



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

## Rapport Final

# **Guide pour la conception et l'exploitation, de silos de stockage de produits agro- alimentaires vis-à-vis des risques d'explosion et d'incendie**

Ministère de l'Aménagement du territoire et de  
l'Environnement

*P. ROUX*

Mai 2000

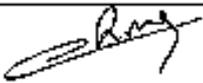
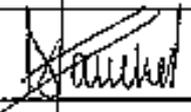
# Guide pour la conception et l'exploitation, de silos de stockage de produits agro- alimentaires vis-à-vis des risques d'explosion et d'incendie

Rapport final

Mai 2000

## REMARQUE

Ce document annule et remplace les versions précédentes

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	P. ROUX	D. GASTON	B. FAUCHER
Qualité	Ingénieur à la Direction des Risques Accidentels	Délégué Scientifique à la Direction des Risques Accidentels	Directeur à LA Direction des Risques Accidentels
Visa			

## **- SOMMAIRE -**

- **ORIGINE DU GUIDE** p. 3
- **OBJECTIFS ET LIMITES DU GUIDE** p. 7
- **Première partie : ACTEURS DE LA SECURITE DES STOCKAGES DE PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES** p. 9
- **Deuxième partie : CONTEXTE REGLEMENTAIRE** p. 14
- **Troisième partie : CONFIGURATION GENERALE D'UN ETABLISSEMENT STOCKEUR** p. 33
- **Quatrième partie : NATURE DE PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES** p. 49
- **Cinquième partie : RISQUES "EXPLOSION" ET "INCENDIE"** p. 55
- **Sixième partie : MOYENS DE PREVENTION ET DE PROTECTION DE L'EXPLOSION ET DE L'INCENDIE** p. 112
- **Septième partie : RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION DE NOUVEAUX SILOS, POUR LES AMENAGEMENTS D'ANCIENS SILOS ET POUR L'EXPLOITATION** p. 135
- **CONCLUSION** p. 185
- **ORGANISATIONS PROFESSIONNELLES** p. 188
- **ORGANISMES** p. 189
- **BIBLIOGRAPHIE** p. 190

## ORIGINE DU GUIDE

Les explosions de poussières dans l'industrie en général et dans l'industrie agro-alimentaire en particulier, sont loin de représenter un phénomène nouveau ; elles ont attiré depuis longtemps l'attention et fait l'objet de nombreux travaux pour tenter d'expliquer leurs causes et rechercher les moyens de les éviter.

Dans l'industrie, toute installation dans laquelle des poussières au moins partiellement inflammables sont fabriquées ou mises en œuvre, peut être soumise à un risque d'explosion de poussières dans certaines conditions de concentration en présence d'une source d'inflammation.

Les effets de l'explosion dus à l'augmentation de la pression peuvent être limités, et se traduire par des dégâts dans une seule installation. Mais quelquefois, des dépôts de poussières inflammables peuvent être soulevés par les effets du souffle d'une première explosion ("explosion primaire") et générer une, voire des "explosions secondaires" qui sont susceptibles de provoquer des dégâts considérables conduisant à une destruction presque totale des installations industrielles et d'entraîner des dommages graves aux personnes.

C'est particulièrement le cas pour l'industrie agro-alimentaire, où la plupart des catastrophes qui ont eu lieu n'ont pas été produites par une seule explosion, mais deux ou plusieurs explosions successives qui ont atteint une grande partie des zones "empoussiérées", même celles où les poussières n'étaient préalablement pas en suspension dans l'air.

Les explosions peuvent aussi se produire en raison de l'utilisation de gaz et liquides inflammables dans les installations (combustibles, produits de traitement, solvants, ...).

L'industrie agro-alimentaire est confrontée également à des incendies impliquant les matières stockées, dont les conséquences ne sont toutefois pas généralement aussi dramatiques pour les personnes que celles des explosions, mais qui conduisent parfois à la destruction complète des installations.

Les incendies résultent de la combustion de produits agro-alimentaires ou d'autres produits combustibles constitutifs des bâtiments et appareils qui peuvent aussi s'enflammer ou contribuer de façon significative au développement d'un incendie.

Historiquement, depuis plus de 200 ans, on signale "des coups de poussières". Une explosion de poussières de farine survenue dans un entrepôt de Turin le 14 décembre 1785 serait semble-t-il la première explosion de poussières reconnue et signalée. Elle s'est produite pendant la période durant laquelle les moulins à vent utilisés depuis le début du 14<sup>ème</sup> siècle pour le broyage des céréales, tout d'abord en Amérique et ensuite en Europe, ont été remplacés par des moulins à vapeur nettement plus performants. On cite également des explosions qui se sont produites en 1887 en Allemagne aux nouveaux moulins de la Weser à Hameln et qui causèrent la mort d'une trentaine de personnes et en blessèrent également un grand nombre.

Au 20<sup>ème</sup> siècle, la fréquence des explosions de poussières s'est accrue surtout en raison du développement de l'industrialisation.

A partir des années 60, des explosions de poussières surviennent fréquemment dans les stockages de produits agro-alimentaires, notamment aux Etats-Unis qui connaissent à cette époque un fort développement de l'agriculture. Une étude américaine publiée en 1982 révèle plus de 200 explosions ayant fait 200 morts dans l'industrie agro-alimentaire dans la période 1960-1980 notamment dans les silos de stockage.

A l'aube des années 80, plusieurs explosions aux conséquences dramatiques mettant en jeu des poussières agro-alimentaires ont eu lieu dans le monde.

En Allemagne, en février 1979, une explosion a dévasté une minoterie à Brême faisant 14 morts. Aux Etats-Unis, deux explosions particulièrement dévastatrices sont survenues en décembre 1977, l'une dans les silos de la Continental à Westwego en Louisiane (36 morts, 15 blessés), l'autre dans les silos de la Farmers Export (18 morts, 23 blessés). A la suite de ces graves explosions de 1977, une action importante de recherche a été entreprise aux Etats-Unis, qui a conduit à la révision en 1980 de la norme pour la prévention des incendies et des explosions dans les silos de produits agro-alimentaires élaborée par le NFPA en 1973.

A la même époque, des accidents dans des silos de stockage de produits agro-alimentaires ont eu lieu dans d'autres pays : Canada, Belgique et surtout Espagne où une explosion dans les silos de la Coopérative Guissona à Lerida a fait 10 morts et 13 blessés en 1979.

En France, jusqu'en 1975, les industries de stockage et de traitement des grains semblent avoir été relativement épargnées comparativement à l'Allemagne et surtout aux Etats-Unis. Le sinistre le plus grave enregistré jusqu'à cette date semble être une explosion dans un silo à maïs (Lestrem) qui n'a pas fait de victime.

Dans la période suivante, jusqu'en 1982, des explosions ont eu lieu de façon sporadique dans les installations des silos français dont la plus grave est celle d'un silo de tourteaux d'huilerie à Bordeaux (1 mort, 12 blessés).

L'année 1982, a été marquée par deux explosions importantes en France, l'une dans une sucrerie à Boiry Sainte Rictrude et l'autre dans une malterie à Metz. L'explosion des silos de Metz d'octobre 1982, qui a fait 12 victimes et entraîné des dégâts matériels considérables, a marqué les esprits et a fait réagir les pouvoirs publics et les organismes de prévention français.

Cette prise de conscience collective des dangers que pouvaient présenter les stockages de produits agro-alimentaires, s'est traduite par l'arrêté du 11 août 1983.

Pour faciliter la mise en application de cet arrêté, un effort normatif a été mené, qui a concerné trois aspects :

- les systèmes d'atténuation des effets des explosions, en particulier les événements de décharge,
- la conception générale des silos en vue d'une meilleure sécurité vis-à-vis de l'incendie et de l'explosion,
- la détermination des quantités de poussières explosives déposées.

Cependant, les travaux normatifs n'ont pu être menés à leur terme, que pour le premier et le troisième aspect, et n'ont pas répondu totalement aux objectifs assignés :

- le calcul des surfaces d'évents indiqué dans la norme NFU 54-540 (/1/), n'est pas adapté pour les plus gros silos (plus de 1 000 m<sup>3</sup>) que l'on trouve fréquemment dans de nombreuses installations de stockage,
- la norme sur la conception générale des silos (/2/) n'a pas pu être finalisée du fait de la très grande diversité des installations de stockage, mais aussi des types de cellules et de matières stockées, et de connaissances encore insuffisantes sur les phénomènes de propagation des explosions et d'inflammation des poussières agro-alimentaires dans les installations, et sur le comportement des structures aux effets de l'explosion.

Depuis 1982, année de l'accident de Metz, des explosions et des incendies continuent de se produire en France dans les silos de stockage de produits agro-alimentaires. D'après des données provenant de GROUPAMA (/3/) sur les incendies et les explosions survenus dans les installations de stockage chez les assurés du groupe sur la période 1982-1990, il apparaît que sur cette période se sont produits en moyenne par an, une explosion grave et deux incendies importants.

Une explosion est l'accident industriel qui a les conséquences les plus graves sur les personnes et l'environnement. L'explosion qui a dévasté le silo de Floriffoux en Belgique en 1993 (4 morts), et plus proche de nous, celle qui a détruit le silo de Blaye en 1997 (11 morts) (/4/) et dont les enseignements ont été pris en compte dans l'arrêté du 29 juillet 1998 sont là pour le rappeler. Par ailleurs, c'est avec ce type d'accident que l'on peut avoir ce que les assureurs appellent un "sinistre maximal possible" c'est-à-dire une destruction de la quasi-totalité des infrastructures existantes. Cela signifie donc, pour l'exploitant d'un silo, un arrêt total et parfois définitif de son activité.

Les incendies, qui ont une fréquence plus élevée que les explosions de poussières sont davantage redoutés en France par les exploitants de silos. Les incendies, s'il n'ont pas de conséquences humaines dramatiques lorsqu'ils ne sont pas accompagnés d'explosion, peuvent conduire à un "sinistre grave" (donc moins important que le "sinistre maximum possible") qui pose cependant presque toujours des problèmes délicats, dont la première conséquence sera l'arrêt momentané de l'activité, et souvent la reprise de l'activité avec une capacité de stockage amoindrie si une unité de stockage doit être reconstruite.

Compte tenu des conséquences humaines, matérielles et économiques que peut avoir une explosion ou un incendie sur les activités de stockage de produits agro-alimentaires, il est apparu nécessaire d'établir un document sur les aspects de prévention et de protection contre les effets d'accidents provenant d'incendies et d'explosions dans les installations de stockage de produits agro-alimentaires et leurs équipements annexes.

## OBJECTIFS ET LIMITES DU GUIDE

Les objectifs du guide, qui tiennent compte des différents contacts pris avec les pouvoirs publics (Ministère chargé de l'Environnement), les professionnels du stockage, et les assureurs, sont les suivants :

- permettre aux ingénieries spécialisées, aux fabricants d'installations, aux autorités administratives, aux assureurs de pouvoir disposer d'un ouvrage de référence traitant des aspects de prévention et de protection contre les effets d'accidents dus à l'incendie et à l'explosion dans les silos, tenant compte des particularités des stockages français,
- augmenter les connaissances dans les domaines de la prévention et de la protection vis-à-vis de l'explosion et de l'incendie,

La réalisation du guide s'est appuyée sur :

- l'exploitation de travaux réalisés en France et à l'étranger traitant de ces problèmes (essais, études de cas, recommandations, réglementations, ...), une recherche bibliographique et des échanges internationaux. Au plan français, en dehors des travaux de l'INERIS, les travaux et informations émanent essentiellement du Ministère chargé de l'Environnement, de l'INRS, de la FFCAT, de l'ITCF, du CETIOM, de l'IFBM, du SNFC, du GLCG, de l'ONIC, de GROUPAMA et de l'APSAD\*,
- des contacts auprès des professionnels français du stockage lors de rencontres (salons spécialisés) ou de réunions de travail,
- des enquêtes sur les installations types établies lors de visites de sites,
- l'analyse de l'expérience tirée des accidents survenus en France et à l'étranger, dans les stockages de produits agro-alimentaires,

Une partie des travaux a été réalisée en commun, dans le cadre du projet européen COPERNICUS ERB CIPACT 930180, avec deux autres Instituts, l'Institut de Recherche des Mines (VVUU en République Tchèque) et l'Institut Central des Mines (GIG, Mine Barbara en Pologne) (/5/).

---

\* Le rôle de ces organismes est présenté dans la première partie du guide et les sigles expliqués en annexe à la fin du guide.

Afin de bien préciser les limites du guide, il est important au préalable de souligner les points suivants :

- Pour en permettre une très large utilisation, le parti a été pris d'établir un guide plutôt généraliste. De cette manière, chacun pourra y puiser ce qui l'intéresse pour répondre aux besoins de son travail, et pourra l'utiliser pour faire l'analyse des risques d'une installation en vue de l'établissement de l'étude des dangers d'un silo.
- Le guide se limite à la prise en compte du risque explosion et du risque incendie lors de la conception et de l'exploitation des silos, mais n'aborde pas d'autres risques. Pour le risque incendie, le guide s'intéresse essentiellement aux produits agro-alimentaires, mais ne traite pas le cas des matériaux de construction et des bâtiments.
- Les installations de stockage qui sont concernées par le guide, sont celles utilisées dans les opérations habituellement réalisées dans les silos de stockage depuis la réception jusqu'à l'expédition des produits c'est-à-dire :
  - . la réception des produits récoltés ou de produits séchés, déshydratés ou transformés, envoyés à l'ensilage,
  - . les traitements préalables des produits (nettoyage, séchage,...),
  - . l'ensilage des produits,
  - . le désilage des produits,
  - . l'expédition des produits.

Il s'agit donc des installations suivantes :

- . des capacités de stockage vrac,
- . des tours d'élévation,
- . des postes de réception et d'expédition,
- . des galeries de manutention,
- . des équipements auxiliaires,
- . des salles de contrôle et de commande,
- . des activités connexes et des stockages annexes.

Le guide ne concerne donc pas les installations mises en œuvre dans les opérations de transformation réalisées en amont ou en aval du stockage, notamment le cas :

- . des installations de déshydratation de la luzerne,
- . des moulins,
- . des installations de maltage
- . des installations de fabrication et de séchage du sucre,
- . des installations de fabrication des huiles,
- . des installations de séchage par atomisation.

## **PREMIERE PARTIE**

### **ACTEURS DE LA SECURITE DES STOCKAGES DE PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES**

Diverses entités, d'ordre privé ou public, interviennent dans la gestion des risques d'incendie et d'explosion des stockages de produits agro-alimentaires au plan du process, de la conception et du conseil, de la réglementation, de l'assurance.

#### **I./ L'EXPLOITANT**

Les obligations générales résultent du Code du Travail. De plus, la loi du 31 décembre 1991 définit le cadre d'une politique de sécurité intégrée à la gestion de l'entreprise, et crée l'obligation légale de sécurité.

La loi du 23 décembre 1982 réunit en une seule institution (CHSCT : Comité d'Hygiène, Sécurité et Conditions de Travail), les anciens comités d'hygiène et de sécurité (CHS) et la commission pour l'amélioration des conditions de travail (CACT).

Le CHSCT qui existe pour une entreprise de plus de 50 salariés, a pour mission au plan de la sécurité, de contribuer à la protection de la santé et de la sécurité des salariés d'un établissement qu'ils soient permanents, temporaires ou d'une entreprise extérieure.

La Directive Européenne 89/391/CEE du 12 janvier 1989 relative à l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs et la Directive Européenne 89/654/CEE du 30 novembre 1989 concernent les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour les lieux de travail. Ainsi l'employeur doit prendre les mesures nécessaires pour la protection de la sécurité et de la santé des travailleurs. Il doit en particulier :

- éviter les risques,
- évaluer les risques résiduels qui ne peuvent être évités,
- combattre les risques,
- tenir compte de l'évolution de la technique,
- remplacer ce qui est dangereux par ce qui l'est moins.

D'autre part, l'obligation du chef d'entreprise ne se limite pas au respect des règles sur la prévention et la sécurité (mise en place de dispositifs de sécurité) mais il doit également veiller à leur efficacité et à leur emploi. Le chef d'entreprise peut déléguer sa responsabilité en matière d'hygiène et de sécurité, mais il doit alors déléguer effectivement ses pouvoirs et fournir les moyens.

## **II./ LES ORGANISATIONS PROFESSIONNELLES**

Les grandes familles de produits agro-alimentaires, sont représentées par des organisations professionnelles qui les assistent dans trois domaines principaux.

- aide technique à la profession sous forme d'études, de formations et de publications,
- activité de conseil, travail sur la normalisation et la qualité,
- recherche appliquée : recherche et développement de nouveaux produits ou processus de fabrication, veille et adaptation technologique, ...

Une liste (non exhaustive) de ces organisations professionnelles est donnée en annexe au guide.

## **III./ LES PROFESSIONNELS DES INSTALLATIONS DE STOCKAGE**

Ces professionnels interviennent à la demande des industriels stockeurs pour la conception des complexes de stockage ou pour la fabrication d'installations (cellules de stockage, circuit de manutention, installations de dépoussiérage, de ventilation et de séchage, ...).

## **IV./ LES SOCIETES DE SERVICE DANS LE DOMAINE DU RISQUE**

Il existe en FRANCE de nombreux Sociétés ou Organismes qui proposent des services dans le domaine du risque. Certains offrent un large éventail de prestations telles que :

- des études préalables à la construction de l'usine,
- des analyses du risque inhérent à une unité déjà existante,
- des conseils sur le choix du matériel et les techniques de prévention et de protection adaptées,
- des interventions lors (ou après) des sinistres,
- de la certification de techniques ou de matériaux,
- de la formation,
- des essais divers, de la recherche et du développement.

## **V./ LES CONSTRUCTEURS DE MATERIEL DE SECURITE**

Les constructeurs et revendeurs s'intéressent à trois aspects :

- la détection de situations dangereuses dont la détection centralisée (système d'alarme électronique) et la détection ponctuelle liée au process (gaz, fuites, poussières, charges électrostatiques),
- la détection et la lutte contre l'incendie (détecteurs, extincteurs, sprinklers, exutoires, techniques d'ignifugation, ...),
- la réduction du risque explosion (événements d'explosion, clapets, systèmes d'extinction, ...)

Les constructeurs de matériels de protection sont généralement présents dans les salons professionnels tels que Explorisk, Europrotection, Infovrac, Préventech, ...

## **VI./ LES ASSUREURS**

Le rôle de l'assureur est de supporter le coût des accidents dû à des risques que l'industriel ne peut économiquement ou techniquement éliminer. Le contrat d'assurance vient donc en complément des efforts de prévention et des techniques de protection que l'exploitant a mise en œuvre.

Les assureurs réalisent des études sur l'analyse des risques dans les différents secteurs, et participent à l'édition d'un certain nombre de documents généraux sur les risques.

## **VII./ LES ADMINISTRATIONS ET LES COLLECTIVITES LOCALES**

### **VII.1. Le rôle du maire**

Le maire est responsable de la sécurité dans sa commune. Cela touche aussi bien les risques technologiques, que les risques naturels, l'hygiène, la circulation routière, ... Sa compétence concerne tant la prévention, que la prévision et l'intervention. Il lui appartient "de faire cesser par la distribution des secours nécessaires, les accidents et les fléaux calamiteux ainsi que les pollutions de toute nature".

La compétence du maire en matière de sécurité est donc la règle de droit commun. Le pouvoir du préfet s'y substitue lorsque plusieurs communes peuvent être concernées par un événement, lorsque cet événement nécessite la mise en œuvre de moyens qui dépassent les possibilités de la commune ou encore en l'absence de toute action du maire (article 131-7 du code des communes).

Pour cette tâche, le maire dispose des structures suivantes :

- la commission départementale de protection civile, de sécurité et d'accessibilité et les commissions de sécurité dont l'avis est obligatoire pour la délivrance du permis de construire, pour l'aménagement et pour l'autorisation d'ouverture des établissements recevant du public (ERP),
- différents services de l'état : Direction de la Réglementation, Service Interministériel de Défense et de Protection Civile, DRIRE, DDASS, DDAF, DDE, Police-Gendarmerie, ...,

Il a aussi à sa disposition les documents suivants :

- le dossier d'autorisation ou de déclaration d'installation classée,
- le dossier de synthèse sur les risques de la commune (réalisé par le préfet pour les communes présentant des risques particuliers),
- les différents plans de secours (ORSEC, PPI, ...).

### **VII.2. Inspection du travail**

Les inspecteurs doivent faire respecter le code du travail. Ils veillent notamment à la protection du personnel. Un inspecteur du travail ne peut se voir refuser l'entrée dans un établissement. Il est le seul habilité à mettre en œuvre les sanctions pénales prévues par la législation concernant l'hygiène et la sécurité.

### **VII.3. Caisse Régionale d'Assurance Maladie - Mutualité Sociale Agricole**

Les CRAM sont les Caisses Régionales d'Assurance Maladie pour l'hexagone et les CGSS sont les Caisses Générales de Sécurité Sociale pour les départements d'outre mer du régime général. Elles possèdent un service de prévention ; c'est par l'expérience qu'accumule ce service que des préconisations peuvent être édictées pour chaque type d'activité. L'INRS, Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, publie aussi diverses brochures sur les risques pour les travailleurs.

Le suivi de la prévention pour les stockages de produits agro-alimentaires pour les coopératives est assuré par les techniciens régionaux des Caisses de Mutualité Sociale Agricole (MSA) placés auprès et sous la responsabilité des Chefs de Service Régionaux de l'Inspection du Travail, de l'Emploi et de la Politique Sociale.

Chaque caisse possède par ailleurs des techniciens conseils qui sont chargés de la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles des salariés agricoles.

#### **VII.4. Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement**

Les Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement, ont en charge l'inspection des installations classées. Dans ce cadre, elles doivent préparer pour signature au préfet les arrêtés préfectoraux autorisant l'exploitation d'une installation sous certaines conditions au titre de la loi du 19 juillet 1976 relative aux ICPE.

## DEUXIEME PARTIE

### CONTEXTE REGLEMENTAIRE

(Etat au 30 décembre 1999)

Seuls les principaux textes en relation avec l'explosion et l'incendie existants ou en préparation sont cités. La liste qui suit n'est pas exhaustive et ne préjuge pas de l'application qui en est faite notamment par les DRIRE.

#### **I. LEGISLATION FRANCAISE**

Les stockages de produits agro-alimentaires sont régis par des lois, des décrets, des arrêtés, ou /(6/):

- la législation des installations classées pour la protection de l'environnement,
- la législation du Ministère du Travail,
- la législation du Ministère de l'Industrie.

Des circulaires donnent par ailleurs des instructions d'application à l'administration décentralisée (préfets).

Dans ces circulaires d'application, sont généralement mentionnées de manière non exhaustive, des normes.

Ces normes sont données généralement qu'à titre indicatif et ne sont, généralement pas, imposées en tant que telles dans des lois, décrets ou arrêtés.

Nous donnerons dans ce qui suit des commentaires généraux sur les principaux textes.

#### **I.1. Législation des installations classées pour la protection de l'environnement**

##### I.1.1. Loi n° 76-663 du 19 juillet 1976

La loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement impose un certain nombre d'obligations aux exploitants d'usines, d'ateliers, de dépôts ou d'autres établissements pouvant présenter des dangers ou des nuisances, pour le voisinage ou l'environnement.

Le classement d'une installation classée est déterminé par une nomenclature de substances ou d'activité établie à l'échelon national.

Les principales rubriques de la nomenclature concernant les stockages agro-alimentaires ainsi que leurs équipements sont rassemblées dans le tableau 1.

N°	DESIGNATION DE LA RUBRIQUE	OBSERVATIONS
2160	Silos de stockage de céréales, grains, produits agro-alimentaires ou tout produit organique dégageant des poussières inflammables	
253	Liquides inflammables (dépôt de)	stockage pouvant être associé au séchoir
1111	Très toxiques (emploi ou stockage de substances et préparations) telles que définies à la rubrique 1000, à l'exclusion des substances et préparations visées explicitement ou par famille par d'autres rubriques de la nomenclature et à l'exclusion de l'uranium et ses composés	utilisés pour la protection des matières ensilées
1131	Toxiques (emploi ou stockage de substances et préparation) telles définies à la rubrique 1000, à l'exclusion des substances et préparations visées explicitement ou par famille par d'autres rubriques de la nomenclature ainsi que du méthanol	utilisés pour la protection des matières ensilées
1155	Agro-pharmaceutiques (dépôts de produits), à l'exclusion des substances et préparations très toxiques et des substances visées par la rubrique "substances toxiques particulières"	utilisés pour la protection des matières ensilées
1430	Liquides inflammables (définition), à l'exclusion des alcools de bouche, eaux de vie et autres boissons alcoolisées	stockage pouvant être associé au séchoir
2260	Broyage, concassage, criblage, déchiquetage, ensachage, pulvérisation, trituration, nettoyage, tamisage, blutage, mélange, épluchage et décortication des substances végétales et de tous produits organiques naturels, à l'exclusion des activités visées par les rubriques 2220, 2221, 2225 et 2226, mais y compris la fabrication d'aliments pour le bétail	nettoyage des grains, etc.
2910	Combustion à l'exclusion des installations visées par les rubriques 167C et 322 B4	Séchoir
2920	Réfrigération ou compression (installations de) fonctionnant à des pressions effectives supérieures à 10 <sup>5</sup> Pa	centrale de ventilation pour l'aération, etc.

**Tableau 1** : Principales rubriques de la nomenclature pour les stockages agro-alimentaires et leurs équipements (liste non exhaustive)

Selon la nature de l'activité, les quantités traitées ou stockées, la gravité des nuisances et des dangers qu'elle peut présenter, une installation avant sa mise en service ou lors d'une régularisation est soumise, soit à une simple déclaration, soit à une autorisation ou "non classée".

### **Procédure de déclaration**

Cette procédure est basée sur "l'arrêté de prescriptions générales" qui contient des exigences essentielles à respecter lors de la conception des installations.

L'exploitant adresse à la préfecture de son département un dossier indiquant sa raison sociale et décrivant :

- la nature et le volume des activités classées (soumises à déclaration) qu'il compte exercer,
- l'emplacement des installations avec plans de situation,
- les conditions d'évacuation et d'épuration des eaux résiduaires et des émanations de toute nature,
- les conditions d'élimination des déchets et résidus de l'exploitation.

Si cette déclaration est jugée complète et si les activités relèvent bien du régime de la déclaration, le préfet adresse à l'exploitant :

- un récépissé de cette demande (article 27 du décret du 21 septembre 1977),
- un texte de prescriptions générales spécifiques à chaque rubrique de la nomenclature exercée dans l'installation.

### **Procédure d'autorisation**

Dans le cas des installations classées soumises à autorisation, l'industriel doit constituer un dossier de demande d'autorisation très complet comprenant en particulier deux parties essentielles : l'étude d'impact et l'étude des dangers qui sont complétées par une notice d'hygiène et de sécurité et par une note de synthèse non technique de l'étude d'impact (décret n° 93-445 du 25 février 1993).

Il est important de signaler dans le cas d'installations présentes sur un site de stockage de produits agro-alimentaires (séchoir, stockage d'engrais, de produits agro-pharmaceutiques, ...), soumis à autorisation, que c'est l'ensemble du site industriel qui doit faire l'objet d'une demande d'autorisation.

### ***Etude d'impact***

Elle expose les nuisances que peuvent présenter pour l'environnement, l'exploitation (fonctionnement normal) de l'établissement et justifie des mesures propres à en réduire la probabilité d'occurrence et les effets par :

- une analyse de l'état initial du site et de son environnement,
- une analyse des effets sur l'environnement,
- les mesures envisagées par le responsable et l'estimation des dépenses,
- l'impact sanitaire.

Elle doit donc comporter des précisions sur :

- le milieu naturel d'implantation de l'installation,
- les approvisionnements en eau et en énergie,
- les effluents liquides, gazeux et les poussières,
- les déchets,
- les nuisances sonores et olfactives,
- l'intégration du site dans le paysage,

- la santé des populations.

### ***Etude des dangers***

Elle expose les dangers que peuvent présenter les installations en cas d'accident (dérive de fonctionnement) et justifie les mesures propres à en réduire la probabilité d'occurrence et les effets. Elle comporte notamment (/7/) :

- une analyse des dérives fonctionnelles (analyse de risques),
- une étude des conséquences de ces dérives sur l'environnement,
- une détermination des moyens de prévention et de lutte.

L'analyse de risque doit donc prendre en compte toutes les installations existantes, et doit faire ressortir les mesures de sécurité que l'exploitant propose de mettre en place pour lutter contre les risques d'explosion et d'incendie.

### ***Notice relative à l'hygiène et à la sécurité***

Elle comprend l'étude des conditions du respect des prescriptions relatives à l'hygiène et à la sécurité des travailleurs dans l'entreprise.

### ***Note de synthèse non technique de l'étude d'impact***

Elle facilite la prise de connaissance par le public des informations contenues dans l'étude.

La demande d'autorisation ou la déclaration doit être renouvelée en cas de transformation ou d'extension entraînant des dangers nouveaux (ou inconvénients) pour l'environnement. Le transfert de l'installation est toujours soumis à nouvelle procédure.

Le permis de construire ne pourra pas être délivré avant obtention de l'autorisation d'exploiter ou du récépissé de déclaration.

La démarche française pour appliquer la réglementation d'une installation classée est donnée à la figure 1.

Pour l'activité "silos" qui est visée par la rubrique 2160 (décret n° 99-1220 du 28 décembre 1999 modifiant la nomenclature des installations classées), les seuils pour la procédure de déclaration et d'autorisation sont les suivants :

N°	DESIGNATION	Régime (a)	Rayon (km) (b)
2160	Silos de stockage de céréales, grains, produits alimentaires ou tout produit organique dégageant des poussières inflammables		
	1) En silos ou installations de stockage :		
	a) si le volume total de stockage est supérieur à 15 000 m <sup>3</sup>	A	3
	b) si le volume total de stockage est supérieur à 5 000 m <sup>3</sup> , mais inférieur ou égal à 15 000 m <sup>3</sup>	D	
	2) Sous structure gonflable ou tente :		
	a) si le volume total de la structure gonflable ou de la tente est supérieure à 100 000 m <sup>3</sup>	A	3
	b) si le volume total de la structure gonflable ou de la tente est supérieur à 10 000 m <sup>3</sup> , mais inférieur à 100 000 m <sup>3</sup>	D	

(a) - D : Déclaration, A : Autorisation,

(b) : rayon d'affichage

Le terme “ silo ” désigne l'ensemble :

- des capacités de stockage type vrac quelle que soit leur conception (silos plats, silos verticaux, silos “ cathédrale ”, silos “ dôme ”, etc.),
- des tours d'élévation,
- des fosses de réception, les galeries de manutention, les dispositifs de transport et de distribution (en galerie ou en fosse), les équipements auxiliaires (épierreurs, tarares, dépoussiéreurs, tamiseurs, séparateurs magnétiques ou tout autre dispositif permettant l'élimination de corps étrangers), les trémies de vidange et le stockage des poussières.

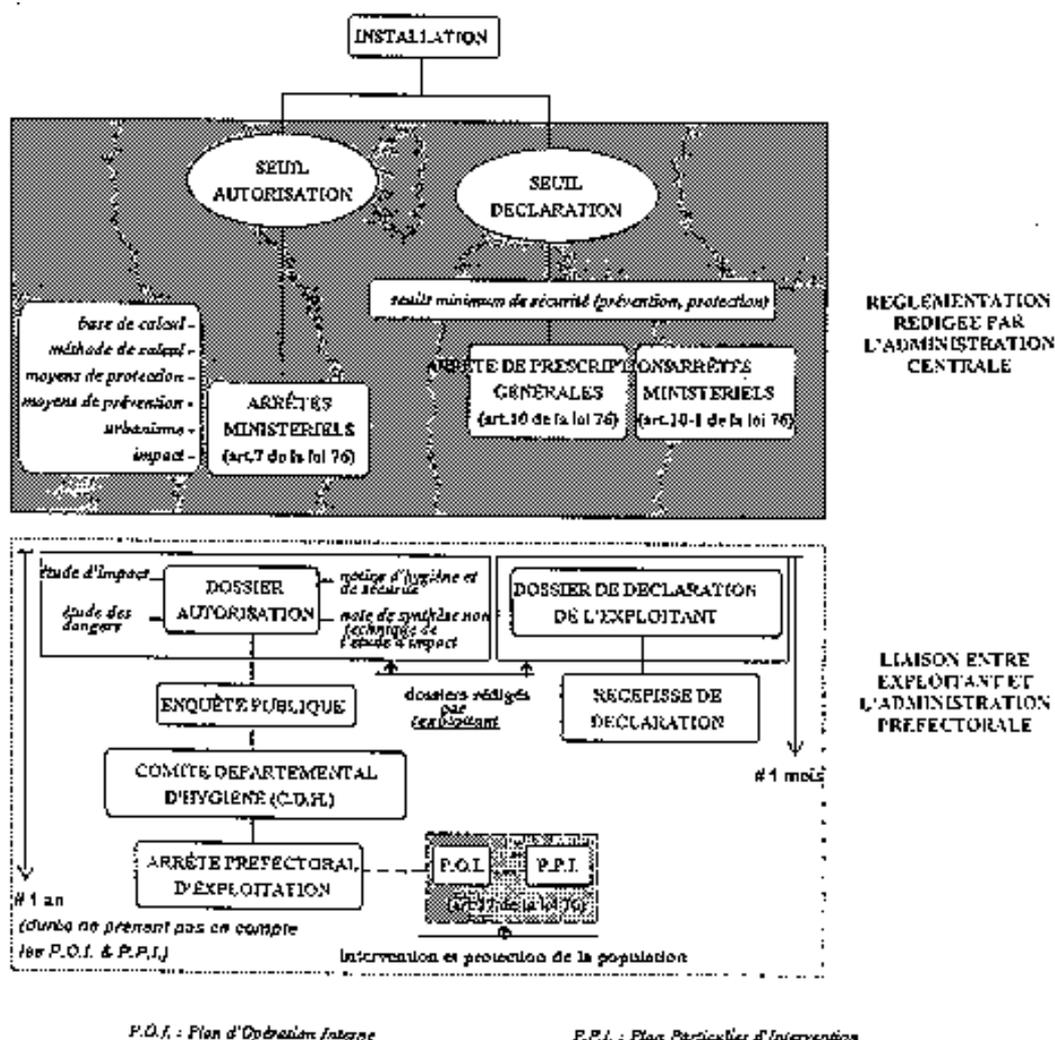


Figure 1 : Démarche française de la réglementation d'une installation

N'entrent pas dans la rubrique silos les installations annexes périphériques liées à l'activité de négoce (stockage d'engrais, stockage de produits agro-pharmaceutiques, produits pétroliers, etc.) qui sont à prendre en considération pour les risques "induits" et font l'objet de rubriques spécifiques.

De ce fait, les produits conditionnés sous forme de bidons, de fûts, de sacs, etc. rentrent soit dans la rubrique entrepôt (n° 1510), soit dans une rubrique spécifique à ces produits.

La rubrique 2160 devra répondre aux prescriptions imposées :

- soit dans l'arrêté ministériel du 29 décembre 1998 (en cours de révision) relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement sous la rubrique n° 2160 pour les installations soumises à déclaration (J.O. du 27 janvier 1999),
- soit dans l'arrêté ministériel du 29 juillet 1998 relatif aux silos et aux installations de stockage de céréales, de graines, de produits alimentaires ou de tout produit organique dégageant des poussières inflammables pour les installations soumises à autorisation (J.O. du 30 août 1998).

I.1.2. Arrêté du 31 mars 1980 du Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie

Cet arrêté est applicable depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1981 à toutes les installations classées pour la protection de l'environnement, dans lesquelles une atmosphère explosive est susceptible d'apparaître.

Il régleme les installations électriques et impose la délimitation des zones dans les établissements classés, susceptibles de présenter des risques d'explosion.

