la partie de ce guide relative à l'article 2 de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié, la protection de volumes contre l'explosion va se faire d'une part par la réduction des communications entre ces volumes (**par la mise en place de découplages**), et d'autre part par **la présence de surfaces soufflables ou d'événements dans les volumes découplés** (pour réduire les effets de pression dans ces volumes) ; mesure envisagée en cohérence avec le découplage. D'autres équipements peuvent également être utilisés pour protéger les équipements contre l'explosion (suppresseurs d'explosion, dispositifs d'isolation de l'explosion...).

Les types d'explosion considérés dans les méthodes de dimensionnement de surface d'événement des cellules (NFU 54-540, VDI 36 73 - Pressure Venting of Dust Explosions et plus particulièrement son chapitre 6.2.4. : Venting of Rectangular Enclosures, NFPA 68, EN 14491) excluent les scénarios de transmission / renforcement de l'explosion en provenance d'un autre volume (« jet de flamme à très grande vitesse »). C'est pourquoi, l'installation de surfaces éventables ou soufflables nécessite de limiter au maximum le renforcement de l'explosion lors de sa transmission entre les volumes à protéger.

Seule la mise en place de découplages entre les volumes en communication associés à des surfaces soufflables/événements permet de s'affranchir du risque de propagation d'explosion.

Aussi, si l'étude de dangers met en évidence une propagation d'explosion possible, les mesures organisationnelles de maîtrise de l'empoussièrement doivent être complétées par cette mesure technique de découplage consistant à limiter les communications entre les différents bâtiments.

**Les espaces sur et sous-cellules** sont constitués de volumes fermés (par ex : un caillebotis au-dessus des cellules ouvertes d'un silo comble ne suffit pas à désigner un espace sur-cellule) situés au-dessus ou en-dessous des capacités de stockage. Ce peut être des galeries supérieures, inférieures de reprise ou parfois enterrées.

L'objectif des prescriptions de l'article 10 est de mettre en place des mesures de sécurité notamment pour protéger les tiers en cas d'explosion ; c'est pourquoi, l'application de cet article doit être adaptée à la configuration des installations et aux phénomènes dangereux analysés.

En effet, la présence de tiers dans les zones d'effets létaux ou irréversibles des phénomènes dangereux doit s'entendre relativement à une installation de stockage. Ainsi, sur un site comprenant des silos verticaux béton et une tour, dont l'analyse de risques met en lumière des effets irréversibles hors du site importants pouvant atteindre des populations puis des silos plats n'entraînant aucun effet à l'extérieur de l'emprise foncière du site, ceci implique la mise en place d'événements/surfaces soufflables associés à du découplage bâtimentaire uniquement dans les installations béton en cause, sièges d'un ou plusieurs accidents majeurs potentiels et non sur le reste des installations (silos plats) du site.

De plus la mesure de découplage inter-cellules n'est applicable que dans le cas de cellules fermées et donc ne s'applique pas aux silos combles ou plats avec cellules ouvertes.

## **2.8.2. Application aux différents éléments d'un silo**

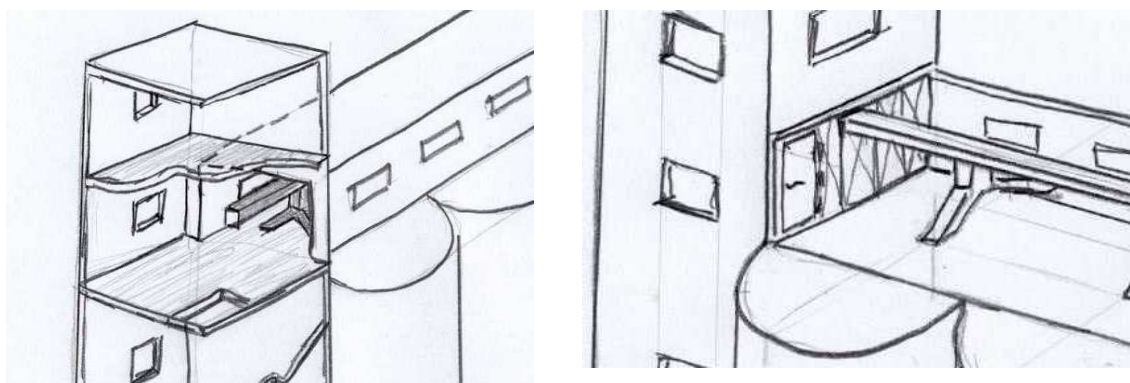
*Remarque préliminaire: Les différentes préconisations définies sont à nuancer et à adapter à chaque type de structure. L'analyse de risques et l'étude des communications entre volumes menées dans les études de dangers vont permettre d'évaluer la possibilité d'une explosion primaire et/ou d'une propagation d'explosion et de déterminer le choix et le dimensionnement des moyens de découplage ou de surfaces soufflables, qui doivent s'appuyer sur des études d'ingénierie spécifiques. De plus, il est important lors de la phase de conception d'un silo d'aménager le*

maximum de surfaces soufflables et de réduire les interconnexions. Les principales remarques reportées dans cette partie sont issues de la norme NFU 54-540.

#### a. Découplage bâtimentaire

Le découplage bâtimentaire peut être réalisé au moyen de parois (en réduisant au maximum les passages de bandes) et de portes au moins de résistance équivalente à celle des volumes attenants (hors parties soufflables bien évidemment). Les portes doivent rester fermées au moyen de dispositifs techniques adaptés (ferme portes...). Une attention particulière doit être portée à la tenue à l'explosion des châssis des portes et au maintien dans le temps des performances de ces mesures. Les caractéristiques (résistance, matériau, ancrage, etc.) des parois de découplage mises en place sont à adapter selon la configuration des installations et les modélisations d'explosions réalisées (dans certains cas par exemple, des parois métalliques pourront être préférables à des parois en béton). **Ces caractéristiques doivent être fixées par une étude technique de l'exploitant ou de l'organisme mandaté pour la réalisation du découplage ; cette étude doit s'appuyer à la fois sur les résultats de l'étude de dangers (de façon à fixer la résistance de la paroi, son emplacement, etc., en fonction des explosions possibles et des surpressions estimées) et sur les plans des structures des bâtiments (pour disposer des éléments nécessaires sur la résistance des bâtiments, etc.).**

Le schéma ci-après montre la mise en place d'un découplage entre une tour de manutention et une galerie sur cellules.



*Figure 11 : Mise en place d'un découplage entre une tour de manutention et une galerie sur cellules*

Au regard de l'accidentologie, deux types de propagation d'explosion peuvent être identifiés :

- La propagation d'explosion, impliquant la tour de manutention, la galerie supérieure et/ou les cellules :

En règle générale, le retour d'expérience et les équipements mis en œuvre tendent à montrer qu'une explosion dans la tour de manutention est plus probable qu'une explosion en galerie supérieure : le découplage doit en ce cas empêcher au moins la propagation d'une explosion de la tour vers la galerie supérieure (si présence d'une porte, celle-ci doit donc s'ouvrir de la galerie vers la tour et celle-ci doit être équipée de ferme-portes automatiques).

Par ailleurs, pour empêcher la propagation d'une explosion de la galerie supérieure vers les cellules, il convient de maintenir fermées les trappes de visite de cellules en galerie supérieure (fermeture aussi fréquente et permanente que l'exploitation des silos le permet).



- La propagation impliquant la galerie inférieure enterrée et la tour ou les cellules vides :

Un scénario conduisant à des dégâts majeurs est l'explosion se produisant ou se propageant dans la galerie inférieure enterrée. Il est très souvent avancé qu'une telle explosion conduirait à la ruine de l'ensemble du silo.

Pour éviter ou limiter les effets de ce scénario, plusieurs mesures peuvent être envisagées :

- mettre en œuvre des mesures de réduction des risques dans la galerie, et notamment le capotage et l'aspiration des circuits de manutention, un nettoyage fréquent, etc.
- s'assurer que la propagation est impossible dans une cellule vide par la fermeture systématique des trappes de visite des cellules,
- mettre en place un découplage de la tour de manutention vers la galerie inférieure (porte s'ouvrant de la galerie vers la tour), qui empêchera qu'une explosion se produisant dans la tour se propage vers la galerie inférieure – ce type de configuration devra être étudié attentivement dans l'étude de dangers.

Dans le cas des silos de sucre, l'industrie sucrière préconise, compte tenu de la typologie des installations (tour de manutention souvent indépendante des cellules et reliée par une galerie) de s'intéresser à la tour de manutention et à la galerie supérieure, en préférant des structures légères et/ou des volumes isolables par des systèmes de découplage. Dans le cas des silos de sucre en béton dont les cellules ne sont pas pourvues d'évents ou de surfaces soufflables, l'industrie sucrière préconise le découplage des appareils de manutention qui les alimentent de façon à éviter qu'un incendie ou une explosion puisse se propager à l'intérieur des cellules<sup>24</sup>.

De la même manière, concernant les boisseaux de chargement, l'industrie sucrière constate qu'il n'est parfois pas possible d'éventer ce type d'installation (situés à l'intérieur...) ou de les équiper de suppresseurs d'explosion (volumes trop importants) et préconise donc le découplage des appareils de manutention qui les alimentent pour éviter qu'un incendie ou une explosion se propage vers les boisseaux, et demande de veiller à qu'aucune source d'inflammation ne soit présente dans les boisseaux.

#### b. Events et surfaces soufflables.

Dans la mesure du possible (nouveaux silos...), il faut s'intéresser à la protection de la tour de manutention et de la galerie supérieure en exigeant qu'elles soient à structure légère.

Dans le cas de silos existants, la mise en place de surfaces soufflables dans ces volumes, si elle est techniquement possible, doit être associée comme vu précédemment à un découplage entre la tour et la galerie supérieure.

#### **Tour de manutention**

La norme NF U54-540 prévoit le quart de la surface latérale de la tour comme surface soufflable et d'autres normes permettent de définir plus précisément par calcul les surfaces soufflables nécessaires. En cas de découplage efficace pour un volume bâtiminaire dans les domaines d'application d'une norme (par exemple la norme EN 14491), on peut considérer les différents étages de la tour, même séparés par des planchers béton, comme des pièces séparées qu'on chercherait individuellement à protéger.

Lorsque la tour communique directement avec un espace sous cellule, il faut considérer qu'un renforcement des effets de l'explosion est possible, que la pression d'explosion sera plus forte et que les débris de la tour seront projetés plus loin. Des distances de projection de quelques dizaines de mètres sont un ordre de grandeur réaliste et il faut au moins retenir la hauteur de la tour.

---

<sup>24</sup> Attention le découplage visé ici consiste en des dispositifs d'isolation ou de suppression de l'explosion et non d'équipements tels que des transporteurs à chaîne.

Quand la tour communique avec la galerie au-dessus des cellules, l'explosion dans celle-ci sera d'autant plus violente que la tour se rompra à une pression élevée et que la galerie aura une résistance mécanique importante.

Les tours connectées aux cellules ou incorporées dans la structure des cellules sont celles qui en cas d'explosion conduiront aux effets de pression et aux dégâts, notamment effondrement des cellules, les plus importants. La mise en place de surfaces soufflables peut être envisagée pour des tours dont les parois ont une résistance de l'ordre de la centaine de millibars.

### **Galerie au-dessus de cellules**

Une réalisation conseillée pourrait être un cadre métallique ou béton recouvert d'un bardage léger (si possible ouverture à quelques dizaines de millibars) : plaques translucides, plaques métalliques...

Une bonne pratique consiste à avoir au moins une surface équivalente à la surface d'un côté et répartie régulièrement sur toute la longueur de la galerie qui doit pouvoir être soufflée en cas d'explosion.

Il est possible de traiter les vitres des différentes fenêtres (par exemple par apposition de films adhésifs) de façon à éviter la formation d'éclats tranchants.

### **Cellules en béton (y compris les as de carreau)**

Selon les experts consultés par le groupe de travail national sur les silos (TECHNIP, SME, INERIS, CEDERIT<sup>25</sup>), le phénomène dangereux d'explosion primaire en cellule est physiquement possible<sup>26</sup> et doit donc être systématiquement étudié dans les études de dangers, y compris les scénarios de propagation ou de renforcement. En effet, selon eux, ce phénomène peut également apparaître dans les as de carreau et les effets de surpression peuvent être très importants.

En ce qui concerne la caractérisation de ce phénomène dangereux<sup>27</sup>, les experts cités précédemment affirment que le retour d'expérience permet d'avancer une fréquence d'occurrence d'une explosion primaire en cellule de C à E<sup>28</sup>, mais que D est la probabilité retrouvée habituellement, dans l'état actuel des silos et en tenant compte de la mise en place de mesures compensatoires correspondant à l'état de l'art. En effet, l'accidentologie américaine démontre notamment que les explosions de poussières sont beaucoup plus fréquentes dans les stockages de céréales, relativement à d'autres industries<sup>29</sup> et que les capacités de stockage sont le siège des explosions de poussières dans 4 % des cas environ (chiffre vérifié sur les périodes 1958-1978 et 1990-1999). Une majorité des explosions de poussières se seraient produites dans des élévateurs.

---

<sup>25</sup> Réunion du 09 mai 2007.

<sup>26</sup> Coop de France-métiers du Grain ne souscrit pas à cette affirmation.

<sup>27</sup> Ce phénomène dangereux s'est notamment produit le 29 mars 2006 à AIGUEPERSE, dans une usine de fabrication d'aliments pour le bétail. L'explosion a blessé cinq employés dont 2 gravement (brûlures et traumatismes) et a engendré un risque d'effondrement de la toiture du bâtiment abritant les cellules, gravement endommagée. Des travaux de maintenance en partie haute des silos seraient à l'origine de l'explosion. [source ARIA-BARPI]

<sup>28</sup> Le TNO est d'accord avec cette évaluation.

<sup>29</sup> Type de sites touchés par les explosions de poussières de céréales sur 20 ans (1980-1989, 1991-2000), 59% sont des stockages de céréales, contre 18% des moulins pour l'alimentation animale, notamment, chiffres issus de « l'étude de la réglementation étrangère s'appliquant aux silos de stockage de céréales », p. 19, rapport final INERIS du 15 octobre 2001.

De plus, le BARPI dans son étude<sup>30</sup>, signale qu'en Allemagne, le BIA (Berufsgenossenschaftlichen institut für Arbeitssicherheit) qui recense notamment les explosions de poussières, a enregistré 192 explosions de poussières dans l'industrie agroalimentaire au cours de la période 1970-1995. Si comme aux Etats-Unis, les élévateurs sont les équipements les plus impliqués (27 %) ; les "silos" (capacités de stockage ) représenteraient 21 % des cas, les broyeurs 19 % et les séchoirs 10%.

Le BARPI précise que la base ARIA n'est que partielle sur ce sujet (collecte organisée depuis 1992) et que des accidents peuvent ne pas apparaître ; ainsi, le nombre d'explosions primaires en cellule cités par la base est de 7 : 1988-GUIGNICOURT, 1991- BASSENS, 1994 – GAND (Belgique), 1997-Le PORT à la Réunion, 1998-PAMPROUX, 2002-DOUVREND, 2006-AIGUEPERSE.

La protection des cellules concernées par une explosion peut se faire<sup>31</sup> :

- par la création de surfaces soufflables sur les parois latérales, mais cela peut s'avérer difficile pour des questions de stabilité. On choisira parfois d'installer des renforts afin de garantir l'intégrité de la structure ;
- par la création de surfaces soufflables sur le toit de la cellule ;
- par le remplacement autant que possible du toit de cellule par un caillebotis par exemple, accompagné d'une plaque posée soufflable, lorsque cette configuration n'entraîne pas un accroissement de l'empoussièrement de la galerie supérieure (ventilation adaptée...) ;
- par une technique appelée « faïençage », qui vise à rendre les pré-dalles ou les toits de cellules soufflables en fragilisant les matériaux par un pré-sciage ; sont ainsi créées, à certains endroits choisis, des surfaces de faible résistance qui seront soufflées en cas d'explosion. Néanmoins cette méthode est techniquement difficile à mettre en œuvre et doit faire l'objet d'études techniques poussées (pression statique résiduelle de la dalle, inertie de la structure à prendre en compte car le faïençage ne permet pas de s'affranchir de cette contrainte, etc.).

Il existe aussi des mesures de prévention : l'aspiration à l'ensilage ; le nettoyage systématique des poussières ; les couloirs de chute ; l'humidité des produits ; absence d'alimentation directe des élévateurs dans les cellules fermées... mais, contrairement aux mesures de protection, leur efficacité reste à évaluer.

### **Cellules métalliques**

Les règles de calcul sont les mêmes que pour les cellules béton et le toit peut servir d'évent (la pression d'ouverture de ce toit devra être très inférieure à la pression supportable par les parois verticales).

Afin d'éviter la projection de la toiture, le doublement des fixations sur une génératrice peut être envisagé.

### **Espace sous cellules**

La communication des espaces sous cellules avec la tour peut favoriser la propagation d'explosions violentes. Comme la structure est souvent allongée et encombrée, les surpressions peuvent y être élevées. On conseille alors d'installer le maximum de surface soufflable compatible avec la stabilité de l'ouvrage.

---

<sup>30</sup> [http://aria.ecologie.gouv.fr/frame.jsp?contexte=/barpi\\_2860.jsp](http://aria.ecologie.gouv.fr/frame.jsp?contexte=/barpi_2860.jsp)

<sup>31</sup> Voir note des Ingénieurs de Paris, "Dispositions constructives destinées à limiter les effets d'une explosion dans les silos à céréales en béton armé, création d'évents" de décembre 1997.

### **Galerie de reprise sous cellules (cas d'un couloir sous les cellules uniquement)**

Ces galeries souvent enterrées peuvent être le siège d'explosions d'autant plus violentes que leur longueur est grande. La mesure principale à appliquer est la limitation des émissions de poussières et la suppression des dépôts de poussières.

### **Choix des normes permettant de déterminer les surfaces d'évent ou les surfaces soufflables :**

Pour les cellules complètement isolées ou pour les cellules suffisamment découplées (réduction au maximum des orifices d'ensilage) qui sont surmontées d'un espace sur cellule en structure légère, l'application des méthodes standard de dimensionnement de surfaces d'évent (NFU 54-540, VDI 36 73 (version 2002), NFPA 68 (édition 2002)) peut être envisagée, ainsi que la nouvelle norme européenne EN14491.

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

- le volume de l'enceinte à protéger et sa géométrie (rapport hauteur sur diamètre),
- la pression d'explosion maximum qui ne doit pas être dépassée (Predmax),
- des paramètres caractéristiques des poussières vis à vis de l'explosion (Kst et Pmax),
- la pression d'ouverture de l'évent (Pstat).

Le volume correspond à la dimension géométrique de l'enceinte considérée et ne tient pas compte d'une obstruction partielle (remplissage par du grain, par exemple), car la surface d'évent augmente avec le volume et donc la situation la plus défavorable du point de vue de l'explosion est a priori celle où le volume disponible pour l'explosion est maximum.

La pression d'ouverture de l'évent est fournie par les constructeurs de matériel ; elle est généralement de l'ordre de 100 mbar.

Dans le cas d'explosions de turbulence élevée (propagation d'explosion sur plusieurs volumes), il faut s'appuyer sur des outils de modélisation ou sur la norme NFU 54-540 turbulence forte quand on est dans son domaine d'application ou la méthode multi-énergie (cela dépend de la turbulence prise en compte ; la NFU est plus conservative).

Il convient par ailleurs de noter que les effets de souffle et les effets de flamme s'exercent à travers les orifices de décharge. Dans le cas des dépôts de poussières à l'extérieur des appareils protégés, ceux-ci peuvent conduire à une explosion secondaire. Il faut aussi veiller à ce que la décharge des événements s'effectue dans une direction non dangereuse pour le personnel ou d'autres installations et de préférence à l'extérieur du bâtiment.

Le tableau suivant reprend les domaines d'application des normes d'évents pour les explosions de poussières.

Références des normes		VDI 3673 (Enceintes, structure résistante) <b>Ed. 2002</b>	VDI 3673. (bâtiments, résistance faible). <b>Ed. 2002</b>	NFU 54-540 (turbulence moyenne et faible) <b>Ed. 86</b>	NFU 54-540 (turbulence forte). <b>Ed. 86</b>	NFPA 68 <b>Ed. 2007</b>	EN 14491 (Enceintes, structure résistante) <b>Ed. 2006</b>	EN 14491 (bâtiments, résistance faible ) <b>Ed. 2006</b>
Caractéristiques des poussières	$P_{\max}$ (bar)	[ 5 ; 10 ]	[ 5 ; 10 ]	[ 0 ; 11 ]		[ 5 ; 12 ]	[ 5, 10 ]	Domaines non définis
	$K_{St}$ (bar.m.s <sup>-1</sup> )	[ 10 ; 300 ]	[ 10; 300 ]	[ 50; 300 ] ( $K_{\max}$ )	100, 400	[ 10 ; 800 ]	[ 10 ; 300 ]	[ 0 ; 300 ]
Caractéristique des enceintes.	$V$ (m <sup>3</sup> )	[ 0,1 ; 10000 ]	Idem VDI 3673 cas général.	[ 0,1 ; 1000 ]	Idem turbulence moyenne et faible.	[0,1 ; 10000]	[0,1 ; 10 000]	Domaine non défini
	$P_{\text{red,max}}$ (bar)	[ 0,1 ; 2 ]	[ 0,02 ; 0,1 ]	[ 0,2 ; 2 ]	[1,2 ; 2,5] pour Kst de 100	Non défini	[0,1 ; 2]	[ 0,02 ; 0,1 ]
	$P_{\text{stat}}$ (bar)	[ 0 ,1; 1 ]	Pstat<0,5 Pred	[ 0,1 ; 0,5 ]	< 1,2 bar	< 0,75 bar	[0,1 ; 1]	< Pred- 0,020
	$L/D$	[ 1 ; 20 ]		[ 1 ; 5 ]	Idem turbulence moyenne et faible.	[ 1 ; 6 ]  [ 1 ; 8 ] dans certains cas	[ 1 ;20 ]	[ 1 ; 20 ]  et <3 au cas où la surface d'évén est limitée à une extrémité

Tableau 8. Synthèse des domaines d'application des normes d'évén pour les explosions de poussières.