Dans les établissements possédant de telles installations l'exploitant doit définir sous sa responsabilité deux types de zone\* dans lesquelles peut apparaître une atmosphère explosive :

- 1<sup>er</sup> type de zone :

L'atmosphère explosive peut apparaître de manière permanente ou semi-permanente en fonctionnement normal de l'installation.

- 2<sup>ème</sup> type de zone :

L'atmosphère explosive apparaît de manière épisodique avec une faible fréquence et une faible durée.

---

\* ces définitions seront révisées lorsque la directive 118 A qui retient trois zones, sera transposée en droit français (cf. page 29).

Ces définitions sont applicables pour **les gaz, les vapeurs, les brouillards et les poussières**.

Cet arrêté prévoit que dans ces zones :

- les installations électriques sont réduites à ce qui est strictement nécessaire aux besoins de l'exploitation,
- les canalisations seront non-propagatrices de la flamme et convenablement protégées contre les chocs et les actions des produits.

Il précise en outre que :

- dans le premier type de zone, tous les matériels doivent satisfaire au décret 78-778 du 17 juillet 1978 et à ses textes d'application (matériels certifiés, sans hiérarchie entre les diverses protections ou catégories),
- dans le second type de zone, le matériel peut être, soit certifié, soit être de bonne qualité industrielle et ne pouvoir créer en service normal, ni arc, ni étincelle, ni surface chaude susceptible de provoquer une explosion.

S'il n'existe pas de matériel spécifique répondant aux exigences ci-dessus, l'exploitant peut, sous sa responsabilité, définir les règles à respecter, compte tenu des normes en vigueur et des règles de l'art, pour prévenir les dangers pouvant exister dans ces zones.

## **I.2./ Législation du Ministère du Travail**

### **I.2.1. Décrets n° 92-332 et 92-333 du 31 mars 1992**

La section IV du décret n° 92-333 du 31 mars 1992, relatif aux dispositions concernant la sécurité et la santé applicables aux lieux de travail que doivent observer les chefs d'établissements, porte sur la prévention des incendies et l'évacuation.

L'article R.232-12-3 donne le nombre et la largeur des dégagements desservant les locaux auxquels ont accès normalement les travailleurs (tableau 2).

	Nombre de dégagements	Largeur totale cumulée
Moins de 21 personnes	1	0,80 m
De 21 à 100 personnes	1	1,50 m
De 101 à 300 personnes	2	2,00 m
De 301 à 500 personnes	2	2,50 m

**Tableau 2 : Nombre et taille des dégagements**

Les articles R. 232-12-4 et R. 232-12-7 précisent respectivement les points relatifs aux portes et la signalisation et l'éclairage de sécurité dont doivent être équipés les établissements.

L'article R. 232-12-17 stipule que "les chefs d'établissement doivent prendre les mesures nécessaires pour que tout commencement d'incendie puisse être rapidement et efficacement combattu dans l'intérêt du sauvetage du personnel".

On trouve quelques dispositions peu contraignantes sur le chauffage des locaux ; il s'agit en particulier des articles :

- R. 232-12-9 : l'emploi pour le chauffage de combustibles liquides dont le point d'éclair est inférieur à 55°C est interdit.

- R. 232-12-11 : le remplissage des réservoirs des appareils de chauffage ne doit jamais s'effectuer au cours du fonctionnement de l'appareil ou dans une pièce comportant des flammes, des éléments incandescents ou des surfaces portées à plus de 100°C.

Quant aux extincteurs, l'article R. 232-12-17 impose qu'il y ait "au moins un extincteur portatif à eau pulvérisée de 6 litres au minimum pour 200 m<sup>2</sup> de plancher, avec un minimum d'un appareil par niveau" et que "lorsque les locaux présentent des risques d'incendie particuliers, notamment des risques électriques, ils doivent être dotés d'extincteurs dont le nombre et le type sont appropriés aux risques".

Une alarme sonore (art. R. 232-12-18) et l'établissement de consignes incendie (art. R. 232-12-20) sont nécessaires dans les entreprises employant plus de 50 personnes. L'alarme générale doit être donnée par bâtiment si l'établissement comporte plusieurs bâtiments isolés entre eux. Le signal sonore ne doit pas permettre la confusion avec d'autres signalisations et être audible de tout point du bâtiment avec une autonomie minimale de 5 minutes.

I.2.2. Décret n° 92-158 du 20 février 1992 complétant le code du travail et fixant les prescriptions particulières d'hygiène et de sécurité applicable aux travaux effectués dans un établissement par une entreprise extérieure et circulaire DRT n° 93/14 du 18 mars 1992 prise pour l'application du décret 92-158.

Les principales dispositions qu'il renferme en matière de prévention incendie sont les suivants :

### ***Avant l'opération***

- La coordination des mesures de prévention prises par l'ensemble des chefs d'entreprise incombe au chef de l'entreprise utilisatrice.
- Une inspection commune des lieux de travail, des installations qui s'y trouvent et des matériels éventuellement mis à disposition des entreprises extérieures est menée. Le chef de l'entreprise utilisatrice communique aux chefs des entreprises extérieures ses consignes de sécurité applicables à l'opération. Les employeurs doivent se communiquer toute information nécessaire à la prévention (description des travaux à effectuer et mode opératoire ...).

- Une analyse commune des risques débouche sur un plan de prévention, comportant au minimum des dispositions dans les domaines suivants :
  - . définition des phases d'activités dangereuses et des moyens de prévention spécifiques correspondants,
  - . adaptation des matériels aux opérations à effectuer et définition des conditions d'entretien,
  - . instructions à donner aux salariés,
  - . dispositifs de premiers secours mis en place par l'entreprise utilisatrice,
  - . participation des salariés d'une entreprise aux travaux menés par une autre : coordination pour le maintien de la sécurité et organisation de la sécurité.
- Un plan de prévention est établi par écrit, si l'opération réalisée par les entreprises extérieures représente plus de 400 heures de travail sur au plus 12 mois ou si elle figure sur une liste d'opérations dangereuses fixée par arrêté. Dans ce cas, le chef de l'entreprise utilisatrice avise par écrit l'inspecteur du travail de l'ouverture des travaux.

### ***Pendant les travaux***

- Chaque entreprise met en œuvre les mesures prévues par le plan de prévention.
- Des réunions et inspections périodiques permettent d'assurer la coordination des mesures de prévention (tous les trois mois au moins si les travaux représentent plus de 90 000 heures pour les 12 mois à venir).
- Le chef de l'entreprise utilisatrice s'assure que les consignes ont bien été données aux salariés des entreprises extérieures.

#### **I.2.3. Décret n° 88-1054 du 14 novembre 1988 relatif à la protection des travailleurs contre les courants électriques.**

Il concerne les établissements mettant en œuvre des courants électriques. Il fixe dans sa section V les mesures à prendre pour la prévention des incendies d'origine électrique, en interdisant notamment l'usage d'installations non protégées contre les surcharges, engendrant des étincelles de rupture. Il est lié dans la pratique aux arrêtés du 19 décembre 1988, relatif aux emplacements présentant des risques d'explosion et à celui du 20 décembre 1988, donnant la périodicité, l'objet et l'étendue des vérifications à effectuer.

Le décret du 14 novembre 1988, relatif à la protection des travailleurs contre les dangers d'origine électrique a une section spécifique, la section V, pour la prévention des brûlures, incendies et explosions d'origine électrique. Les articles 41 et 42 concernent respectivement la réalisation des installations et de certains appareils.

L'article 43 traite des *locaux ou emplacements présentant des dangers d'incendie* en raison des matières fabriquées, manipulées et entreposées et l'article 44 concerne les *zones présentant des risques d'explosion*.

Pour ces dernières, l'article 44 entre autre, impose que les installations répondent également à l'article 43. L'article 44 renvoie à l'arrêté du 19 décembre 1988 pour la nature des câbles et le choix des matériels électriques.

Les prescriptions de l'article 43 et de la circulaire d'application, pour les locaux présentant des risques d'incendie, peuvent être résumées ainsi :

- contact des matières avec les matériels et canalisations évité,
- protection des câbles contre les surcharges,
- câbles non-propagateurs de la flamme,
- degré de protection des matériels IP5X s'il y a présence de poussières,
- la circulaire précise également : *“ Par ailleurs l'utilisation de dispositifs de protection à courant résiduel, au plus égal à 300 mA, est considérée par la normalisation comme susceptible de diminuer le risque d'incendie ayant comme origine un défaut à la terre ”*

En ce qui concerne la protection contre l'incendie, il n'y a pas d'exclusion, il n'y a que des prescriptions spécifiques à ces schémas.

Toutefois, un des désavantages du régime TN\* est, lorsqu'il y a un défaut d'isolement non franc, la circulation de courants relativement importants dans les conducteurs de protection avant que la protection (fusibles ou disjoncteurs) ne fonctionne et ce, pendant des temps longs.

Aussi, afin de limiter, en cas de défaut, les courants de circulation importants dans les conducteurs de protection intégrés dans les câbles, les textes demandent qu'un détecteur résiduel soit utilisé.

Par ailleurs, le NF C 15-100 exclut le schéma TN-C dans les locaux présentant des risques d'incendie et d'explosion et précise que le schéma TN-S est autorisé (482.2.13/512.2 et interprétation 96-08).

#### I.2.4. Arrêté du 19 décembre 1988 (pris en application du décret du 14 novembre 1988) et relatif aux installations électriques

Le texte n'est pas limité aux installations classées pour la protection de l'environnement, mais est applicable dès lors qu'il existe une zone ou un emplacement à risque d'explosion.

---

\* le régime TN, est explicité page 173

Il contient, pour l'essentiel, les dispositions suivantes :

- les canalisations doivent être non-propagatrices de la flamme (catégorie C2 au sens de la norme NF C 32 070), être protégées contre les risques mécaniques et chimiques et ne pas permettre le passage d'atmosphères explosives d'un local ou d'un emplacement à un autre,
- il existe trois types de zones à risque d'explosion du fait de la présence **de gaz, vapeurs ou brouillard** :
  - . Zone 0 :  
les zones où une atmosphère explosive est présente en permanence ou pendant de longues durées,
  - . Zone 1 :  
les zones où l'atmosphère explosive est susceptible de se former en fonctionnement normal,
  - . Zone 2 :  
les zones où l'atmosphère explosive ne peut subsister que pendant de courtes périodes et ne pas se former en fonctionnement normal.
- Il peut y avoir des dérogations pour des emplacements particuliers définis par l'arrêté dans lesquels le risque explosion est prévenu par des mesures particulières où la présence de matériel électrique n'accroît pas le risque d'explosion existant déjà.
- Lorsque le risque provient de **poussières inflammables** (ou fibres), le matériel électrique doit être conçu ou installé pour s'opposer à leur pénétration afin d'éviter tout risque d'inflammation ou d'explosion.

En outre, des mesures doivent être prises pour éviter que l'accumulation de ces poussières (ou fibres) sur les parties des installations soit susceptible de provoquer un échauffement dangereux. Par conception des installations, ces échauffements doivent être limités de façon qu'ils ne puissent pas provoquer en fonctionnement normal, du fait de la température de surface, l'inflammation de ces poussières (ou fibres).

Dans le premier type de zone, tous les matériels et systèmes doivent satisfaire au décret 78-778 du 17 juillet 1998, et être de sécurité intrinsèque de catégorie i-a.

Dans le second type de zone, les matériels doivent être certifiés selon la hiérarchie entre les divers modes de protection et catégories.

Dans le troisième type de zone, les matériels doivent être, soit certifiés, soit conformes à des normes pour du matériel électrique qui, en service normal ne peut créer, ni arc, ni étincelle, ni échauffement susceptible de provoquer une inflammation ou une explosion.

### I.2.5. Arrêté du 25 juillet 1976

Indépendamment des mesures présentées par le Code du Travail et du décret 96-1010, l'arrêté du 25 juillet 1976 modifié par l'arrêté du 25 janvier 1983 soumet les transporteurs à bande fixes ou mobiles, y compris les dispositifs annexes à des mesures particulières de prévention, notamment concernant les frottements pour le risque incendie. L'arrêté précise notamment les points suivants :

- les transporteurs à bande doivent être montés et installés avec soin, tant pour la charpente que pour les parties mécaniques et les courroies (article 2),
- l'utilisateur doit veiller à la tension de la bande, au réglage et à l'entretien des divers organes de nettoyage (article 7),
- un dispositif continu de commande d'arrêt d'urgence est mis en place sur toute la longueur du transport accessible au personnel, ainsi que sur le poste de réception des matières. Le réarmement de la commande doit être effectué par une personne qualifiée et responsable, seulement après que la cause de l'incident a cessé d'exister (article 6).

### I.2.6. Circulaire TR 22/49 du 15 novembre 1949

Cette circulaire traite spécifiquement des principes à prendre en considération pour la prévention des dangers de l'électricité statique.

Après un inventaire de ces principes, il est précisé dans un commentaire la manière dont peut être réalisée, en pratique, la prévention des dangers de l'électricité statique.

## **I.3. Législation du Ministère de l'Industrie**

### I.3.1. Arrêté du 25 octobre 1999

Cet arrêté est relatif aux emplacements présentant des risques d'explosion et distingue trois types de zones exclusivement pour **les gaz** :

- zone 0 : emplacement dans lequel une atmosphère explosive gazeuse est présente en permanence ou pendant de longues périodes,
- zone 1 : emplacement dans lequel une atmosphère gazeuse est susceptible de se former en fonctionnement normal ;
- zone 2 : emplacement dans lequel une atmosphère explosive gazeuse n'est pas susceptible de se former en fonctionnement normal et où une telle formation si elle se produit, ne peut subsister que pendant une courte période.

### I.3.2. Décret 96-1010 du 19 décembre 1996

Ce décret est relatif aux appareils et aux systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosible et transpose la directive 94/9/CE du 23 mars 1994 –plus communément appelée la directive ATEX 100A- et abroge le décret n° 78-779 du 17 juillet 1978 portant réglementation de la construction du matériel électrique utilisable en atmosphère explosive. Toutefois, le décret n° 78-779 du 17 juillet 1978 présente la particularité de n'avoir jamais été appliqué en ce qui concerne les poussières car il prévoyait la fixation par arrêté des modes de protection destinés à empêcher la naissance ou la propagation des inflammations. Les dits arrêtés n'ont jamais été publiés en raison d'une absence de norme précisant de tels modes de protection.

## **II./ LEGISLATION EUROPEENNE**

Parallèlement à la législation française en vigueur, une législation européenne et internationale est en cours d'élaboration dont les textes sont appliqués progressivement en France au fur et à mesure de leur élaboration et de leur transcription.

Un des objectifs de l'Union Européenne, qui se fonde sur l'article 100A du traité instituant la CEE, est d'assurer la libre circulation des biens et équipements entre les différents Etats membres en éliminant toutes entraves techniques aux échanges.

Pour atteindre cet objectif, la CEE a développé à partir de 1985 une nouvelle approche pour l'harmonisation technique et la normalisation qui impose, dans le cadre des nouvelles Directives, la définition en termes généraux, d'exigences essentielles santé et sécurité (par exemple pour la sécurité) auxquelles doivent se conformer les équipements et matériels avant qu'ils ne soient mis sur le marché se fondant sur l'article 100 A. Cette Directive 94/9/CE, dite Directive ATEX (Atmosphère Explosive) vise les **constructeurs de matériels** (/8/).

Les Directives concernant les biens et équipements doivent également préciser comment le fabricant ou son mandataire peut démontrer que ses produits et matériels sont conformes aux exigences essentielles, par exemple par apposition du marquage "CE" avant de l'autoriser à vendre ses produits dans l'ensemble des pays de la CEE.

Un autre objectif, se fondant sur l'article 118 A du traité, est de promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs. Une directive qui vise les **utilisateurs de matériels** est en cours d'élaboration.

Des normes harmonisées mandatées par la Commission Européenne sont progressivement produites notamment par le Comité Européen de Normalisation (CEN), leur application constitue ainsi un des moyens pour satisfaire aux exigences essentielles des Directives et permettre de garantir une présomption de conformité.

## **II.1. Directives**

Deux directives (94/9/CE et 1999/92/CE) traitent entre autre aujourd'hui des problèmes de prévention et de protection des explosions d'atmosphères explosives dont celles des mélanges poussières/air.

Une directive (98/37/CE) traite à la fois des questions d'incendie et d'explosion.

### **II.1.1. Directive 94/9/CE - ATEX 100A (transposé en droit français : décret 96.1010)**

Au début de la présente décennie il est apparu nécessaire d'élaborer une nouvelle Directive visant les "Appareils et systèmes de protection destinés à être utilisés dans les atmosphères explosibles".

Elle s'applique aussi bien aux **matériels électriques que non électriques** destinés à être utilisés dans tous types d'atmosphères explosives (gaz, vapeur, brouillard ou poussières), à savoir :

- les matériels électriques et moteurs à combustion interne situés en ATEX (diesel, ...),
- les appareils et systèmes de protection à fonction autonome (événements d'explosion, barrages déclenchés, ...),
- les matériels autres situés en ATEX (broyeurs, ...),
- les dispositifs de sécurité de contrôle et de réglage situés hors ATEX mais contribuant au fonctionnement sûr des appareils (barrières, ...).

Les appareils et systèmes de protection sont répartis dans deux groupes :

- . Groupe I : qui comprend les appareils et systèmes de protection destinés aux travaux souterrains des mines et aux parties de leurs installations de surface, susceptibles d'être mis en danger par le grisou et/ou des poussières inflammables.
- . Groupe II : qui comprend les appareils destinés et systèmes de protection à être utilisés dans d'autres lieux susceptibles d'être mis en danger par des atmosphères explosives.

Au sein de chaque groupe sont définies plusieurs catégories d'appareils en fonction de leur utilisation, en particulier pour le **groupe II (groupe d'appareils devant être utilisés dans les silos notamment)** :

- . Catégorie 1 : Appareils conçus pour assurer un très haut niveau de protection. Les atmosphères explosives sont présentes constamment, ou pour une longue période ou fréquemment.

- . Catégorie 2 : Appareils conçus pour assurer un haut niveau de protection. Les atmosphères explosives se manifesteront probablement.
- . Catégorie 3 : Appareils conçus pour assurer un niveau normal de protection. Les atmosphères explosives ont une faible probabilité de se manifester et ne se manifesteront que pour une courte période.

Pour ces catégories on doit préciser si l'usage est prévu en ATEX gaz (G) ou poussières (D).

La Directive spécifie les procédures d'évaluation de la conformité et indique les exigences essentielles de sécurité.

Cette Directive transposée en droit français dans le décret 96-1010 du 19 novembre 1996, relative aux appareils et aux systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles, sera d'application totale au 1<sup>er</sup> juillet 2003.

Le tableau ci-après précise la correspondance entre la directive européenne et les textes français de transposition.

<b>Directive et recommandations européennes</b>	<b>Textes de transposition en droit français</b>	<b>Commentaires</b>
Directive n° 94/9/CE du 23 mars 1994 (JOCE du 19 avril 1994)	Décret n° 96-1010 du 19 novembre 1996 (JORF du 24 novembre 1996)	
	Arrêté du 20 décembre 1996 (JORF du 28 janvier 1997)	Ce texte porte habilitation de l'INERIS (2) et du LCIE (3) pour la mise en œuvre des procédures d'évaluation de conformité prévues par le décret du 19 novembre 1996
	Arrêté du 3 mars 1997 (JORF du 20 avril 1997)	Ce texte définit un modèle de déclaration CE de conformité et le contenu de l'attestation écrite de conformité d'un composant pour l'application du décret du 19 novembre 1996
Guide européen d'application de la directive n° 94/9/CE du 24 mars 1994 (en projet)		Ce texte qui devait aboutir fin 1998 est destiné à préciser sous forme de recommandation divers points de la directive

(d'après M. ESTIVAL, Secrétariat d'Etat à l'Industrie)

### II.1.2. Directive 1999/92/CE

La Directive ATEX 100A ne considère que les prescriptions minimales et les dispositions spécifiques concernant l'utilisation des équipements.

La Directive (1999/92/CE) sera transposée en droit français par le Ministère du Travail dont les textes seront repris par d'autres ministères que celui de l'environnement. Elle devrait s'appliquer complètement au 1<sup>er</sup> juillet 2003.

Elle vise notamment les dangers d'explosion liés à l'utilisation et/ou au mode d'installation des appareils et concerne les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives.

Toutefois, certaines dispositions de la directive ne modifieront pas notablement les dispositions prises dans les arrêtés relatifs à la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (Ministère en charge de l'environnement).

Le tableau ci-après donne quelques commentaires par rapport à la législation ICPF.

<b>Directive 1999/92/CE</b>	<b>Transposition de cette directive dans la législation française</b>	<b>Commentaires par rapport à la législation du Ministère en charge de l'environnement</b>
Article 3 : prévention des explosions et protection contre celles-ci	Textes du Ministère de l'Emploi et de la Solidarité	Eviter la formation d'atmosphère explosive ou les points chauds (prescriptions déjà intégrées dans les textes)
Article 4 : évaluation des risques d'explosion	Texte du Ministère de l'Emploi et de la Solidarité	Analyse des risques (notion déjà intégrée dans la loi du 19 juillet 1976)
Article 6 : emplacements où des atmosphères explosives peuvent se former	Texte du Ministère de l'Emploi et de la Solidarité + modification des textes du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement + modification des textes du Secrétariat d'Etat à l'Industrie	Définition des zones d'atmosphères explosibles
Article 7 : document relatif à la protection contre les explosions	Textes du Ministère de l'Emploi et de la Solidarité	Prescriptions déjà intégrées dans l'étude des dangers (loi du 19 juillet 1976)
Article 8 : dispositions particulières applicables aux lieux et appareils de travail	Textes du Ministère de l'Emploi et de la Solidarité	--
Annexe I : marquage	Textes du Ministère de l'Emploi et de la Solidarité	--
Annexe II : mesures de protection contre l'explosion	Textes du Ministère de l'Emploi et de la Solidarité	Prescriptions déjà intégrées dans les textes
Annexe II : mesures organisationnelles.	Textes du Ministère de l'Emploi et de la Solidarité	Prescriptions déjà intégrées dans les textes

(d'après J. JARRY, Ministère de l'Environnement (/6/))

### II.1.3. Directive machine (98/37/CE)

Cette Directive adoptée en 1989 et révisée en 1998 dans son annexe 1, en plus de la prévention des risques traditionnels associés aux parties mécaniques en mouvement des machines, exige que les machines soient construites de manière à prévenir tous risques d'incendie et d'explosion présentés par la machine elle-même ou par des substances produites ou utilisées par celles-ci. Elle spécifie également que les mêmes précautions s'appliquent si le fabricant prévoit d'utiliser la machine dans une atmosphère explosive.

## **II.2. Normalisation**

Le CEN a été mandaté dans le cadre de l'application des Directives Machines et ATEX 100A pour préparer une norme de type A décrivant les principes de base et la méthodologie concernant la prévention et la protection contre l'explosion et l'incendie.

Le travail a été confié au Comité Technique 114 qui a créé un groupe de travail (WG 16) qui a rédigé pour l'instant une norme (EN 1127-1) concernant l'explosion. Le travail est en cours pour ce qui concerne l'incendie, a conduit à l'élaboration du projet de norme EN 13478 – sécurité des machines. Prévention et protection contre l'incendie, en cours d'enquête publique.

La norme EN 1127-1 et le projet EN 13478 peuvent d'ores et déjà servir de guide aux utilisateurs des appareils, systèmes de protection et composants pour apprécier le risque d'explosion et d'incendie au poste de travail.

De plus, le Comité Technique CEN TC 305 (uniquement pour la Directive ATEX 100A) a reçu mandat pour produire des normes de type B et C pour permettre de faire une vérification de conformité aux exigences essentielles de sécurité dans le cas des atmosphères explosives.

Cette norme contient notamment quatre grandes parties :

- . identification des phénomènes dangereux,
- . éléments d'appréciation du risque,
- . suppression ou réduction du risque,
- . informations pour l'utilisation.

Elle définit les zones dont l'explosivité est due à une atmosphère gazeuse (trois zones) et celle où elle est due à une atmosphère poussiéreuse (trois zones).

### **Zones pour les gaz et les vapeurs**

#### **- Zone 0 :**

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

- **Zone 1 :**

Emplacement où une atmosphère explosive consistant en un mélange avec l'air de matières combustibles sous forme de gaz, de vapeur ou de brouillard est susceptible de se former occasionnellement en fonctionnement normal.

- **Zone 2 :**

Emplacement où une atmosphère explosive consistant en un mélange avec l'air de matières combustibles sous forme de gaz, de vapeur ou de brouillard n'est pas susceptible de se former en fonctionnement normal ou bien si une telle formation se produit néanmoins, n'est que de courte durée.

**Zones pour les poussières**

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

- **zone 20 :**

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

- **zone 21 :**

Emplacement où une atmosphère explosive sous forme de nuages de poussières combustibles peut occasionnellement se former dans l'air en fonctionnement normal.

- **zone 22 :**

Emplacement où une atmosphère explosive sous forme de nuage de poussières combustibles n'est pas susceptible de se former dans l'air en fonctionnement normal ou bien si une telle formation se produit néanmoins, n'est que de courte durée.

**Remarques :**

Ces zones sont voisines de celles retenues par le projet de Directive 1999/92/CE. Notamment le terme "matières combustibles" a été remplacé par "substances inflammables".

## TROISIEME PARTIE

### CONFIGURATION GENERALE D'UN ÉTABLISSEMENT "STOCKEUR"

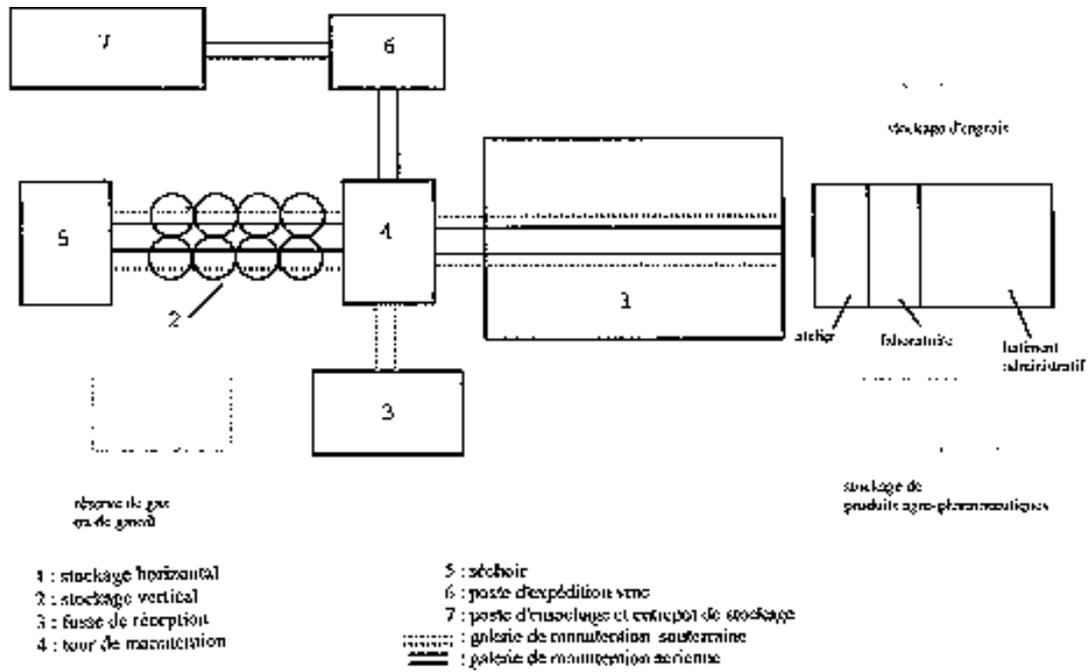
Ce chapitre a été notamment élaboré à partir notamment d'informations contenues dans une brochure (9/) éditée par le Groupement des Exportateurs Français d'Équipements pour le Grain (G.E.F.E.G). Une présentation succincte des opérations et installations susceptibles d'être rencontrées dans un silo de stockage y est faite.

#### I./ SCHEMA GÉNÉRAL D'UN ÉTABLISSEMENT

Les silos de stockage équipant les établissements industriels manipulant et utilisant des produits agro-alimentaires peuvent comporter des installations liées à plusieurs types d'activités (figure 2).

Ces installations sont les suivantes :

- Pour les activités de stockage :
  - les capacités de stockage type vrac,
  - les tours de manutention,
  - les postes de réception et d'expédition,  
les galeries de manutention,
  - les dispositifs de transport et de distribution,
  - les équipements auxiliaires :
    - dispositifs d'élimination des corps étrangers,
    - appareils de nettoyage,
    - dépoussiéreurs,
    - ventilation,
    - ...
  - les salles de contrôle et de commande, dont l'emplacement est variable,
- pour les activités connexes :
  - les séchoirs,
  - les ateliers,
  - ...



**Figure 2 :**  
Exemple de schéma de principe d'installation d'un établissement "stockeur"

- pour les stockages annexes :
  - les stockages de produits agro-pharmaceutiques,
  - les stockages d'engrais,
  - ...

La figure 2, ne vise qu'à représenter les installations pouvant exister dans un établissement "stockeur". Sur celle-ci ne figurent pas la salle de contrôle et de commande, ni les équipements auxiliaires qui ont des lieux de situation variés selon les sites. Chaque cas est un cas d'espèce qui doit faire l'objet d'une étude spécifique.

Les opérations successives réalisées dans les silos de produits agro-alimentaires, sont toutes ou en partie les suivantes :

- la réception des matières,
- la préparation des matières avant stockage,
- l'ensilage des matières,
- le stockage des matières,
- le conditionnement des matières avant expédition,
- l'expédition des matières.

Dans la majorité des cas, le déchargement des camions et des trains se fait gravitairement dans des fosses de réception.

Pour le déchargement des bateaux, le déchargement gravitaire est remplacé le plus souvent par des déchargements pneumatiques plus performants. Cette technique est parfois utilisée aussi pour le déchargement des camions et des trains.

Concernant les silos plats, pour ceux qui ne comportent pas de circuit de manutention pour l'ensilage, les camions ou les trains déversent en général leurs produits dans une trémie réceptacle située à l'extérieur, et les produits sont transportés à l'intérieur du silo par une "sauterelle".

Pour certains silos plats, à faible taux de rotation, dont l'ensilage et le déstockage est réalisé par "chouleur", les produits peuvent être déposés directement à l'intérieur des stockages par camions.

Les produits agro-alimentaires avant ensilage peuvent subir un traitement préalable consistant essentiellement à des opérations de nettoyage et de séchage.

Les produits transportés par route et par voie ferrée sont repris en général (à l'exception de certains silos plats notamment) après pesage sur bascule et déchargement dans les fosses de réception par des transporteurs installés dans des galeries souterraines, puis dirigés selon l'importance du site de stockage vers la ou les tour(s) de manutention.

Les produits transportés par voie fluviale ou maritime transitent fréquemment par une tour de réception (qui sert également à l'expédition) pour être pesés, avant d'être dirigés vers la ou les tour(s) de manutention. Le rôle dévolu aux tours de manutention est d'élever les matières, avec des élévateurs à godets en général, jusqu'au niveau de la partie supérieure des cellules de stockage pour l'ensilage.

Après les élévateur à godets, on trouve le plus souvent des transporteurs horizontaux (à bande ou métallique) pour le transport des produits agro-alimentaires vers les silos de stockage. Lorsque les silos sont éloignés des élévateurs à godets, des galeries de manutention aériennes abritant les transporteurs relient les différentes installations.

Dans le cas d'utilisation de transporteurs à bande pour l'ensilage en silos verticaux, le dernier engin est équipé en général d'un chariot distributeur mobile qui transfère les produits dans les cellules à travers des goulottes et des trappes.

Dans le cas d'utilisation de transporteurs métalliques (à chaîne) pour l'ensilage en silos verticaux, la distribution dans les cellules se fait souvent par des canalisations en place en permanence et des vannes guillotines.

L'ensilage en silos horizontaux est réalisé le plus souvent par un transporteur à bande situé au niveau du faîtage. La distribution des matières dans les cellules se fait dans ce cas par un chariot mobile, complété dans certains cas, compte tenu des dimensions des cellules, par des dispositifs de chargement par projection, pouvant projeter les grains à plus de 30 mètres.

Dans certains silos horizontaux, l'ensilage des produits est réalisé à partir de portes latérales d'accès, soit par des sauterelles mobiles équipées éventuellement de projecteur, soit par des engins à moteur thermique (chouleur ou camion).

Le stockage des produits agro-alimentaires se fait dans des cellules de stockage, qui peuvent être, selon le cas, constituées de cellules verticales ou horizontales, en béton armé, en métal, ou en matériaux légers. Les cellules des silos horizontaux sont le plus souvent ouvertes.

Les produits stockés sont extraits des cellules, puis transportés par des engins de manutention vers les installations d'expédition en vrac ou les ateliers de conditionnement.

Le déstockage des cellules verticales se fait par des systèmes d'extraction situés à la base des cellules, déversant sur des transporteurs, qui sont installés dans des espaces sous cellules.

Le déstockage des cellules horizontales est réalisé, soit à partir de portes latérales par des chouleurs et des camions, soit par gravité à partir de trappes de vidange et de moyens complémentaires (chouleurs, extracteur).

Dans le cas de la vidange des cellules horizontales par des trappes, les transporteurs recueillant les produits sont installés en général dans des galeries souterraines.

Enfin, les produits sont dirigés vers les postes de conditionnement et d'expédition sacs et vrac.

## **II./ ACTIVITE DE STOCKAGE**

### **II.1. Types de cellules ou de capacités de stockage**

En France, différentes techniques sont utilisées pour réaliser les stockages (/10/).

#### ***- Stockage vertical en métal***

Cette technique peut s'adapter aux petites comme aux très grandes unités de stockage. Ce type de construction est très développé en raison de son faible coût.

En outre, l'avantage des cellules métalliques est :

- . la facilité de transport,
- . la simplicité du génie civil,
- . la rapidité de fabrication,
- . la rapidité et la facilité de montage des cellules quelles que soient les conditions climatiques,
- . la standardisation de la production.

Beaucoup de silos de stockage de collecte des céréales et des oléoprotéagineux sont formés de cellules métalliques.

#### ***- Stockage vertical en béton armé.***

Les cellules peuvent être réalisées selon la technique du coffrage glissant. Les cellules réalisées selon cette technique sont en général cylindriques, mais elles peuvent être aussi polygonales.

Les dimensions des cellules peuvent atteindre une soixantaine de mètres de hauteur, et une quarantaine de mètres de diamètre. Seules les cellules de très grand diamètre nécessitent l'emploi des techniques du béton précontraint. Ce type de construction en béton armé s'impose généralement quand il est nécessaire de réaliser des cellules de grande hauteur.

Néanmoins, la réalisation de cellules de très grande hauteur doit être entreprise en tenant compte de contraintes particulières (problème de disponibilité de terrain, nécessité d'être situé en bord de quai de déchargement, prévention et protection incendie et explosion,...) et d'utilisations spéciales (silos portuaires, silos à taux de rotation élevés, ...); en effet, de tels silos engendrent des problèmes d'exploitation importants (casse des grains, effets de voûte liés aux fortes pressions exercées sur les grains, ventilation de conservation des grains plus difficile, ...). La recherche d'économie dans les coûts de construction des silos de stockage a conduit les entreprises françaises à étudier la préfabrication d'éléments standardisés en béton armé en usine ou sur le chantier. Ces éléments sont assemblés sur le chantier. Ils permettent la réalisation de cellules de stockage rectangulaires carrées, octogonales ou circulaires, de petite ou de grande taille.

#### ***- Stockage de type magasin ou stockage horizontal***

Les cellules de stockage de type magasin ou stockage horizontal sont constitués de grands bâtiments de base rectangulaire, généralement de 20 m à 40 m de large.