A noter que les domaines de validité des normes citées dans ce tableau diffèrent des domaines mentionnés dans le tableau « Synthèse des domaines d'application et des principaux résultats des normes d'évén pour les distances d'effets » au début de ce guide : il s'agit en effet dans un cas des domaines d'application des formules de calculs permettant d'évaluer les effets des surpressions et dans l'autre cas (tableau ci-dessus) des domaines d'application des formules de calculs permettant de dimensionner les surfaces d'évén.

Les annexes de la VDI 3673 contiennent aussi des formules relatives à des volumes alimentés pneumatiquement.

Il est à noter qu'il existe des domaines où l'efficacité de l'évén n'est plus maximale ; cela est le cas lorsque l'évén est prolongé par une canalisation destinée à évacuer le souffle à l'extérieur. Pour ces cas, les normes de dimensionnement ci-dessus permettent de prendre en compte l'impact de ces canalisations. De plus, certains constructeurs d'évén ont réalisé des essais et en ont déduit des méthodes de dimensionnement qui leur sont propres.

Dans le cas des surfaces soufflables un ordre de grandeur plausible de limite supérieure pour la masse surfacique est de l'ordre de 20 à 30 kg/m<sup>2</sup>. Au delà, une étude spécifique tenant compte de l'inertie est souhaitable (la surface n'est pas forcément une « surface soufflable » - cf. ci-dessous).

### **Cas particulier du caractère soufflable des toits de cellules béton :**

Avant d'envisager la mise en place d'« événements lourds » en toiture, il est nécessaire de réaliser une étude de faisabilité technique permettant de mettre en place des événements normalisés classiques sur les cellules. En effet, l'utilisation d'événements lourds ne peut s'envisager que dans l'impossibilité de recourir à des événements sans inertie.

De façon générale, même en partie haute, le fût de la cellule est plus résistant que la dalle.

Plusieurs paramètres entrent en jeu pour déterminer le caractère soufflable ou non d'un toit de cellule ou de pré-dalles posées sur des cellules, notamment l'inertie du toit (ou des pré-dalles). Mais il n'existe pas, à ce jour, de référentiel reconnu traitant de ce point particulier.

Cette problématique, dite « des événements lourds », est délicate à traiter et doit être étudiée au cas par cas. La norme NFPA 68 version 2007 propose une démarche de calcul dans son annexe G "*Calculation method for correction factor due to increased vent panel mass*", afin de déterminer un facteur correctif pour prendre en compte l'inertie des dalles. Cette démarche est applicable pour une masse surfacique inférieure à 200 kg/m<sup>2</sup> (condition a été rajoutée dans l'errata daté du 17 septembre 2004) et pour une pression statique d'ouverture de l'événement inférieure à 500mbar. Pour une dalle béton ayant une masse volumique de 2 400 kg/m<sup>3</sup>, l'épaisseur limite est donc de l'ordre de 8 cm : au-delà de cette valeur, a priori, les dalles béton ne peuvent pas jouer le rôle d'"événements", et le phénomène d'explosion de la cellule non éventée est à considérer.

Il faut noter que certains experts estiment qu'un toit de cellule pourra être considéré dans certains cas comme soufflable, notamment lorsque la pression d'ouverture du toit est comprise entre 200 mbar (pour un toit posé) et 400 mbar (cas d'un toit ancré) et que le haut du fût de la cellule est 1,5 à 2 fois plus résistant que le toit (pression de rupture du haut de la paroi > 1,5 à 2 x la pression d'ouverture du toit). Néanmoins, cette position ne fait pas l'objet d'un consensus entre les experts présents au sein du groupe de travail national relatif aux silos.

Dans le cas des pré-dalles posées sur plusieurs cellules, il est généralement plus adapté de considérer un soulèvement partiel de la dalle et de réaliser les modélisations d'explosion cellule par cellule, une généralisation à l'ensemble des cellules couvertes par la dalle n'étant pas envisagé.

D'autres critères sont à prendre en compte pour évaluer si le toit peut assurer le rôle d'événement lourd :

<b>CRITERE</b>	<b>APPRECIATION</b>	<b>COMMENTAIRE</b>
Ancrage	---	Il retient la dalle et augmente la pression de rupture
Géométrie	+++ ou --- (selon le cas)	Une dalle par morceaux se fragmente plus facilement Une dalle en continu est plus résistante
Existence d'une pré-dalle	--	L'existence d'une pré-dalle augmente la pression de rupture.
Ferraillage	---	Sa conception (ferraillage horizontal ou non), sa densité (diamètre des aciers et maillage de la nappe) augmente la résistance de la dalle.
Indépendance des cellules	+++	La dalle peut être commune ou non à plusieurs cellules et, de ce fait, avoir une masse plus ou moins importante.
Masse surfacique	--	L'épaisseur est liée à la masse donc à l'inertie. L'application d'une norme n'est pas toujours possible si on sort des limites de son domaine d'application.
Galerie et équipements sur cellules	---	Ils représentent une masse supplémentaire (parpaings, béton coffré, bardage)

*L'appréciation donne une indication sommaire (nombre de + ou de -) sur l'aspect positif ou négatif du critère considéré dans la prise en compte d'un toit de cellule comme événement lourd.*

Pour rappel, les modélisations réalisées dans le cadre des configurations particulières décrites ici devront bien sûr prendre en compte les effets de projections consécutifs aux ruptures d'enceintes, et les effets dominos possibles.

### c. Autres dispositifs de protection contre l'explosion

En dehors du découplage bâtimentaire, il existe des **dispositifs d'isolation de l'explosion** ou de **suppression de l'explosion**<sup>32</sup>. Ces appareils permettent de découpler les équipements en cas de surpression afin d'éviter la transmission d'une explosion d'un équipement à l'autre. Par exemple, on peut citer **les supprimeurs d'explosions, les vannes VENTEX (pilotées ou non), les écluses alvéolaires, les vannes à fermeture rapide** ou **l'isolation chimique, voire les cheminées de détente**<sup>33</sup>. Dans ce dernier cas, il convient de s'assurer que le dispositif est suffisamment proche de la source de l'explosion.

**Les supprimeurs d'explosions**, qui permettent d'étouffer celles-ci, sont parfois utilisés pour la protection des élévateurs par exemple. Le système est constitué d'une détection de surpression (qui doit être réalisée le plus tôt possible : de l'ordre de quelques ms) et d'un dispositif d'extinction ultra-rapide du front de flamme : dès qu'une surpression est détectée en amont, le mélange réactif de l'agent extincteur est libéré et neutralise le phénomène de combustion, bloquant alors la propagation de l'explosion au reste de l'équipement. Ces systèmes permettent ainsi de détecter une combustion dans sa phase originelle, afin de stopper la montée en pression, et de contrôler et de circonscrire les flammes, afin d'éviter toute propagation du sinistre. Ils sont utilisés pour protéger des alimentations/canalisation et non des volumes entiers ; son efficacité dépend des configurations de l'installation.

Il est possible aussi d'isoler une explosion par la mise en place d'une **vanne à fermeture rapide** : des détecteurs informent d'une montée en pression ou de l'apparition d'une flamme. Une armoire de contrôle (par exemple) déclenche alors la vanne à fermeture rapide, constituant ainsi un dispositif d'isolation de l'explosion, si les conditions d'utilisation sont respectées.

Il existe aussi **un dispositif passif d'isolation d'explosion** appelé vanne Ventex. Lors d'une déflagration, la flamme est précédée d'une onde de pression, qui vient projeter la boule centrale sur le joint de vanne et assure la fermeture de la vanne avant l'arrivée de la flamme (attention aux conditions sur les concentrations des poussières, les vitesses de process et la disposition de la vanne)<sup>34</sup>.

### Protection contre les effets de projections

Il revient en tout état de cause à l'exploitant de déterminer la nécessité de mettre en place de telles mesures. Néanmoins, sans préjudice des mesures de sécurité qui pourraient être identifiées par l'étude de dangers, la proximité immédiate (dans le périmètre forfaitaire de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié ou dans le périmètre de dangers défini par l'étude de dangers) d'un silo et d'une voie ferrée (ouverte au transport de voyageurs ou non) doit être a minima gérée sur le terrain par la mise en place **d'une procédure d'alerte de la SNCF**. Cette procédure doit encadrer les opérations à mener en cas d'accident ayant eu des conséquences sur les voies ferrées (ou susceptibles d'en avoir) et les coordonnées du service SNCF à contacter doivent y figurer de

---

<sup>32</sup> Voir guide INRS : « les mélanges explosifs : les poussières combustibles » téléchargeable gratuitement sur le site : <http://www.inrs.fr/>

<sup>33</sup> "A review of explosion prevention and protection systems suitable as ultimate layer of protection in chemical process installations", A.A. Pekalski, J.F. Zevenbergen, S.M. Lemkowitz, H.J.Pasman, Process Safety and Environmental Protection, Volume 83, Issue B1, pp. 1-17, 2005.

<sup>34</sup> Source : FIKE.

manière visible. Cette procédure doit être régulièrement testée, et doit être mise à jour aussi souvent que nécessaire, notamment pour les coordonnées SNCF (un test annuel de l'appel SNCF peut être pertinent en cas de trafic important sur les voies ferrées).

Cependant, il est aussi possible de conclure qu'en l'état actuel des connaissances, une protection systématique des voies ferrées vis-à-vis des projections issues d'une explosion de silos (via des filets de retenue des projections par exemple, ou un arrimage solide des bardages...) n'est pas forcément nécessaire : en effet, la survenue d'une explosion au moment du passage d'un train est un phénomène généralement considéré comme très peu probable, notamment au regard du temps de passage d'un train au droit d'une installation classée. Mais cette probabilité est bien sûr à nuancer dans le cas d'un trafic important de trains voyageurs, ou d'un passage sur une distance importante ou à vitesse réduite à proximité de l'installation à risque. De plus, il est aussi nécessaire de considérer la gravité des accidents potentiels<sup>35</sup>.

Pour se prémunir contre des éventuels effets de projection (surfaces soufflables toiture...), il peut ainsi être envisagé d'utiliser des systèmes mécaniques simples venant entraver l'envol des projectiles (ex : renforcement de la fixation selon une génératrice...).

Il peut aussi être envisagé la possibilité d'utiliser des filets de protection, ou de créer des zones de fragilisation sur le bâtiment, dirigées vers une zone de moindre risque. Ce dispositif doit être considéré comme un complément des autres barrières incontournables visant à prévenir l'explosion et à limiter ses conséquences. Il vise à retenir les projections consécutives à une explosion de façon à protéger les cibles éventuelles (voie de circulation par exemple...). Ces filets peuvent par exemple être en matière plastique, dotés de mailles de tailles différentes selon le silo, les matériaux en cause et les données sur l'explosion issues de l'étude des dangers.

Pour apprécier l'efficacité de ce dispositif, l'exploitant doit apporter les arguments relatifs à sa capacité intrinsèque à résister aux projectiles (vitesse, masse, surface associée,...), les éléments de calcul des dispositifs de fixation, les garanties quant à la tenue des structures d'ancrage en cas d'explosion. De plus, s'agissant de dispositifs de sécurité, un programme de vérification du bon état dans le temps doit être prévu (risque de vieillissement du filet et des fixations).

Dans la mesure où en cas d'explosion, l'effet de souffle et donc les projections interviennent préalablement à l'effet de flamme, ce type de dispositif peut remplir sa mission en cas d'explosion même si la tenue au feu des matériaux constitutifs est limitée. A l'inverse, l'utilisation de filets en matériaux non résistants à la flamme ne réduit pas le risque à un niveau 0 (comme toute barrière d'ailleurs), en effet, ce dispositif est susceptible de perdre son efficacité en cas de scénario mixte avec incendie, suivi d'une explosion.

## **2.9. ARTICLE 11 : MOYENS DE LUTTE CONTRE UN SINISTRE**

### **Enoncé de l'article**

L'établissement doit être pourvu en moyens de lutte contre l'incendie adaptés aux risques encourus, en nombre suffisant et correctement répartis sur la superficie à protéger.

Les installations de protection contre l'incendie doivent être correctement entretenues et maintenues en bon état de marche. Elles doivent faire l'objet de vérifications périodiques.

Les cellules de stockage des silos béton fermées doivent être conçues et construites afin de permettre l'inertage par gaz en cas d'incendie. Cette disposition ne s'applique pas aux cellules de stockage contenant du sucre.

---

<sup>35</sup> La référence concernant la surpression nécessaire pour faire dérailler un train (500 mbar) provient de Lannoy A., 1984 : « Analyse des explosions air-hydrocarbures en milieu libre », EDF, Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches n° 4.



Des procédures d'intervention pour la gestion des situations d'urgence sont rédigées par l'exploitant et communiquées aux services de secours. Elles doivent notamment comporter :

1. le plan des installations avec indication :
  - des phénomènes dangereux (incendie, explosion, etc.) susceptibles d'apparaître;
  - les mesures de protection définies à l'article 10 ;
  - les moyens de lutte contre l'incendie ;
  - les dispositifs destinés à faciliter l'intervention des services d'incendie et de secours.
2. les stratégies d'intervention en cas de sinistre ;
3. et le cas échéant :
  - la procédure d'inertage ;
  - la procédure d'intervention en cas d'auto-échauffement.

### **Moyens d'intervention dans un silo**

Le choix du matériel et des stratégies de lutte contre un sinistre doit être fait en fonction de l'activité du site, des spécificités des installations, de l'organisation du service de sécurité incendie de l'établissement et en concertation avec les services de secours.

#### **Cas des silos de sucre<sup>36</sup>**

Compte tenu des spécificités liées au sucre, l'industrie sucrière préconise en premier lieu de lutter contre l'incendie qui pourrait se produire dans les structures, galeries, ou installations annexes. Deux types de matériels sont à cet effet envisageables : les extincteurs et les RIA. Pour une intervention directement sur les produits stockés, en cellule ou en partie stockage d'un silo plat, l'utilisation de mousse d'extinction est préconisée (moyen à haut foisonnement, avec l'aide de lances à mousse). Des extincteurs en nombre suffisant et adaptés aux risques présentés doivent être répartis au sein des installations :

- dans les silos (tours, galeries...) : au minimum un extincteur CO<sub>2</sub> pour les armoires électriques et 2 extincteurs à eau pulvérisée de 6 ou 9 litres ;
- sur les engins de manutention : au minimum un extincteur par engin, ou éventuellement, si l'engin ne peut pas en être équipé, au moins 2 extincteurs à poudre (6 kg) sur roue à proximité des installations dans lesquelles il évolue.
- Dans le cas des silos plats stockant du sucre, un nombre d'extincteurs plus important est préconisé : 4 extincteurs à eau de 6 ou 9 litres et 1 extincteur à eau sur roues de 20 litres.

#### **Cas général**

En matière de protection contre le risque d'incendie, le guide de l'ANMF (relatif à la profession de la meunerie) fait plusieurs recommandations, qu'il est possible de prendre en compte également dans le cas d'installations de stockage de céréales :

<b>Equipement</b>	<b>Bonnes pratiques</b>
Dispositifs permettant l'inertage et/ou l'injection de mousse	L'extinction d'un incendie par injection de gaz inerte dans une cellule béton fermée et/ou par injection de mousse est décrite ci-dessous et en annexe B du présent guide. Il est important que l'exploitant se concerte avec le SDIS pendant l'élaboration de sa procédure d'intervention au sujet des moyens-type émulseurs - à mettre en œuvre : normalement, l'exploitant doit pouvoir assurer des moyens de lutte contre l'incendie. De plus, il est toujours nécessaire de connaître les moyens opérationnels que possèdent les SDIS dans les départements pour savoir si des mesures supplémentaires doivent être mises en place par l'exploitant (mesures pour compenser les délais d'acheminement d'azote, etc.).
Extincteurs mobiles	Les extincteurs sont placés dans des zones protégées et facilement accessibles. Le personnel doit être régulièrement formé à leur maniement et le nombre, la capacité ainsi que les procédures de

<sup>36</sup> Certaines informations sont notamment issues du guide « sucre ».

	<p>vérification des extincteurs sont définis en se référant à la règle R4 de l'APSA version 2007- chapitre « silos » (un appareil de 6 ou 9 kg pour 200m<sup>2</sup>). Pour la maintenance des extincteurs portatifs, il existe la norme NF S 61-919 (intégrée dans nouvelle version de la norme APSA)<sup>37</sup>. Pour l'extinction des feux de céréales et pour les feux de matériaux combustibles, la pulvérisation d'eau doit être privilégiée. Les extincteurs à CO2 seront réservés pour les installations électriques - attention au risque de mise en suspension de poussières. L'utilisation d'extincteur à poudre ne peut pas se faire sur tout type de produit : ainsi, le 13 mai 2004, une explosion de poussières de bois a été déclenchée par l'utilisation de ce type d'appareil sur un feu de poussières de bois : l'usage de cet agent extincteur a mis les poussières en suspension, créant ainsi une ATEX qui, au contact de la source de chaleur, a explosé.</p>
R.I.A. : Robinets d'Incendie Armés	<p>Les débits d'eau disponibles doivent correspondre aux besoins, suivant la règle R5 APSA en accord avec la commission d'agrément des pompiers<sup>38</sup>.</p> <p>L'installation restera de préférence en permanence sous manche à air, pour éviter la dégradation due au gel. Les RIA doivent être utilisés sur les feux de structures en se rappelant les dangers provoqués par l'eau sur les parties électriques, et sont à proscrire à l'intérieur des cellules ou des parties stockage des silos plats, en raison du risque de provocation d'une ATEX par soulèvement des poussières.</p> <p>Il vaut donc mieux bloquer les RIA en position « jet diffusé » pour empêcher la diffusion par « jet baton » susceptible de créer une ATEX.</p>
Poteaux incendie	<p>Ils doivent faire l'objet d'une vérification périodique<sup>39</sup>.</p>
Colonnes sèches, réserves d'eau	<p>Il est nécessaire de connaître l'emplacement des colonnes sèches et des réserves d'eau<sup>40</sup>. Si les moyens prévus par l'exploitant ne lui appartiennent pas (poteaux extérieurs, réserves d'eau partagées ou communales, etc.), il revient à l'exploitant de s'assurer de leur fonctionnement et de leur disponibilité.</p>

Les besoins en eau en cas d'incendie varient notamment beaucoup en fonction du type de produits stockés. Néanmoins, a minima, il est recommandé de disposer d'une ressource globale de 60 m<sup>3</sup>/h pendant 2h sur le site: appareils d'incendie (bouches, poteaux) publics ou points d'eau, bassins, citernes (cette réserve en eau est exigée pour les sites soumis à déclaration, cf. arrêté du 28 décembre 2007).

- **Dispositifs d'inertage des cellules béton fermées**

L'objectif de la disposition de l'article 11 de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié relative à l'inertage est de pouvoir, en cas d'échauffement ou d'incendie dans la masse, connecter rapidement et dans les meilleures conditions de sécurité possibles un système d'inertage à la cellule concernée. Cette demande est destinée d'une part à enrayer efficacement un tel sinistre, et, d'autre part, à réduire l'exposition aux risques des personnes participant à l'intervention.

<sup>37</sup> Pour mémoire, dans le Code du Travail (Décret n° 92-333 du 31 mars 1992 art. 4-3°, art. 8, décret n° 94-346 du 2 mai 1994 art. 4, décret n° 2002-1553 du 24 décembre 2002 art. 1-1°, 2°, art. R. 232.12.21 (exercices d'entraînement), art. R. 232.12.20 (consignes), art. R. 232.12.21 (visites/essais/matériel), art. R.232.12.18 et arrêté du 04/11/93 (alarme)), il est notamment indiqué que « Le premier secours est assuré par des extincteurs en nombre suffisant et maintenus en bon état de fonctionnement. Il y a au moins un extincteur portatif à eau pulvérisée de 6 litres au minimum pour 200 mètres carrés de plancher, avec un minimum d'un appareil par niveau. Les établissements sont équipés, si cela est jugé nécessaire, de robinets d'incendie armés, de colonnes sèches, de colonnes humides, d'installations fixes d'extinction automatique d'incendie ou d'installations de détection automatique d'incendie. Tous les dispositifs non automatiques doivent être d'accès et de manipulation faciles. Dans tous les cas où la nécessité l'impose, une quantité de sable ou de terre meuble proportionnée à l'importance de l'établissement, à la disposition des locaux et à la nature des travaux exécutés est conservée à proximité des emplacements de travail, avec un moyen de projection, pour servir à éteindre un commencement d'incendie. Toutes ces installations doivent faire l'objet d'une signalisation durable, apposée aux endroits appropriés. »

<sup>38</sup> Référentiels normatifs : normes de matériel NF EN 671-1 et NF EN 694 et normes d'installation NF S 62-201 et NF EN ISO 6708.

<sup>39</sup> Pour mémoire, dans le Code du Travail : « Les installations de poteaux d'incendie doivent être contrôlées au moins une fois par an » : art R. 232- 1-12 et R. 232-12-21 du Code du Travail et art L. 620- 6 du Code du travail, art R. 123-51 et R. 122-29 du Code de Construction sur le registre de sécurité. De plus, on signale aussi la norme NF S 61 213 concernant la procédure de vérification.