Les parois sont de faible hauteur (de l'ordre de 5 à 6 m). Elles peuvent être réalisées en béton armé, ou en panneaux métalliques de type "profil oméga". La couverture du toit est réalisée en matériau léger. La manutention d'ensilage est en général accrochée à la charpente.

Le cloisonnement du volume de stockage peut être réalisé à partir d'éléments préfabriqués en béton ou métalliques mobiles, permettant ainsi la réalisation de cases modulables (fractionnement des capacités).

Ce type de stockage offre la possibilité d'une activité très polyvalente : stockage en vrac, stockage de produits différents, (tourteaux, manioc, ...) sous réserve que les parois soient calculées à cet effet. En revanche, il nécessite une surface de terrain importante.

#### ***- Stockage "dôme"***

Un intérêt principal du stockage "dôme" réside dans les faibles moyens à mettre en œuvre pour sa construction et sa rapidité de construction. La fondation et la ou les galeries d'extraction sont les seules parties de l'ouvrage nécessitant l'utilisation de moyens classiques sur un chantier de génie civil. Le reste de la procédure de construction fait appel à une technique tout-à-fait particulière impliquant diverses étapes. Tout d'abord, on met en place une membrane gonflable sur la fondation. Cette membrane conçue en fonction des dimensions et de la forme choisies est ensuite gonflée. On projette alors de la mousse de polyuréthane sur la surface intérieure de la membrane et, parallèlement, on met en place des barres d'ancrage de conception spéciale qui recevront le ferrailage. Ces barres sont noyées dans la première couche de mousse. L'étape suivante est la mise en place des armatures en fonction du dôme à réaliser. Enfin, on procède à la projection du béton, en mélange spécial de haute résistance, dont l'épaisseur des couches est définie et calculée en fonction des conditions d'utilisation du stockage "dôme". Pendant toutes ces opérations, la membrane sert de protection extérieure et de coffrage. La faible résistance de la structure doit être prise en compte dans la construction des stockages "dôme", particulièrement sous l'aspect prévention et protection de l'explosion. On trouve en France quelques stockages "dôme" pour le stockage de céréales et de sucre.

### ***- Stockage aménagé dans des friches industrielles***

Le stockage des produits agro-alimentaires peut être aussi réalisé dans d'anciens bâtiments industriels, aménagés en silos horizontaux. Le volume de stockage est délimité par des éléments préfabriqués en béton ou métalliques. Les bâtiments industriels doivent recevoir les aménagements nécessaires pour la prévention et la protection de l'incendie et de l'explosion.

### ***- Stockage enterré***

Après création d'une tranchée en forme de "V" dans le sol, une cave bétonnée est réalisée; les déblais sont utilisés en remblais.

La réalisation de tels stockages nécessite des sols exempts d'eau et de bonne qualité mécanique. Cette technique est peu utilisée (quelques silos en France).

### ***- Stockage sous structure gonflable***

Le stockage des produits agro-alimentaires, est réalisé sous une structure gonflable maintenue uniquement par la ventilation implantée sur un terrain stable avec un revêtement type " routier ". Le montage de l'ensemble est simple et rapide.

Un ensemble de longrines périphériques en béton posées directement sur le revêtement servent à l'amarrage de la structure et à l'étanchéité des eaux de pluie.

La construction de ce type de stockage doit prendre en compte des contraintes particulières, notamment la résistance à la prise d'air, le bruit des ventilateurs et la prévention et la protection de l'incendie.

## **II.2. Les tours de manutention**

Les tours de manutention sont réalisées pour certaines en béton avec des planchers intermédiaires également en béton avec la technique du coffrage coulissant.

D'autres tours d'élévation sont réalisées avec une ossature en charpente métallique et des parois en bardage. Les tours sont en général équipées sur certaines de leur face de baies d'éclairage.

## **II.3. Les galeries de manutention**

Les galeries de manutention sont soit aériennes, soit souterraines.

Les galeries souterraines sont réalisées en béton armé. Les galeries aériennes sont réalisées pour certaines en béton armé, pour d'autres en charpente et bardage métallique.

## **II.4. Les postes de réception**

La réception se fait par route, par fer et par voie fluviale et maritime. La réception des produits approvisionnés par route et par fer se fait dans des fosses de réception. Ces fosses sont équipées d'une grille de séparation pour retenir les corps étrangers les plus importants. Les produits transportés par bateau sont le plus souvent déchargés au moyen de portiques de déchargement avec transport pneumatique.

## **II.5. Les postes d'expédition**

L'expédition se fait par route, par fer et par voie fluviale et maritime. Pour l'expédition des produits en vrac, le chargement des camions et des trains est réalisé au moyen de postes spécialisés de chargement et celui des bateaux au moyen de portiques spécialisés de chargement.

Le transport des produits est le plus généralement de type gravitaire.

Pour l'expédition des produits en sac, les produits en vrac sont stockés en cellules puis conditionnés en sacs ou en big-bag dans des ateliers équipés d'une ou plusieurs lignes d'ensachage.

Les sacs ou les big-bag sont ensuite chargés dans des camions, des trains ou des bateaux.

## **II.6. Les dispositifs de transport et de distribution**

### **II.6.1. La manutention**

La manutention des grains pour l'ensilage ou pour la reprise des grains stockés, est réalisée le plus souvent gravitairement au moyen de transporteurs et d'élévateurs.

En général, les moyens de manutention verticaux (élévateurs à godets), permettant l'élévation des grains pour la mise en stock, sont groupés dans la tour de manutention qui comprend la majeure partie de l'appareillage du silo et qui en est donc la partie active.

Les débits de manutention des céréales dans les silos de stockage se sont accrus au cours des dernières années :

- dans le cas des silos de collecte et de report : pour suivre le rythme d'apport au moment de la moisson et pour s'adapter à l'utilisation des moyens de transport économiques (trains complets). Les débits varient entre 150 t/h et 300 t/h,
- dans le cas de silos portuaires : pour augmenter les cadences de réception et d'expédition des grains (problème de pointes de trafic à l'exportation, augmentation de la taille des bateaux). Les débits de manutention par circuit peuvent atteindre, voire dépasser 1 500 t/h.
- au niveau du stockage à la ferme et chez les utilisateurs, les débits de manutention sont de l'ordre de 30 t/h à 100 t/h.

Les circuits de manutention qui assurent le transport des produits depuis les postes de réception et d'expédition jusqu'aux installations de stockage comportent à la fois des transporteurs horizontaux et verticaux.

### **- Transporteurs horizontaux**

On trouve pour ce type de transporteurs :

- Les transporteurs à chaînes : du fait de leur faible encombrement, ils sont très utilisés en reprise sous les cellules, dans les galeries, dans les fosses de réception. Ils sont fermés, ce qui permet de limiter les dégagements de poussières.

Ils sont généralement légèrement inclinés (jusqu'à 20°). Avec une inclinaison plus importante une chaîne spéciale est nécessaire.

Ils présentent, par rapport aux transporteurs à bande, l'inconvénient d'être souvent bruyants et moins économes en énergie.

- Les transporteurs à bandes : ils sont très utilisés pour l'ensilage.

Ils sont plus encombrants que les transporteurs à chaînes.

Ils sont recommandés pour les produits fragiles, pouvant se briser lors de la manutention et produire de la poussière.

Ils sont généralement ouverts, donc susceptibles de provoquer des dégagements de poussières s'ils ne peuvent aussi être capotés.

- Les transporteurs à vis d'Archimède : ils sont utilisés dans les petites installations de stockage. Leurs débits peuvent atteindre 100 à 150 t/h.

### **- Transporteurs verticaux**

On trouve pour ce type de transporteurs :

- Les élévateurs à godets : l'élévation des grains pour la mise en stock, pour l'expédition ou pour le traitement est réalisée à partir d'élévateurs à godets. Les débits varient suivant les cas de 30 à 1 500 t/h et plus.

Les godets métalliques ou en plastique sont fixés à intervalles réguliers sur une sangle.

- Les vis élévatrices : les vis élévatrices fixes ou mobiles (sur chariots) sont le plus souvent utilisées dans les petites unités de stockage. Leur angle optimum de fonctionnement est de 45° et les débits peuvent atteindre 100 t/h.

Parfois le transport des produits pour l'ensilage ou pour l'expédition est réalisé par un transport pneumatique constitué d'un réseau de tuyauteries.

L'air servant à la manutention des produits est dépoussiéré avant d'être rejeté à l'atmosphère.

### II.6.2. L'ensilage des cellules

En général, le circuit d'alimentation des produits à stocker dessert plusieurs cellules et un dispositif de distribution assure la répartition des produits vers les différentes cellules (distributeur rotatif, chariot verseur, ...).

Pour optimiser le chargement des silos plats notamment, des dispositifs particuliers sont utilisés (sauterelle, éjecteur, ...).

### II.6.3. La vidange des cellules

Les techniques de vidange sont de types différents, selon la nature des installations de stockage et les nécessités de rotation. On trouve :

#### ***- La vidange gravitaire***

C'est la solution idéale pour la reprise des grains stockés.

Des dispositions constructives doivent être prises pour donner une pente de 35 à 45° au fond de la cellule afin d'assurer l'écoulement des grains par gravité vers un transporteur.

Les cellules à vidange gravitaire sont systématiquement utilisées pour la réalisation de silos de stockage de transit où le coefficient de rotation des installations est élevé (silos portuaires, stockage de matières premières d'industries utilisatrices, ...). Cette conception des installations de stockage, plus coûteuse en investissement, permet une exploitation au moindre coût.

La vidange gravitaire est surtout utilisée dans le cas de cellules verticales.

#### ***- La vidange partiellement gravitaire***

Dans le cas des cellules à fond plat ou de magasins de stockage horizontaux, la vidange peut être réalisée partiellement par gravité avec reprise dans une galerie centrale. L'évacuation du tas résiduel peut être assurée par :

- . une vis rotative de vidange intégrale dans le cas des cellules cylindriques ou par des transracleurs dans le cas de cellules rectangulaires, ramenant les produits vers les orifices de vidange. Cet équipement permet une vidange presque entièrement automatisée des cellules. Le débit de vidange du tas résiduel peut atteindre 100 t/h. Cette solution est satisfaisante pour les silos ayant une rotation moyenne,
- . réalisée en poussant les produits vers la galerie centrale au moyen de chouleurs.

#### ***- La vidange par extracteur***

Dans le cas de produits pulvérulents stockés dans des cellules à fond plat et s'écoulant donc difficilement par gravité (farines, tourteaux, manioc, ...), on utilise généralement des extracteurs. L'extracteur est constitué d'une vis d'Archimède parcourant la surface du fond de cellule et située dans la masse de produit;

#### ***- La vidange par fluidisation***

Cette technique consiste à utiliser les gaines de ventilation posées sur les silos à fond plat pour fluidiser le tas de produits. Le produit est poussé par la simple action de l'air de ventilation. Il suit les filets d'air orientés vers les orifices de vidange de la galerie centrale.

Cette technique permet :

- la suppression de tout élément mécanique de reprise et présente donc l'avantage de ne pas casser les grains,
- l'utilisation des gaines de ventilation pour la vidange.

Elle présente néanmoins l'inconvénient d'une consommation énergétique importante , donc, d'un coût d'exploitation plus élevé que les autres techniques.

Par ailleurs, le dégagement de poussière qu'elle entraîne peut poser des problèmes d'entretien et de sécurité.

#### ***- La vidange par chouleur***

Il s'agit d'une vidange demandant l'intervention de l'homme, dans le cas des silos de stockage à fond plat. Le produit est pris dans le tas par un tracteur ou un chouleur et déposé sur une bande transporteuse ou un transporteur à chaîne ou chargé directement sur le système de transport (camion, wagon, ...). Il s'agit du système de manutention le plus simple. Ce type de manutention est économique dans le cas d'installations de stockage dont le taux de rotation annuel est faible.

### **II.7. Nettoyage des produits**

Les produits (grains) avant stockage peuvent être nettoyés. Le nettoyage des produits réalisé dans certains silos est assuré par des installations disposées généralement dans la tour de manutention, alimentée en direct par circuit ou par gravité à partir de boisseaux de stockage. Les opérations de conditionnement plus élaborées telles que le calibrage et l'ébarbage ne sont généralement pas réalisées sur les céréales de consommation. Elles sont par contre nécessaires pour les semences ou les orges de brasserie.

Plusieurs types d'appareils sont utilisés pour nettoyer les produits.

### *- Les nettoyeurs à tamis plan*

Les plus simples sont équipés d'un tamis plan incliné sur lequel tombe le grain. Ce tamis est animé de vibrations et les grosses impuretés telles les rafles, tiges et feuilles sont retenues. La hotte d'alimentation est parfois reliée à un ventilateur pour obtenir l'aspiration des impuretés légères. Il existe également des appareils à un, deux ou trois tamis. Les tamis sont généralement nettoyés par une brosse.

### *- Les nettoyeurs à tamis cylindrique*

Deux systèmes existent. Dans le premier, le grain tombe sur la partie extérieure du tambour qui est animé d'un mouvement de rotation. Les grosses impuretés sont alors retenues et éliminées. Dans le deuxième système, le grain arrive à l'intérieur du tambour, qui est incliné et est animé d'un mouvement de rotation. Dans les deux cas le tambour peut être animé de secousses axiales ce qui améliore le débit et l'efficacité du nettoyage. Le dégommage du crible est généralement assuré par une brosse rotative.

### *- Les nettoyeurs circulaires*

Ces appareils ainsi que d'autres types qui en sont dérivés (à cascade, etc.) utilisent le principe de la circulation d'un courant d'air en sens inverse du flot de grain ce qui élimine les impuretés légères. Ils ne permettent donc pas l'élimination des impuretés telles que spathes, tiges, rafles et ne doivent être utilisés qu'en complément de nettoyeurs plans ou à tambour.

Ces appareils de nettoyage qui débarrassent les produits des impuretés provenant des matières agro-alimentaires elles-mêmes, et des pierres, peuvent être complétés par des séparateurs magnétiques pour éliminer les corps étrangers métalliques.

## **II.8. La ventilation**

Généralement, en France, la conservation des grains est réalisée par ventilation au débit moyen de 10 m<sup>3</sup>/h par m<sup>3</sup> de grains. La ventilation se fait aux heures froides et lorsque l'air est sec. On conserve ainsi les stocks par refroidissement. Le refroidissement de l'air de ventilation peut être fait artificiellement au moyen de machines frigorifiques. Pour que la ventilation soit néanmoins efficace, la hauteur de stockage de grains doit être limitée à 20 m environ, sauf dispositions spéciales.

La désinsectisation est réalisée par nébulisation d'insecticide dans le circuit de manutention (en pied d'élévateur généralement) ou par fumigation du produit stocké.

La conservation sous gaz neutre, en atmosphère contrôlée (CO<sub>2</sub>) ou en atmosphère confinée est peu utilisée pour les céréales.

La ventilation est également utilisée pour garder la qualité du sucre stocké en cellules.

## **II.9. Le dépoussiérage**

Pour limiter les émissions de poussières à l'intérieur des bâtiments des silos de stockage en vue de prévenir les risques d'explosion, une captation des poussières est réalisée par aspiration aux points les plus empoussiérés des circuits de préparation et de manutention. Le dépoussiérage de l'air est réalisé par des filtres à manches ou des cyclones situés le plus souvent dans les tours de manutention.

L'installation de dépoussiérage peut être centrale ou locale.

Les installations de dépoussiérage comportent trois parties distinctes :

- Une captation des poussières par aspiration par de l'air.

Pour améliorer l'efficacité de l'aspiration, un capotage le plus étanche possible autour de la source d'émission des poussières est essentiel. Le débit d'air à l'aspiration doit être suffisant pour aspirer les poussières, mais pas trop élevé au risque d'entraîner la matière. La vitesse optimale se situe aux environs de 2 m/s.

- Un transport de l'air empoussiéré.

L'air empoussiéré est transporté dans un réseau de tuyauteries. La vitesse de l'air à l'intérieur des tuyauteries doit être la plus constante possible et assez élevée pour limiter les dépôts de poussières susceptibles de colmater les tuyauteries et de s'auto-échauffer.

Cependant, il y a tout intérêt à se limiter à une valeur raisonnable afin de limiter les pertes de charge et d'éviter une usure prématurée des tuyauteries par abrasion. Des vitesses de 15 à 20 m/s permettent de répondre à ce double objectif.

- Une séparation des poussières de l'air.

Les appareils de séparation les plus couramment utilisés dans les silos de stockage, sont les cyclones et les filtres à média filtrant.

Les **cyclones** sont les systèmes de séparation de type mécanique utilisant la force centrifuge. Leur efficacité de traitement dépend de la densité des poussières, et également de la vitesse périphérique à l'intérieur de la chambre de séparation.

Leur capacité maximale de séparation est estimée, avec les appareils actuels, à 80 % sur des particules de 40  $\mu\text{m}$  et à 25 % sur des particules de 25  $\mu\text{m}$ .

Les rejets dans l'atmosphère sont donc importants avec les cyclones, et peuvent se révéler incompatibles avec la sécurité explosion ou les contraintes réglementaires de rejet dans l'environnement.

Mais les cyclones sont bien adaptés pour traiter de grandes quantités d'air chargées de grosses poussières.

Lorsque les conditions l'exigent, des filtres à média filtrant sont associés aux cyclones pour limiter les rejets à un seuil acceptable. Ces appareils combinant à la fois un cyclone et un filtre à couche poreuse sont appelés **cyclofiltres**.

**Les séparateurs à média filtrant** qui sont aussi utilisés seuls, sont soit des filtres à manches tissus, soit des filtres à manches feutre, soit des filtres à cartouches.

Les appareils à manches tissu, sont de moins en moins utilisés. Ils ont des rejets supérieurs à  $20 \text{ mg/m}^3$  s'aggravant rapidement au fil de l'utilisation.

Les filtres à manches feutre que l'on trouve sur les installations sont en général du type à décolmatage pneumatique. Un injecteur envoie de courtes impulsions d'air comprimé à 4 ou 6 bar dans les manches.

Les filtres à média filtrant sont adaptés aux volumes d'air poussiéreux pas trop importants et pas trop chargés en poussières, et permettent d'excellentes performances de dépoussiérage.

#### **II.10. Nettoyage des dépôts de poussières**

L'enlèvement des dépôts de poussières peut être réalisé manuellement (balais). Mais on rencontre de plus en plus pour cette opération, l'utilisation d'aspirateur industriel, voire de centrale d'aspiration.

La zone d'action des aspirateurs industriels est limitée, ils sont déplacés de bâtiment en bâtiment.

Dans le cas d'une centrale d'aspiration, un réseau de tuyauteries équipé de prises permet de distribuer des points de nettoyage dans les différents bâtiments de l'établissement.

#### **II.11. Alimentation en énergie**

L'alimentation en énergie électrique est assurée par des postes de transformation équipés de transformateurs et d'armoires électriques.

On trouve en plus dans certains établissements des compresseurs d'air comprimé et des chaudières pour le chauffage et parfois la production de vapeur ou d'air chaud.

#### **II.12. Salle de contrôle, commande**

Les différents matériels intervenant dans le cycle de travail fonctionnent par asservissement.

Le pilotage des installations est réalisé, selon le niveau de modernité du silo, depuis une salle de contrôle :

- à partir de tableaux synoptiques comportant le diagramme des installations. Dans ce cas, l'établissement des circuits est réalisé à partir de relais électromécaniques,
- à partir d'automates programmables. Cette dernière technique se développe,
- à partir d'appareils donnant des informations sur le fonctionnement des installations.

### **III./ ACTIVITES CONNEXES**

#### **III.1. Séchoirs**

Certaines céréales (maïs, blé tendre, orge, ...) ou oléoprotéagineux (colza, tournesol, pois, soja, ...) nécessitent un séchage pour ramener le taux d'humidité des grains récoltés à des niveaux compatibles avec leur bonne conservation. Le séchage est réalisé dans des installations spécialisées (séchoirs). De plus en plus, le séchage est réalisé par de l'air chaud chauffé au gaz dans des séchoirs bi-étagés. Ces installations sont munies de dispositifs spéciaux pour économiser l'énergie (récupération de chaleur sur l'air usé, recyclage d'air, refroidissement lent différé, ...). La conduite des installations de séchage est généralement réalisée par automates tenant compte des paramètres de fonctionnement (température de l'air chaud, humidité du grain en sortie du séchoir, degré hygrométrique de l'air usé) pour faciliter l'exploitation et assurer une meilleure sécurité.

Le pilotage des installations de séchage évolue vers une automatisation complète grâce à la mise au point des systèmes de mesure de l'humidité en continu en sortie de séchoir.

#### **III.2. Ateliers**

Les établissements stockeurs sont équipés généralement d'un atelier dans lequel sont réalisés certains travaux d'entretien (les autres étant réalisés sur place), sur les installations et où sont entreposés les pièces de rechanges et l'outillage nécessaires aux interventions.

Dans les établissements stockeurs, les matériaux combustibles en dehors de produits très spécifiques (produits agro-pharmaceutiques, solvants, ...), sont surtout le gasoil et les huiles utilisés dans les installations (groupe motoréducteur, transformateur), les véhicules (chouleur, camion) et les gaz de soudage et de découpage.

### **IV./ ACTIVITES ANNEXES**

On peut retrouver à l'intérieur des stockages de produits agro-alimentaires, des activités annexes de négoce (qui ne sont pas traitées dans ce guide) qui nécessitent des stockages importants de produits susceptibles de provoquer des incendies voire des explosions.

Il s'agit essentiellement des stockages de produits agro-pharmaceutiques (fongicides, pesticides, insecticides, herbicides) et des stockages d'engrais.

On retrouve parfois pour certains process des produits particuliers (formol, ...) pour lesquels les dangers sont bien spécifiques.

## QUATRIEME PARTIE

### NATURE DE PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES

Dans le cadre de cette étude, nous avons porté notre attention tout particulièrement sur **les produits présentant des risques d'incendie et d'explosion** au moment de leur stockage.

Nous nous sommes limités aux produits présentant les risques les plus élevés, ou à ceux dont les quantités stockées sont les plus importantes, à savoir : les céréales, les oléagineux, les protéagineux, la luzerne, le sucre, le malt.

Ces produits sont, soit produits directement en France, soit importés de l'étranger.

Pour certains d'entre eux, une partie de la production est exportée .

Le stockage de ces produits est fait soit directement sur les lieux de production, soit sur un autre site après une éventuelle transformation.

## I./ GÉNÉRALITES SUR LES STOCKAGES

### I.1. Produits céréaliers et oléoprotéagineux (en grains)

L'approvisionnement des utilisateurs français et étrangers nécessite des stockages intermédiaires, à différents niveaux, entre la production et l'utilisation des produits qui permettent :

- d'assurer la conservation des graines,
- d'organiser l'équilibre d'un marché, entre une offre généralement très dispersée, et une demande concentrée et éloignée,
- d'assurer la sécurité alimentaire du pays.

Il existe, en France, quatre niveaux de stockage correspondant, en période normale, aux circuits commerciaux du secteur céréalier (/11/).

Ces niveaux peuvent donc, en théorie, être définis d'après la fonction qu'exercent, dans lesdits circuits, les opérateurs qui possèdent ou exploitent les capacités de stockage.

On distingue :

- **Le stockage à la ferme**, qui est représenté par les capacités que possèdent les producteurs, en vue de stocker les céréales au moment de la récolte ; les moyens de stockage en cause sont utilisés, soit pour permettre l'échelonnement des livraisons à la collecte, soit pour l'autoconsommation. Fin 1995, on estimait à 20,6 millions de tonnes les capacités de stockage en ferme dont 14 millions de tonnes en cellules, le reste sur des aires de stockage couvertes.

Le stockage des céréales à la ferme est de courte durée, de l'ordre de deux à six mois.

- **Le stockage de collecte**, qui correspond aux capacités de stockage des collecteurs agréés (coopératives et négociants) ; il est destiné à recevoir les céréales en provenance directe de leurs sites de production. Il s'agit du stockage de base dans les régions de production. Au 1<sup>er</sup> septembre 1998, la capacité de stockage des silos de collecte s'élevait à 38,6 millions de tonnes. 70 % des capacités étaient détenues par des coopératives et 23 % par des négociants. La capacité de stockage moyenne des silos de collecte est de 5 270 tonnes. Bien évidemment, il y a une grande dispersion de la taille des silos de collecte, certains centres de stockage ayant des capacités de stockage supérieures à 80 000 tonnes. Les silos de moins de 5 000 t représentent 72,6 % du nombre total de silos, mais seulement 20 % des capacités de stockage.

La durée du stockage dans ces silos peut atteindre 1 an, voire plus.

- **Le stockage secondaire** qui comprend les capacités de tous les opérateurs dont la fonction se situe en aval de la collecte, notamment les entrepreneurs qui assurent le stockage de céréales en transit, destinées à l'exportation ou à la distribution sur le marché intérieur. Le stockage secondaire comprend également la conservation des stocks de report, dont les stocks d'intervention de l'ONIC, qui est réalisée dans le cadre de contrats pluriannuels. Les silos sont implantés, soit dans les grandes zones de production où leur concentration est la plus importante, soit en bordure de voies navigables ou dans les sites portuaires maritimes. Au 1<sup>er</sup> septembre 1998, la capacité de stockage des silos de collecte s'élevait à environ 11,3 millions de tonnes, la capacité de stockage moyenne des silos étant de 32 000 millions de tonnes.

Le stockage est de longue durée : un an, voire plus pour les stockages de report.

- **Le stockage chez les utilisateurs** qui correspond au stockage dans les installations de transformation des céréales (meunerie, malterie, semoulerie, maïserie, aliments du bétail). Globalement, ce stockage représentait une capacité d'environ 3,1 millions de tonnes au 1<sup>er</sup> septembre 1998. Ce chiffre ne prend pas en compte les coopératives céréalières qui se sont diversifiées dans la fabrication d'alimentation bétail. Plus de 40 % de capacités de stockage des utilisateurs sont détenus par les fabricants d'aliments de bétail et près de 30 % par les meuniers.

Ce classement par type de stockage est donné à titre de repère, mais dans la pratique, la correspondance entre le niveau et la fonction n'est pas absolue. En effet, certains entrepreneurs peuvent être amenés à assurer occasionnellement une fonction liée à un autre niveau, pour tenir compte de la conjoncture et des besoins immédiats des circuits commerciaux.

En résumé, il apparaît que le stockage de collecte représente près de la moitié des capacités de stockage. Par ailleurs, le stockage à la ferme représente une part non négligeable des capacités de stockage (le quart). Le stockage des céréales est réalisé essentiellement dans des stockages verticaux et horizontaux (métallique ou en béton). On trouve également quelques stockages dôme. Des stockages sous structure gonflable sont envisagés.

## **I.2. Protéagineux en tourteaux**

Les protéagineux en tourteaux sont les sous-produits des huileries et servent à la fabrication des aliments du bétail.

La France produit essentiellement du colza et du tournesol, et importe du soja pour la fabrication des huiles de consommation.

Les tourteaux qui contiennent 40 à 50 % de protéines, se présentent sous forme de farines grossières.

En France, on trouve les stockages des tourteaux, sur les sites des huileries nationales mais également dans les ports pour les tourteaux importés.

Le stockage des tourteaux est réalisé, essentiellement, dans des cellules verticales en béton de grande hauteur.

La tendance actuelle est de conditionner, les tourteaux en granulés (ou pellets) afin de diminuer les coûts de transport vers les usines d'aliments du bétail.

A leur arrivée dans les usines d'aliments du bétail, les tourteaux ou les pellets de protéagineux sont stockés avant utilisation dans des cellules verticales, en béton ou métallique, ou dans des cellules horizontales.

## **I.3. Malt**

Le malt est fabriqué à partir d'orge dans des malteries, et sert essentiellement à la fabrication de la bière.

Après réception et stockage, l'orge est nettoyé et calibré.

L'opération de maltage proprement dite comprend la germination des grains d'orge après trempage.

Le malt est ensuite séché, (touraillage), dégermé puis stocké.

Le malt est stocké essentiellement dans des cellules verticales en béton.

#### **I.4. Produits déshydratés**

La luzerne fraîchement coupée est transportée vers les centres de traitement.

Dans ces usines, la luzerne est déshydratée par séchage (séchoir rotatif), transformée en granulés dans des presses puis refroidie.

La luzerne déshydratée est ensuite évacuée depuis l'usine de déshydratation vers les centres de stockage où les granulés sont stockés sous gaz inerte principalement dans des cellules verticales (en béton ou métallique).

Le stockage est réalisé également dans des cellules horizontales (silo à fond plat) sans inertage.

#### **I.5. Sucre**

La production française est réalisée à partir de la betterave sucrière. Le stockage du sucre cristallisé est fait essentiellement dans des cellules verticales en béton de diamètre supérieur à 10 m comportant des greniers pour les installations d'ensilage. On trouve également dans les nouvelles capacités de stockage quelques stockages dôme et des stockages horizontaux.

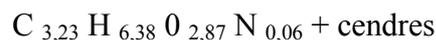
## **II./ RISQUES SPECIFIQUES**

### **II.1. Généralités**

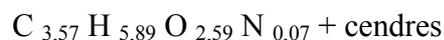
Les céréales constituent un exemple de poussières agro-alimentaires. Ces poussières sont composées par exemple de 65,3 % d'amidon, 6,8 % de fibres (cellulose), 4 % de lipides et 6,5 % de protéine, 9 % d'humidité et 8 % de cendres. Les variations du taux d'humidité et du taux de cendres peuvent être très importantes.

Même si l'amidon, les lipides, les protéines et les fibres ont des compositions chimiques différentes et conduisent à des produits de combustion différents, on peut cependant écrire une formule chimique pour les poussières sèches et humides :

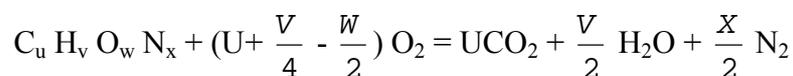
- . pour les poussières humides :



- . pour les poussières sèches :



L'équation de combustion complète (ou stoechiométrique) d'un produit composé de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N), s'écrit :



Pour les substances organiques, un paramètre important influençant les propriétés explosives est la teneur en matières volatiles. Cette caractéristique est mesurée lors du chauffage lent dans des conditions normalisées, de l'échantillon jusqu'à 900°C.

Les matières volatiles sont simplement les gaz émis par la céréale lors de son chauffage.

Cette caractéristique est importante car l'explosion des poussières agro-alimentaires en mélange avec l'air se produit dans le mélange de matières volatiles formé avec l'air selon le modèle :

poussières + chaleur → matières volatiles + oxygène de l'air → produits de combustion + chaleur.

D'autres paramètres, comme les taux d'humidité et de cendre influencent les propriétés explosives des poussières agro-alimentaires.

Le taux d'humidité peut être défini comme la perte de masse de l'échantillon entre la température ambiante et 70°C, rapportée à la masse de l'échantillon.

Le taux de cendres correspond au résidu minéral après combustion dans des conditions normalisées de température.

Par ailleurs, au plan de l'incendie, les pouvoirs calorifiques supérieurs des poussières de céréales sont compris entre 15 et 16 MJ par kg.

## **II.2. Particularités des produits**

Les stockages des produits agro-alimentaires posent plus ou moins de problèmes de sécurité, selon les spécificités des produits stockés vis-à-vis de l'explosion et de l'incendie.

Comme le montrent la cinquième partie du guide consacrée aux risques incendie et explosion posés par les produits agro-alimentaires, les paramètres d'inflammabilité et d'explosivité des poussières dépendent étroitement de leurs caractéristiques (granulométrie, humidité, origine) et peuvent donc varier parfois notablement. A titre indicatif, des fourchettes de valeurs de ces paramètres pour des produits agro-alimentaires établies à partir d'informations publiées (comme par exemple dans (/12/, /13/, /16/)) sont fournies dans la cinquième partie du guide.

Cependant, sur un plan plus général, en fonction des connaissances acquises sur les produits et du retour d'expérience d'accidents, il apparaît les tendances suivantes.

### *CAS DE L'EXPLOSION*

- Les céréales (blé, orge, maïs) sous forme pulvérulente ont globalement des comportements similaires vis-à-vis de l'explosion (coefficient d'explosivité  $K_{St} < 200 \text{ bar.m.s}^{-1}$  classe  $ST_1^*$ ).
- Les oléagineux (tournesol, ...), lors de fermentation, peuvent conduire à la formation de gaz susceptibles de donner lieu à des explosions.
- Les tourteaux, en plus des gaz de fermentation peuvent, produire des vapeurs combustibles provenant de l'hexane utilisé pour l'extraction de l'huile, s'ils sont insuffisamment débarrassés de leur solvant.
- La luzerne et le malt posent des problèmes spécifiques d'explosion (poussières fines et sèches).
- Le sucre pose des problèmes spécifiques d'explosion du fait d'une énergie minimale d'inflammation ( $EMI^*$ ) des nuages de poussières très faible.

### *CAS DE L'INCENDIE*

- Le maïs et le tournesol posent des problèmes vis-à-vis de l'auto-inflammation \*et de l'incendie lors des opérations de séchage.
- Le maïs, le tournesol, les pois fourragers, les tourteaux, l'orge, la luzerne posent, si les conditions de stockage sont anormales, des problèmes d'auto-échauffement\* et d'auto-inflammation.
- Le sucre ne pose pas de problèmes d'auto-échauffement, mais peut donner lieu à des incendies.

---

\* ces caractéristiques et ces phénomènes sont explicités dans la cinquième partie du guide

## **CINQUIEME PARTIE**

### **RISQUES "EXPLOSION" ET "INCENDIE"**

Après une description du risque d'incendie et d'explosion spécifique aux silos de stockage de produits agro-alimentaires se basant sur le retour d'expérience d'accident, une présentation générale est faite des phénomènes d'incendie des produits stockés et d'explosion de poussières au plan de l'amorçage (inflammation), du développement, de la propagation et des effets.

#### **I./ ACCIDENTOLOGIE**

L'accidentologie permet de mieux comprendre les phénomènes concernant l'amorçage et la propagation des incendies et des explosions,

De plus, le retour d'expérience permet de prendre en compte les coûts économiques et sociaux, en s'intéressant à la probabilité d'occurrence du phénomène et à l'importance des dommages obtenus. Ceci permet d'adapter par type d'industrie une politique de sécurité s'appuyant sur la réglementation, la normalisation, l'assurance et le management de la sécurité (/14/).

Il est nécessaire pour cela de disposer de données récentes et exploitables sur les accidents survenus dans la branche industrielle considérée.

Pour tenter de dégager les points marquants, caractéristiques des accidents touchant les stockages de produits agro-alimentaires, des informations récentes provenant essentiellement de France, mais aussi de République Tchèque et de Pologne sont d'abord examinées. Ensuite, les conclusions tirées de l'analyse de ces accidents sont décrites. Ces données partielles ne permettent pas d'assurer une approche statistique.

## **I.1. Données sur les accidents**

◆ En 1992 et 1993, dans le domaine industriel et les transports, le Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (BARPI) du Ministère de l'Environnement a rassemblé dans la base de données ARIA, des informations sur 1350 accidents dans lesquels des incendies, des explosions et des émissions dangereuses étaient impliquées.

Ainsi en 1992, sur 710 accidents, 36 étaient des explosions et 295 des feux. Seuls 16 cas se sont produits dans les industries agro-alimentaires (prises au sens large puisque divers accidents survenus à la ferme ont été pris en considération).

Dans le domaine agro-alimentaire au sens large, une seule explosion avec des dommages matériels importants mais n'ayant pas causé de morts s'est produite dans un stockage de grains. 7 des 15 autres accidents ont mis en cause des quantités faibles de produits (inférieures à 200 t) tels que des pois, des fourrages, des aliments pour bétail et de la paille stockés dans des hangars.

Trois autres cas impliquaient l'auto-échauffement et l'auto-inflammation de stockages de tournesol (dont l'un avec destruction du séchoir).