<sup>40</sup> On signale l'existence de la norme NF S 61-750 relative à la vérification hydraulique des colonnes sèches.

Pour atteindre ces objectifs, deux axes sont à retenir : réduire le temps de présence de ces personnes dans les zones à risques et réduire les risques liés aux opérations de raccordement en elles-mêmes (absence de travaux pouvant générer des étincelles,...).

Les différents dispositifs possibles sont détaillés en **annexe B** du présent guide. Il convient de noter que la mise en place d'un seul piquage d'inertage en pied de cellule ou d'un seul piquage sur la ventilation de plusieurs cellules (en pied) est estimé, compte tenu du retour d'expérience actuel suffisant.

L'objectif de cette disposition de l'article 11 relative à l'inertage ne va donc pas jusqu'à demander la présence à demeure de gaz inerte (ou de mousse si la stratégie d'intervention fait intervenir l'injection de mousse) et du système d'alimentation. Les dispositifs qui doivent être installés dans les cellules béton fermées doivent simplement permettre la connexion à un système d'alimentation en gaz inerte (type piquages).

De plus, l'exploitant doit s'assurer que le délai d'approvisionnement est compatible avec la cinétique de ce type d'accident (généralement de l'ordre de plusieurs heures) et une concertation doit être menée entre l'exploitant et le SDIS en amont afin de définir des stratégies opérationnelles adaptées aux scénarii d'inflammation des produits au sein des cellules (notamment pour définir l'articulation entre les moyens propres à l'exploitant et l'intervention éventuelle des pompiers).

Une procédure d'intervention doit par ailleurs accompagner la mise en œuvre de ces dispositifs : l'exploitant précisera notamment dans ce document comment il entend disposer du gaz inerte sur son site (mention des coordonnées des sociétés concernées) et indiquera le délai prévisible d'approvisionnement (pour le contenu précis de ces procédures : voir annexe B).

Lors de l'installation des dispositifs d'injection, l'exploitant devra bien sûr s'assurer de la compatibilité des raccords avec les systèmes d'alimentation en gaz inerte susceptibles d'être utilisés. Il doit également s'assurer que l'accès aux piquages est aussi aisé que possible (signalement du piquage à l'intérieur et à l'extérieur des silos, mise en place d'échelles si nécessaire pour les cas de piquages en hauteur ou en contrebas, etc.)

- **Définition d'une cellule béton fermée**

Seules les cellules fermées en béton sont concernées par la mise en place de dispositifs d'inertage demandés par l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié.

Une cellule de silos béton fermée est une cellule ne disposant pas d'ouverture permanente sur l'extérieur (vers une galerie, une autre cellule, l'extérieur...). Le terme « fermé » ne suppose pas toutefois une étanchéité absolue des cellules : en effet, les stratégies de lutte par types de produits consistent en un balayage au gaz inerte du ciel de cellule et/ou une injection de mousse, et éventuellement une injection de gaz inerte par le bas de la cellule (à travers les produits). Elles ne consistent pas en un « remplissage » des cellules par le gaz inerte (voir **annexe B** du présent guide).

Ainsi, une cellule béton ayant comme seule ouverture une trappe de visite (en pied et/ou en tête) et une manche de respiration sera considérée comme une cellule béton fermée. Une cellule béton munie d'un évent (orifice fermé qui s'ouvre à une surpression donnée) doit également être considérée comme une cellule béton fermée.

Il convient par ailleurs de signaler que l'article 11 de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié demande l'installation de dispositifs permettant l'inertage sur toute cellule béton fermée (y compris as de carreau) : l'impossibilité d'inertage sur des cellules de ce type constitue donc une non-conformité à la réglementation, quel que soit le motif invoqué pour justifier ce manquement (un taux de rotation important notamment ne permet pas de s'affranchir de la mise en œuvre de cette disposition).

En effet, l'inertage est une mesure destinée à lutter contre l'incendie. Or ce type de phénomène dangereux a des causes multiples (foudre, explosion dans une autre partie de l'installation, travaux de soudure, lampes baladeuses, frottement, etc...) qui ne sont pas forcément en rapport avec les caractéristiques des produits (produits susceptibles de s'auto-échauffer par exemple), des installations (taille des cellules) ou des process (taux de rotation élevés par exemple).

## **2.10. ARTICLE 12 : AIRES DE CHARGEMENT / DECHARGEMENT**

### **Enoncé de l'article**

Les aires de chargement et de déchargement des produits sont situées en dehors des capacités de stockage.

Cette disposition ne s'applique pas aux aires de chargement et de déchargement situées à l'intérieur de silos plats ne disposant pas de dispositifs de transport et de distribution de produits.

Des grilles sont mises en place sur les fosses de réception. La maille est déterminée de manière à retenir au mieux les corps étrangers.

Les aires de chargement et de déchargement sont :

- soit suffisamment ventilées de manière à éviter la création d'une concentration de poussières de  $50 \text{ g/m}^3$  (cette solution ne peut être adoptée que si elle ne crée pas de gêne pour le voisinage ou de nuisance pour les milieux sensibles) ;
- soit munies de systèmes de captage de poussières, de dépoussiérage et de filtration.

Ces aires doivent être régulièrement nettoyées.

L'objectif de cet article consiste d'une part à rappeler la localisation des aires de chargement et de déchargement au sein d'une installation, notamment en distinguant les silos plats des autres silos, et d'autre part de prévenir tout incident associé à la présence de corps étrangers au sein des produits (par la mise en place d'une maille adaptée en entrée du circuit des produits).

Au sens de cet article 12, les aires de chargement et de déchargement des produits doivent être situées à l'extérieur des cellules, sauf pour les cas de silos plats sans système de vidange des produits (puisque la vidange de ceux-ci s'effectue alors souvent par sauterelles ou chargeurs directement dans le silo). Les postes de chargement (wagons, camions...) situés directement sous des boisseaux ou sous des cellules peuvent être considérés comme situés en dehors des capacités de stockage. Une zone de chargement peut être abritée sous le même toit ou être dans le même bâtiment que les cellules fond plat, si aucun autre aménagement n'est techniquement envisageable.

### **• Caractéristiques des mailles des fosses de déchargement**

Il est généralement admis une dimension des mailles de tamis fixée à 4 x 20 cm (longueur) pour la majorité des produits (cf. notamment recommandation de l'INRS (R266), reprise dans le recueil de texte concernant la réglementation relative aux silos élaboré en avril 1999). Cependant, la nature de certaines céréales et leur degré d'humidité peuvent conduire à utiliser parfois des mailles de dimensions plus importantes. Dans tous les cas, l'exploitant doit bien sûr justifier son choix de maille.

### **• Ventilation des aires de chargement / déchargement**

Au sens de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié, une aire suffisamment ventilée est une aire où est évitée la création d'une concentration de poussières de  $50 \text{ g/m}^3$  (indépendamment du classement de zone ATEX). Ce peut donc être une aire partiellement ouverte (ouverte sur 1 ou 2 côtés...), permettant ainsi d'éviter le confinement des poussières et donc permettant d'éviter d'atteindre une teneur en poussières combustibles en suspension comprise dans le domaine d'explosivité. Des indicateurs permettant d'apprécier les quantités de poussières pouvant générer une atmosphère explosive poussiéreuse dans un environnement fermé, sont décrits dans le chapitre suivant.

Néanmoins, l'arrêté ministériel indique que « cette solution ne peut être utilisée que si elle ne crée pas de gêne pour le voisinage ou de nuisances pour les milieux sensibles ». S'il existe une gêne pour le voisinage ou le milieu, la solution d'une aire munie de systèmes de captage des poussières, de dépoussiérage et de filtration devra être préférée.

De la même façon que précédemment, l'exploitant doit justifier que les moyens qu'il a mis en place permettent de garantir que les aires de chargement et de déchargement sont, soit suffisamment ventilées, soit munies de systèmes de captage de poussières, de dépoussiérage et de filtration<sup>41</sup>.

## 2.11. ARTICLE 13 : LIMITATION DE L'EMPOUSSIEREMENT DES INSTALLATIONS

### **Enoncé de l'article**

Tous les silos ainsi que les bâtiments ou locaux occupés par du personnel sont débarrassés régulièrement des poussières recouvrant le sol, les parois, les chemins de câbles, les gaines, les canalisations, les appareils et les équipements et toutes les surfaces susceptibles d'en accumuler.

La fréquence des nettoyages est fixée sous la responsabilité de l'exploitant et est précisée dans les procédures d'exploitation.

Le nettoyage est réalisé à l'aide d'aspirateurs ou de centrales d'aspiration. Ces appareils doivent présenter toutes les caractéristiques de sécurité nécessaires pour éviter l'incendie et l'explosion.

Le recours à d'autres dispositifs de nettoyage tels que l'utilisation de balais ou d'air comprimé doit être exceptionnel et doit faire l'objet de consignes particulières.

### **Commentaires**

Pour apprécier les quantités de poussières pouvant générer une atmosphère explosive poussiéreuse, les indicateurs suivants peuvent être proposés :

- pour un nuage, si un observateur, bras tendu, ne voit pas son pouce, la concentration de poussières est de l'ordre de 50 g/m<sup>3</sup>.
- pour les dépôts, si cet observateur, en marchant sur un sol recouvert de poussières laisse des traces de pas, l'atmosphère pourra devenir explosive en cas de mise en suspension. Par ailleurs, des méthodes simples, basées sur l'observation visuelle de cibles placées au sol permettent d'estimer la quantité de poussières déposée. La vue de la cible peut par exemple disparaître lorsqu'un dépôt de 50 g/m<sup>2</sup> est atteint.

Le nettoyage des poussières doit être réalisé avec des aspirateurs (par le vide).

Le nettoyage manuel des poussières, avec des balais, ou le nettoyage avec des soufflettes doivent être exceptionnels (dans le temps). Les consignes de nettoyage doivent le rappeler de façon claire. Si ces moyens sont mis en œuvre, ce doit être avec prudence et de façon encadrée (procédure particulière de type brumisation des surfaces pour éviter la mise en suspension de poussières, réalisation d'un permis d'intervention, etc.).

La meilleure solution permettant d'éviter la redispersion des poussières pendant le nettoyage des sols, des parois, des appareils ..., est le nettoyage par aspiration qui peut être réalisé à l'aide d'aspirateurs industriels ou de systèmes de nettoyage centralisé conformes à la directive 94/9/CE, transposée en droit français par le décret n°96-1010.

Une conception adaptée des bâtiments est nécessaire, pour limiter au maximum les zones où les poussières se déposent et notamment celles d'accès difficile pour le nettoyage. On peut citer dans ce domaine les mesures suivantes :

- éviter au maximum les surfaces horizontales dans l'espace des bâtiments abritant les installations (élément de charpente, canalisation, chemin de câbles, ...),

---

<sup>41</sup> On peut citer le document de la Commission européenne « Reference Document on Best Available Techniques on Emissions from Storage » (paragraphe dédié aux fosses de réception : p. 95, paragraphe 3-4-2-8 « Dump Pits ») : un système de grilles basculantes empêchant la remontée des nuages de poussières associés à une aspiration des poussières y est présenté.