Trois feux étaient décrits, l'un dans la partie supérieure d'un silo de stockage de maïs, l'autre dans une minoterie et le dernier dans un stockage de farine. Enfin, dans les deux derniers cas, les conséquences des incendies dans un stockage de fourrage ont été amplifiées par la présence de combustibles liquides.

En 1993, sur 640 accidents, quinze se sont produits dans les industries agro-alimentaires. Une explosion importante qui n'a pas occasionné de morts mais des dégâts matériels importants s'est produite dans un stockage de sucre. Parmi les 14 autres accidents, 6 impliquaient des quantités limitées (moins de 300 tonnes) de fourrage, foin ou paille stockés principalement sous hangar. Six feux importants ont concerné des installations de stockage de lait, de racines de chicorée et de cacao, de céréales stockées en silo, un séchoir à amidon et une installation de fabrication d'aliments pour animaux. Enfin, un incendie a aussi concerné une installation électrique.

◆ Dans la base de données ARIA du BARPI (état au 31 octobre 1997) (/15/), au total, 67 accidents sont dénombrés dans les installations de stockage agro-alimentaires françaises et équipements associés. Sur ces 67 accidents, 53 sont des incendies (79 %), 12 sont des explosions (18 %) et 2 sont des accidents autres. Dans les incendies, des séchoirs sont impliqués 14 fois et une bande de transporteurs dans deux cas.

◆ Ces données peuvent être comparées à celles, dans le même domaine (séchoir exclus), rassemblées par GROUPAMA qui, pour la période 1982-1990, a indemnisé 25 accidents graves (/3/).

Sur ces accidents, 16 sont des incendies (65 %) et 9 sont des explosions (35 %). Ceci montre qu'en France, dans le domaine des stockages de produits agro-alimentaires, une probabilité d'occurrence d'une explosion et de deux incendies graves par an peut être retenue.

Pour l'explosion, les produits impliqués sont principalement des céréales (31 %) et des produits déshydratés (25 %). Pour l'incendie les produits impliqués sont principalement des céréales (65 %).

Les causes d'incidents les plus souvent citées sont : l'auto-échauffement, les échauffements dus aux engins de manutention, les travaux par points chauds.

◆ Une enquête faite en 1998 par la FFCAT (/16/) auprès de 300 coopératives agricoles, a conduit au recensement de 70 incendies et explosions, dont les causes étaient :

- des défauts de maintenance (bandes transporteuses, élévateurs, ...) pour 24 incendies et 2 explosions,
- des travaux par point chaud (soudure sur élévateur en fonctionnement, ...) pour 17 incendies et 6 explosions,
- des causes diverses ; d'origine électrique pour 5 accidents, suite à une fermentation suivie d'une auto-inflammation pour 2 accidents (tournesol et colza), suite à l'utilisation de baladeuses pour 2 accidents et d'origine électrostatique pour un accident,
- des causes inconnues pour 6 incendies et 5 explosions.

## **I.2. Origines des accidents**

L'expérience acquise repose sur l'analyse détaillée d'accidents dans trois pays (France, Pologne, République Tchèque). Sur une période de 30 ans, plus de 100 accidents ont été analysés de façon détaillée.

En prenant aussi en considération des accidents dans divers autres pays, il a été possible de tirer les conclusions générales suivantes.

### ***I.2.1. Age des installations***

Des incendies et des explosions se sont produits aussi bien dans des installations neuves qu'anciennes. Dans certains cas, l'accident est arrivé dans la phase de mise en route et pouvait être attribué à l'absence d'une appréciation détaillée du risque mettant suffisamment l'accent sur les mesures de prévention et de protection. La procédure d'autorisation administrative peut donner l'occasion de contrôler que les mesures de sécurité prises tiennent compte des accidents possibles.

### ***I.2.2. Travaux de maintenance et de réparation***

Dans de nombreux cas, les travaux de maintenance et de réparation étaient à l'origine des accidents ; il faut souligner l'importance d'adopter la procédure d'autorisation de travail par point chaud toutes les fois où des travaux de soudure et de découpage doivent être entrepris.

### *1.2.3. Nature des produits mis en cause*

Des types très différents de produits étaient impliqués dans les accidents : céréales, fourrages, protéagineux et oléagineux, lait en poudre, sucre. **Tous ces produits sont combustibles, mais leur inflammabilité, leur combustibilité et leur explosivité, la propagation de l'incendie et de l'explosion sont largement fonction de leurs propriétés physiques telles que la teneur en eau et en cendres, la granulométrie, l'âge...** Ces propriétés ont une influence plus ou moins grande selon les appareils utilisés pour leur fabrication. Des procédures opérationnelles inadaptées telles que des températures trop élevées, des débits trop importants, des produits trop humides, des broyages trop fins peuvent introduire des conditions facilitant l'inflammation par exemple.

### *1.2.4. Sources d'inflammation*

Avant stockage, les produits sont manipulés dans des appareils mécaniques, tels que des bandes transporteuses, des élévateurs à godets, des mélangeurs, des nettoyeurs, des broyeurs dans lesquels des frottements sont difficilement évitables. Beaucoup d'accidents mettent en cause les élévateurs à godets du fait de frottement. La surveillance des appareils impliqués peut accroître le niveau de sécurité si des mesures de prévention adaptées sont prises.

Les processus de séchage sont aussi mentionnés dans de nombreux accidents ; ceci est la conséquence de températures trop élevées et/ou de temps de séchage trop longs. L'inflammation se produit dans le séchoir lui-même ou dans le stockage qui lui est relié dans lequel des produits trop chauds sont réceptionnés.

Avec le maïs, la luzerne, les oléagineux (tournesol, soja) et les protéagineux (pois fourragers) ainsi que le lait et le sucre, des feux couvants se sont produits dans les stockages ; il est difficile de lutter contre de tels feux qui impliquent des moyens spécifiques (mise à l'état inerte de cellules par des gaz inertes,...).

L'auto-échauffement et l'auto-inflammation de couches de poussières sur des surfaces chaudes sont aussi connues pour avoir entraîné aussi bien des incendies que des explosions.

Un nombre non négligeable d'accidents est la conséquence d'opérations de soudure et de découpage ou a pour origine des installations électriques.

Des accidents attribués à des inflammations par étincelles électriques ou électrostatiques sont mentionnés dans le cas de poussières possédant des énergies très faibles d'inflammation (amidon séché et sucre).

### ***1.2.5. Fonctionnement de l'installation***

De nombreux accidents sont survenus lors des opérations de démarrage et d'arrêt pour lesquelles des nuages de poussières ou des dépôts de poussières importants se produisent. Ceci concerne tout spécialement les opérations de remplissage et de vidange des cellules. Par ailleurs, lorsqu'on change de produit dans une même installation, les réglages ne sont pas toujours réalisés ; des incendies et des explosions sont connus lors du séchage de lait à diverses teneurs en matières grasses, lors de la manipulation de grains plus secs qu'à l'ordinaire, lors du séchage de grains.

### ***1.2.6. Types de bâtiments et équipements divers***

Dans de nombreux cas, les cellules de stockage, les galeries aériennes ou souterraines, et les bâtiments en général étaient construits de telle manière que, lors de l'explosion, des débris étaient projetés, parfois à plusieurs centaines de mètres. L'analyse des accidents montre aussi l'effondrement plus ou moins généralisé de l'ensemble du silo, notamment en raison de l'absence de prise en compte des explosions secondaires dans ces installations. Ces points doivent être examinés à la construction.

### ***1.2.7. Matériels utilisés pour récupérer les poussières***

Le matériel dans lequel la poussière est récupérée, principalement comme sous-produit a été impliqué dans diverses explosions. Une appréciation précise du risque doit être faite lorsqu'on prend la décision d'installer de tels équipements dans une installation, principalement pour des raisons économiques ou d'hygiène. Les poussières récupérées ne doivent pas demeurer dans l'équipement ou à leur voisinage et doivent être évacuées dès que possible.

### ***1.2.8. Automatisation des installations***

Lorsqu'on augmente l'automatisation des installations, il est encore plus indispensable lors de l'analyse de risque de définir des limites de fonctionnement sûr. Une attention particulière est à accorder à la surveillance des propriétés physiques des produits et au contrôle de fonctionnement des équipements, tout spécialement à la température. La détection précoce des frictions et bourrages dans les équipements est indispensable.

### ***1.2.9. Facteur humain***

Lorsqu'il a été possible de discuter avec les personnes directement impliquées dans le fonctionnement d'une installation accidentée, il a pu être constaté que souvent les opérateurs n'étaient pas avertis des conséquences possibles de tels incendies et explosions et ont été surpris par la rapidité de développement du phénomène. La formation du personnel est donc à assurer régulièrement.

Le fait de fumer, l'utilisation de baladeuse peut constituer une origine possible d'incendie, voire d'explosion.

### **I.3. Accidents marquants**

#### ***I.3.1. Explosion d'un silo de céréales à Metz***

Le 18 octobre 1982, l'explosion d'un silo de céréales d'une malterie à Metz entraîne la mort de 12 personnes et en blesse une.

Le silo comportait quatorze cellules cylindriques en béton armé de 8 mètres de diamètre et de 43 mètres de hauteur et avait une capacité de stockage de graines d'orge de 15 000 tonnes. La température était maintenue inférieure à 30°C à l'intérieur des cellules et contrôlée par sondes de température. Le taux d'humidité était maintenu inférieur à 16 % pour éviter tout début de fermentation. Aucun fumigant n'était utilisé. Une tour de travail contenant des élévateurs était accolée aux cellules. Les élévateurs étaient munis de systèmes de dépoussiérage asservis à leur marche.

Lorsque l'explosion s'est produite, des travaux sur les tuyauteries, pour améliorer l'aspiration des poussières, étaient en cours alors que le silo était en exploitation.

Bien que les causes de l'explosion aient fait l'objet de plusieurs hypothèses, la plus plausible d'entre elles suppose que, dans la tour de travail, un nuage de poussières provoqué par l'exécution des travaux a atteint des sources d'inflammation existant sur le chantier d'assemblage des tuyauteries. L'inflammation du nuage de poussières a créé une explosion qui s'est propagée vers le haut dans la galerie supérieure et dans l'espace vide entre les cellules ainsi que vers le bas, atteignant les galeries d'alimentation.

L'explosion a entraîné la ruine presque totale de l'ouvrage (8 cellules sur 14 ainsi que la tour de travail et les ouvrages annexes).

Des projections de débris de béton de dimensions significatives ont été observées à plusieurs centaines de mètres du silo.

#### ***I.3.2. Explosion d'un silo de sucre à Boiry Ste Rictrude***

Le 11 mai 1982, une forte explosion détruit en partie des cellules verticales de stockage de sucre et leurs installations annexes. Fort heureusement l'accident a eu lieu à l'heure du déjeuner et aucun blessé n'a été à déplorer.

L'explosion s'est propagée dans deux tours de manutention, et dans les greniers de trois cellules verticales qui étaient en communication. Les toitures en béton léger des greniers de deux des trois cellules, ont été soufflées par l'explosion et des débris ont été projetés à plusieurs centaines de mètres. Des passerelles aériennes en bardage métallique ont servi de découplage pour la propagation de l'explosion.

Les causes exactes du sinistre n'ont pas été identifiées.

### ***1.3.3. Explosion d'un silo de céréales à Floriffoux***

Le 7 avril 1993, l'explosion d'un silo à Floriffoux en Belgique, tue cinq personnes et en blesse quatre.

Les 100 000 tonnes de froment, d'escourgeon et de colza entreposées en silos faisaient de Floriffoux, en Wallonie, le plus important site de stockage de céréales de Belgique.

Une panne du système automatisé rendait impossible un nettoyage général du bâtiment central, utilisé pour le traitement des céréales.

A la place, les ouvriers avaient commencé le nettoyage par le cinquième étage en précipitant les poussières et résidus d'étages en étages, créant ainsi un véritable nuage de poussières qui s'infiltrait dans l'ensemble des locaux. Peu avant le sinistre, trois opérations étaient effectuées simultanément.

- Le chargement de 600 tonnes de céréales à bord d'une péniche. Ces céréales, assez sèches (seulement 11 % d'humidité) étaient partiellement mangées par des charançons et la proportion de particules fines devait être importante.
- Des céréales ne pouvaient s'écouler d'un silo et une opération de désengorgement était en cours. Pour l'entreprendre, il était d'abord nécessaire de découper, à l'aide d'une disqueuse, un carré de 15 x 15 cm pour permettre le passage d'une tige afin de faciliter l'écoulement. Ce travail fut confié à trois ouvriers intérimaires, qui ignoraient tout du risque d'explosion encouru.
- Dans le même temps une "rustine" était découpée au chalumeau pour désengorger une cellule de stockage par le bas.

L'explosion a démarré dans le caniveau où l'on procédait à cette découpe. Elle s'est propagée avec violence dans les sous-sols situés sous les silos jusqu'à la tour de manutention. Des éboulements de parois, de planchers et d'installations diverses causèrent alors aux victimes, en plus des brûlures, de multiples contusions.

Des bardages métalliques ont été retrouvés à plus de 100 mètres du silo.

### ***1.3.4. Explosion d'un silo de céréales à Blaye***

Le 20 août 1997, une explosion se produit dans un silo de céréales à Blaye alors que diverses opérations de manutention (maïs, blé, orge) sont en cours.

Le bilan de l'accident s'établit à 11 morts, dont 10 retrouvés dans les locaux administratifs et techniques implantés au pied du silo ou à proximité immédiate de ceux-ci, et 1 blessé.

Un rapport relatif à l'expertise de cet accident demandée par le Ministère chargé de l'Environnement a été établi (/4/).

De façon générale, le silo vertical s'est effondré en partie centrale et en partie nord. Sur les 44 cellules, seules 16 semblaient encore en grande partie en place après le sinistre.

L'effondrement des structures a pu être facilité par d'éventuelles fragilités structurelles.

La tour de manutention, ainsi que les cellules immédiatement adjacentes, ont été presque totalement détruites. Des équipements de l'installation, notamment des éléments du circuit centralisé de dépoussiérage, n'ont pas été retrouvés.

La galerie sur cellules a été totalement détruite.

La tour sud semble s'être affaissée sur le sommet des cellules.

Par ailleurs, certaines installations situées à proximité du silo ont été endommagées à des degrés divers, principalement par la chute ou la projection d'éléments du silo.

Des dommages aux habitations, notamment des bris de vitres, ont été recensés jusqu'à une distance de l'ordre de 500 mètres du silo.

Des projectiles significatifs en taille (éléments métalliques, en béton, en verre) ont pu être observés jusqu'à une centaine de mètres du silo.

Les produits contenus dans les cellules détruites se sont étalés jusqu'à une distance égale à environ la hauteur des cellules (soit 40 mètres).

Des incendies et feux couvants ont été constatés au niveau des cellules de stockage juste après l'accident.

Le filtre de dépoussiérage (non fermé), a été incriminé dans le démarrage de l'explosion. L'explosion qui a démarré en haut de la tour de manutention s'est propagée dans la tour, la galerie sur cellules et l'espace sous cellules et probablement dans plusieurs cellules qui étaient ouvertes.

L'accident de Blaye a montré, de façon dramatique, que la présence à proximité immédiate du silo de personnes dont l'activité n'était pas directement liée au silo, aggravait considérablement le bilan de l'accident.

### ***1.3.5. Incendie d'un silo de graines de tournesol à Bassens***

Le 12 mars 1998, le responsable du silo ressent une odeur de brûlé, lors de sa ronde de surveillance, alors qu'il se trouve dans la galerie supérieure. Il constate de la fumée sortant par l'extracteur de poussières d'une des cellules verticales remplie de graines de tournesol et alerte les secours.

Les sapeurs pompiers ont enlevé les graines de tournesol en feu à la surface du stockage. Cette opération était assez périlleuse et le risque d'explosion de poussières n'était pas nul, du fait de dépôts non négligeables sur les fers qui auraient pu former un nuage explosible suite à un choc ou par une agitation quelconque.

Afin de pouvoir tenter une vidange de la cellule par le bas, il a été décidé d'inertier à l'azote le ciel de la cellule puis d'injecter de l'azote par le bas de la cellule.

Des différentes investigations, il ressort que, depuis trois semaines avant l'incendie, une société sous-traitante travaillait dans la galerie au-dessus des cellules. L'intervention comprenait des travaux à feux nus (meulage, soudure, perçage) pour lesquels un permis de feu avait été délivré.

Les perles de meulage ont pu a priori s'infiltrer dans la cellule par un défaut d'étanchéité du joint et tomber sur un dépôt de poussières. Ces perles ont enflammé le dépôt et la combustion s'est propagée le long des poutres (environ 12 mètres en 65 heures). Un dépôt incandescent est tombé de la poutre et a mis le feu à la surface du stockage.

### ***1.3.6. Incendie d'un silo de granulés de luzerne à Saint Ouen l'Aumône***

Le 17 février 1998, un incendie très violent concerne la totalité du volume de luzerne contenu dans une cellule verticale en béton (/17/).

Le risque d'explosion étant important, afin de limiter les risques pour les sapeurs pompiers et l'environnement extérieur, la décision est prise, de traiter l'incendie par une inertisation à l'azote du ciel de silo complétée par la mise en place d'un bouchon de mousse, et une injection d'azote par le bas de la cellule, avant d'en entreprendre la vidange.

Pendant toute l'opération, la composition de l'atmosphère du ciel de la cellule a été contrôlée en permanence par un laboratoire mobile afin d'étudier l'évolution de l'incendie et évaluer le risque d'explosion de gaz.

En fin d'opération, la vidange de la cellule a été particulièrement difficile, puisque la quasi-totalité de la luzerne stockée avait subie une combustion et était prise en masse. Deux petites explosions sans conséquence grave sont survenues pendant les travaux de vidange.

La cause incriminée dans le sinistre, dont le traitement a duré jusqu'au 24 mars 1998, est un auto-échauffement de la luzerne.

### ***1.3.7. Explosion d'un site meunier à Strasbourg***

Le 10 avril 1991, une explosion se produit dans un site meunier à Strasbourg.

Les effets de pression constatés sont importants dans le bâtiment abritant les cellules de stockage farine, son, semoule et dans cinq cellules de stockage.

C'est vraisemblablement dans une de ces cellules au cours de la visite d'un employé que l'explosion a démarré.

L'explosion s'est ensuite propagée dans d'autres parties du site (moulins, bâtiment d'ensachage), avec cependant des effets de pression moindres.

L'accident a détruit une partie des installations du site meunier, et le bilan humain s'établit à un mort et deux blessés.

#### ***1.3.8. Autres accidents***

En 1960, de violentes explosions ont détruit les installations de stockage de la sucrerie de Kopingebrö (Suède). Deux ouvriers ont été tués, un autre blessé. L'hypothèse de l'électricité statique a été retenue dans la cause ayant provoquée l'explosion.

En 1975, une explosion de poussières a eu lieu à Lestrem dans un silo horizontal de stockage de maïs. L'explosion s'est propagée dans une longue galerie souterraine (sur plusieurs centaines de mètres) avant de déboucher dans le silo.

En 1987, un incendie a détruit un silo horizontal de stockage de sucre à Bray-sur-Seine.

#### **I.4. Risques liés aux stockages**

A première vue, le stockage de produits agro-alimentaires, pourrait apparaître comme ne devant pas poser de risques industriels importants (/18/).

Cependant, les informations données par l'accidentologie, montrent clairement que cette branche d'activité peut connaître des accidents industriels graves à la suite d'incendie et d'explosion. Différents aspects des stockages de produits agro-alimentaires concourent à l'origine de ces accidents :

- Les produits manipulés ou stockés contenant du carbone, de l'hydrogène, de l'azote, et de l'oxygène, sont combustibles et par conséquent, sont capables de provoquer des incendies et des explosions et de dégager dans certaines conditions des produits toxiques.
- La manutention des produits agro-alimentaires sous forme de grains, de tourteaux, de pellets crée des quantités de poussières importantes. A titre indicatif, le volume de poussières engendré par le brassage, le stockage et la circulation de grains est estimé à 0,1 % du poids manipulé.

Ces poussières inflammables, lorsqu'elles sont mélangées à l'air dans certaines conditions, forment une atmosphère explosive.

Dans le cas des produits en grains, notamment les céréales, les poussières proviennent principalement du tégument des grains qui se composent de plusieurs couches très minces, friables qui se détachent et se brisent finement lors des diverses manutentions et conditionnement.

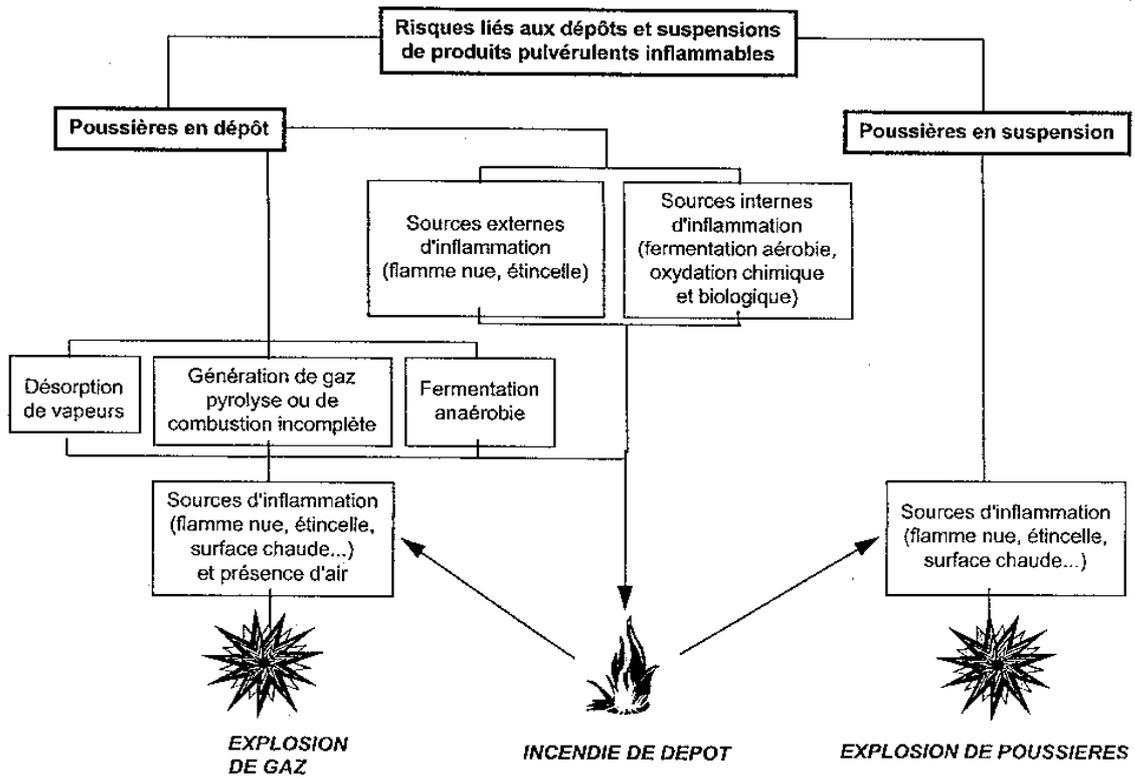
Dans certains cas c'est le produit lui-même, à l'état pulvérulent, comme le sucre, qui est à l'origine des poussières.

- Les produits à fortes teneurs en lipides (graines d'oléagineux) peuvent être le siège d'auto-oxydation et donc d'un auto-échauffement, très exothermique pouvant aller jusqu'à l'incandescence, cause possible d'incendie voire d'explosion. Par ailleurs, lorsque les grains sont humides la fermentation peut conduire à une augmentation notable de la température pouvant aller jusqu'à l'incandescence. Ces réactions peuvent s'accompagner ou non de gaz inflammables, cause possible d'incendie et d'explosion.
- La pulvérisation d'additifs combustibles sur les grains pour la conservation (pesticides) ou le soulèvement des poussières (huiles) peut contribuer à augmenter le risque incendie et explosion (formation d'aérosol, grains plus réactifs).
- En dehors des matières agro-alimentaires elles-mêmes, on trouve la présence, dans les matériels et installations, de gasoil, d'huile, de gaz, de bandes de transporteurs, de câbles électriques, de palettes en bois, de sacs papier, de films plastique, ou dans les bâtiments de bois, de PVC, ou pour des activités annexes aux sites, d'engrais, de produits agro-pharmaceutiques qui peuvent participer dans une large mesure, aux incendies en accroissant les effets thermique et toxique, ou en favorisant la propagation dans certains cas de figure et induire un risque d'explosion supplémentaire.

En résumé, les risques inhérents au stockage et à la manutention de produits agro-alimentaires sont de quatre types :

- Risque d'explosion lorsque les produits pulvérulents en suspension ou des gaz inflammables issus de la fermentation anaérobie sont enflammés par une source d'inflammation.
- Risque d'incendie lorsque la combustion est induite par une source extérieure d'inflammation (étincelle, travail par point chaud, flamme, ...).
- Risque de fermentation aérobie ou anaérobie lorsque les produits stockés (surtout les grains) sont trop humides.
- Risque d'auto-échauffement lorsque les grains ou les poussières sont stockés à des températures trop élevées ou sur des surfaces chaudes.

Ces risques sont illustrés sur la figure 3 ci-après.



**Figure 3 :**  
*Risques liés aux produits agro-alimentaires*

## **II./ CAUSES D'UN INCENDIE OU D'UNE EXPLOSION**

A la température ambiante, la plupart des substances combustibles ont une vitesse de réaction avec l'oxygène de l'air très faible et ne conduisent pas à l'incendie ou à l'explosion.

Généralement, le déclenchement de l'incendie ou de l'explosion, nécessite un apport d'énergie complémentaire.

L'énergie permettant d'obtenir la combustion est apportée par les sources d'inflammation qui proviennent de phénomènes biologiques, physiques, électriques ou mécaniques (/19/, /20/).

Les sources d'inflammations possibles sont indiquées ci-après. Des renseignements complémentaires existent dans la norme EN 1127-1.

### **II.1. Surfaces chaudes**

Si une atmosphère explosive, une couche de poussière ou un solide combustible vient en contact avec une surface chauffée, l'inflammation peut se produire. Il n'y a pas qu'une surface chaude qui puisse agir comme une source d'inflammation, car une couche de poussière ou un solide combustible en contact avec une surface chaude et enflammé par celle-ci peut aussi agir comme une source d'inflammation pour une atmosphère explosive. Les surfaces chaudes peuvent provenir des installations électriques (moteurs, coffrets d'alimentation, câbles), des conduites de chauffage, des paliers de machines, des frottements de pièces l'une sur une autre, ...

Les élévations de température dues à des réactions chimiques doivent aussi être prises en considération.

Il arrive aussi que des dépôts chauds se détachent et se trouvent transportés dans d'autres endroits des installations où ils peuvent donner lieu à des inflammations.

Remarque : un dépôt de poussières sur une surface chaude s'enflammera à une température d'autant plus faible que son épaisseur est importante.

### **II.2. Flammes et gaz chauds (incluant les particules chaudes)**

Les flammes sont associées aux réactions de combustion à des températures supérieures à 1000°C. Des gaz chauds sont obtenus comme produits de réaction et, dans le cas de flammes de particules solides ou de flammes contenant des suies, des particules incandescentes sont aussi produites. Les flammes, leurs produits chauds de réaction et les gaz chauffés à haute température peuvent enflammer une atmosphère explosive, des produits pulvérulents en dépôt, voire des produits combustibles massifs. Les flammes, même de faibles dimensions, sont parmi les sources d'inflammation les plus actives.

Les perles de soudure qui se produisent lors des opérations de soudage ou de découpage sont des étincelles de très large surface et, de ce fait, sont aussi parmi les sources d'inflammation les plus actives.

### **II.3. Étincelles d'origine mécanique**

Par suite des processus de friction, de choc et d'abrasion tels que le broyage, des particules chauffées peuvent se séparer des matériaux solides. Si ces particules se composent de substances oxydables, par exemple le fer ou l'acier, elles peuvent subir un processus d'oxydation et atteignent ainsi des températures plus élevées. Ces particules (étincelles) peuvent enflammer les gaz et vapeurs combustibles et certains mélanges poussières/air (spécialement les mélanges poussières métalliques/air). Dans la poussière en dépôt, un feu couvant peut être déclenché par des étincelles et ceci peut constituer une source d'inflammation d'une atmosphère explosive.

Dans les appareils, l'entrée de matériaux étrangers, par exemple pierres ou morceaux de métal, capables de donner des étincelles, doit être pris en compte.

### **II.4. Matériel électrique**

Dans le cas du matériel électrique, des étincelles électriques et des surfaces chauffées peuvent être produites et constituer des sources d'inflammation. Les étincelles électriques peuvent être produites par exemple :

- lorsque des circuits électriques sont ouverts ou fermés,
- ou par suite de courants vagabonds,
- ou du fait de connexions desserrées.

On fait remarquer explicitement que la très basse tension (TBT par exemple inférieure à 50 V) est conçue pour la protection des personnes contre les chocs électriques et ne constitue pas une mesure visant la protection contre l'explosion. Ainsi, des tensions inférieures à 50 V peuvent encore produire des énergies suffisantes pour enflammer une atmosphère explosive.

Des matériels adaptés sont à choisir en fonction des zones dangereuses définies.

### **II. 5. Courants "vagabonds"**

Les courants "vagabonds" peuvent s'écouler entre systèmes électriquement conducteurs ou parties de ces systèmes :

- sous forme de courants de retour dans les installations de génération de puissance, par exemple à proximité d'installations de soudure importante,
- en raison d'un court-circuit ou d'une mise accidentelle à la terre par suite de défauts dans les installations électriques,
- par suite de l'induction magnétique, par exemple près des installations électriques où existent des courants et des radio fréquences élevées,
- par suite de la foudre.

Si les parties d'un système capable de conduire les courants vagabonds sont déconnectées, connectées ou pontées même dans le cas de faibles différences de potentiel ; une atmosphère explosive peut être enflammée par suite de la formation d'étincelles électriques et / ou d'arcs. De plus, l'inflammation peut aussi se produire par suite du chauffage dû au courant circulant dans le circuit.

## **II.6. Electricité statique**

Dans certaines conditions, des décharges d'électricité statique capables de conduire à des inflammations peuvent se produire. La décharge de parties conductrices isolées et chargées peut facilement conduire à des étincelles capables de donner l'inflammation. Avec des parties chargées de matériaux non-conducteurs, ce qui inclut la plupart des matières plastiques, aussi bien que d'autres matériaux, des décharges sont possibles. De plus, les dépôts de produits granulaires peuvent se charger et conduire à des décharges électrostatiques (/21/).

Le risque est à caractériser au cas par cas en tenant compte de l'énergie minimale d'inflammation des poussières.

Le processus de développement des décharges électrostatiques est le suivant :

- création de charges électriques entre deux surfaces en contact,
- séparation ou accumulation des charges,
- neutralisation des charges à la terre ou ionisation disruptive de l'air en l'absence de liaisons à la masse.

Le niveau de charge électrostatique que peut accumuler un produit pulvérulent dépend de nombreux paramètres, principalement du type de transfert auquel il est soumis, mais aussi de la nature du produit et de sa granulométrie, de la nature des matériaux avec lesquels il est en contact, etc.

Pour illustrer, l'aptitude à la charge en fonction du process, on peut donner les ordres de grandeur suivants (tableau 3).

Opérations	Charges massiques (C/kg)
Tamisage	$10^{-9}$ à $10^{-11}$
Transvasement	$10^{-7}$ à $10^{-9}$
Alimentation par vis	$10^{-6}$ à $10^{-8}$
Broyage	$10^{-6}$ à $10^{-7}$
Micronisation	$10^{-4}$ à $10^{-7}$
Transport pneumatique	$10^{-4}$ à $10^{-6}$

Source : INERIS (séminaire Euroforum 1998).

**Tableau 3:**  
*Production de charges électriques lors d'opérations sur les poussières*

On constate que les charges électrostatiques susceptibles d'être induites lors d'un transport pneumatique sont très importantes (100 000 fois plus élevées que pour le tamisage).

De façon générale, il existe quatre types de décharges, qui sont données ci-dessous par ordre croissant d'énergie dégagée :

- La décharge “ en aigrette ” qui se rapporte à la décharge d'une surface isolante vers un objet conducteur. Elle est hétérogène dans le temps et l'espace et possède généralement un potentiel d'inflammation au maximum de quelques millijoules.
- La décharge “ cône ” qui est une décharge de talus. Elle peut avoir une énergie qui dépend de la taille du silo, de la granulométrie, du débit de remplissage.
- La décharge “ étincelle ” qui correspond à une décharge entre deux conducteurs dont un est isolé, il y a formation d'un canal ou s'écoulent simultanément toutes les charges électrostatiques.
- La décharge glissante de surface qui se produit à la surface de matière isolante mince recouvrant des supports conducteurs mis à la terre.

Pour la décharge “ étincelle ” et la décharge glissante de surface, les énergies libérées dépendent de la configuration du stockage qui détermine la capacité électrique et par conséquent le potentiel d'inflammation. Ceci dit, les énergies pour ces décharges peuvent être très importantes. **Dans une installation de silo, il faut faire particulièrement attention à la décharge cône et à la décharge glissante de surface.**

Des exemples de situations industrielles correspondantes aux différents types de décharge sont fournies ci-après :

- Décharge “ en aigrette ” :
  - décharges de surfaces isolantes chargées par frottement, soit de manière continue (courroie de machine par exemple), soit de manière aléatoire (coffret isolant de matériel électrique),
  - les décharges de surface des liquides isolants (lors du remplissage à vitesse élevée dans un réservoir par exemple) est un cas particulier de décharge en aigrette.
- Décharge “ cône ” :
  - elle se produit lors du remplissage de silos ou de conteneurs de grandes dimensions.

- Décharge “ étincelle ” :
  - pelle mécanique isolée sur une conduite qui devient chargée du fait de l’écoulement d’un liquide dans la conduite,
  - tambour sur une surface isolante qui se charge lors du remplissage d’un produit.
  
- Décharge “ glissante de surface ” :
  - transport pneumatique des poudres à grande vitesse à travers une conduite isolée ou une conduite à revêtement interne isolant,
  - transport à grande vitesse des hydrocarbures liquides à travers une conduite avec revêtement interne isolant,
  - impact continu des particules de poudre sur une surface,
  - remplissage de grands silos.

## **II.7. Foudre**

L'inflammation par la foudre peut survenir de plusieurs manières.

Effets directs : Lorsque la foudre éclate dans un environnement où une atmosphère explosive existe, l'inflammation peut intervenir. De plus, il existe aussi une possibilité d'inflammation due à la température élevée atteinte par les conducteurs de foudre, ou aux étincelles générées par les courants importants qui s'y écoulent.

Effets indirects : Même en l'absence d'impact direct du coup de foudre, les orages peuvent induire des tensions importantes dans les appareils, équipements de protection et composants.

## **II.8. Ondes électromagnétiques**

Des ondes électromagnétiques sont émises à partir de tous les systèmes qui produisent et utilisent des énergies électriques notamment par haute fréquence (émetteurs radio, téléphoniques...)

Toutes les parties conductrices situées dans le champ électromagnétique se comportent comme des antennes réceptrices. Si le champ est suffisamment puissant et si l'antenne a des dimensions suffisantes, ces parties conductrices peuvent entraîner l'inflammation d'atmosphères explosives.

## **II.9. Rayonnement lumineux**

Dans certaines conditions, le rayonnement de sources lumineuses intenses est absorbé si fortement par les particules de poussières, que celles-ci deviennent des sources d'inflammation pour les atmosphères explosives ou pour les dépôts de poussières.

Avec un rayonnement laser, même à grandes distances, l'énergie ou la densité puissance d'un faisceau, même non concentré peut être assez élevée pour conduire à l'inflammation d'atmosphères explosives ou de dépôts de poussières.

Le processus du chauffage se produit principalement quand le faisceau laser atteint la surface d'un corps solide ou quand il est absorbé par les particules de poussières en suspension.