- éliminer sur les sols des étages des bâtiments les aspérités qui sont propices aux accumulations de poussières (favoriser les caillebotis),
- capoter dans la mesure du possible les installations de manutentions,
- aménager des accès aux différentes parties des bâtiments,
- prévoir une disposition verticale des chemins de câbles plutôt qu'à plat, pour éviter l'accumulation de poussières dans des zones difficilement accessibles.

Pour les cas d'installations disposant de parties hautes difficiles d'accès, les principes généraux suivants peuvent permettre de limiter au mieux les risques d'accident :

- toutes les parties accessibles doivent faire l'objet d'un nettoyage à une fréquence définie par l'exploitant ;
- il peut être fait appel, pour les parties « inaccessibles », à une fréquence définie par l'exploitant en fonction du taux d'empoussièrement constaté de l'installation, à des sociétés spécialisées dans le nettoyage de surfaces d'accès difficile ;
- l'étude de dangers du site doit prendre en compte l'empoussièrement du silo, et le matériel installé doit être adapté ;
- en cas d'empoussièrement récurrent et de nettoyage difficile, il importe de découpler les zones au maximum (il convient cependant de s'interroger sur les conséquences pour les tiers) ;
- des mesures de limitation de l'empoussièrement lors des phases d'exploitation du silo doivent être étudiées : ce peut être par exemple la mise en place de mesures de cantonnement, de goulottes ou de couloirs de chute pour accompagner la chute des produits lors de l'ensilage, l'encagement des galeries supérieures, la non utilisation du système dit « de ventilation vidange » (vidange de silo plat par ventilation), la nébulisation lors de l'ensilage, etc.

Malgré la mise en place des dispositions précédentes, la limitation des émissions et des dépôts de poussières, à un seuil convenable permettant de réduire fortement la fréquence d'occurrence de l'explosion, ne peut être obtenue sans une sensibilisation du personnel aux risques présentés par les poussières. De plus, une organisation de l'exploitation prenant en compte cet aspect (conception et maintenance des installations, procédure de nettoyage) est à mettre en place.

Les procédures de nettoyage mises en place doivent donc préciser les fréquences de passage dans les installations et les consignes de nettoyage, et faire référence au registre de suivi que les opérateurs doivent compléter systématiquement. Et lors des phases d'exploitation intensives des installations (moissons...), des consignes particulières peuvent être prévues au sein de ces procédures pour accroître cette fréquence de nettoyage. Ces paramètres peuvent faire varier le niveau de confiance des mesures de maîtrise des risques.

## **2.12. ARTICLE. 14 : PREVENTION DES RISQUES D'AUTO-ECHAUFFEMENT**

### **Enoncé de l'article**

L'exploitant doit s'assurer périodiquement que les conditions d'ensilage des produits (durée de stockage, taux d'humidité, température, etc.) n'entraînent pas des dégagements de gaz inflammables et des risques d'auto-échauffement.

La température des produits stockés susceptibles de fermenter est contrôlée par des systèmes de surveillance appropriés et adaptés aux silos. Les relevés de température donnent lieu à un enregistrement.

Des procédures d'intervention en cas de phénomènes d'auto-échauffement sont rédigées et communiquées aux services de secours

## Commentaires

Il est rappelé que les risques liés à un auto-échauffement sont l'élévation de température ainsi que le dégagement de gaz inflammables. La présentation du phénomène en lui-même a été faite au chapitre relatif à l'article 2 de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié.

Le risque d'auto-échauffement existe dès que la température du produit stocké (susceptible de conduire à un auto-échauffement) excède **une valeur critique**, fonction de la taille du stockage, du produit et de la teneur en oxygène.

Concernant le taux d'humidité des produits, il convient de noter de manière très générale que c'est le paramètre déclencheur de la fermentation qui conduit à une montée de température qui généralement plafonne à 60-70°C. **La comparaison de la taille du stockage à la taille critique n'est donc valable qu'à taux d'humidité fixé et ne prévoit donc pas les situations de fonctionnement dégradé (entrée d'humidité dans la cellule) ou les séquences incidentelles/accidentelles.**

Dans ces conditions et si la taille du stockage dépasse la taille critique pour ce taux d'humidité et pour le produit considéré, l'échauffement peut conduire par oxydation chimique (généré par la présence d'oxygène) à l'auto-inflammation dès lors qu'aucun changement de phase (fusion, évaporation) n'entrave ce processus.

La figure suivante indique en fonction de la forme de stockage retenue, la dimension critique associée.

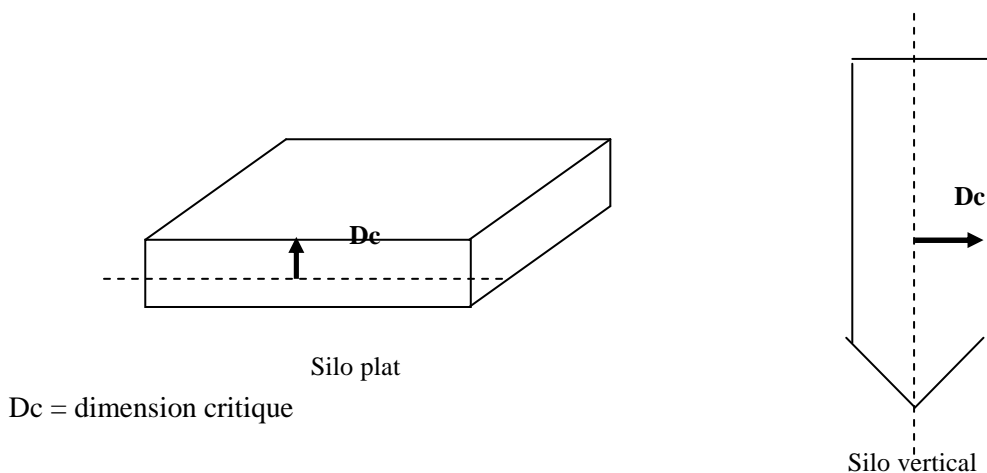
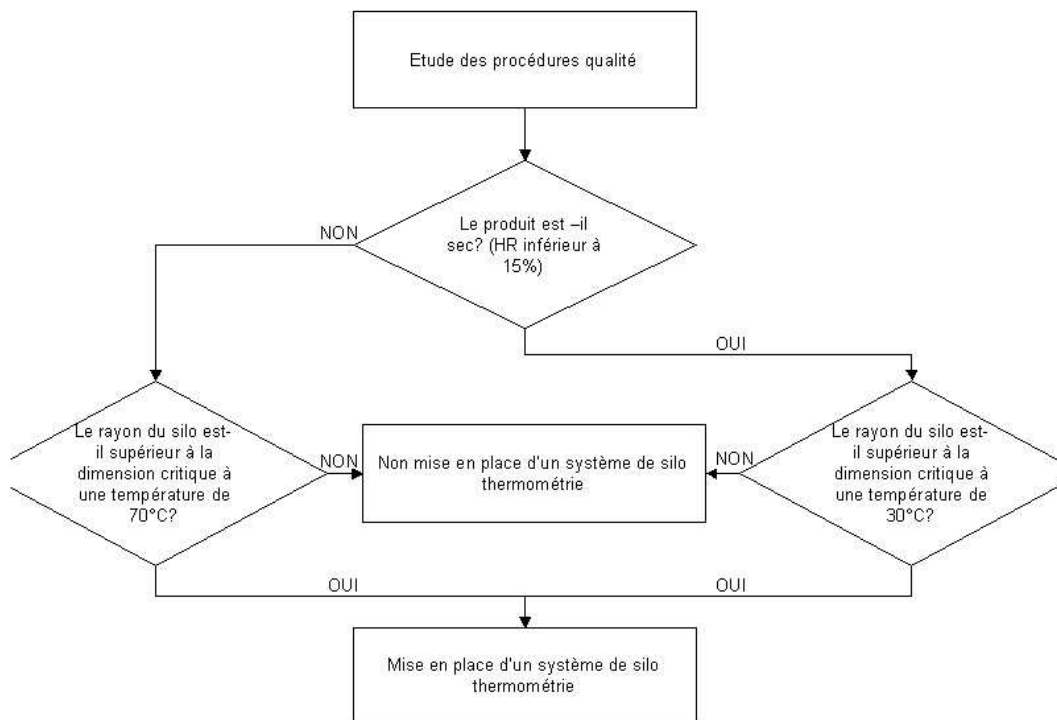


Figure 12 : Définition de la dimension critique associée en fonction de la forme de stockage.

## Définition d'un logigramme pour étudier les phénomènes d'auto-échauffement

Le logigramme ci-dessous peut être utilisé afin de prendre en compte les risques d'auto-échauffement.



Le diagramme ci-dessus suppose en condition première que le produit ait une humidité maîtrisée ou fixée : en cas d’infiltration d’eau dans une cellule par exemple, ou d’une défaillance organisationnelle lors de l’ensilage des produits (stockage trop humide), il est possible que ce taux soit dépassé : le phénomène d’auto-échauffement est alors susceptible de se présenter. Aussi, la non mise en place d’un système de surveillance par thermométrie aux motifs que le taux d’humidité des produits est en permanence maîtrisé et qu’aucun point chaud ne peut entrer en contact avec les produits doit être pris avec prudence. Il appartient à l’exploitant de le démontrer explicitement ; cela doit par ailleurs être assorti de procédures et consignes détaillées et rigoureuses, intégrant notamment une surveillance fréquente des cellules et des modes opératoires relatifs aux opérations par points chauds (permis de feu, rondes, etc.). Enfin, les exploitants doivent rester vigilants en ce qui concerne les températures de produits sortant des installations de séchage.

S’agissant des tailles critiques en fonction des températures de stockages, des ordres de grandeurs sont disponibles pour les oléagineux et différentes céréales dans une étude COOP de France réalisée par l’INERIS.

Ils sont repris le tableau ci-dessous :

Produit	Taille critique à une température de 30°C	Taille critique à une température de 70°C
oléagineux ( tournesol...)	15 m	3 m
céréales (blé, orge, maïs...)	100 m	20 m

Tableau 9: Dimension critique de produits agro-alimentaires

Nous ne disposons pas de valeurs pour la luzerne et les tourteaux de colza mais ce sont des produits particulièrement réactifs. **Dans ces cas, la mise en place de sondes thermométriques constitue la mesure de sécurité indispensable.**



Il convient de distinguer les sondes à mettre en œuvre dans les silos plats et celles destinées aux silos verticaux.

Dans les silos plats, on peut mettre en place des sondes de mesures manuelles. Le nombre de ces sondes doit être adaptée aux dimensions et aux produits stockés.

Pour les silos verticaux, des sondes automatiques peuvent être mises en place. Au moins une sonde thermométrique doit être installée par cellule (nombre à adapter par l'exploitant selon la taille des cellules), placée de préférence dans l'axe central de la cellule ou au point recevant le plus d'air.

Par ailleurs, il convient de s'assurer fréquemment de l'étanchéité des cellules de stockage afin de prévenir toute entrée d'humidité et de limiter les entrées d'air par le bas.

### **Cas particulier du sucre**

On rappelle que le sucre cristallisé blanc, sec, stocké en silo à une humidité contrôlée inférieure à 0,1 % n'est pas susceptible de fermenter (l'activité thermodynamique de l'eau d'une solution de sucre est très faible, empêchant ainsi tout développement de micro-organismes). A noter toutefois que les coproduits de sucrerie (pulpes déshydratées) peuvent être sujets à auto-échauffement, par l'effet combiné de la réaction dite de Maillard (condensation exothermique) et de la fermentation.

### **Procédures d'intervention à mettre en place suite à la détection de phénomènes d'auto-échauffement**

Il convient de prévoir une procédure d'intervention en cas d'auto-échauffement, même si la taille des cellules est inférieure à la taille critique (de façon à anticiper toute inflammation survenant suite à une fuite en toiture, un point chaud d'origine humaine, etc.).

Parmi les points essentiels à prendre en compte pour élaborer des procédures d'intervention :

- Pour les cellules horizontales, lorsque l'auto-échauffement est encore très localisé, et ne s'est pas propagé à une trop grande partie de la masse ensilée, un accès dans la masse ensilée peut être pratiqué, et les produits chauds peuvent être sortis à l'extérieur de la cellule pour y être étalés et/ou arrosés. Une procédure précise est à définir.

- Pour les cellules de stockage verticales de grandes capacités présentant des feux couvants, un risque d'explosion existe en cas de désilage par formation d'atmosphères explosives (poussièreuses en cas de désilage ou gazeuses). Seule l'injection prolongée de gaz inerte combinée si nécessaire avec de la mousse, en permettant de balayer l'ensemble de la masse auto-échauffée ou en combustion et en inertant le ciel de la cellule est véritablement efficace. Là encore, des procédures précises d'intervention sont à définir.

Il est rappelé que l'utilisation de lances à eaux est à proscrire compte tenu du risque d'explosion engendré par le soulèvement de poussières.

Des indications sur les procédures d'intervention dans les silos sont présentées en **annexe B**.

### **Mesures compensatoires si taille critique non atteinte**

En conclusion, lorsque les cellules (ou as de carreau) ne sont pas muni(e)s de sondes thermométriques, il est nécessaire de s'assurer :

- que les cellules de taille inférieure à la taille critique sont toujours réservées au stockage des mêmes produits ou de produits de même taille critique ;
- que le contrôle (suivi d'un enregistrement) du taux d'humidité et de la température des produits lors de l'ensilage est rigoureusement réalisé par l'exploitant, et qu'une surveillance fréquente des cellules est en place (entrée d'eau impossible...) ;

- que, lorsque des produits ne correspondent pas aux conditions normales de stockage, le stockage provisoire en attendant la phase de séchage doit être fait dans des cellules dont la taille est inférieure à la taille critique ;
- que toutes les situations susceptibles de produire des sources d'inflammation à l'intérieur ou à proximité des cellules (foudre, points chauds, incendie dans une autre partie d'installation...) sont rigoureusement encadrées et prévenues sur le site (y compris détection des sources d'inflammation éventuelles). Il appartient à l'exploitant de démontrer explicitement le respect de l'ensemble de ces conditions.

En parallèle, de façon à détecter tout début d'incendie lié à une cause externe (point chaud...), la mise en place de mesures de maîtrise des risques adaptées est nécessaire, pour toutes les situations susceptibles de produire des sources d'inflammation à l'intérieur ou à proximité des cellules : mise en place d'une détection incendie (assortie d'une alarme), réalisation de rondes périodiques pendant les 3 jours maximum du stockage, utilisation de sondes de température mobiles ou de caméras thermiques, etc.

L'arrêté ministériel du 28 décembre 2007 (applicable aux silos soumis à déclaration) prévoit une surveillance hebdomadaire, avec une fréquence qui peut être plus élevée durant les périodes de réception des produits ou d'ensilage (ceci doit être fait l'objet d'une procédure dans les consignes d'exploitation, explicitant la périodicité et le mode de surveillance).

### **2.13. ARTICLE 15 : PREVENTION DES RISQUES LIES AUX APPAREILS DE MANUTENTION**

#### **Énoncé de l'article**

Les filtres à manche sont protégés par des événements (sauf impossibilité technique), qui, dans la mesure du possible, débouchent sur l'extérieur.

Les systèmes de dépoussiérage et de transport des produits sont conçus de manière à limiter les émissions de poussières. Ils sont équipés de dispositifs permettant la détection immédiate d'un incident de fonctionnement et l'arrêt de l'installation.

Les installations de manutention sont asservies au système d'aspiration avec un double asservissement: elles ne démarrent que si le système d'aspiration est en fonctionnement, et, en cas d'arrêt du système d'aspiration, le circuit doit immédiatement passer en phase de vidange et s'arrêter une fois la vidange terminée, ou s'arrêter en cas d'arrêt du système d'aspiration, après une éventuelle temporisation adaptée à l'exploitation.

Les transporteurs à bandes sont équipés de bandes non propagatrices de la flamme.

#### **Commentaires**

Le tableau ci-après constitue un inventaire de différents dispositifs de sécurité spécifiques aux équipements de manutention. En fonction de l'analyse de risque, la mise en place de moyens de protection sera retenue. Le scénario d'explosion débutant dans un appareil de manutention et son éventuelle propagation ne peut être totalement écarté même en présence de dispositifs de sécurité.

N.B. : **En gras** figurent les équipements nécessaires et exigibles pour la prévention des explosions et des incendies. Les autres dispositifs de sécurité sont uniquement recommandés dans le cadre de l'amélioration continue.

Equipements	Dispositifs de sécurité destinés à limiter les sources d'inflammation.	Dispositifs de sécurité destinés à limiter l'empoussièrement	Dispositifs de protection contre l'explosion.
Transporteurs à bandes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôleurs de températures sur les paliers moteurs (de préférence détecteurs actifs)</li> <li>• <b><u>Détecteur de sur-intensité moteur ou sécurité puissance (imposé sur tous les moteurs par le Code du Travail)<sup>42</sup></u></b></li> <li>• <b><u>Contrôleur de rotation sur tambour mené</u></b></li> <li>• <b><u>Contrôleurs de déport de bandes</u></b></li> <li>• <b><u>Bandes résistantes au feu (réglementaire)</u></b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Points d'aspiration constants aux points de jetées du grain cf. article 10</u></b> ou cas par cas pour les non-SETI</li> <li>• <b><u>Capotage (le cas échéant) obligatoire pour les transporteurs à bande des SETI dans espaces confinés non évités (cf. article 10 modifié)</u></b> ou, pour les autres silos non SETI, au cas par cas</li> </ul>	
Transporteurs à chaîne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Détecteur de sur-intensité moteur (imposé sur tous les moteurs par le Code du Travail)<sup>41</sup></u></b></li> <li>• <b><u>Détecteur de bourrage (redler)</u></b></li> </ul>		
Elévateurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Paliers extérieurs</u></b></li> <li>• Contrôleurs de températures sur les paliers (de préférence actifs) sur les appareils les plus puissants</li> <li>• <b><u>Contrôleur de rotation sur tambour mené ou sondes de bourrage, asservis au fonctionnement de l'installation</u></b></li> <li>• <b><u>Contrôleurs de déport de sangles ou détecteurs de température</u></b></li> <li>• Sangles non propagatrices de la flamme (NF EN 20-340) en cas de remplacement ou sangles neuves</li> <li>• Matériaux de constitution des godets non –étincelants (polymère ou fer doux...)</li> <li>• <b><u>Equipements reliés à la terre</u></b></li> <li>• <b><u>Protection moteurs ou sécurité puissance</u></b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Points d'aspiration aux jetées à la sortie de l'élévateur ou au pied de la gaine montante (+ jetées capotées).</li> <li>• <b><u>Les jetées sont étanches et/ou munies des dispositifs d'aspiration ci-dessus</u></b></li> <li>• <b><u>Marche des élévateurs asservie à la marche du système d'aspiration (obligatoire)</u></b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Event d'explosion/surfaces soufflables (tête d'élévateur fragilisée ...)</li> <li>• Suppresseur d'explosion (notamment industrie du sucre)</li> <li>• Résistance des élévateurs à des pressions importantes (renforcement des pieds d'élévateur) qui permet d'éviter la transmission de l'explosion en cellule (attention aux alimentations directes)</li> </ul>
Vis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trappe de bourrage</li> <li>• <b><u>Contrôleurs d'intensité ou sécurité puissance<sup>41</sup></u></b></li> </ul>	<b><u>Capotage</u></b> (par définition)	

<sup>42</sup> Ce dispositif ne permet pas toujours de déceler à temps un incident, source d'incendie ou d'explosion.

Equipements	Dispositifs de sécurité destinés à limiter les sources d'inflammation.	Dispositifs de sécurité destinés à limiter l'empoussièrement	Dispositifs de protection contre l'explosion.
Appareil Nettoyeur/Séparateur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Protection sur moteurs ou sécurité puissance</u></b> (ex : par disjoncteurs /magnétothermiques avec contacteurs/fusibles)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Capotage.</u></b></li> <li>• Aspiration des poussières</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombreuses ouvertures et panneaux d'accès offrant une faible résistance</li> </ul>
Filtres (cf. annexe C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Manches conductrices et équipements mis à la terre ;</u></b></li> <li>• Capteur de température à l'entrée du filtre, arrêt du ventilateur asservi au capteur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b><u>Maintenance et nettoyage réguliers</u></b> du système de dégommage et de la partie propre du filtre une fois par an minimum ;</li> <li>• <b><u>Présence d'un moyen de contrôle de la pression pour les filtres à manches (manomètre, etc.);</u></b></li> <li>• <b><u>Evacuation des poussières à l'extérieur préconisée ;</u></b></li> <li>• <b><u>Ventilateur toujours placé derrière le filtre</u></b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositifs anti-retour (pots de découplage...)</li> <li>• <b><u>Event sur le filtre à manches avec rejet à l'extérieur (filtre en façade )</u></b> et détecteur d'ouverture</li> <li>• Le stockage des poussières à l'extérieur des installations</li> <li>• Découplage entre dépoussiéreurs (autres que filtres à manche) et les stockages des poussières</li> </ul>
Courroies de transmission hors bandes et sangles	Elles doivent être vérifiées régulièrement et changées si nécessaire. La qualité de la courroie sera déterminée en fonction des risques identifiés. La norme NF EN 12882 propose un classement des courroies selon leur degré de sécurité en terme d'inflammation, de propagation de la flamme et d'inflammation au frottement et d'électricité statique		

Tableau 10 : Dispositifs de sécurité à mettre en œuvre sur les équipements de manutention

De manière systématique les mesures suivantes doivent être mises en place :

- tous les appareils doivent être mis à la terre et reliés par des liaisons équipotentielles,
- un programme de maintenance doit être adapté sur chaque équipement,
- tous les détecteurs et contrôleurs doivent disposer d'un renvoi en cas de dysfonctionnement avec un arrêt des manutentions en amont,
- les aspirations des poussières doivent disposer d'un double asservissement : un premier asservissement lié au démarrage de l'installation et un deuxième qui arrête l'installation en cas de panne du système d'aspiration (N.B. : le redémarrage en charge peut être dangereux car il peut créer une atmosphère explosive, c'est pourquoi il est recommandé dans certains cas de faire passer immédiatement le circuit en phase de vidange et d'arrêter les manutentions une fois la vidange terminée).
- Les filtres à manche doivent être protégés par des événements (sauf impossibilité technique), qui, dans la mesure du possible, débouchent sur l'extérieur et non pas devant des lieux de passage du personnel. En effet, ces filtres peuvent être le siège d'une explosion primaire.