#### **II.10. Rayonnement ionisant**

Le rayonnement ionisant produit, par exemple à partir de tubes de rayons X et des substances radioactives, peut enflammer des atmosphères explosives (spécialement les atmosphères explosives contenant des particules de poussières) du fait de l'absorption d'énergie. De plus, la source radioactive elle-même peut chauffer le milieu en raison d'absorption interne de l'énergie du rayonnement à un niveau tel que la température d'inflammation de l'atmosphère explosive qui l'entoure est dépassée.

Le rayonnement ionisant peut induire une décomposition chimique ou d'autres réactions qui peuvent conduire à la formation de radicaux très réactifs et de composés chimiques instables. Ceci peut entraîner l'inflammation.

#### **II.11. Ultrasons**

Quand des ondes ultrasoniques sont employées, une grande quantité d'énergie émise par l'émetteur électroacoustique est absorbée par les substances solides ou liquides. En conséquence, la substance exposée aux ultrasons s'échauffe de telle sorte que, dans des cas extrêmes, l'inflammation peut se produire.

#### **II.12. Compression adiabatique et onde de choc**

Dans le cas de la compression adiabatique ou quasi adiabatique et en cas d'ondes de choc, on peut obtenir des températures suffisamment élevées pour permettre d'enflammer les atmosphères explosives (et les poussières déposées). L'élévation de température dépend principalement du rapport des pressions et non de la différence de pression.

Dans les réseaux sous pression des compresseurs d'air et dans les enceintes reliées à ces réseaux, des explosions peuvent se produire en raison de l'inflammation par compression des brouillards d'huile de lubrification.

Les ondes de choc sont produites, par exemple, lors de la décharge brutale de gaz sous haute pression dans les réseaux de canalisations. Dans ce processus, les ondes de choc se propagent dans les zones de plus faible pression à une vitesse plus grande que la vitesse du son. Quand elles sont diffractées ou réfléchies par les coudes des canalisations, les rétrécissements, les brides de raccordement, les vannes fermées, etc., de très hautes températures peuvent apparaître.

### **II.13. Auto-échauffement**

Le risque d'auto-échauffement peut exister chaque fois qu'une masse importante de produit peut subir des phénomènes de fermentation et/ou d'oxydation (s'il s'agit d'un combustible) (/22/, /23/). Le phénomène d'oxydation se produira d'autant mieux lorsque le produit est chauffé dans les processus de broyage, séchage, etc...

A température ambiante, la vitesse des réactions d'oxydation est souvent faible, mais d'autres sources de chaleur peuvent jouer le rôle "d'allumette" comme la fermentation aérobie ou anaérobie pour les produits agro-alimentaires, fermentation plus ou moins favorisée par la présence d'un excès d'eau.

Au total, les phénomènes d'auto-échauffements sont relativement compliqués et font intervenir en dehors de l'oxydation et des fermentations, les conditions générales de stockage principalement la taille.

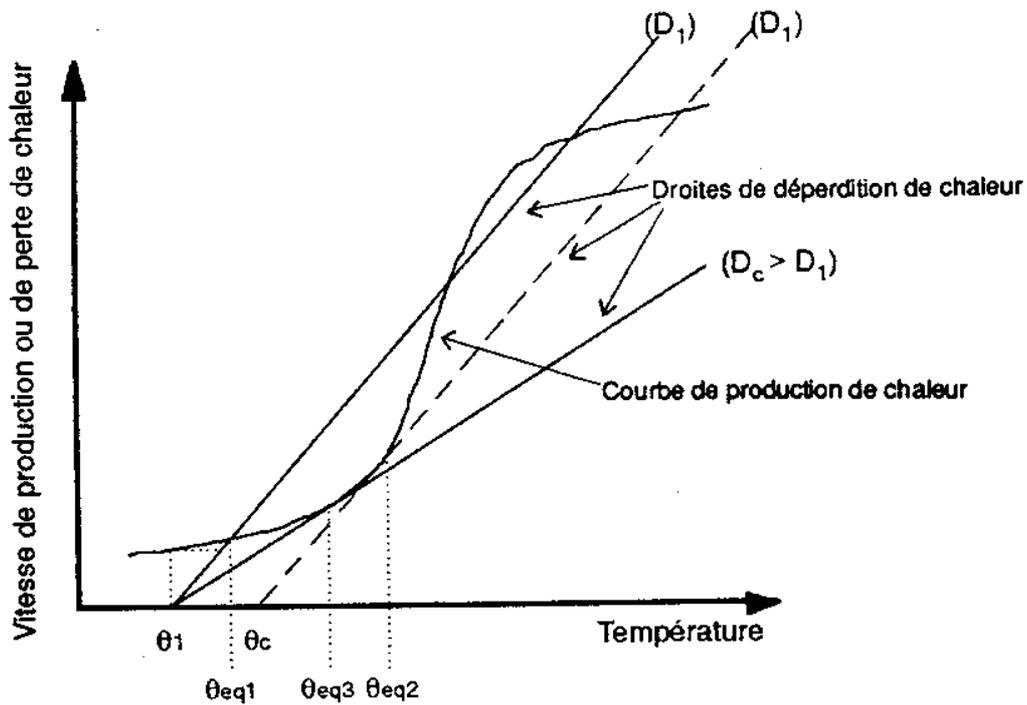
Dans les situations industrielles, si le phénomène n'est pas détecté de façon précoce et que le processus n'est pas arrêté, l'élévation de température du matériau considéré peut être suffisante pour que se produise la décomposition thermique de celui-ci avec dégagement de gaz inflammables qui sont susceptibles de créer alors un danger d'explosion. La température continuant à s'élever, l'inflammation du matériau peut se produire et l'auto-échauffement dégénérer en incendie si l'oxygène est en quantité suffisante.

Les échanges de chaleur à l'intérieur du tas et entre le tas et l'extérieur sont régis par les conditions de stockage.

La température n'augmente à l'intérieur du stockage que si la chaleur produite est supérieure à la chaleur que l'on peut dissiper dans les conditions établies. On définit :

- $T_c$ , la température critique d'auto-inflammation du dépôt ou tas de produit de volume donné, comme la température la plus basse pour laquelle les phénomènes d'auto-échauffement conduisent à une élévation de température conduisant à une inflammation du produit,
- $D$ , la dimension du stockage, comme la distance minimale du centre du stockage à un de ses bords. Par exemple, dans un silo à base circulaire, la dimension du stockage correspond au rayon ; dans un silo à base carrée, la dimension du stockage correspond à la demi-arête,
- $D_c$ , la dimension critique, pour un produit et une température initiale donnée, comme la dimension la plus faible pour laquelle les phénomènes d'auto-échauffement conduisent à une inflammation du produit.

La figure 4 ci-après permet d'expliquer les notions de température et de dimension critique, les équilibres ou déséquilibres thermiques dans un stockage de matériaux pulvérulents et oxydables.



**Figure 4 :**  
*Equilibre thermique dans un stockage de produit  
 pulvérulent et oxydable*

- Si on considère un produit situé dans un stockage de dimension  $D_1$  à une température initiale  $\theta_1$ , en raison de la production de chaleur liée à l'auto-échauffement, sa température augmentera jusqu'à la température  $\theta_{eq1}$  où les échanges thermiques avec l'extérieur équilibrent la production de chaleur ; cet équilibre est stable comme on peut le voir sur la figure 4. Dans ce cas, la réaction d'oxydation exothermique ne s'emballera pas.
- En revanche, pour ce même stockage, on voit très bien que si la température initiale augmente jusqu'à  $\theta_c$ , le point de rencontre entre la courbe de production de chaleur et celle de dissipation correspond à un équilibre instable  $\theta_{eq2}$  : la température du stockage a toutes les chances de monter assez haut avant d'atteindre un hypothétique deuxième point d'équilibre. Le stockage risque alors fortement de subir un emballement de la réaction d'auto-oxydation. La température initiale  $\theta_c$  est donc appelée **température critique d'auto-inflammation** ( $T_c$ ) d'un produit donné ; au-delà de cette température, le matériau s'auto-enflamme.

- Pour une température initiale donnée  $\theta_1$ , on peut également arriver à l'auto-inflammation si l'on change la dimension caractéristique du stockage; En effet, dans ce cas, la pente de la droite de dissipation de chaleur diminue et le point d'équilibre stable  $\theta_{eq1}$  devient  $\theta_{eq3}$  et instable. On définit ainsi la **dimension critique** ( $D_c$ ) d'un stockage pour un produit donné, à une température donnée.

Cette influence du volume s'explique assez simplement si l'on considère que la chaleur générée est proportionnelle au volume et que la chaleur dissipée est proportionnelle à la surface. Quand la dimension du stockage augmente, le volume augmente plus vite que la surface et le bilan thermique se déplace donc dans le sens de l'accumulation de chaleur.

Pour évaluer le risque d'atteindre l'auto-inflammation à la suite d'un dégagement de chaleur due à l'oxydation des pulvérulents, l'INERIS a mis au point une méthodologie qui est décrite ci-après.

Après une caractérisation physico-chimique du produit (granulométrie, analyse élémentaire, ...), le risque d'auto-inflammation est identifié par :

- un examen initial ("screening test") consistant à repérer la composition chimique du produit, à analyser les groupes fonctionnels à risque,
- des tests simples d'inflammation et de combustion permettant une première classification des produits par ordre de risque par application de différentes sources extérieures d'inflammation (flamme, étincelle électrique, fil chaud, ...).

Ensuite, une analyse thermique différentielle (ATD) et une analyse thermogravimétrique (ATG) sont réalisées afin de classer les produits pulvérulents par ordre de risque. On distingue habituellement trois catégories de produits : les moins réactifs, les plus réactifs, et ceux de réactivité moyenne ; selon la valeur de la température d'auto-échauffement déterminée dans l'essai ATD qui caractérise le début de la première réaction exothermique.

Pour la suite de l'examen, selon la réactivité du produit :

- les échantillons les moins réactifs (température d'auto-échauffement  $>$  à  $400^\circ\text{C}$ ), ne subissent pas d'autres essais,
- les échantillons les plus réactifs (température d'auto-échauffement  $<$   $250^\circ\text{C}$ ) subissent l'essai en étuve isotherme,
- les échantillons de réactivité moyenne ( $250^\circ\text{C} <$  température auto-échauffement  $<$   $400^\circ\text{C}$ ) sont soumis aux essais en étuve isotherme si pour le stockage industriel des conditions particulières existent (stockage de grande dimension, produit toxique, ...).

Dans le cadre du présent guide, des essais ATD-ATG ont été faites conjointement à l'INERIS et au VVUU sur huit échantillons de poussières agro-alimentaires (/24/). A titre indicatif, les poussières testées ont pu être classées comme ci-après en fonction de la Température d'Auto-échauffement :

- échantillons les plus réactifs (Température d'Auto-échauffement < 250°C)

poussières de blé  
farine de blé  
poussières d'orge (1 et 2)  
poussières de malt  
poussières de colza

- échantillons de réactivité moyenne (250° C < Température d'Auto-échauffement < 400° C).

poussières de maïs  
farine de maïs

L'essai en étuve isotherme qui est réalisé sur les produits les plus réactifs permet d'établir en laboratoire une relation entre les paramètres température, dimension et forme du dépôt pour des petits volumes. Des modèles mathématiques (F. KAMENETSKII, Thomas) sont utilisés pour extrapoler les résultats de laboratoire (essai en étuve isotherme) aux situations de stockage industriel.

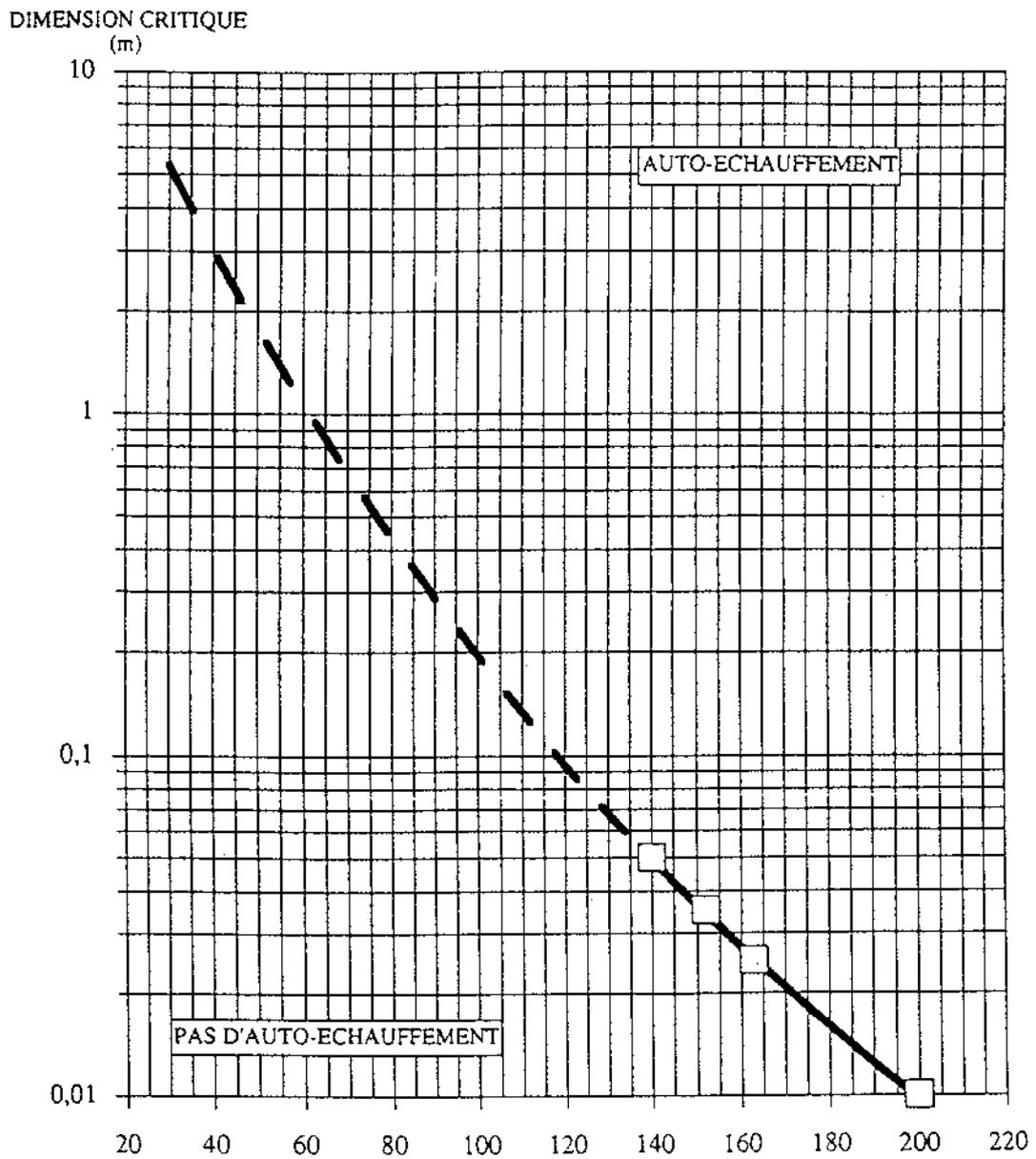
Nous donnons ici à titre d'exemple les courbes d'extrapolation de la dimension critique en fonction de la température obtenue pour plusieurs échantillons de produits agro-alimentaires (luzerne, colza, blé, tournesol, maïs, pois, ...), (figures 5, 6, 7, 8).

Ce type de courbes peut être utilisé par exemple pour connaître le rayon maximal à ne pas dépasser dans une cellule verticale pour le stockage d'un produit à une température d'ensilage donnée, afin de ne pas s'exposer à des incendies de cellules par auto-échauffement.

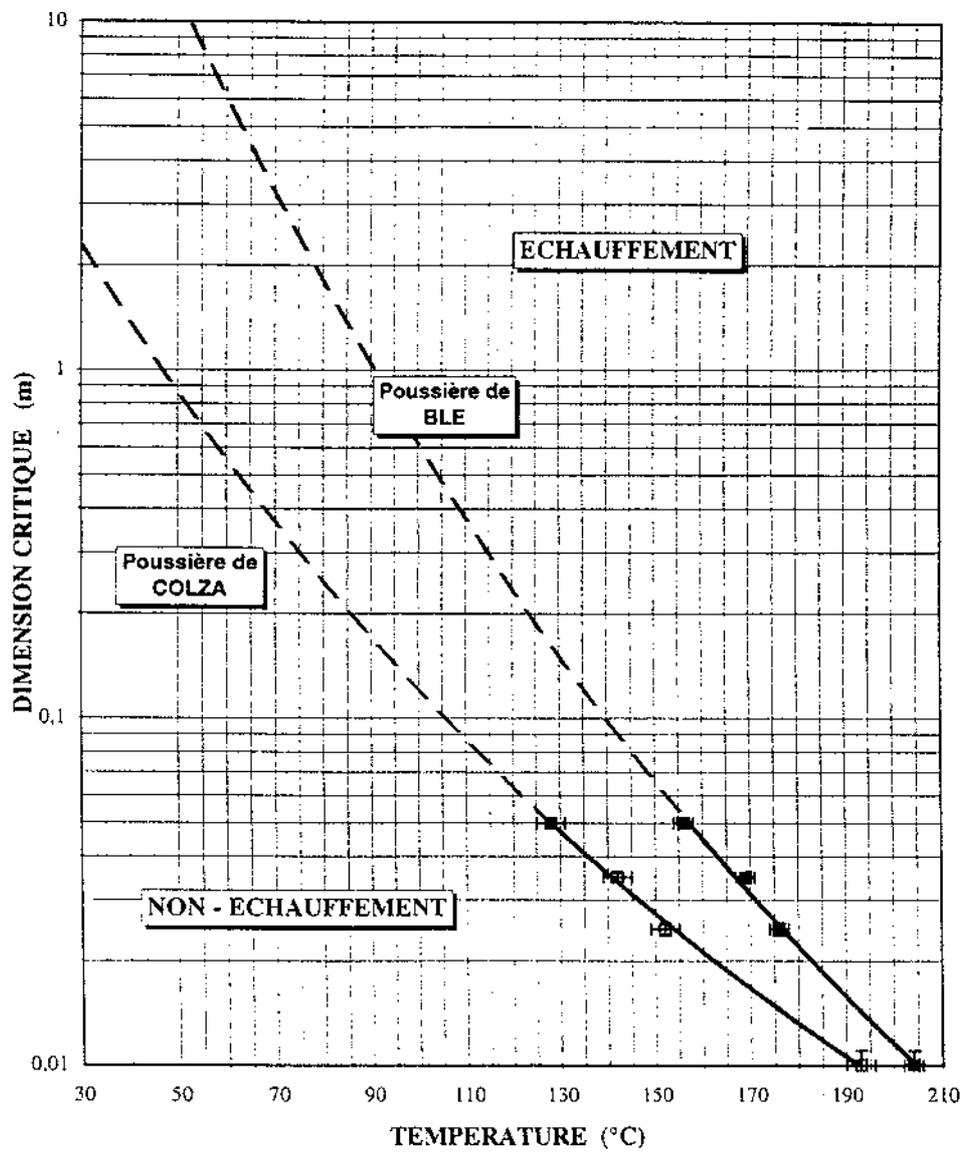
Aux essais précédents, peuvent s'ajouter des essais complémentaires, pour étudier des aspects particuliers, tels que :

- La calorimétrie adiabatique (sans échange de chaleur avec le milieu extérieur) sous air pour déterminer le temps minimum nécessaire pour amorcer l'auto-inflammation.
- Des essais de stockage aérobies ou anaérobies en cuves pour quantifier les effets thermiques et les dégagements gazeux liés à la fermentation, et fixer les conditions d'inertage.

Les essais les plus importants pour caractériser l'auto-échauffement sont décrits plus loin dans la cinquième partie du guide à la page 103 dans le chapitre consacré au Risque Incendie.

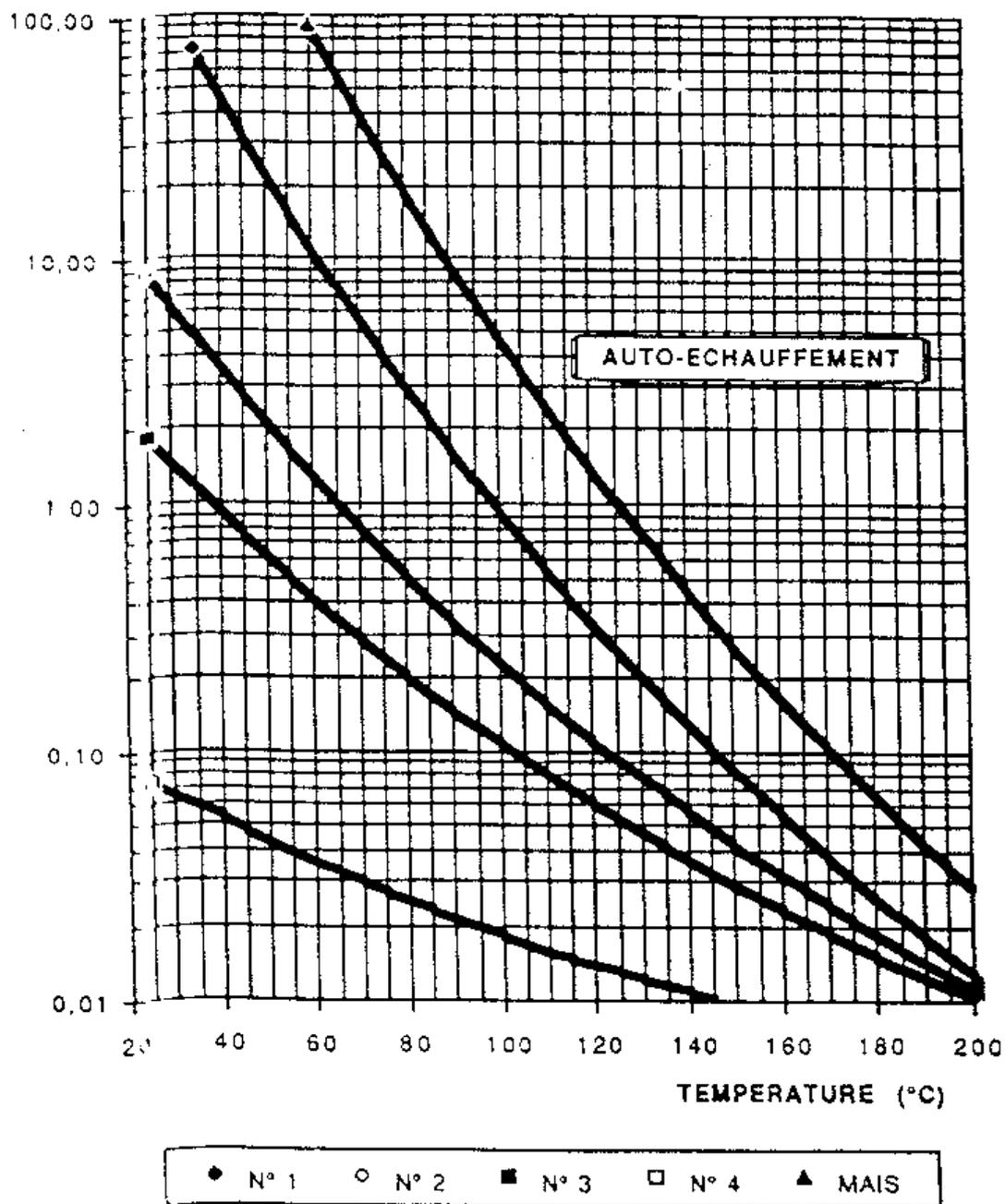


**Figure 5 :**  
*Exemple de la variation de la dimension critique en fonction de la température d'un tas de poussières de luzerne*

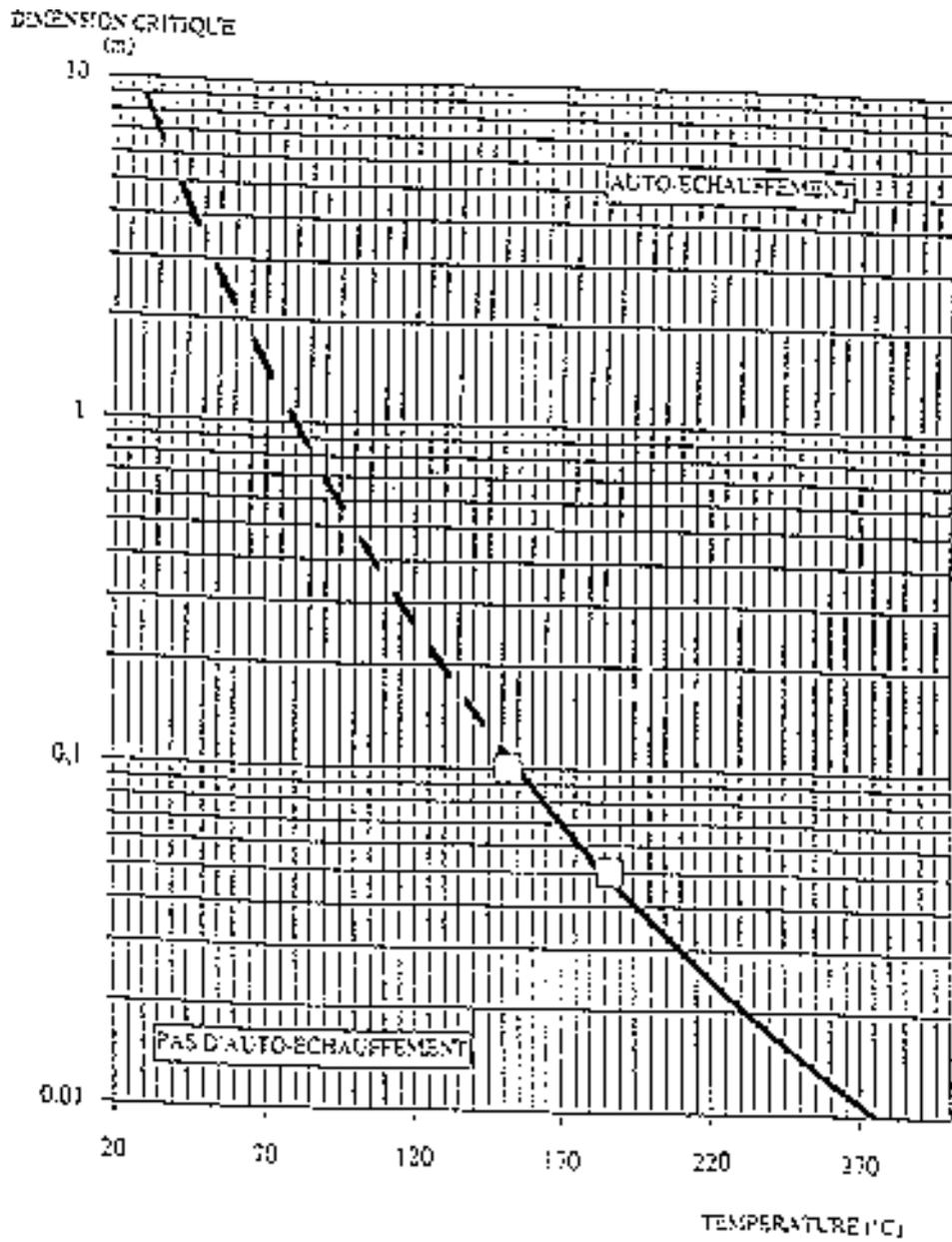


**Figure 6 :**  
*Exemple de la variation de la dimension critique en fonction de la température pour des poussières de blé et de colza*

EPAISSEUR CRITIQUE  
(m)



**Figure 7 :**  
*Exemple de la variation de la dimension critique en fonction de la température pour des graines et poussières de tournesol et des poussières de maïs*



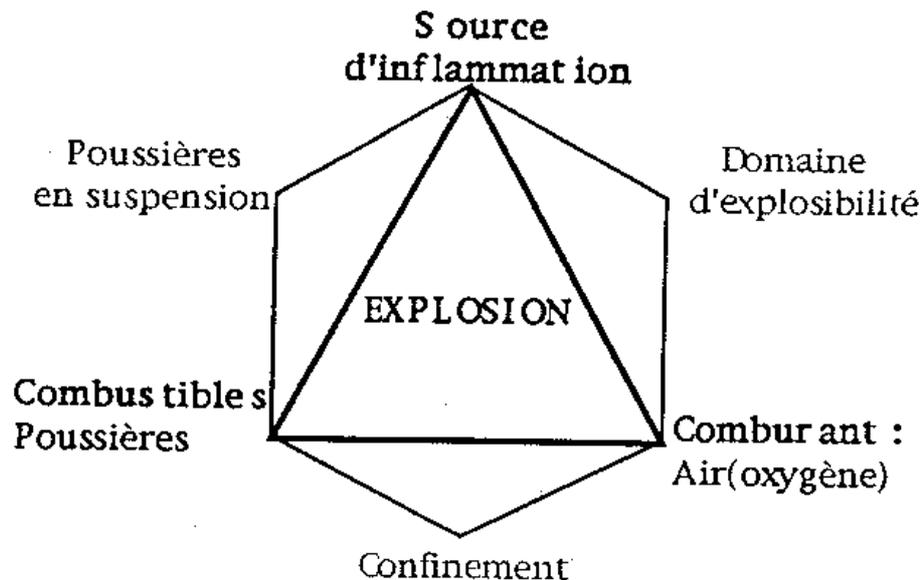
**Figure 8 :**  
*Exemple de la variation de la dimension critique en fonction de la température pour des petits pois*

### III./ RISQUE EXPLOSION

#### III.1. Généralités sur l'explosion

L'explosion est la combustion rapide d'un mélange inflammable gaz, vapeur ou poussières avec l'air dans un espace confiné ou partiellement confiné (/25/, /26/, /27/). Dans les industries agro-alimentaires, les explosions de poussières sont possibles du fait des poussières formées lors de la manipulation ou du transport des produits. Des explosions peuvent aussi être dues aux gaz de pyrolyse formés ou du fait de l'utilisation de liquides ou de gaz combustibles.

L'incendie nécessite la présence, au même moment et en même lieu, d'un combustible, d'un comburant et d'une source d'inflammation (triangle du feu). Trois autres facteurs sont nécessaires pour obtenir l'explosion : le combustible doit être convenablement dispersé, le mélange du combustible et du comburant doit se trouver dans le domaine d'explosivité et un confinement suffisant doit exister. On peut alors parler d'hexagone de l'explosion (figure 9).



**Figure 9 :**  
*Hexagone de l'explosion de poussières*

Il n'y a possibilité d'une explosion de poussières que si un nuage inflammable de poussières existe à l'intérieur d'une installation et qu'une source d'inflammation provoque alors l'inflammation. Les particules autour de la source s'enflamment et servent de source d'inflammation au mélange air-particules adjacent, si bien qu'une zone de combustion -la flamme- se propage de proche en proche dans le nuage en transformant sur son passage le mélange réactif air-particules "froid" (température ambiante) en produits de combustion "chauds" (1 000°C à 2 000°C). Le mélange air-particules qui traverse la flamme subit en conséquence une forte dilatation thermique (volume multiplié par 5 au moins).

Cette "production de volume" est à l'origine de l'augmentation de la pression dans l'espace fermé où se produit l'explosion.

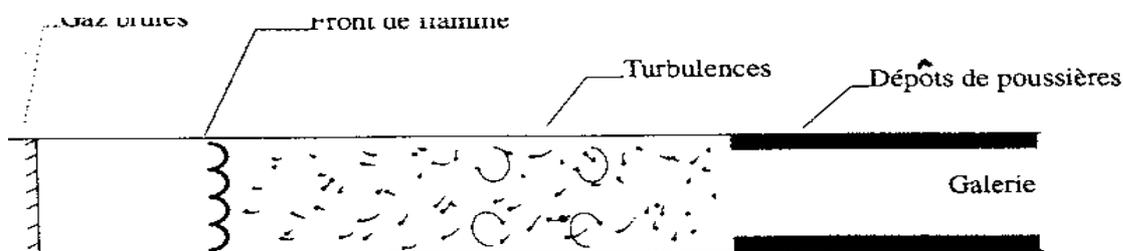
Lorsque l'explosion se produit, les effets de pression induits ne dépendent pas uniquement des propriétés de combustion du mélange réactif (taux de dilatation thermique, vitesse de propagation de la flamme...) mais également de la géométrie de l'installation dans laquelle elle se développe.

Dans les "enceintes" isolées, la vitesse de propagation de la flamme est suffisamment faible ( $< 30$  m/s) pour que la pression interne reste uniforme (dans l'espace). Cette condition est très généralement satisfaite lorsque le rapport entre la plus grande et la plus petite dimension de l'appareil est plus petit que 5 ( $L/D < 5$ ) et que la plus grande dimension est inférieure à 20 m. Dans ce cas, la surpression maximale d'explosion  $P_{\max}$  ne dépend que de la quantité volumique de gaz de combustion produits : elle ne peut pas excéder 12 à 13 bars (enceinte parfaitement close) et dépend exclusivement de la nature du produit pulvérulent (et plus particulièrement de son pouvoir calorifique).

Dans les volumes allongés comme les très hautes cellules, dans les galeries longues et dans les canalisations de transport pneumatique ou de dépoussiérage, le déroulement de l'explosion peut être très violent et conduire à des vitesses de flammes de plusieurs centaines de m/s.

La figure 10 représente le schéma d'une explosion de poussières dans une galerie avec l'inflammation se produisant à l'extrémité fermée de la galerie. Peu de temps après son démarrage, le front de flamme remplit toute la section de la galerie. Ce front de flamme se déplace comme un piston et comprime les gaz présents en amont, en induisant un écoulement de ceux-ci (l'air principalement). Cet écoulement est turbulent et les turbulences augmentent la vitesse de réaction, ce qui induit à son tour une accélération de la flamme. L'écoulement des gaz conduit au soulèvement des poussières déposées ; la flamme se propage ensuite dans ces poussières soulevées. Ce phénomène se reproduit tant que de la poussière déposée peut être ressoulevée et que de l'air est présent : c'est le mécanisme du "coup de poussières".

Les conséquences à l'intérieur d'un appareil ou d'un bâtiment d'une explosion sont l'augmentation de pression et la propagation d'une flamme suite à l'amorçage de la combustion d'un nuage de poussières inflammables. S'ils ne sont pas dimensionnés correctement alors ils se fracturent et des fragments sont formés puis projetés dans l'environnement souvent à grande vitesse. La surpression et la flamme, jusqu'alors confinées à l'intérieur, sont libérées et peuvent produire des effets dans les bâtiments ou les équipements reliés à celui où a été amorcée l'explosion.



**Figure 10 :**  
*Développement d'une explosion de poussières en galerie*

## **III.2. Poussières**

Plusieurs paramètres liés aux poussières et aux process sont déterminants pour l'explosion.

### ***III.2.1 Caractéristiques des poussières***

Pour qu'une explosion de poussières soit possible, il faut que le produit pulvérulent combustible soit à l'état suffisamment divisé (au moins une partie des particules de dimensions inférieures à 0,5 mm). Des essais de laboratoire ont montré que les particules plus grosses que 0,425 mm ne contribuent pas à la pression produite dans l'appareil où est réalisé l'explosion. Généralement les particules de taille inférieure à 0,075 mm participent complètement à l'explosion.

Par ailleurs l'humidité et la composition chimique des poussières (cendres, matières volatiles) ont une incidence sur la violence de l'explosion (cf. tableau 4, page 88).

### ***III.2.2. Formation du nuage***

Un nuage de poussières peut être créé par le processus même de traitement du produit, broyage, séchage en lit fluidisé, par exemple. Il peut l'être aussi par les manutentions qu'il subit : vidange de silos, transport pneumatique, décolmatage de filtres, etc. D'expérience, au bout d'une heure la majorité des poussières se sont redéposées. Il peut aussi être créé par le démarrage de l'explosion elle-même..

La dispersibilité des poussières est difficile à caractériser. Elle est en principe d'autant plus grande que la densité de la poussière est faible. Elle dépend aussi de sa cohésion, celle-ci dépendant de l'humidité et de la forme des particules.

Les poussières fines restent le plus longtemps en suspension : il y a donc là une raison supplémentaire pour qu'elles soient les plus dangereuses.

### ***III.2.3. Turbulences***

Ce sont les fluctuations aléatoires des propriétés d'un fluide (vitesse, température, densité, concentration, etc.) associées à l'existence de tourbillons.

Dans les processus industriels, toute une gamme de conditions de turbulence peut être rencontrée entre les deux conditions extrêmes suivantes : faible turbulence lors du remplissage de silos par alimentation gravitaire et très forte turbulence lors de certaines opérations de broyage.

La turbulence accroît les transferts de chaleur par convection et l'importance de l'agitation et donc les effets de l'explosion. La pression et surtout la vitesse de flamme de l'explosion est d'autant plus élevée que la turbulence est forte.

### **III.3 Comburant**

Le plus généralement c'est l'oxygène de l'air qui intervient comme comburant dans les explosions industrielles.

En-dessous d'une certaine teneur (concentration limite en oxygène) la réaction d'explosion ne peut se faire et ne peut donc donner lieu à une explosion.

Il faut en général descendre en-dessous de 6 à 8 % d'oxygène pour les gaz et en-dessous de 10 % d'oxygène pour les poussières pour empêcher l'explosion de se produire. Cette teneur n'empêche pas la poursuite de l'incendie dans des produits granulaires pulvérulents.

Parfois, pour des produits pulvérulents très réactifs la teneur limite en oxygène pour laquelle l'explosion n'est plus possible peut être de l'ordre de 5 %.

Pour caractériser précisément cette teneur (concentration limite en oxygène), des essais sont nécessaires.

### **III.4. Sources d'inflammation**

L'énergie de la source d'inflammation doit être suffisamment grande pour amorcer l'inflammation de l'atmosphère dangereuse (volume gazeux ou nuage de poussières).

Les types de sources d'inflammation susceptibles de provoquer une explosion sont décrites précédemment (causes d'une explosion et d'un incendie), dans cette partie du guide.

L'aptitude à l'inflammation des poussières dépend de la nature de la poussière, de sa répartition granulométrique, de la concentration et de l'homogénéité du nuage de poussières.

Pour qualifier l'aptitude à l'inflammation par étincelle, on détermine la plus faible valeur de l'énergie de l'étincelle (énergie minimale d'inflammation) permettant d'obtenir une inflammation du nuage de poussières. Avec l'appareil Hartmann, décrit à la figure 11 ci-après, il est courant de trouver des valeurs s'échelonnant de quelques millijoules à plusieurs joules. Mais récemment, certains auteurs ont pu montrer expérimentalement qu'on pouvait trouver des inflammations des nuages de poussières pour des valeurs d'énergie de l'ordre du millijoule, donc assez voisines de celles des gaz.

Les étincelles électrostatiques faiblement énergétiques peuvent donc constituer pour certaines poussières des sources d'inflammation active.

Les caractéristiques de l'étincelle, tension, intensité et surtout durée ont une influence considérable sur l'énergie minimale d'inflammation.

### **III.5. Paramètres d'explosivité**

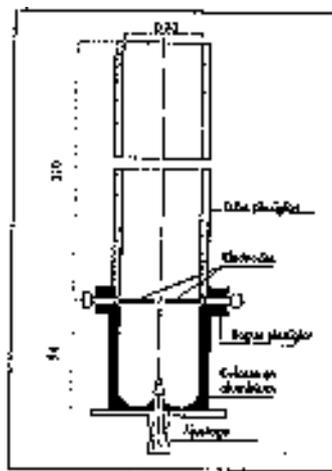
Deux groupes de paramètres permettent de caractériser le risque d'explosion du aux mélanges poussières/air dans les installations industrielles :

- l'énergie minimale d'inflammation (EMI) et certains des paramètres d'inflammabilité, caractérisant le risque incendie,
- les paramètres d'explosivité qui vont être développés ici : Limite Inférieure d'Explosivité (LIE), Pression maximale d'explosion ( $P_{max}$ ), ...

### ***III.5.1. Energie minimale d'inflammation***

C'est la quantité la plus faible d'énergie à appliquer à un combustible pour l'enflammer lorsqu'il est en mélange avec l'air. Nous nous intéressons ici à l'inflammation des atmosphères explosives de gaz, vapeurs et poussières combustibles mélangées avec l'air. L'énergie minimale d'inflammation est souvent caractérisée par l'énergie de l'étincelle d'une décharge capacitive.

L'énergie minimale d'inflammation des nuages de poussières peut être déterminée dans l'inflamateur Hartmann (figure 11). L'énergie est déterminée pour la concentration qui conduit aux valeurs les plus faibles. L'inflammation est réalisée par une étincelle électrique.



**Figure 11 :**  
***Inflamateur à étincelles***

Pour les produits agro-alimentaires, à titre indicatif les énergies minimales d'inflammation les plus faibles mesurées sont d'environ 30 millijoules (amidon de blé, sucre).

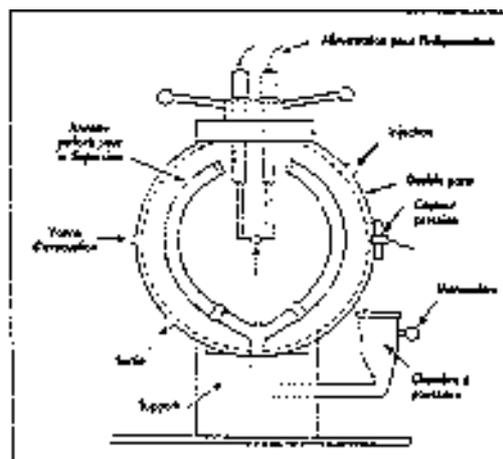
Les énergies minimales d'inflammation des gaz sont nettement plus faibles : 0,28 millijoule pour le méthane par exemple.

### ***III.5.2. Limite inférieure d'explosivité***

C'est la concentration la plus faible en combustible qui est capable de conduire à la propagation d'une flamme dans un nuage homogène poussière/air. Pour les gaz comme pour les poussières, il existe une limite inférieure et une limite supérieure d'explosivité qui sont caractéristiques d'un produit donné. A l'intérieur de ces limites on se trouve dans le domaine d'explosivité. Pour les poussières, seule la limite inférieure d'explosivité est mesurable expérimentalement.

La limite supérieure d'explosivité des nuages de poussières est difficile à déterminer, elle est généralement supérieure à quelques  $\text{kg/m}^3$ . Pour la majorité des poussières agro-alimentaires (grains inférieurs à 0,1 mm) la limite inférieure d'explosivité est de l'ordre de  $50 \text{ g/m}^3$ . Une telle concentration n'existe généralement pas en permanence dans des ateliers industriels ; il serait d'ailleurs impossible de travailler dans de telles conditions. Par contre, dans des appareils, les broyeurs notamment, une telle concentration est souvent dépassée. Il n'en demeure pas moins vrai que, dans de nombreux cas, une concentration dans le domaine d'explosivité n'est obtenue qu'après soulèvement de poussières déposées par l'action de l'onde de pression d'une première explosion qui se déplace en avant de son front de flamme. C'est souvent ainsi qu'on obtient une explosion secondaire.

La limite inférieure d'explosivité est déterminée conformément à la norme CEI 31 H, GT, partie 2.5. Il est admis que les concentrations mesurées avec l'appareil constitué par une sphère de 20 l (figure 12), utilisé pour la mesure de la pression d'explosion et de la vitesse maximale de montée en pression n'ont qu'une valeur essentiellement indicative. Les mesures faites dans une chambre de  $1 \text{ m}^3$  apparaissent plus représentatives. A titre indicatif, la limite inférieure d'explosivité peut varier de  $30 \text{ g/m}^3$  pour un échantillon d'amidon de blé de granulométrie très fine à  $750 \text{ g/m}^3$  pour un échantillon d'avoine et d'orge de granulométrie grossière d'après des résultats d'essais réalisés à l'INERIS.



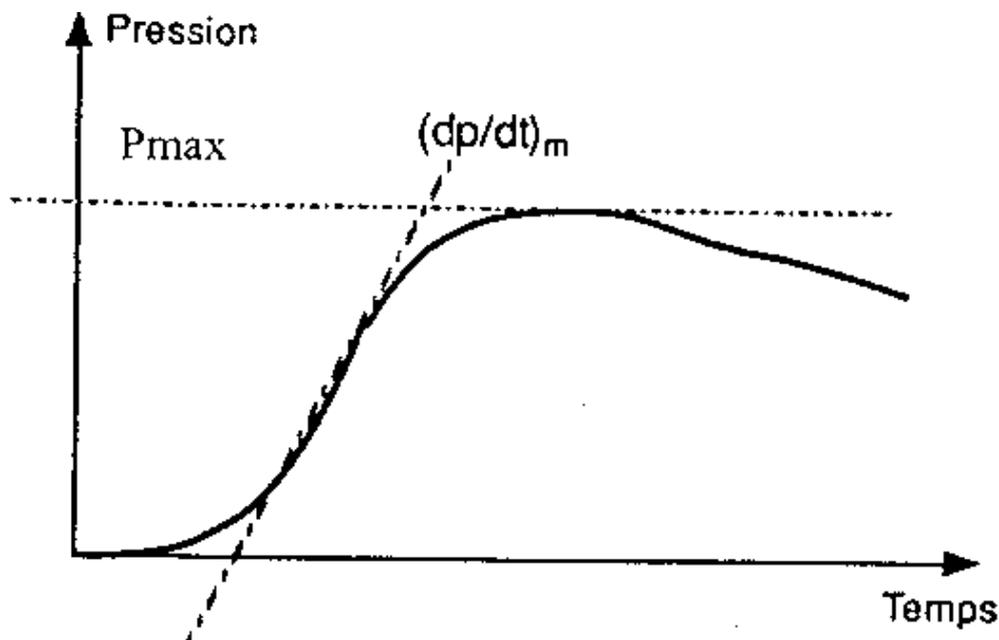
**Figure 12 :**  
*Schéma de la sphère de 20 l*

### **III.5.3. Pression maximale d'explosion**

C'est la valeur maximale de pression obtenue dans un récipient fermé lors de l'explosion d'une atmosphère explosive de composition donnée dans des conditions d'essais spécifiées (figure 13).

La valeur la plus élevée est obtenue pour une concentration donnée.

Cette mesure peut être obtenue à partir d'une mesure dans une chambre de  $1 \text{ m}^3$  "cubique" telle que décrite dans la norme CEN 21184/1.



**Figure 13 :**  
*Courbe d'évolution de la pression d'explosion d'un mélange air/poussière en chambre fermée*

En fait, il est courant que la pression maximale d'explosion  $P_{max}$  soit déterminée à partir d'essais en chambre de 20 l qui permettent d'obtenir la courbe de variation de la pression maximale en fonction de la concentration. Selon le type de poussières agro-alimentaires, la valeur de la pression maximale est variable et peut varier à titre indicatif de 4 à 10 bar.

#### **III.5.4. Vitesse maximale de montée en pression**

C'est la valeur maximale de la montée en pression par unité de temps obtenue dans des conditions d'essais spécifiées lors des explosions de toutes les atmosphères explosives étudiées dans le domaine d'explosivité. Elle caractérise l'explosivité des poussières (violence d'explosion) et permet de dimensionner les mesures de protection contre l'explosion (évent, suppresseur d'explosion).

La vitesse maximale de montée en pression  $(dp/dt)_{max}$  dans un appareil cubique est reliée au volume de l'appareil ( $V$ ) où se déroule l'explosion par une relation de la forme :

$$K = (dp/dt)_{max} V^{0,33}$$

$K$  est une constante qui dépend principalement de la chambre d'essai du produit, et pour un même produit de la nature de la poussière et de son état (granulométrie, humidité).

Pour des turbulences dites "modérées", la constante appelée dans ce cas  $K_{st}$  est déterminée selon EN 26184/1 par des essais en chambre de 1 m<sup>3</sup> "cubique". Pour des questions de commodités, le  $K_{st}$  est souvent déterminé par des essais en chambre de 20 l.

Pour des turbulences dites "fortes", la constante appelée dans ce cas  $K_{maxt}$  est déterminée selon NFU 54-540 par des essais en chambre 1 m<sup>3</sup> "allongée".

Les poussières sont classées selon leur explosivité, et par exemple pour le  $K_{st}$ , il existe trois classes :

$$ST1 = 0 \text{ bar.m.s}^{-1} - < K_{st} < 200 \text{ bar.m.s}^{-1}$$

$$ST2 = 200 \text{ bar.m.s}^{-1} < K_{st} < 300 \text{ bar.m.s}^{-1}$$

$$ST3 = K_{st} > 300 \text{ bar.m.s}^{-1}$$

A titre indicatif, le  $K_{st}$  de poussières agro-alimentaires varie de  $50 \text{ bar.m.s}^{-1}$  à un peu plus de  $200 \text{ bar.m.s}^{-1}$ .

Le tableau 4 qui rassemble des résultats d'essais réalisés en Pologne à la mine expérimentale BARBARA du GIG, sur du maïs et du blé met en évidence en fonction des caractéristiques des poussières (humidité, cendres, granulométrie, matières volatiles), la variabilité des  $K_{st}$ . ( $K_{st}$  variant de 65 à  $150 \text{ bar.m.s}^{-1}$  pour le maïs,  $K_{st}$  variant de 60 à  $100 \text{ bar.m.s}^{-1}$  pour le blé) pouvant exister pour un même produit agro-alimentaire.

N°	Poussières	$K_{st}$ ( $\text{bar.m.s}^{-1}$ )	Matières volatiles %	Cendres (%)	Humidité (%)	$d < 75 \mu\text{m}$ (%)
1	Maïs (A)	110	87,0	10,6	10,6	99,0
2	Maïs (A)	70	82,9	5,9	11,4	46,0
3	Maïs (A)	140	88,5	1,6	11,2	78,0
4	Maïs (A)	65	86,0	2,3	11,9	65,6
5	Maïs (A)	150	87,5	1,5	11,4	87,7
6	Maïs (A)	110	85,2	1,7	11,5	68,0
7	Maïs (A)	90	86,8	1,9	11,5	71,5
8	Blé (A)	60	79,5	22,2	8,2	46,0
9	Blé (A)	70	82,3	20,0	9,1	85,0
10	Blé (P)	75	81,3	7,4	9,0	76,0
11	Blé (P)	75	82,8	5,4	8,2	71,8
12	Blé (P)	100	94,3	6,7	9,2	75,5
13	Blé (P)	75	78,4	6,6	10,3	55,2
14	Blé (P)	80	83,9	8,0	10,1	67,0
15	Soja (A)	60	85,7	42,0	6,8	92,5

(A) poussières d'origine américaine

(P) poussières d'origine polonaise

**Tableau 4 :**  
*Paramètres physiques et valeurs  $K_{st}$  de certaines poussières agricoles  
(essais réalisés au GIG)*

**Tous les paramètres d'explosivité que nous venons de décrire ne concernent que les processus de combustion en enceintes fermées cubiques de volume limité dans lesquelles la combustion se déroule relativement lentement et se propage sans induire d'importants écoulements de gaz.**

### **III.6. Propagation de l'explosion**

Dans le cas de bâtiments connectés notamment par des galeries ou d'appareils connectés par des canalisations, une explosion de poussières va se développer dans une configuration de type "enceintes interconnectées" avec d'importants écoulements de gaz, et donner lieu à des "coups de poussières" si des dépôts de poussières existent.

#### ***III.6.1. Essais en galerie***

Des essais réalisés en galerie à la mine expérimentale de "BARBARA" du GIG en Pologne, donnent des indications pour de telles explosions sur les conditions de développement (dépôts de poussières) et les violences obtenues (/28/).

##### **Concentration limite de poussières**

Au GIG en Pologne, de la poussière de blé a été déposée de façon homogène sur le sol d'une galerie de longueur 200 m et de section 2,5 m<sup>2</sup>, fermée à une extrémité et ouverte à l'autre. Une explosion primaire (mélange air/méthane) a été provoquée à l'extrémité fermée de la galerie, et la propagation de l'explosion de poussières dans la galerie a été observée.

Les résultats de ces essais donnés à titre indicatif ont été les suivants :

- avec une explosion primaire représentant un amorçage par source déjà violente (inflammation d'un mélange stoechiométrique de méthane et d'air), la concentration en poussières permettant la propagation de l'explosion a été de 75 g/m<sup>3</sup> de volume de galerie,
- avec une explosion primaire plus violente (mélange air/méthane précédent renforcé par un dépôt de poussière) la propagation a été obtenue pour des concentrations proches de 50 g/m<sup>3</sup>. En situation industrielle, on peut préciser que dans des conditions très défavorables cette concentration limite peut être encore plus faible,
- la propagation de l'explosion n'a pas été modifiée lorsque l'on a pratiqué une interruption de 10 mètres dans le dépôt de poussières agro-alimentaires réalisé sur le sol de la galerie d'essai. Une explosion de poussières dans une galerie, est donc capable de traverser sans s'affaiblir une zone non empoussiérée.

### Dynamique des explosions en galerie

Au GIG en Pologne, l'examen de la violence d'explosion de poussières agro-alimentaires a été fait dans une galerie souterraine de 400 m de longueur et 7,5 m<sup>2</sup> de section fermée à une extrémité et ouverte à l'autre. Pour obtenir le développement de l'explosion, une zone empoussiérée de 200 m a été réalisée. L'explosion primaire (source d'inflammation) a été réalisée par la combustion d'un volume de 25 m<sup>3</sup> de mélange stoechiométrique méthane/air placé près de l'extrémité fermée de la galerie.

Quelques explosions de poussières de maïs ont été réalisées aux concentrations nominales en poussières de 100, 150 et 200 g/m<sup>3</sup> de volume de galerie. Les vitesses moyennes de flamme  $V_f$  et les pressions statiques  $P_{stat}$  obtenues données à titre indicatif, sont présentées dans le tableau 5.

$\Delta L$	$C_n = 100 \text{ g/m}^3$		$C_n = 150 \text{ g/m}^3$		$C_n = 200 \text{ g/m}^3$		$C_n = 200 \text{ g/m}^3^*$	
	$P_{stat}$ (bar)	$V_f$ (m/s)	$P_{stat}$ (bar)	$V_f$ (m/s)	$P_{stat}$ (bar)	$V_f$ (m/s)	$P_{stat}$ (bar)	$V_f$ (m/s)
40	0,60	165	1,00	125	2,65	170	5,80	280
80	0,25	110	1,75	135	3,10	220	4,80	255
120	0,50	100	2,20	210	4,00	450	7,10	670
160	0,50	80	2,50	255	5,40	500	--	830
200	0,50	70	4,00	330	5,60	670	>15,00	2000

\* Dans ces cas, la galerie était plus sèche que dans les essais précédents

**Tableau 5 :**

*Pression statique maximale d'explosion et vitesse de flamme en galerie souterraine à différentes distances  $\Delta L$  du point d'inflammation,  
 $C_n$  : concentration nominale en poussières de maïs (en g/m<sup>3</sup> de galerie)*

On voit à l'examen des résultats obtenus dans ces essais que la violence de l'explosion caractérisée par la vitesse moyenne de flamme  $V_f$  s'accroît avec l'augmentation de la concentration du dépôt de poussières.

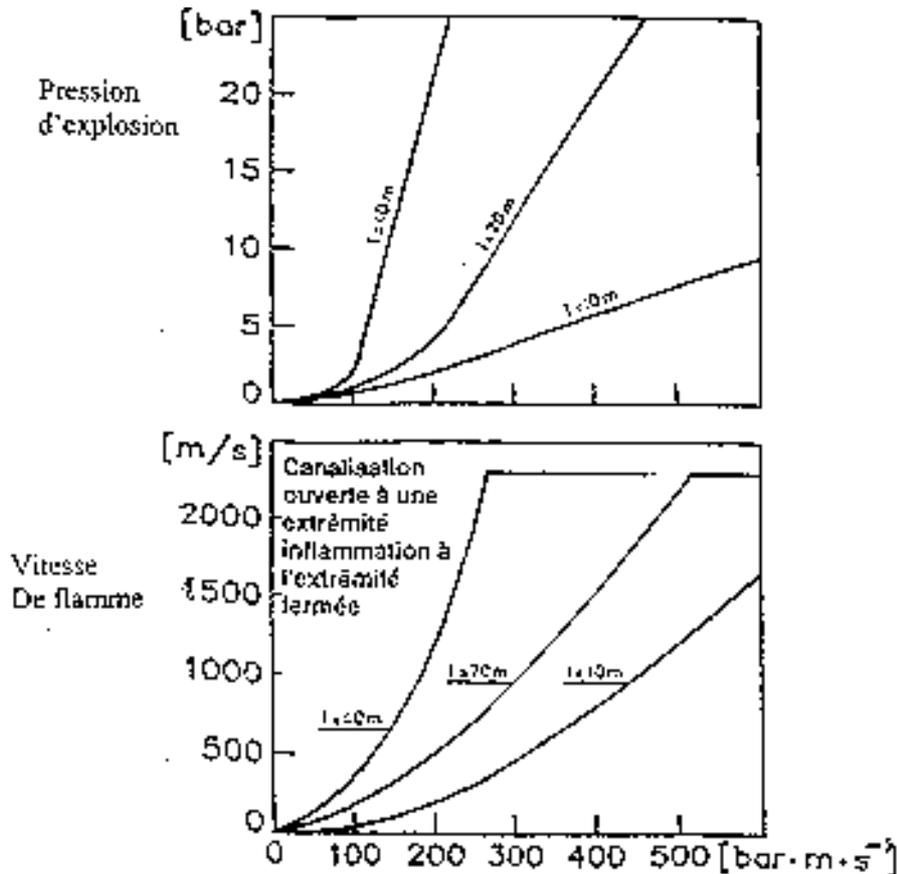
**Dans les galeries on constate donc que, dans les cas les plus défavorables (concentration de 200 g/m<sup>3</sup>, poussières sèches), la flamme de l'explosion peut s'accélérer et l'explosion peut devenir particulièrement violente avec des vitesses de flammes dépassant 1 000 m/s et des pics de pressions supérieurs à 10 bar et atteindre dans des conditions très particulières un régime de quasi-détonation.**

### III.6.2. Essais en canalisation

Le développement des explosions de poussières en canalisation a été étudié notamment en Allemagne et en France (/29/).

Des essais d'explosion de poussières en canalisation ont été réalisés avec plusieurs diamètres de tuyauteries, pour examiner l'influence de la longueur de la canalisation sur la relation des caractéristiques de l'explosion (pression, vitesse de flamme) avec le  $K_{ST}$  des poussières (mesure en chambre fermé cubique).

Les résultats obtenus dans ces essais pour une canalisation de  $\varnothing$  400 mm sont donnés par les courbes présentées à la figure 14.



**Figure 14 :**  
*Caractéristiques de l'explosion en canalisation DN 400  
(essais allemands)*

Dans les canalisations on constate donc, qu'avec un produit de  $K_{St}$  200  $bar.m.s^{-1}$ , la pression d'explosion et la vitesse de flamme peuvent atteindre respectivement 20 bar et 1 000 m/s, lorsque la longueur atteint 40 m.

### **III.7. Conséquences d'une explosion**

#### ***III.7.1.Effets dynamiques***

Les effets dynamiques résultent de la surpression produite.

Ils peuvent engendrer :

- des dommages corporels aux hommes.
- la destruction d'installations et la projection de projectiles pour les structures,

#### **Effets sur l'homme**

Le tableau 6 indique les risques encourus par les personnes soumises à la surpression d'une explosion.

Surpression appliquée (mbar)	Nature des dégâts
Jusqu'à 70 mbar	Risques minimales
de 150 à 200 mbar	Renversement des personnes
350 mbar	Rupture des tympanes
1 000 mbar	Lésions aux poumons

(Source : INRS /13/)

#### **Tableau 6 :**

*Domages dus à la surpression pour les personnes*

Ces risques proviennent de trois effets :

. L'effet primaire résulte de l'action directe de l'onde de pression sur le corps humain.

La plus grande partie de l'onde de pression est absorbée par l'organisme dans lequel elle se propage, et s'amortit en raison de l'hétérogénéité du corps en provoquant des lésions anatomiques.

Ces lésions se traduisent notamment par des éclatements des organes creux (contenant des gaz : oreille, poumon, estomac, ...) dus à la détente des gaz succédant à leur compression brutale.

La rupture des tympanes peut se produire pour des surpressions voisines de 400 mbar. Des lésions des poumons sont à craindre dès 1 bar.

. L'effet secondaire résulte de l'impact sur le corps humain des projections d'objets ou fragments d'objets générées par l'explosion.

L'effet dépend de l'énergie du projectile d'impact.

Les éclats et projections peuvent perforer l'organisme ou occasionner des traumatismes en l'absence de perforation.

. L'effet tertiaire résulte du heurt du corps humain propulsé sur un obstacle. Tout comme les objets situés dans le voisinage du siège de l'explosion, le corps humain peut être soulevé et propulsé. Une surpression de 150 à 200 mbar est suffisante pour propulser un homme de corpulence moyenne.

Les seuils critiques présentés ci-dessous sont pris en référence dans les études de dangers.

Seuil critique correspondant à l'apparition de la létalité - Z.E.L. (1) -	140 mbar
Seuil critique correspondant à l'apparition des effets irréversibles - Z.E.L. (2) -	50 mbar

(1) Zone d'effets létaux

(2) Zone d'effets irréversibles

### **Effets sur les structures**

Le tableau 7 donne les types de dégâts que l'on rencontre en fonction de la surpression moyenne appliquée.

Surpression moyenne Appliquée (mbar)	Type de dégâts
20 mbar	bris de vitres
100 mbar	bris de panneaux genre Eternit
200 mbar	fissuration de murs de parpaings de 25 cm d'épaisseur
500 mbar	écroulement de murs de briques de 25 cm d'épaisseur
700 mbar	destruction probablement totale de bâtiments

(Source : INRS /13/)

**Tableau 7 :**  
*Domages dus à la surpression sur les structures*

L'examen du tableau montre :

- qu'une surpression de l'ordre de quelques dizaines de mbar est susceptible de briser et de projeter les vitrages,
- qu'une surpression de l'ordre de 100 mbar disloque les structures légères (panneaux genre Eternit),
- qu'une surpression de 200 à 500 mbar endommage fortement les structures en briques ou en parpaings,
- que vers 700 mbar la plupart des constructions classiques s'effondrent,

Par ailleurs, le retournement de wagons chargés est susceptible de se produire pour une surpression de 350 mbar.

De plus, la destruction totale ou partielle des structures par le souffle de l'explosion s'accompagne en général de projection d'objets ou fragments d'objet.

Dans le cas des explosions de poussières, la dimension des projectiles varie essentiellement selon la nature des matériaux constituant la structure impliquée.

La distance à laquelle l'objet peut être projeté est variable suivant l'énergie appliquée et la masse de l'objet.

Comme l'ont montré certains accidents industriels, dans le cas d'explosions très violentes se déroulant à l'intérieur de structures très résistantes, des distances de plusieurs centaines de mètres peuvent être atteintes par des fragments lourds de béton (cas des accidents de Boiry et de Blaye).

Les conséquences pour l'environnement des effets liés aux projections de débris doivent être étudiées au cas par cas en fonction des nécessités résultantes de la configuration du site industriel et de son imbrication dans l'environnement.

### ***III.7.2. Autres effets***

Le flux thermique intense dégagé par une explosion de poussières malgré une vitesse de propagation de la flamme élevée et donc un temps d'exposition réduit, est susceptible d'entraîner dans la plupart des cas la mort des personnes exposées.

Une explosion de poussières, s'accompagne d'une production de monoxyde de carbone (CO).

## **IV./ RISQUE INCENDIE**

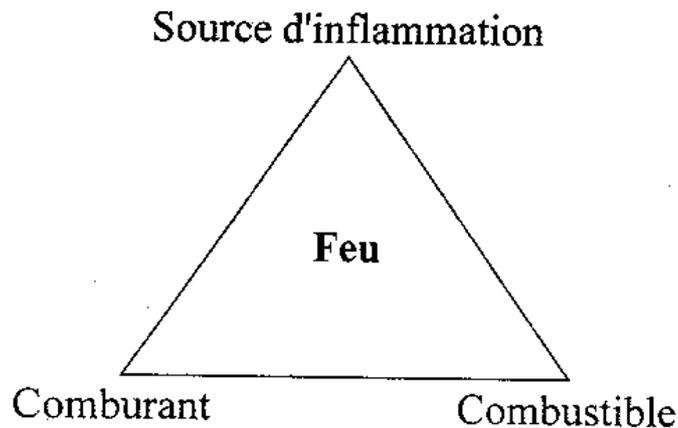
### **IV.1. Généralités sur l'incendie**

La norme X65-020 définit un incendie comme un feu dont on n'a pas ou plus le contrôle. Successivement vont donc être abordé les conditions de démarrage d'un feu et sa propagation, puis les phases de développement d'un incendie (/30/).

Le feu est une réaction de combustion qui se développe sans contrôle dans le temps et dans l'espace. Un feu peut se produire si diverses conditions concernant les substances sont remplies et, qu'en même temps, une source d'énergie suffisante, appelée source d'inflammation est présente.

Le système à prendre en considération comprend un combustible, un comburant (généralement l'oxygène de l'air), des gaz inertes (et diverses autres substances) qui peuvent influencer la combustion. Ces substances peuvent dégager ou absorber de la chaleur.

Les conditions de la réaction de combustion sont rassemblées dans le triangle du feu (figure 15).



**Figure 15 :**  
*Triangle du feu*

Les trois éléments symbolisés par le triangle du feu, doivent être réunis pour qu'un feu se déclenche.

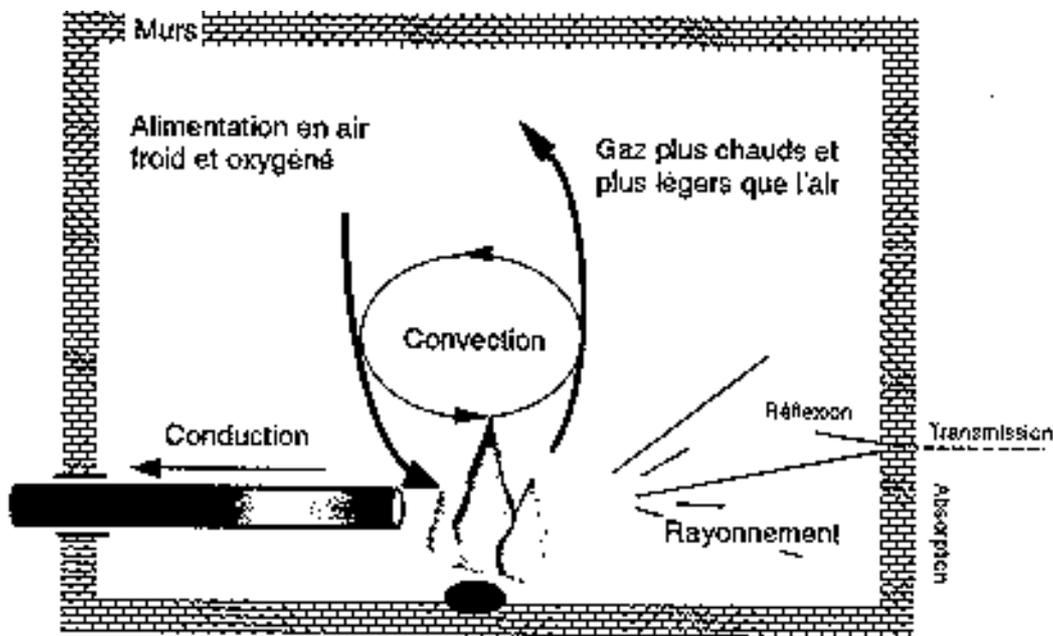
Les processus suivants se produisent au cours du déroulement du feu :

- changements physiques de la substance (fusion, évaporation, chauffage et séchage),
- émission des produits de combustion chauds et de rayonnement thermique,
- transformation chimique de la substance (pyrolyse, gazéification),

- oxydation partielle ou totale du combustible,
- entraînement d'air dans la zone de combustion.

Trois types de transfert thermique (convection, conduction et rayonnement), contribuent à la propagation d'un feu (figure 16) :

- le rayonnement : il s'agit d'un transfert énergétique sous forme d'ondes infrarouge notamment,
- la convection : elle permet les échanges de chaleur par brassage de l'air ; ce phénomène est également à l'origine de l'alimentation permanente en oxygène,
- la conduction : l'énergie calorifique se propage au sein d'un solide ou par contact entre deux solides. La quantité transférée dépend du temps de contact, du gradient de température, de la surface de contact et de la conductivité thermique.



*Figure 16 :  
Propagation de la chaleur lors d'un incendie*

### *Propagation de la chaleur lors d'un incendie*

C'est la convection et le rayonnement qui sont prédominants. Lors de la combustion d'une nappe de liquide inflammable, le transfert de chaleur de la flamme s'effectue essentiellement par rayonnement. Par contre, pour les feux de solides et de matériaux de construction, 75 % de l'énergie vient de la convection et 25 % du rayonnement. Le transfert de chaleur dans les solides et liquides combustibles (et à l'exception des métaux) se produit très lentement en raison de la faible conductivité de la plupart des combustibles.

La propagation du feu peut se faire aussi :

- par projection de matières combustibles enflammées après éboulement, explosion, flammèches portées par le vent, étincelles, etc.,
- par écoulement accidentel de liquide inflammable sur le sol ou par des caniveaux, des égouts, etc.,
- par rupture accidentelle de canalisations de liquides ou de gaz combustibles.

Afin d'éviter la propagation, on peut utiliser différents moyens de compartimentage.

Lorsqu'on n'a pas ou plus le contrôle d'un feu, il va dégénérer en un incendie.

Trois phases principales peuvent être distinguées dans l'évolution d'un incendie :

- allumage ou inflammation : L'étendue du feu dépend alors de la charge à brûler, du volume, de la forme ainsi que des phénomènes de surface. Si l'on veut éviter une destruction, c'est lors de cette phase qu'il faut agir. C'est une phase de chauffage où la température reste basse ( $< 300^{\circ}\text{C}$ ),
- embrasement généralisé ou combustion vive : Le feu est alors contrôlé par l'apport de comburant, c'est-à-dire l'oxygène de l'air. La destruction des bâtiments se produit dans cette phase, les pompiers doivent surtout limiter l'extension de l'incendie. La température monte de  $300\text{-}500^{\circ}\text{C}$  à  $1\ 000^{\circ}\text{C}$  en quelques minutes, les risques d'effondrement sont donc importants,
- refroidissement : Ce dernier est global, mais l'échauffement des éléments de construction est encore possible et les risques d'effondrement persistent (phénomènes de dilatation ou de contraction).

La durée des phases et les températures atteintes dépendent des propriétés du combustible, de sa répartition dans la flamme de l'incendie et des conditions ambiantes telles que l'apport d'air.

Il faut souvent un certain temps (période d'induction) pour obtenir l'incendie. C'est pendant cette période d'induction qu'il est possible de détecter précocement l'incendie par des détecteurs de fumées ou de gaz formés.

Pour un incendie à l'intérieur d'un bâtiment, les conditions de ventilation jouent un rôle important, d'une part dans l'arrivée de comburant (oxygène de l'air) et d'autre part, pour les pertes de chaleur par convection et rayonnement.

L'évolution d'un incendie est donc difficile à prévoir, et nécessite une analyse pour chaque cas particulier. Cette analyse doit prendre en compte également la configuration des installations qui peut favoriser la propagation de l'incendie dans un site industriel.

Les combustibles peuvent être naturels ou fabriqués, mais le terme combustible ne correspond pas à une classification chimique.