L'asservissement généralement mis en place est automatique : en cas de détection d'un dysfonctionnement, après une éventuelle temporisation de quelques secondes, la manutention est arrêtée par un automate avec renvoi du problème au tableau de commande du silo. Néanmoins, l'objectif énoncé dans l'article 15 de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié est la détection du problème et l'arrêt des équipements : aussi, il pourra être accepté un arrêt non automatique des équipements (uniquement dans le cas de la détection des dysfonctionnements, pas dans le cas de l'arrêt de l'aspiration), réalisé par un opérateur, sous réserve d'un encadrement très rigoureux de

ces actions (procédures, tests périodiques de la réactivité des opérateurs, etc.). Le niveau de confiance global de ces chaînes d'actions de sécurité pourra être évalué dans l'étude de dangers.

Les mesures de protection citées sont celles les plus couramment rencontrées. Cependant, des dispositifs respectant « *les exigences essentielles en ce qui concerne la sécurité et la santé pour la conception et la construction d'appareils et de systèmes de protection destinés à être installés en ATEX* » (Annexe II de la directive ATEX 94/9/CE) et certifiés par un organisme notifié peuvent être installés.

### **Caractéristiques des bandes de transporteurs**

Les bandes non propagatrices de la flamme actuellement en place dans les silos sont généralement certifiées selon la norme ISO 340 (auto-extinguibles). En cas de changement de bande, il est conseillé d'utiliser des bandes, plus efficaces, conçues selon la norme NF EN 47107.

Le capotage des bandes transporteuses peut parfois être mis en place pour réduire l'empoussièrement des installations ; cette mesure doit être associée à une aspiration des jetées de produits sur les bandes : le capotage permet en effet de canaliser l'aspiration et donc d'augmenter son efficacité, et évite ainsi les émanations de poussières à l'extérieur de l'équipement (mais cela n'évite pas la présence de poussières dans l'équipement).

L'accidentologie récente (les accidents de Metz le 4 septembre 2004 et le 10 mai 2005 à Plestan) prouve que la conformité à la norme ISO 340 ne permet pas d'écartier totalement le risque de propagation d'incendie via les bandes transporteuses dans certaines conditions. En effet, en cas d'échauffement ou de départ de feu au niveau d'une bande transporteuse capotée, l'effet tunnel peut favoriser la propagation des flammes et remettre en cause le caractère auto-extinguible des bandes. Les accidents survenus en 2004 et 2005 ont conduit à constater la propagation d'incendie sur plusieurs centaines de mètres de bandes transporteuses. Des essais ont été réalisés par COOP de France avec les exploitants concernés par ces accidents et un fabricant de bande. Différentes pistes ont été envisagées, dont le remplacement par un modèle de bande alimentaire conservant son caractère auto-extinguible même en cas d'effet tunnel. Les conclusions définitives de cette étude ne sont pas encore disponibles.

### **Systèmes de dépoussiérage**

Concernant les spécificités propres aux systèmes d'aspiration de poussières, une présentation technique de ces systèmes, ainsi qu'une description des moyens de protection et de prévention à mettre en œuvre contre les explosions est donnée en **annexe C**. Il est rappelé que le dépoussiérage est une mesure de maîtrise des risques importante à mettre en œuvre pour limiter les émissions de poussière et que son dimensionnement doit être correctement réalisé. Une mesure annuelle des débits d'air permet de s'assurer du maintien de l'efficacité du dépoussiérage. Par ailleurs certains dispositifs sont équipés de capteur de pression permettant de contrôler le bon fonctionnement du système.

On peut rappeler que les procédés de dépoussiérage sont de deux catégories<sup>43</sup> :

- les dépoussiéreurs à sec qui comprennent eux-mêmes les cyclones, les filtres à manches et les dépoussiéreurs électrostatiques (qui fonctionnent avec des électrodes maintenues à des potentiels différents entre lesquels s'établit un champ électrique) ;
- les dépoussiéreurs humides ( ce sont des capacités contenant de l'eau à travers lesquelles on fait passer le flux d'air à dépoussiérer...).

**Un cyclone** est un contenant de forme cylindrique ou tronconique et d'axe vertical qui comporte trois orifices. A leur arrivée dans le cyclone, les grains sont séparés de l'air par effet gravitaire,

---

<sup>43</sup> Rapport inéris DRA 35, version 2004.

c'est-à-dire qu'ils tombent dans le bas du cyclone d'autant qu'ils sont plus gros et lourds. Donc ce système ne permet pas de retenir les grains les plus fins comme un filtre à manches, qui fonctionne comme un aspirateur domestique.

**Le filtre sous caisson ou filtre à manche** est un équipement indépendant, distinct des machines qu'il met en dépression bien qu'il soit connecté à une ou plusieurs de celles-ci au moyen de tuyauteries d'aspiration. L'air capté est filtré au travers de manches en tissu puis traverse le ventilateur puis il est rejeté à l'extérieur. Le mélange air/produit pulvérulent arrive dans le corps du filtre par un conduit. La séparation de l'air propre et du produit est réalisée au moyen de manches. A l'heure actuelle celles-ci se doivent être de qualité antistatique. Un système de décolmatage, par air comprimé (5 bars) ou air pulsé (0,5 bar) par un surpresseur, crée ponctuellement dans le corps du filtre, autour de la manche en cours de dégommage, une zone plus chargée de fines particules<sup>44</sup>.

### **Recommandations sur les sangles**

La rédaction de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié n'impose pas strictement l'utilisation de sangles d'élévateurs non propagatrices de la flamme. Néanmoins, l'article 9 prévoit une obligation de prévention des risques d'incendie et d'explosion. La mise en place de sangles anti-propagatrices de la flamme est une mesure permettant de répondre en partie à cet objectif.

En effet, l'accidentologie dans les silos de produits organiques (informations BARPI de 1997 à décembre 2005) montre qu'environ 86% des accidents survenus dans les silos au cours de cette période sont des incendies, et environ 20 % de ces incendies concerne les élévateurs, équipements particulièrement « critiques » du point de vue de la maîtrise des risques d'incendie et d'explosion. Il est parfois avancé qu'un incendie de sangle non traitée conduirait à une rupture de la sangle, celle-ci tombant au sol (puisque les sangles sont disposées verticalement) sans propager de flamme aux cellules de stockage. Néanmoins, une telle situation conduirait très probablement à un incendie de la sangle non traitée en pied d'élévateur, ce qui, en terme de quantité de matière combustible, pourrait provoquer un accident majeur.

Par ailleurs, il est possible que la configuration des élévateurs, positionnés verticalement et de forme allongée, conduise à une intensification de l'incendie par « effet cheminée ». Compte tenu de ces éléments et au regard des enseignements que l'on peut tirer de l'accidentologie, on peut considérer que les sangles anti-propagatrices de la flamme constituent une bonne pratique permettant de répondre à un objectif de prévention et de protection des silos contre le risque d'incendie et de propagation d'incendie, voire de prévention contre les risques d'explosion.

Ainsi, dans le cas d'installations nouvelles, la mise en œuvre dans les élévateurs de telles sangles doit être systématique ; dans le cas d'installations existantes ayant mis en place des sangles anti-propagatrices de la flamme, il est recommandé de maintenir ces sangles (et en cas de remplacement, d'installer à nouveau des sangles anti-propagatrices de la flamme). Enfin, dans le cas d'installations existantes ne disposant pas de sangles anti-propagatrices de la flamme, l'installation de ces sangles est très fortement recommandée, surtout lors du remplacement des sangles.

### **Autres recommandations sur les équipements et le matériel**

Il est recommandé de mettre en place des contrôleurs de rotation et des contrôleurs de déport de sangles et de bandes sur les transporteurs et les élévateurs.

Une attention particulière doit être portée sur les paliers situés dans des fosses. S'agissant des pastilles thermo-sensibles, elles doivent être accompagnées de procédures de contrôle.

---

<sup>44</sup> Source : Nutrioxo.

Les décharges d'électricité statique liées au frottement entre les paliers et des bandes ou des courroies non anti-statiques sont des décharges de type aigrette dont l'énergie ne dépasse pas 5 mJ qui ne sont pas susceptibles d'enflammer les nuages de poussières agro-alimentaires. Il n'y a donc pas de nécessité de mettre en œuvre des courroies anti-statiques.

L'usure des paliers/roulements doit faire l'objet d'un suivi attentif de la part de l'exploitant : les vitesses de rotation engendrent une usure des roulements progressive. Avant qu'un roulement soit défectueux, il se caractérise par des fréquences caractéristiques qui indiquent son état d'usure. Une maintenance préventive peut être mise en place au prorata de son utilisation.

Les équipements tournants (paliers, moteurs...) doivent être protégés contre la pénétration des poussières, ils doivent être régulièrement lubrifiés, et disposés à l'extérieur des installations qu'ils entraînent (paliers à roulement externe).

Concernant les élévateurs :

- une détente des courroies entraîne un patinage au niveau des tambours du moteur et peut provoquer un échauffement.
- Les courroies peuvent frotter sur les carters et provoquer également un échauffement.

L'échauffement a des effets plus ou moins importants selon la hauteur et le débit de l'élévateur.

A noter que les bourrages dans les équipements de transport des produits, dus à des mauvais transferts de produits, ont pour effet de mettre en pression les conduits de la machine concernée, et provoquent des échauffements des moteurs et des frottements supplémentaires. Cela devrait entraîner un arrêt du système soit par un contact électrique sur une trappe appropriée (sonde capacitive et contrôleur de bourrage ou de rotation), soit par une disjonction du moteur par surintensité.

### **3. CONCLUSION**

---

---

Ce document s'attache à apporter des éléments de réflexion, de méthodologie et de maîtrise des risques pour appliquer l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 modifié relatif à la prévention des risques dans les silos.

Il est rappelé l'importance de l'analyse de risques menée dans le cadre de l'étude de dangers qui doit servir de base à l'évaluation des risques.

Enfin, ce document a vocation à évoluer en fonction du retour d'expérience issu de l'application du nouvel arrêté et de l'amélioration des connaissances en matière de silos.