Dans la suite, seuls les cas des bandes transporteuses et la combustion des produits agro-alimentaires sont traités en détail.

#### **IV.2. Les combustibles**

Dans l'industrie agro-alimentaire, les incendies peuvent concerner les matières premières ou les produits dans / ou constituant les bâtiments.

Les combustibles peuvent être soit des solides (produits agro-alimentaires, bois...), des liquides (huiles, gasoil, pesticides, ...), des gaz (gaz de soudage, de chauffage, ...).

Pour qu'une combustion de gaz puisse avoir lieu, il faut que le mélange gaz-comburant soit dans des proportions adéquates (compris entre la limite inférieure d'inflammabilité (LII) et la limite supérieure d'inflammabilité (LSI) pour les mélanges gaz-air).

Lorsque la combustion présente les caractères de l'explosion, on parlera de limites inférieures et supérieures d'explosivité (LIE et LSE).

Un liquide inflammable est un liquide dont les vapeurs dans certaines conditions sont inflammables. Pour chaque liquide, cette condition correspond à la température à partir de laquelle les vapeurs peuvent être enflammées par une source d'énergie (point éclair).

La combustion des solides ne répond pas à des lois aussi précises que celles des gaz ou des liquides.

Les matériaux tels que le bois et autres matériaux cellulosiques émettent des gaz inflammables et le processus de combustion se rapproche de celui des liquides.

Certains matériaux brûlent en formant des braises, sans gros apport d'oxygène. Cela donne lieu à des feux couvants qui posent de gros problèmes d'extinction.

Enfin, d'autres matériaux peuvent donner lieu à des combustions spontanées par des phénomènes d'auto-échauffements.

Nous rappelons que la norme AFNOR NF EN 2 introduit un système normalisé de classification des feux en fonction de la nature du combustible comme suit :

**classe A** : feux de matériaux solides généralement de nature organique produisant des braises et des flammes,

**classe B** : feux de liquides ou de solides liquéfiables produisant uniquement des flammes,

**classe C** : feux de gaz,

**classe D** : feux de métaux.

### **IV.3. Comburant**

Dans l'agriculture et les industries alimentaires, on ne rencontre généralement que l'oxygène dans l'air.

L'inflammabilité, la vitesse de combustion, la température obtenue au cours de l'incendie et toutes les autres caractéristiques de sécurité liées à l'incendie dépendent fortement de la concentration en oxygène. Généralement, ces caractéristiques sont mesurées à la concentration de l'oxygène dans l'air (20,94 % en volume).

Ces caractéristiques varient de manière importante à d'autres concentrations. Lorsqu'on réduit la teneur en oxygène, il est possible d'arrêter la combustion. Beaucoup de combustibles condensés ne peuvent plus brûler en-dessous de 17 % d'oxygène en volume d'air. Pour les atmosphères explosives dans l'air, il faut abaisser nettement plus la concentration (pour l'hydrogène, il faut descendre à 5 % en volume). Par ailleurs, un feu couvant ou une incandescence avec combustion, peut aussi se poursuivre avec des teneurs en oxygène de l'ordre de 5 %.

### **IV.4. Sources d'inflammation**

Pour l'incendie, on retrouve les mêmes sources d'inflammation que pour l'explosion qui sont décrites dans la cinquième partie du guide (causes des incendies et des explosions).

### **IV.5. Caractéristiques d'inflammabilité**

Les caractéristiques de sécurité incendie permettent l'appréciation quantitative des combustibles en ce qui concerne le phénomène dangereux d'un incendie.

Les caractéristiques physiques et chimiques sont largement influencées par les conditions de réalisation des essais (rôle de la convection notamment). Il est donc possible d'obtenir des caractéristiques reproductibles que dans des conditions d'essais spécifiées.

Nous ne fournissons ici que la liste des essais permettant d'identifier si des produits agro-alimentaires ou des produits combustibles, autres que ceux constituant les bâtiments présents dans un silo, permettent de conduire à un incendie plus ou moins violent.

Les caractéristiques les plus importantes concernant la sécurité incendie sont :

#### ***IV.5.1. Combustibilité***

Elle caractérise la capacité de combustibles à réagir avec un comburant (principalement l'oxygène de l'air) avec développement de chaleur et de lumière.

Pour les produits granulaires, on peut notamment utiliser des méthodes permettant de caractériser la propagation de la combustion dans un tas de dimensions données, enflammé par une source d'inflammation comme celle de la norme VDI 2263.

Pour les liquides inflammables, il est important de connaître la vitesse de régression de la surface de la nappe de liquide ce qui permettra de déterminer l'importance de la puissance calorifique produite. Des modèles permettent de déterminer ces grandeurs.

Dans tous ces cas, il est indispensable de connaître les puissances calorifiques de feux pleinement développés.

#### ***IV.5.2. Point d'éclair***

C'est la plus faible température à laquelle il faut porter un liquide pour qu'une quantité suffisante de vapeurs soit émise par un liquide dans des conditions spécifiées d'essais pour obtenir une inflammation lorsqu'on applique une source d'inflammation.

Le point d'éclair n'est valable que pour les liquides inflammables (hydrocarbures, solvants organiques).

La classification des liquides combustibles en fonction de leurs points d'éclair, varie selon les réglementations :

- le Code du travail : classement des substances et préparation dangereuses (Ministère du Travail),
  - . extrêmement inflammables : point éclair  $< 0^{\circ}\text{C}$ ,
  - . facilement inflammables : point éclair  $< 21^{\circ}\text{C}$ ,
  - . inflammables :  $21^{\circ}\text{C} \leq$  point éclair,  $\leq 55^{\circ}\text{C}$ ,
- la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement-nomenclature (Ministère chargé de l'Environnement),
  - . extrêmement inflammables : point éclair  $< 0^{\circ}\text{C}$ ,
  - . inflammables de première catégorie : point éclair  $< 55^{\circ}\text{C}$ ,
  - . inflammables de deuxième catégorie :  $55^{\circ}\text{C} \leq$  point éclair  $< 100^{\circ}\text{C}$  (sauf fioul lourd),
  - . peu inflammables : fiouls lourds,
- les règles d'aménagement et d'exploitation des dépôts d'hydrocarbures, classement des hydrocarbures (Ministère de l'Industrie),
  - . catégorie A : hydrocarbures liquéfiés,
  - . catégorie B : hydrocarbures liquides - point éclair  $< 55^{\circ}\text{C}$ ,
  - . catégorie C : hydrocarbures liquides  $55^{\circ}\text{C} <$  point éclair  $< 100^{\circ}\text{C}$ ,
  - . catégorie D : hydrocarbures liquides point éclair  $\geq 100^{\circ}\text{C}$ ,
- la réglementation transport, transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens - classes de danger (Ministère des Transports). Cette réglementation ne concernant pas le stockage n'est pas décrite ici.

Remarque : Le point de feu est la température la plus faible à laquelle il faut porter un liquide dans des conditions spécifiées d'essais pour que les vapeurs soient enflammées et que leur combustion se poursuive pendant un temps suffisant après qu'une petite flamme ait été placée près de la surface du liquide. Le point d'éclair est légèrement inférieur au point de feu.

#### ***IV.5.3. Température d'auto-inflammation***

C'est la température minimale à laquelle l'allumage est obtenu, par chauffage dans des conditions d'essais spécifiques, et en l'absence de toute source d'allumage auxiliaire.

Lorsqu'on a affaire à des solides, il est indispensable de faire la différence entre les phénomènes de feu couvant et d'incandescence avec combustion.

Le feu couvant est la combustion d'un matériau sans émission visible de lumière et généralement révélée par de la fumée et par une élévation de la température.

L'incandescence avec combustion est la combustion d'un matériau, à l'état solide, sans flamme mais avec émission de lumière émanant de la zone de combustion.

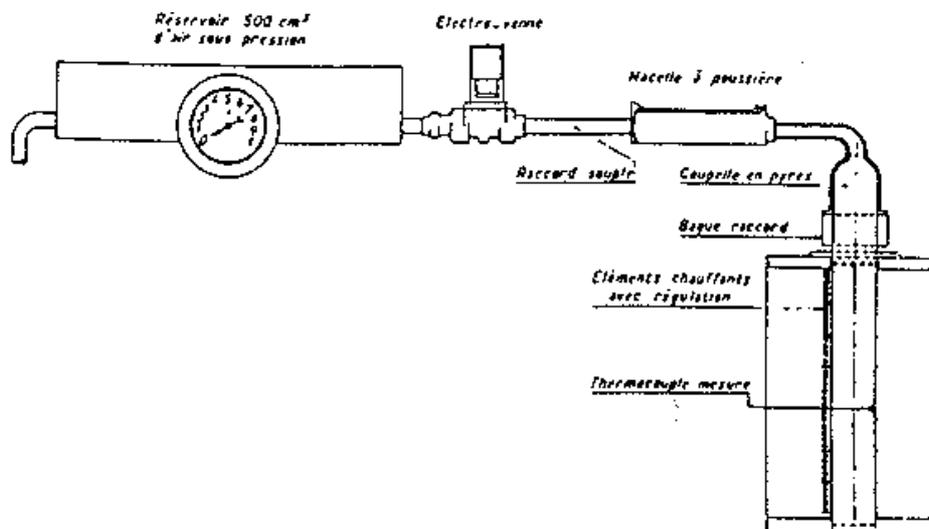
Pour les gaz et les liquides combustibles, on détermine la température d'inflammation des gaz et vapeurs considérés.

En ce qui concerne les poussières, il faut faire la différence entre les températures d'inflammation des couches et des nuages de poussières. Les méthodes décrites ci-après ont été normalisées par la CEI.

Le test de référence pour déterminer la température d'inflammation d'une couche de poussières est le test réalisé avec une couche de 5 mm d'épaisseur placée sur une plaque chauffée. A titre indicatif pour les produits agro-alimentaires pour des couches de 5 mm les températures sont comprises entre 200 et 400°C. Généralement en France, l'INERIS préfère déterminer la température d'apparition des phénomènes exothermiques dans un essai d'analyse thermique différentielle (ATD) (voir température d'auto-échauffement, § IV.5.4).

La température minimale d'inflammation des nuages de poussières est déterminée dans le four Godbert-Greenwald (figure 17).

A titre indicatif, pour les produits agro-alimentaires, les températures d'inflammation des nuages sont comprises entre 350 et 500°C.

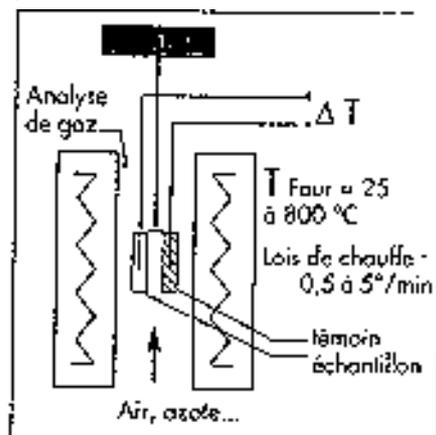


**Figure 17 :**  
*Four type Godbert-Greenwald*

#### **IV.5.4. Température d'auto-échauffement**

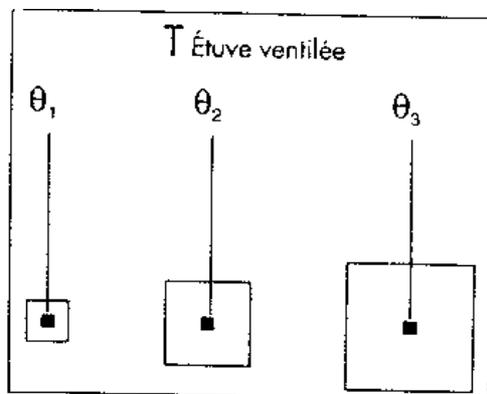
C'est la plus faible température d'un liquide ou d'un solide dans l'air ou en l'absence d'air pour laquelle, dans des conditions spécifiées, des réactions avec dégagement de chaleur (processus biologiques, oxydation, ...) démarrent dans la substance ou à sa surface. Sous air, l'auto-échauffement d'une substance peut conduire à l'auto-inflammation.

La température d'auto-échauffement d'un produit pulvérulent est déterminée à l'INERIS par l'analyse thermogravimétrique (ATG) couplée à l'analyse thermique différentielle (ATD) (figure 18).



**Figure 18 :**  
*Analyse thermo-différentielle couplée à l'analyse thermo-gravimétrique*

Selon le risque d'auto-échauffement mis en évidence, l'essai ATD est complété par un essai en étuve isotherme (figure 19).



**Figure 19 :**  
*Etuve isotherme*

Cette méthode consiste à déterminer la température critique d'auto-échauffement de volumes homothétiques croissants d'un combustible solide.

Par des essais effectués sur plusieurs volumes, on arrive à dégager une relation température critique-volume de matière. A titre d'exemple, des courbes obtenues avec des produits agro-alimentaires sont données dans la cinquième partie du guide, sous II.13.

#### ***IV.5.5. Chaleur de combustion, potentiel calorifique***

C'est l'énergie calorifique susceptible d'être dégagée par la combustion complète d'un matériau par unité de masse. Cette énergie est appelée Pouvoir Calorifique Supérieur -PCS-, si on considère l'eau condensée et pouvoir calorifique inférieur lorsque l'eau est à l'état de vapeur.

#### ***IV.5.6. Pouvoir calorifique***

C'est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de masse d'une substance dans l'oxygène avec formation d'eau sous forme gazeuse.

A titre d'exemple, les pouvoirs calorifiques des produits agro-alimentaires dépendent du pourcentage de matières organiques (protéines, matières grasses, fibres, amidon) et sont compris entre 15 mJ/kg et 16 mJ/kg.

#### ***IV.5.7. Charge calorifique***

C'est l'énergie calorifique de la totalité des éléments contenus dans un espace, aussi bien dans les équipements que dans les bâtiments.

#### ***IV.5.8. Vitesse de propagation de la flamme***

C'est la distance parcourue par unité de temps lorsque le front de flamme se développe dans des conditions spécifiées d'essais.

#### ***IV.5.9. Débit calorifique***

C'est l'énergie dissipée par unité de temps lors de la combustion d'une substance dans des conditions d'essais spécifiées.

#### ***IV.5.10. Indice d'oxygène***

C'est la concentration minimale d'oxygène, dans un mélange avec l'azote, à laquelle un matériau brûle juste, dans des conditions d'essais spécifiées.

#### ***IV.5.11. Vitesse linéaire de combustion***

C'est la distance parcourue par la zone en combustion par unité de temps ; elle dépend des conditions d'essais.

#### ***IV.5.12. Vitesse de combustion de zone***

C'est la zone concernée par la combustion par unité de temps ; elle dépend des conditions d'essais.

#### ***IV.5.13. Durée de combustion avec flamme***

C'est l'intervalle de temps pendant lequel la combustion se poursuit après que la source d'inflammation ait été retirée.

#### ***IV.5.14. Durée de combustion après extinction de la flamme (pour les solides)***

C'est l'intervalle de temps qui s'écoule depuis la fin de la flamme jusqu'à l'absence de tout feu couvant ou d'incandescence avec combustion des matériaux.

#### ***IV. 5.15. Autres caractéristiques***

D'autres caractéristiques sont également importantes : masse molaire, densité, densité relative des vapeurs, point d'ébullition, point de fusion, point de congélation, pression de vapeur, vitesse d'évaporation, coefficient de diffusion, valeurs critiques, etc.

### **IV.6. Propagation d'un incendie**

La dynamique de la propagation d'un incendie peut être illustrée par ce qui est obtenu lors de l'incendie de certaines courroies transporteuses.

Les transporteurs à bande sont très utilisés pour la manutention et le transport de produits en vrac, tant sur de courtes que de longues distances.

Les bandes sont généralement constituées d'une carcasse (textile ou métallique), et de matériaux élastomériques ou thermoplastiques (polypropylène, polybutadiène, isoprène, chloroprène, PVC, ...). Leur pouvoir calorifique est élevé (40 mJ/kg pour certaines courroies facilement inflammables et propagatrices de la flamme, celui du bois étant de l'ordre de 18 mJ/kg).

Un essai d'incendie réalisé dans une galerie expérimentale à l'INERIS (longue de 50 m et de 10 m<sup>2</sup> de section), dans le cadre d'une expertise après un accident, a permis d'évaluer la vitesse de propagation du feu, la densité et la toxicité des fumées émises et les flux de chaleur dégagés par la combustion de 12 m de bande non ignifugée, placée dans une configuration réaliste d'utilisation (inclinaison, aérage de vitesse 1 m/s). L'allumage a été réalisé par une source d'énergie rayonnante.

Les principales conclusions ont été l'inflammation de la bande dans les 10 minutes suivant l'allumage de la source d'énergie rayonnante (vitesse de combustion < 1 m/min) ; puis l'accélération importante de la combustion (2 < vitesse de combustion < 4 m/min) jusqu'à la destruction complète de la bande dans un délai < 20 min après l'apparition des flammes.

La combustion a provoqué la formation de gouttes enflammées, la projection de particules caoutchouteuses et l'émission de fumées extrêmement opaques. Le passage du front de flammes s'est accompagné d'un flux thermique élevé compris en 10 et 30 W/cm<sup>2</sup>. Les principaux gaz émis ont été le dioxyde de carbone, l'anhydride carbonique et des hydrocarbures. Les températures maximales relevées sont alors de 900° (tableau 8).

	A 6 m de l'extrémité amont	A 11 m (Extrémité de la bande)	A 38 m
A 2,75 m de hauteur	450°C	800°C	387°C
A 1,50 m de hauteur	--	750°C	232°C
A 0,50 m de hauteur	750°C	900°C	136°C

**Tableau 8 :**  
*Températures relevées lors de l'essai de l'incendie d'une bande transporteuse (INERIS)*

Les facteurs importants qui agissent sur la propagation du feu dans le cas d'une bande transporteuse sont : la nature de son revêtement et de sa carcasse, ses dimensions (largeur, longueur), l'orientation du tapis (pente), le débit calorifique (transfert par rayonnement et convection) et l'apport de comburant au niveau des flammes.

Les bandes de transporteurs peuvent donc constituer un vecteur de la propagation d'un incendie du fait, lors de leur combustion, de la formation de gouttes enflammées et de la projection de morceaux de bande en feu (à des distances de plusieurs dizaines de mètres).

A noter que, les bandes contenant des produits halogénés (PVC, chloroprène, ...) brûlent difficilement mais la production de fumées toxiques peut être importante (acide chlorhydrique, voire acide cyanhydrique).

#### **IV.7. Risques toxiques**

##### ***IV. 7.1. Fumées***

De façon générale, dans un incendie, la toxicité des fumées est responsable de 50 à 80 % des décès et deux victimes hospitalisées sur trois présentent uniquement des signes d'intoxication. Les personnes décédées par inhalation de fumées toxiques sont en général des personnes bloquées près du feu ou des acteurs de la lutte anti-incendie. En effet, des pertes de visibilité dues à l'opacité des fumées empêchent les personnes présentes de gagner les issues de secours et gênent fortement la lutte.

Dans le cas d'explosion de poussières agro-alimentaires et d'incendies de produits agro-alimentaires, c'est généralement le monoxyde de carbone produit en grande quantité par la combustion des poussières qui est toxique pour les personnes.

Ce gaz est mortel pour l'homme à une teneur de 1 % pour une exposition de 1 minute. Dans des accidents en milieu très confiné (explosions minières) des teneurs importantes en CO ont été relevées juste après une explosion de poussières (plus de 3 % dans certains cas).

Par contre, les fumées émises par l'incendie de certains produits présents sur les sites de stockage de produits agro-alimentaires (pesticides de traitement des grains, engrais, produits phytosanitaires) peuvent avoir une toxicité importante.

On peut classer les gaz produits lors d'incendies et d'explosions en trois grandes classes toxicologiques :

##### ***- Les narcotiques et asphyxiants :***

On trouve en particulier CO, HCN, H<sub>2</sub>S, benzène, acétone, hydrocarbures aliphatiques... Ces substances sont des déprimeurs du système nerveux central et bien souvent des toxiques du système cardio-vasculaire.

**- Les irritants :**

On compte parmi eux NO<sub>x</sub>, HCl, Cl<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, l'acroléine, ... Ces produits sont toxiques (parfois avec retard) pour les voies aériennes supérieures et les poumons.

**- Les autres :**

Hydrocarbures halogénés (toxicité hépatique), alcools, phénols (neurotoxicité), glycols et divers composés aromatiques azotés qui sont toxiques pour les cellules sanguines.

L'intoxication peut également venir du manque d'oxygène. Des phénomènes d'incoordination motrice se manifestent à 17 % d'oxygène. En-dessous de 10 %, la mort est immédiate.

L'action de ces gaz sur l'organisme diffère selon leur nature. Des exemples sont donnés ci-dessous.

***Le monoxyde de carbone***

On explique la toxicité de CO par son affinité pour l'hémoglobine (210 fois supérieure à celle de l'oxygène). De ce fait les capacités de transport de l'oxygène par le sang diminuent. Cela affecte surtout les deux organes les plus sensibles au manque d'oxygène que sont le cœur et le cerveau. D'autre part, le CO se fixe également sur la myoglobine, diminuant ainsi la diffusion de l'oxygène dans la cellule. Enfin, d'autres effets du CO ont été étudiés ; on citera par exemple la toxicité cardiaque du CO.

***Le dioxyde de carbone :***

Des concentrations de CO<sub>2</sub> légèrement supérieures à la normale augmentent à la fois la fréquence et le volume de la respiration, conduisant ainsi à l'inhalation de quantités plus importantes de gaz toxiques.

***L'acide cyanhydrique :***

Ce produit possède, comme le CO, une forte affinité pour les hémoprotéines. Il se fixe également sur les cytochromes oxydases, bloquant ainsi la respiration cellulaire. Il a donc un effet asphyxiant redoutable et mène à l'hypoxie cérébrale.

***Le gaz chlorhydrique :***

Ce gaz produit une irritation intense des muqueuses oculaires et des voies respiratoires. Ce gaz rencontré surtout dans la décomposition du PVC, est adsorbé sur les suies produites lors de l'incendie. Cet aérosol de micro-particules, se déposant sur les voies respiratoires, engendre alors des micro-lésions localisées.

### ***Les mélanges de gaz :***

La toxicité des fumées d'incendie est d'autant plus mal connue, que le nombre de gaz est important. Elle dépend des produits concernés par l'incendie. On peut par exemple trouver des gaz irritants (NO<sub>x</sub>, HCl, acroléine, ...).

L'évaluation des impacts toxiques des nuages de fumées sur l'environnement proche doit être considéré s'ils peuvent être significatifs dans le cadre notamment de scénarios d'accidents tirés de l'analyse des risques retenus dans les études de dangers réglementaires.

Pour étudier ces scénarios, des modèles existent comme ceux utilisés par l'INERIS, qui tiennent compte de paramètres atmosphériques et topographiques pour calculer la dispersion des panaches de fumées toxiques.

Par ailleurs, les fumées sont constituées de gaz de combustion mais aussi de particules solides de produits imbrûlés qui les rendent opaques et gênent ainsi les interventions de secours.

### ***IV.7.2. Eau d'extinction***

La toxicité des eaux d'extinction dépend pour beaucoup des substances qui sont stockées ou produites lors de l'incendie. Pour se prémunir de conséquences sur l'environnement, le principe est simple : il faut éviter que ces eaux n'atteignent l'environnement extérieur à l'usine, en particulier pour les produits dont on connaît le caractère dangereux. La mise en place de cuvette de rétention et/ou de cuve de stockage des eaux d'extinction au niveau des aires de stockage des produits toxiques (produits agro-pharmaceutiques, solvants, ...) constitue la seule solution envisageable à l'heure actuelle.

## **IV.8. Conséquences d'un incendie**

### ***IV.8.1. Effets thermiques***

Les flux thermiques dégagés par la combustion de matières peuvent engendrer à la fois :

- des brûlures "graves" pour les personnes,
- des effets sur les structures pouvant conduire à l'effondrement de constructions.

Le tableau 9 donne des indications sur les intensités des flux thermiques et les conséquences possibles.

Flux (kw/m <sup>2</sup> )	Conséquences	Flux (kw/m <sup>2</sup> )	Conséquences
240	Rayonnement d'un feu intense (1150°C)	8	début de la combustion spontanée du bois et des peintures
200	ruine du béton par éclatement interne en quelques dizaines de minutes (200-300°C)	9,5	seuil de la douleur en 6 s, flux minimal léthal en 30 s
150	rayonnement d'un feu moyen (1000°C)	10	modification structurelle de la laine ou du coton
100	température de 100°C dans 10 cm de béton au bout de 3 heures	5	- intervention de personnes protégées avec des tenues ignifuges - bris de vitres sous l'effet thermique - flux minimal léthal pour 60 s - intervention rapide pour des personnes protégées (pompiers)
92	rayonnement d'un feu faible	2,9	flux minimal léthal en 120 s
40	ignition spontanée du bois en 40 s	1,5	seuil de rayonnement continu pour des personnes non protégées (habillement normal)
36	propagation probable du feu de réservoirs d'hydrocarbures même refroidis à l'eau	1	rayonnement solaire en zone équatoriale
27	ignition spontanée du bois entre 5 et 15 minutes	0,7	rougissement de la peau, brûlure en cas d'exposition prolongée
20	- tenue des ouvrages d'art en béton pendant plusieurs heures - inflammation possible des vêtements		
12	modification structurelle des fibres de type polyester		

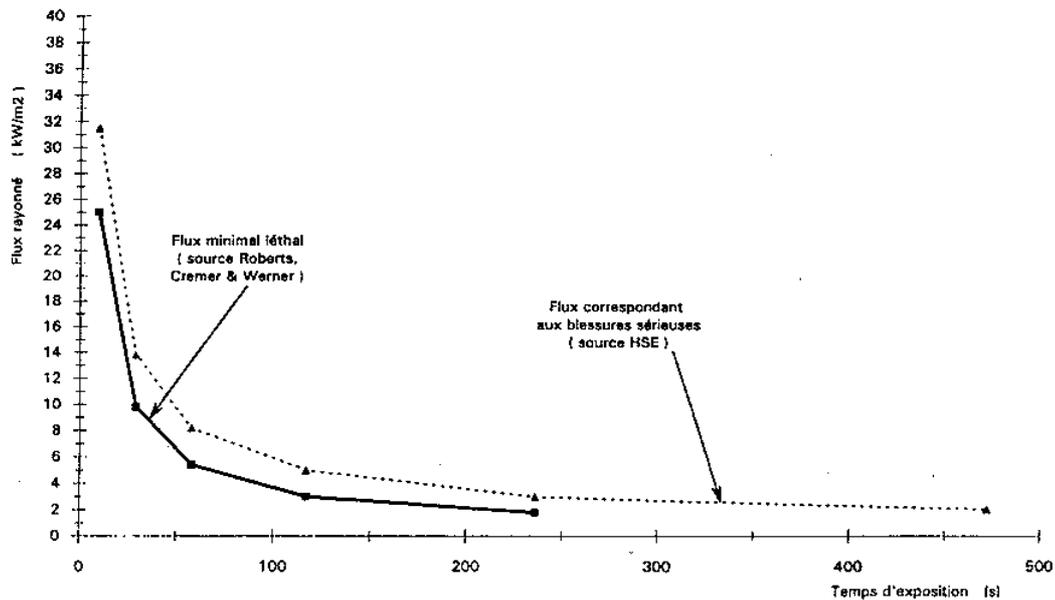
**Tableau 9 :**  
*Intensité du flux thermique et type de conséquence*  
*(Préventive et Sécurité N° 5 -*  
*août-septembre 1994, page 8)*  
 (d'après J. JARRY, Ministère de l'Environnement - /31/)

### **Effets sur l'homme**

L'effet sur l'homme du flux thermique dégagé par un incendie est surtout lié à la durée du temps d'exposition.

A titre indicatif, les courbes du flux minimal léthal et du flux correspondant aux blessures sérieuses données à la figure 20 montrent qu'elles sont, en fonction du temps d'exposition (s), les intensités du flux rayonné (kW/m<sup>2</sup>) nécessaires.

Des seuils caractéristiques des flux thermiques de plusieurs minutes, respectivement de 5 kW/m<sup>2</sup> pour l'apparition de la létalité et de 3 kW/m<sup>2</sup> pour la limite des effets significatifs sont retenus dans le cadre des études de dangers.



**Figure 20 :**  
*Flux rayonné induisant des brûlures chez l'homme*  
 (d'après J. JARRY, Ministère de l'Environnement - /31/)

A distance de la flamme, les effets du flux radiatif émis se traduisent par l'apparition de brûlures au 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> degré dont les conséquences pour l'homme sont :

- 1<sup>er</sup> degré : atteinte superficielle de la couche cornée (rougeur)
- 2<sup>ème</sup> degré : destruction partielle de l'épiderme (cloques)
- 3<sup>ème</sup> degré : destruction totale de l'épiderme et du derme (tâches noires).

Dans la mesure où les brûlures au troisième degré sont généralement étendues, elles sont mortelles à brève échéance.

Les brûlures du second degré peuvent également être mortelles selon la surface atteinte :

- 90 % : mortalité dans 90 % des cas,
- 50 % : mortalité dans 50 % des cas,
- 25 % : mortalité dans 5 % des cas.

Les brûlures du premier degré ne sont pas mortelles.

### **Effets sur les structures**

Le rayonnement thermique a un effet conséquent sur les structures dans le cas des incendies, car les flux thermiques sont importants et les durées d'exposition sont longues.

Toutes les structures subissent des modifications dès l'instant où l'intensité du flux thermique est assez conséquente ( $5 \text{ kW/m}^2$ ) qui vont se traduire par des déformations, suivies par un effondrement si un seuil critique est dépassé. Dans certains cas, l'effondrement d'installation comme celle d'une cellule de stockage peut avoir des conséquences dramatiques pour le personnel situé à proximité.

## SIXIEME PARTIE

### MOYENS DE PREVENTION ET PROTECTION DE L'EXPLOSION ET DE L'INCENDIE

Deux types de mesures sont possibles pour réduire les risques d'explosion et d'incendie :

- la prévention qui permet de diminuer la probabilité de survenance d'un sinistre,
- la protection qui permet de diminuer les dommages d'un sinistre.

Dans la suite, la prévention et la protection de l'explosion et de l'incendie sont traitées dans un cadre général, afin de donner un aperçu des moyens disponibles pour éviter les accidents importants.

Une application spécifique aux silos de produits agro-alimentaires est faite dans la septième partie du guide, qui donne des recommandations pour un certain nombre d'installations rencontrées dans les silos.

#### **Appréciation du risque d'explosion et d'incendie dans les conditions industrielles**

**Chaque installation industrielle doit être l'objet d'une analyse du risque d'explosion et d'incendie (/32/, /33/).**

Les risques d'explosion et d'incendie nécessitent d'abord l'identification des phénomènes dangereux en s'intéressant à la fois à leur occurrence et aux dommages possibles.

Dans les phénomènes dangereux, on doit prendre en compte la probabilité d'occurrence (sources d'inflammation) et les conditions de propagation.

La prévention va s'intéresser à la probabilité d'occurrence qui peut être appréciée à l'aide des caractéristiques de sécurité explosion et d'incendie du système complet.

Les propriétés des sources d'inflammation active doivent être évaluées.

Il faut noter que les caractéristiques de sécurité explosion et incendie sont généralement déterminées à l'échelle du laboratoire dans des conditions d'essais spécifiques décrites dans la cinquième partie du guide. Pour l'appréciation des risques, il faut considérer les conditions de fonctionnement (fabrication, stockage, ...), et notamment l'influence de la pression et de la température de fonctionnement, les conditions de transfert des produits (écoulement laminaire ou turbulent), la géométrie de l'appareil.

Il est aussi nécessaire d'apprécier le risque pour les conditions de démarrage et d'arrêt de l'installation, lors des travaux de réparation et de maintenance et lors de dysfonctionnement ; en effet dans ces conditions, les teneurs en combustibles ou en poussières en suspension, les conditions d'exploitation sont généralement changées. De nouvelles sources d'inflammation peuvent apparaître (postes de soudure donnant des perles incandescentes, surcharge d'une courroie entraînant un frottement, ...).

Pour la prévention du risque de propagation d'une explosion, d'un incendie, il est indispensable de tenir compte des particularités des installations (compartimentage, liaison,...).

En dépit de l'adoption de mesures de prévention, l'explosion, l'incendie peuvent se produire.

Pour l'incendie, plus tôt le feu est détecté, contrôlé et combattu, moins les effets seront importants. La propagation du feu peut être limitée à l'aide de la détection précoce de l'incendie, et par des moyens d'extinction appropriés.

Pour définir comment le feu peut se propager dans les conditions normales et anormales de fonctionnement de l'installation, les mesures de protection de l'incident doivent tenir compte des caractéristiques de sécurité des substances combustibles (combustibilité, potentiel calorifique, vitesse de propagation de la flamme, vitesse de combustion linéaire).

Pour l'explosion, plus l'événement reste localisé, plus il est facile d'en réduire les effets.

Les mesures de protection de l'explosion doivent tenir compte de la configuration des installations pour définir comment l'explosion de poussières peut se propager aussi bien dans les conditions normales et anormales de fonctionnement de l'installation et des caractéristiques de sécurité des substances explosives (limite inférieure d'explosivité, pression maximale d'explosion,  $K_{st}$ , ...).

Les effets de l'explosion peuvent être contenus dans un appareil résistant à l'explosion.

Les effets de l'explosion (pression, flamme, projection de débris) peuvent être limités par une construction résistante à l'explosion évitant l'effondrement, par l'installation d'évents et la suppression de l'explosion.

La propagation d'une explosion peut être limitée par isolement et interruption de l'explosion (découplage).

La suppression d'une ou plusieurs des conditions qui sont spécifiques à l'explosion dans "l'hexagone de l'explosion" n'empêche pas forcément le déclenchement d'un incendie, qui lui nécessite la suppression d'une des conditions du triangle du feu. C'est pourquoi, il est fréquent de constater dans l'analyse d'un accident, qu'un incendie succède à une explosion de poussières.

Un incendie peut donc suivre une explosion, mais inversement, une explosion peut être la conséquence d'un incendie non maîtrisé.

## **I./ PREVENTION**

### **I.1. Prévention de l'explosion**

La prévention des explosions de poussières consiste à supprimer une ou plusieurs des conditions de l'hexagone de l'explosion (/32/).

Les conditions sur lesquelles on peut agir concernent :

- . le combustible : la poussière,
- . la source d'inflammation,
- . le comburant : l'oxygène de l'air.

La prévention pourra donc s'exercer au niveau du combustible, des sources d'inflammation ou du comburant.

#### ***Limitation de la création de poussières et élimination des poussières***

En ce qui concerne les poussières combustibles, dans toute la mesure du possible, il faut éviter, lors des opérations faites sur les produits agro-alimentaires, de créer inutilement des nuages de poussières dans les installations où une explosion "primaire" est possible. Il faut par ailleurs empêcher les émissions de poussières hors des installations qui peuvent conduire à former des dépôts et après remise en suspension, à alimenter une explosion "secondaire".

Les émissions de poussières sont surtout importantes au niveau des points de transfert des installations de transport gravitaire, et également dans les installations où les produits subissent un traitement particulier (nettoyeur, séchoir, ensachage, etc.).

La réduction des émissions de poussières passe par des dispositions constructives sur ces installations (réduction des hauteurs de chute par exemple), par des dispositions préventives sur les produits stockés (nettoyage préalable et traitement particulier des produits comme l'ajout d'huile) et par la mise en place de dispositifs de captage des poussières produites (installation de dépoussiérage).

Si malgré tout des émissions de poussières subsistent, il faut rendre les installations, ou les points d'émission suffisamment étanches pour que la poussière ne puisse s'échapper.

Les poussières, émises dans l'environnement des installations, qui n'ont pas été traitées par les dispositions précédentes vont se déposer par sédimentation sur le sol et les parois des bâtiments, et vont constituer des accumulations de poussières. Le long des appareils de transport des dépôts sont susceptibles de se former (chemin de câbles, gaines, moteurs électriques, ...).

Pour réduire le risque d'explosion, les dépôts de poussières doivent être évacués régulièrement par un nettoyage des locaux, afin d'éviter, dans le cas d'un soulèvement des poussières, de se trouver dans le domaine d'explosivité.

Une conception adaptée des bâtiments est nécessaire, pour limiter au maximum les zones où les poussières se déposent 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, ...),
- éliminer sur les sols des étages des bâtiments les aspérités qui sont propices aux accumulations de poussières,
- aménager des accès aux différentes parties des bâtiments.

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 probabilité 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.

Ces mesures ne permettent pas en général d'éliminer le risque d'explosion mais elles tendent essentiellement à éviter que l'explosion ne se propage et ne dégénère en accident catastrophique.

### ***. Limitation des sources d'inflammation***

Les sources d'inflammation active pour une explosion sont décrites en détail auparavant dans la cinquième partie du guide.

Diverses sources d'inflammation pouvant être à l'origine d'explosions (ou d'incendies) dans les silos sont à envisager : étincelle ou échauffement d'origine mécanique ou électrique, étincelle d'origine électrostatique, auto-échauffement des produits, présence de feux nus...

L'auto-échauffement concerne essentiellement les dépôts de poussières ou de produits pulvérulents, de faible importance que l'on trouve, par exemple, lors de bourrages dans les circuits de manutention et de dépôts de produits dans les circuits de transport pneumatique ou de forte importance comme les stockages en trémie et en silo.

Les étincelles mécaniques sont surtout à craindre dans les installations pourvues d'un équipage mobile en cas d'anomalie de fonctionnement ou de présence de corps étrangers (engin de manutention, broyeur, ...).

Les étincelles d'origine électrostatique sont susceptibles d'apparaître, dans les installations de l'établissement, où les produits pulvérulents subissent des frottements (opérations de chargement, de vidange, de transport pneumatique, de broyage, ...).

Les points chauds peuvent provenir d'échauffements de pièces mécaniques, de points incandescents véhiculés avec les produits transportés, de surfaces chauffées par des opérations d'entretien (soudage, découpage). Les flammes peuvent provenir essentiellement de l'utilisation d'appareils de découpage et de soudage.

Au total, selon leur origine, les sources d'inflammation sont plus ou moins énergétiques. L'énergie délivrée par un point chaud est sans commune mesure avec celle délivrée par une étincelle électrostatique.

Les sources d'inflammation peuvent avoir pour origine les installations.

Les sources d'inflammation peuvent apparaître lors du fonctionnement normal (surface chaude), ou lors des dysfonctionnements (frottement accidentel) des installations.

Les sources d'inflammation peuvent provenir également d'autres installations connectées (installation de transport, circuit de dépoussiérage) et peuvent avoir des origines diverses : particules incandescentes, corps étrangers, etc.

La flamme d'une explosion, survenant dans une installation contiguë, peut constituer également une source d'inflammation.

Une autre origine très fréquente des sources d'inflammation est apportée par les interventions de réparation ou d'entretien (travail par point chaud).

La source d'inflammation peut être constituée par la combustion de produits agro-alimentaires à la suite d'un auto-échauffement, ou l'inflammation de gaz formé lors d'une fermentation.

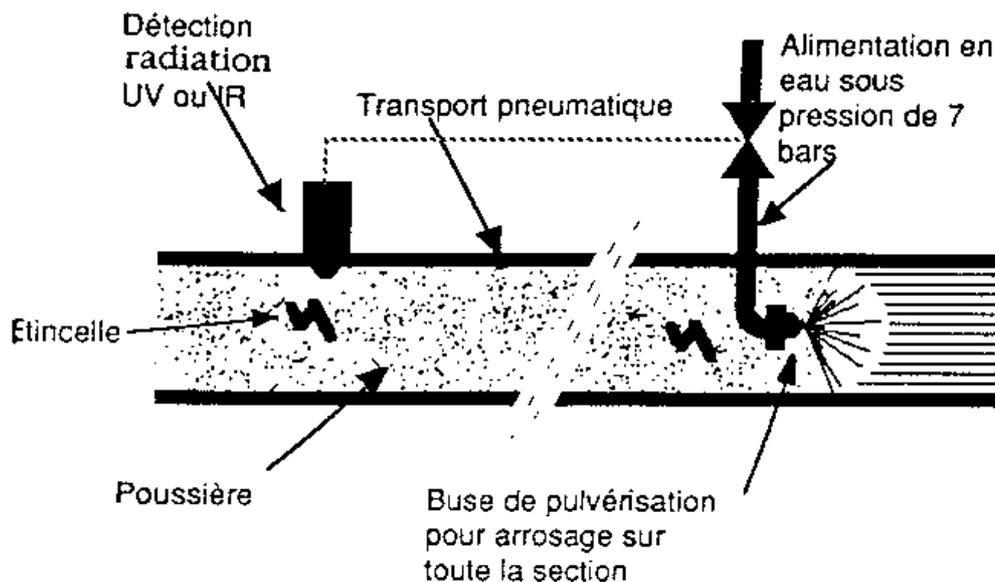
La prévention contre les explosions implique la suppression de toute source d'inflammation active.

Pour ce faire, des dispositions doivent être prises pour éviter l'apparition des sources d'inflammation notamment lors du choix des installations et des matériaux mis en œuvre, lors de la conception des installations et des bâtiments et par l'emploi de systèmes de contrôle, de commande et de surveillance permettant de détecter les dysfonctionnements.

La définition des mesures spécifiques doit être effectuée après une analyse des installations en fonction de la nature des sources d'inflammation susceptibles d'apparaître, et des caractéristiques d'inflammabilité des poussières.

Pour les surfaces chaudes, le principe général est que la température de surface ne dépasse en aucun cas la température minimale d'inflammation des produits inflammables qui pourraient venir en contact avec elles (en tenant compte de l'épaisseur pour les dépôts).

Une autre méthode pour supprimer les sources d'inflammation active d'origine thermique, est de les éliminer dès leur apparition après détection par l'action d'un agent extincteur (figure 21). Cette méthode de prévention de l'explosion est à utiliser principalement dans les installations où il y a un flux de produit s'écoulant par gravité (engin de manutention) ou par un support extérieur (transport sous flux d'air).



**Figure 21 :**

Dispositif de lutte contre les étincelles ou les points incandescents

#### ***Abaissement de la teneur en oxygène***

L'addition de gaz inerte permet de sortir du domaine d'explosivité, en abaissant la teneur en oxygène.

Pour éviter tout risque d'explosion, on peut introduire un gaz inerte dans l'enceinte étanche d'une installation, de manière à empêcher les suspensions de poussières formées de générer une explosion en présence d'une source d'inflammation.

Différents gaz inertes peuvent être utilisés à cet effet : N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, fumées de combustion.

La teneur maximale admissible en O<sub>2</sub> pour éviter l'explosion dépend de la nature des produits agro-alimentaires et également du gaz inerte employé.

Il faut en général descendre en-dessous d'une concentration limite en oxygène de 10 % en volume ; seul un essai spécifique permet une détermination précise de cette concentration.

Pour être efficace, la méthode nécessite le suivi rigoureux de procédures de contrôle et d'exploitation afin de garantir en permanence une teneur en O<sub>2</sub> inférieure à la concentration limite en oxygène avec un contrôle régulier de cette teneur.

L'anoxie doit être aussi prise en compte au plan des dangers pour le personnel.

**Pour réduire les risques d'apparition d'une explosion, et parvenir à un niveau de sécurité satisfaisant, les mesures de prévention se rapportant aux combustibles et aux sources d'inflammation doivent être complétées par l'application effective de règlements, normes et consignes de sécurité, et par l'établissement par l'exploitant de règles d'exploitation, de contrôle et de maintenance des installations de stockage.**

## **I.2. Prévention de l'incendie**

Pour qu'il y ait un feu, il faut la présence simultanée de trois conditions que l'on trouve dans le triangle du feu :

- un combustible,
- une source d'inflammation,
- un comburant.

Un incendie est un feu qui n'a pas été maîtrisé après son démarrage ; il peut se développer plus ou moins rapidement (propagation) et se terminer par un sinistre (destruction) plus ou moins important selon sa violence.

Pour prévenir les incendies on pourra agir sur la présence de combustibles et de sources d'inflammation pour empêcher le risque d'occurrence d'un feu (/30/, /34/).

### ***. Les combustibles***

Les combustibles susceptibles de participer à un début d'incendie peuvent être les produits stockés, et les matériaux combustibles nécessaires au fonctionnement des appareils (bande transporteuse, carburant, huile, insecticide ...) présents dans ceux-ci ou à proximité ou dans des locaux spécialisés.

Pour les produits stockés, la prévention de l'incendie doit tenir compte des spécificités des produits vis-à-vis de l'incendie. Lors des différentes opérations réalisées, les mesures suivantes doivent être prises :

- éviter les accumulations inutiles à proximité immédiate des zones où le risque d'inflammation est élevé (circuit de séchage, moteur thermique et électrique non adapté, palier de transporteur, séchoir),
- veiller à maintenir un état permettant de limiter les risques d'auto-inflammation (humidité, température, ...) dans les cellules de stockage, les séchoirs, ...

Pour les produits combustibles présents dans les bâtiments ou les appareils, la prévention de l'incendie repose sur :

- l'utilisation de matériaux incombustibles ou toutefois difficilement inflammables,
- la limitation au strict nécessaire des quantités de combustibles (huile, produit de traitement,...) stockés à proximité de dépôts de produits agro-alimentaires.

### *. Les sources d'inflammation*

On retrouve pour l'incendie les mêmes sources d'inflammation que pour l'explosion, les étincelles d'origine électrostatique étant cependant beaucoup plus spécifiques de l'explosion.

Dans ces sources, l'inflammation à la suite d'un auto-échauffement est particulièrement insidieuse, parce que l'incendie prend naissance sans apport de chaleur extérieure, la chaleur nécessaire à l'inflammation étant générée à l'intérieur du dépôt de produit parfois même dès la température ambiante.

Pour éliminer les sources d'inflammation active et éviter les incendies, des mesures de prévention adaptées aux types de sources susceptibles d'apparaître, et aux caractéristiques d'inflammabilité des produits doivent être prises. Elles portent essentiellement sur :

- le choix des installations et des matériaux mis en œuvre,
- la conception et les conditions d'exploitation des installations,
- le contrôle de la sûreté de fonctionnement des installations.

**Pour réduire les risques d'apparition d'un incendie, et parvenir à un niveau de sécurité satisfaisant, les mesures de prévention se rapportant aux combustibles et aux sources d'inflammation doivent être complétées par l'application effective de règlements, normes et consignes de sécurité, et par l'établissement par l'exploitant de règles d'exploitation, de contrôle et de maintenance des installations de stockage.**

## **II./ PROTECTION**

### **II.1. Protection de l'explosion**

Bien souvent les mesures de prévention ne suffisent pas pour réduire le risque d'explosion à un niveau acceptable, et il faut donc agir pour limiter les effets de l'explosion (/32/, /35/, /36/).

Dans les appareils ou points de l'espace où la poussière est en suspension à des concentrations explosives, des explosions primaires sont possibles et il y a lieu d'installer des moyens de protection pour atténuer leurs effets. Ces explosions primaires, si elles ne sont pas convenablement atténuées, peuvent conduire à la remise en suspension de poussières déposées, favorisant la propagation d'explosions secondaires, ayant souvent les effets les plus dévastateurs.

En complément des mesures de prévention qui viennent d'être recensées, des mesures de protection contre les explosions doivent être adoptées, leur objectif étant de réduire les effets des explosions en limitant la propagation de la flamme et de la pression et leurs effets.

On distingue différentes catégories de mesures qui sont décrites ci-dessous.

### ***Construction résistante à l'explosion***

La méthode consiste à construire les appareils et/ou les bâtiments susceptibles d'être soumis aux effets de pression de l'explosion, suffisamment résistants, pour ne pas se disloquer et s'effondrer.

Pour ce faire, la résistance mécanique des structures des installations doit être supérieure à la pression maximale d'explosion afin de ne pas conduire à des effondrements.

C'est relativement facile à obtenir sur un appareil isolé de faible volume et peu allongé (rapport longueur/diamètre inférieur à 5), car les pressions maximales généralement inférieures à 10 bar sont compatibles avec des installations industriellement et économiquement réalisables.

La conception d'installations résistantes à la pression des explosions concerne donc principalement les enceintes de faible volume (appareils plutôt que bâtiments) et les canalisations de petits diamètres (canalisations de transport pneumatique par exemple) ou la détonation est possible (surpression pouvant atteindre 30 bar).

### ***Décharge de l'explosion***

La méthode consiste en la "décharge de l'explosion", afin que la pression atteinte (pression d'explosion réduite) soit nettement inférieure à la résistance mécanique de la partie d'installation susceptible d'être soumise aux effets de pression de l'explosion.

Sur les appareils ou bâtiments peu allongés, l'atténuation de la surpression due à l'explosion peut être obtenue par des événements de décharge.

Cette méthode de protection impose qu'on ait déterminé au préalable la résistance à l'effondrement et à l'éclatement sur l'ensemble des appareils et volumes sur lesquels on a ou non installés des événements.

Elle nécessite également, de connaître l'état de turbulence à l'intérieur de l'enceinte à protéger au moment de l'explosion.

### ***Calcul des événements***

Les enceintes peuvent avoir des capacités très différentes (volume de quelques centaines à quelques milliers de mètres cubes) et des formes ramassées ou plus allongées.

Il se pose dans tous les cas de figure, le problème de la faisabilité de la protection par événement et du dimensionnement de la surface des événements pour limiter la pression à une valeur inférieure à la résistance mécanique des structures.

Au niveau français, pour répondre à ce besoin, a été développée **la norme expérimentale AFNOR U 54-540** (/1/) de décembre 1986 qui définit les méthodes pour le calcul des surfaces d'évents en fonction de caractéristiques des poussières (indice d'explosion) et de l'appareil à protéger (pression supportable), et des conditions de turbulences.

Le domaine d'application de la norme concerne les volumes inférieurs à 1 000 m<sup>3</sup> et de forme ramassée (rapport longueur ou hauteur/diamètre ou largeur inférieure à 5). De plus, la décharge de pression est limitée aux mélanges air-poussières dont l'indice d'explosion ( $K_{St}$  ou  $K_{max} T$ ) est inférieure à 600 bar.m.s.<sup>-1</sup>.

Dans cette norme, la méthode applicable aux **turbulences "faible" et "moyennement forte"** est celle tirée de la recommandation allemande VDI 3673 (/37/). Elle permet la détermination de la surface de décharge nécessaire (F), en considérant la pression réduite d'explosion  $P_{red}$  et la pression d'ouverture  $P_{stat}$  du dispositif de décharge, pour un volume V de l'enceinte lorsque la valeur  $K_{St}$  de la poussière est connue. La méthode est valable pour les poussières développant une pression absolue d'explosion maximale de 11 bar lorsque la valeur  $K_{St}$  ne dépasse pas 300 bar.m.s.<sup>-1</sup>.

Dans cette norme, la méthode applicable **aux turbulences "élevées"** est celle mise au point au CERCHAR. Un nuage à turbulence élevée peut exister, soit du fait de conditions de travail particulières (broyage, transport pneumatique), soit du fait d'une source d'inflammation violente. Dans ce cas, la détermination de la surface d'évent (F) est faite à partir de la pression réduite  $P_{red}$ , de la pression d'ouverture  $P_{stat}$  et du volume V, et la gamme des  $K_{max} T$  des poussières en bar.m.s.<sup>-1</sup> (100, 100 << 400, 400 << 600). La valeur de  $K_{max} T$  de la poussière doit être connue dans des conditions de turbulences élevées.

Remarque :

Pour la protection d'installations particulières non couvertes par la norme, NF U54-540 préconise, à défaut de méthode de calcul fiable :

- Pour les cellules de stockage, lorsque le rapport  $\frac{L}{D}$  est supérieure à 5 et la hauteur supérieure à 20 m, de prévoir que toute la surface du toit serve d'évent.
- Pour les tours de manutention en béton, de prévoir que 25 % de la surface latérale serve d'évent.

Pour la protection de structure très allongée de type canalisation la norme NF U54-540 stipule dans les paragraphes 7.3 et 7.4 :

"- Elévateurs à godets

C'est dans ces appareils que l'explosion a de grandes chances de démarrer. S'ils ne peuvent supporter une surpression de 8 bar, leur protection est nécessaire.

Note : des essais ont pu montrer que l'installation d'événements en tête, en pied d'élévateur et sur les colonnes montantes et descendantes permettait d'atténuer très sensiblement les pressions pour des élévateurs de hauteur modérée  $\leq 15$  m. Ainsi, pour un élévateur de 14 m de haut et  $7 \text{ m}^3$  de volume avec une colonne montante de section 300 mm x 600 mm, la surpression d'explosion réduite est toujours inférieure à 0,15 bar pour une surface d'événement de  $1,7 \text{ m}^2$  dans le cas d'une explosion d'amidon. Toutefois, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de recommandations générales pour le calcul des surfaces d'événements à installer sur de tels appareils.

- Galeries

La protection par événement ne s'applique pas aux galeries de plus de 20 m de longueur. D'autres moyens de protection doivent être utilisés : leur définition n'a jamais fait l'objet d'études jusqu'à présent."

Pour le dimensionnement des événements, en Allemagne ont été développés la **recommandation VDI 3673** (/37/), et aux Etats-Unis, le **guide NFPA 68** (/38/) qui utilise également VDI 3673, en fournissant des relations empiriques tirées des résultats expérimentaux fournies sur les courbes VDI 3673.

Pour la protection des volumes de forme ramassée VDI 3673 et NFPA 68 fournissent des méthodes de calcul pour un domaine d'application plus étendu (allant au-delà d'un  $\frac{L}{D}$  de 5). Les deux méthodes ne prennent pas en compte les turbulences "élevées", par contre elles proposent des méthodes de calculs (chacune différente) pour le cas des volumes allongés (à structure fragile comme les bâtiments).

Les recommandations VDI 3673 et NFPA 68 ont depuis subi une récente mise à jour.

Dans la nouvelle version de NFPA 68, les méthodes de calcul proposées par la NFPA 68 de 1994 n'ont pas changé, seules quelques modifications de détail ont été opérées.

La nouvelle version de la VDI 3673 de 1995 a subi par rapport à celle ayant inspiré une partie de la norme NF U54-540 de profondes modifications, justifiées par des résultats de campagnes d'essais, concernant notamment la prise en compte de la pression maximum. A noter que par rapport à l'ancienne version, les méthodes de calcul proposées sont devenues difficiles à utiliser, du fait de la grande complexité des cas de figures envisagées.

Au plan des élévateurs à godets, la norme NFPA 68 indique quant à elle que, pour protéger un élévateur vis-à-vis du risque d'explosion de poussières, il faut installer des événements d'explosion sur les deux parties de l'élévateur (jambes montante et descendante) tous les 6 mètres (surface de chaque événement =  $\frac{2}{3}$  de la surface de l'élévateur) et mettre en place sur la tête de l'élévateur la surface la plus importante possible (au minimum,  $0,5 \text{ m}^2$  pour  $2,8 \text{ m}^3$ ). La pression d'ouverture des événements doit être de l'ordre de 0,034 à 0,069 bar. D'autre part, l'élévateur à protéger doit être disposé à moins de trois mètres des parois de la tour de manutention afin de minimiser la longueur des canalisations prolongeant les événements. Enfin, la vitesse de déplacement des godets doit être inférieure à 2,5 m/s.

Si on compare les différentes méthodes de calcul proposées pour dimensionner la taille des événements (AFNOR, VDI, NFPA), on observe que :

- les champs d'application de ces méthodes sont différents, par exemple pour ce qui concerne les structures fragiles (dont la surpression de ruine est plus petite que 200 mbar),
- pour un même domaine d'application, les limites de validité sont différentes comme par exemple pour ce qui concerne le facteur de forme des enceintes (L/D),
- pour un même domaine d'application, pour des cas courants de calcul d'événements pour des petits volumes et des turbulences faibles et modérées, on trouve des valeurs sensiblement différentes (figure 22).

Actuellement, pour le dimensionnement des événements de volume inférieur à 1 000 m<sup>3</sup> de forme ramassée ( $L/D < 5$ ), les méthodes de calcul proposées par VDI 3673 de 1995, étant devenues difficiles à utiliser du fait de la grande complexité des cas de figures envisagées et pour certaines critiquables, la norme NF U54-540 apparaît comme la méthode la plus appropriée d'autant plus qu'elle traite les turbulences fortes. A noter cependant que les turbulences fortes prises en compte ne couvrent pas celles pouvant être induites par une explosion venant d'une autre installation (jet de flamme à très grande vitesse).

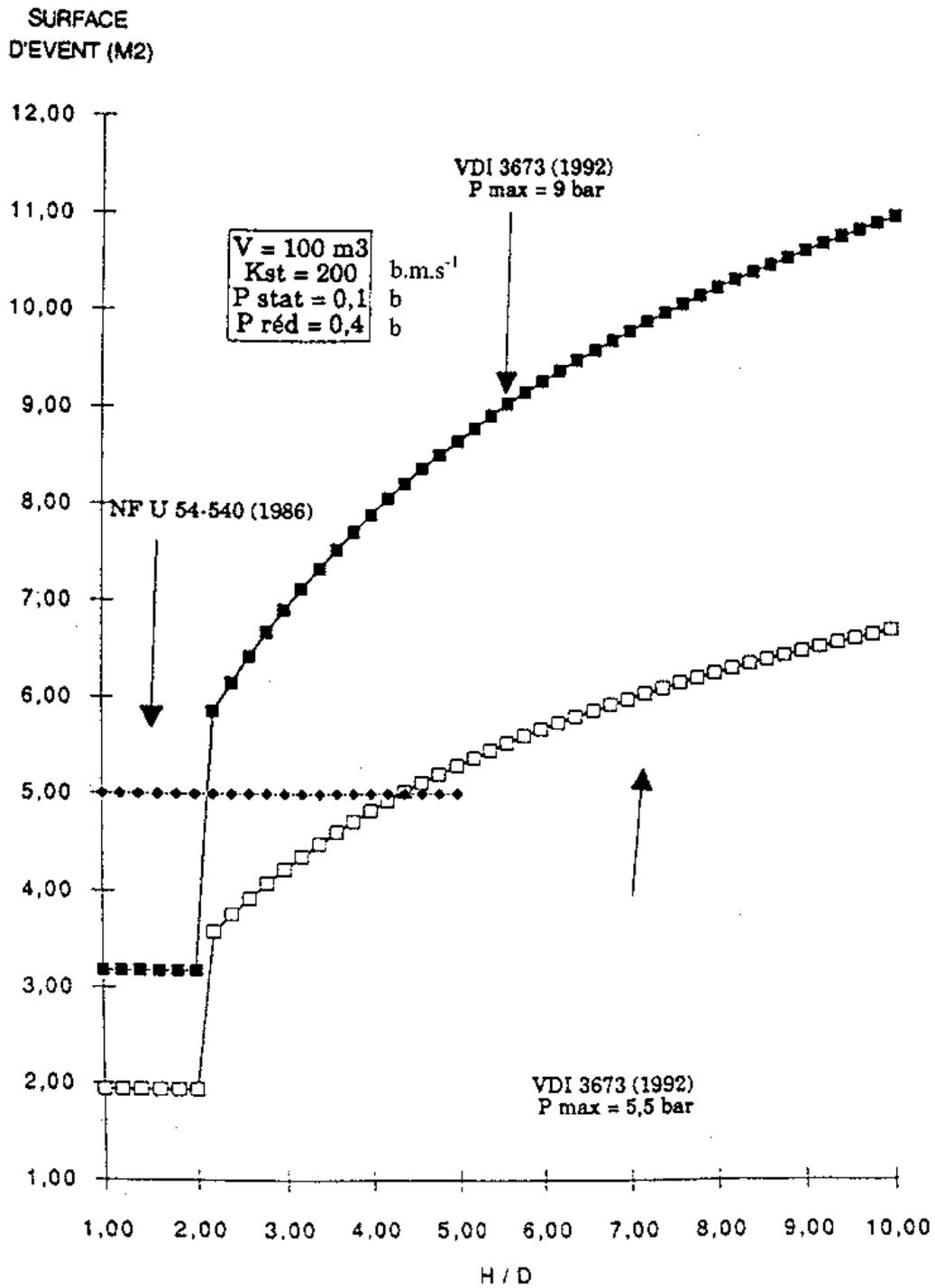
Dans les cas de volumes à protéger supérieurs à 1 000 m<sup>3</sup> de forme ramassée ( $L/D < 5$ ), pour lesquels la norme NF U54-540 ne s'applique pas, faute de mieux, une estimation des surfaces d'événements à prévoir peut être faite en extrapolant les abaques de cette norme (explosion par jet de flamme exclue), par application de la loi cubique, comme le suggère le guide "Les mélanges explosifs" INRS (1989) (/13/).

Dans le cadre du CEN TC 305, un sous-groupe de travail a été constitué au niveau européen, pour élaborer **une norme européenne** pour les calculs d'événements, à partir des expériences et des connaissances nouvelles acquises notamment en France et en Allemagne.

Il apparaît à travers les travaux de ce groupe, que la norme NFU 54-540 possède de bons fondements au plan de la prise en compte de la turbulence du nuage explosif sur la dimension des surfaces d'événement.

Dans ce contexte, il est donc légitime de tenter d'améliorer la norme NFU 54-540 comme complément de la future norme européenne, ce qui devrait pouvoir être réalisé dans un avenir proche grâce aux travaux récents réalisés en France à l'INERIS (/39/) sur une prise en compte mieux adaptée de l'influence de la turbulence et des canalisations de décharge.

Soulignons que, l'**Eurocode** de 1997, partie 2-7 ("charges d'impact et d'explosions"), fournit également une règle de calcul de surface d'événement. Cependant, il est considéré des courbes de montée en pression à l'intérieur des enceintes, qui ne sont pas représentatives de celles produites par les explosions de poussières.



**Figure 22 :**  
*Comparaison des surfaces d'événements en fonction de la norme utilisée*

### *Installation des événements*

Pour la protection des appareils, différents types de dispositif d'évent sont possibles, soit les disques de rupture (ne pouvant être utilisés qu'une seule fois), soit les clapets d'explosion (réutilisables après une explosion).

Le bon état de fonctionnement doit faire l'objet d'un contrôle régulier, par exemple annuel ou bi-annuel (mobilité des clapets d'explosion, vérification de l'absence d'obstruction des canalisations de décharge, ...).

Les clapets, qui ont la particularité de se refermer automatiquement après l'explosion, présentent l'avantage d'éviter l'entrée d'air dans l'installation et donc un éventuel incendie ultérieur. De plus, on limite aussi l'émission de gaz toxiques formés par l'explosion. Soulignons cependant qu'ils ont une inertie plus grande.

A la sortie des orifices de décharge s'exercent les effets de souffle et les effets de flamme. Dans le cas de dépôts de poussières à l'extérieur des appareils protégés, ceux-ci peuvent être remis en suspension et conduire à une explosion secondaire.

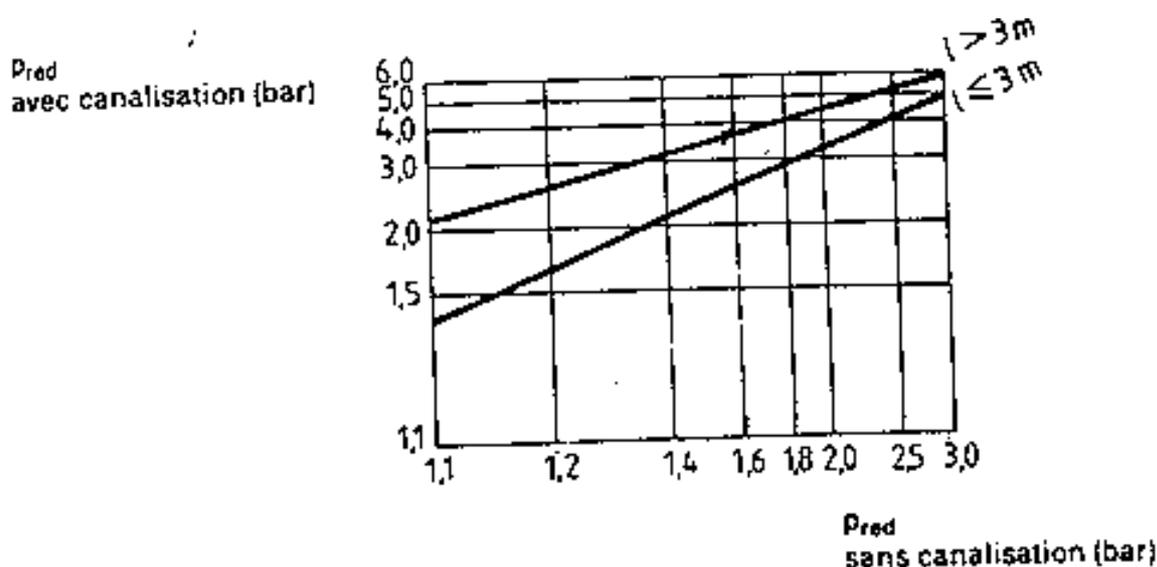
Il est donc indispensable que la décharge des événements s'effectue dans une direction non dangereuse pour le personnel ou d'autres installations et de préférence à l'extérieur des bâtiments.

On a recours pour cela à des canalisations de décharge, dont la longueur dépend de la géométrie du bâtiment où se situe l'appareil protégé par événement.

Il a été constaté que cette canalisation, induit une perte de charge qui s'oppose à la décharge et peut dans certaines conditions être le siège d'une explosion.

Pour ces raisons, la suppression interne maximale dans l'appareil à protéger,  $P_{red}$ , est augmentée par la présence "d'une canalisation de décharge" et l'effet est d'autant plus marqué que la canalisation est longue. Aucune analyse phénoménologique complète n'a jusqu'à présent permis un paramétrage cohérent de l'incidence de cette canalisation, à défaut, on peut utiliser les corrélations graphiques fondées sur des résultats expérimentaux tirés de VDI 3673 pour estimer l'accroissement de  $P_{red}$  (figure 23). Dans cette méthode, toutes choses égales par ailleurs, la suppression maximale d'explosion croît drastiquement d'un facteur 2 dès que la longueur ( $l$ ) de la canalisation dépasse 3 m. Cette frontière, très pénalisante dans la réalité industrielle, ne trouve aucune justification théorique.

Les résultats de travaux expérimentaux et théoriques supplémentaires, notamment à l'INERIS, devraient permettre de mieux prendre en compte l'incidence des tuyauteries de décharge.



**Figure 23 :**  
*Incidence d'une canalisation prolongeant l'événement*  
*(NFU 54-540 - /1/)*

Les premiers travaux réalisés à l'INERIS sur cet aspect (/39/) suggèrent que, dans la mesure où les effets d'accélération de la flamme dans la canalisation ne sont pas sensibles, l'effet essentiel de la canalisation de décharge serait de s'opposer à l'écoulement sous l'effet des pertes de charge. Pour une canalisation droite, cela signifie que la pression réduite d'explosion,  $P_{red}'$ , dans la cuve munie d'une canalisation de décharge de longueur  $l$  et de diamètre  $D$  (= diamètre de l'événement) doit être reliée au rapport  $l/D$  (et non pas simplement à la longueur  $l$ ), et à la pression d'explosion,  $P_{red}$ , lorsque la cuve est dépourvue de canalisation de décharge.

Dans le cas d'explosions de poussières, il faut retenir qu'avec des volumes d'atmosphère explosive de l'ordre de  $20 \text{ m}^3$  peuvent s'échapper à l'air libre des flammes d'une dizaine de mètres de longueur qui sont accompagnées de l'émission d'une onde de pression dans l'environnement.

A noter, que certains fabricants proposent des systèmes spécifiques permettant de "coincer" la flamme, et d'éviter qu'elle ne sorte de l'orifice de décharge.

Pour les bâtiments et cellules de stockage, tout ou partie des parois selon le cas peut constituer une surface soufflable jouant le rôle d'événement, mais des débris peuvent être projetés.

### **. Suppression de l'explosion**

Dans cette méthode, l'extinction de la flamme est obtenue par la dispersion dans l'atmosphère explosive d'un agent extincteur (eau, poudre, ...) ce qui permet de limiter la valeur de  $P_{max}$  (figure 24).

Les dispositifs d'extinction (extincteurs déclenchés) sont constitués par un détecteur dont le délai de fonctionnement est rapide (quelques ms) et un ou des extincteur(s) à décharge rapide (en quelques dizaines de ms selon la taille des appareils).

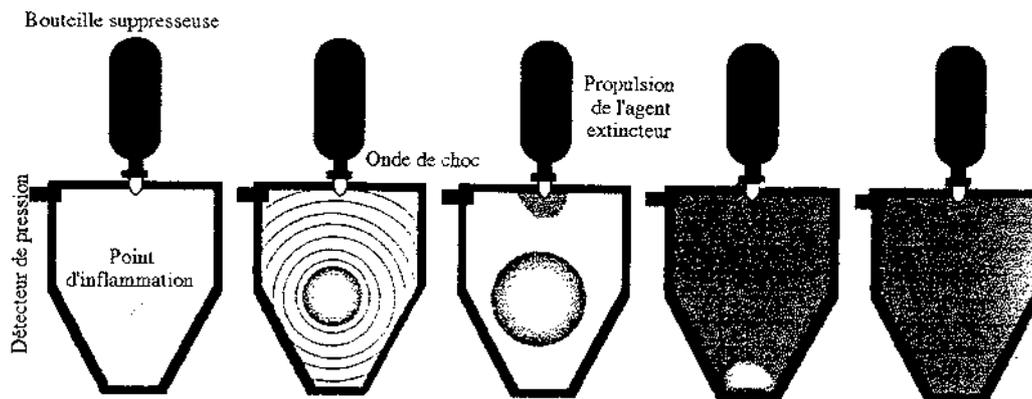


Figure 65 : système de suppression d'explosion  
D'après Kidde-Graviner (Volume : 1m<sup>3</sup> - Produit : maïs)

### **Figure 24 :**

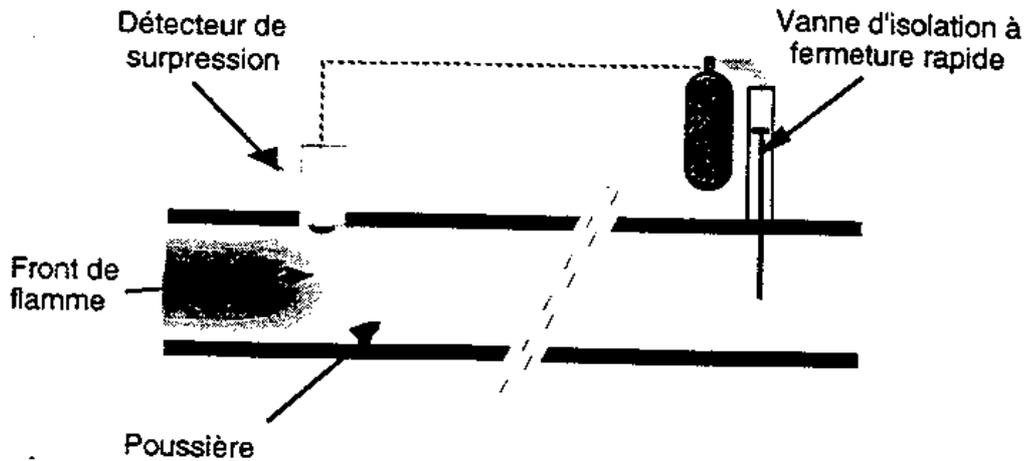
*Dispositif d'extinction de la flamme dans une enceinte de volume réduit*

### **. Prévention de la propagation de l'explosion (isolement et interruption de l'explosion, "découplage")**

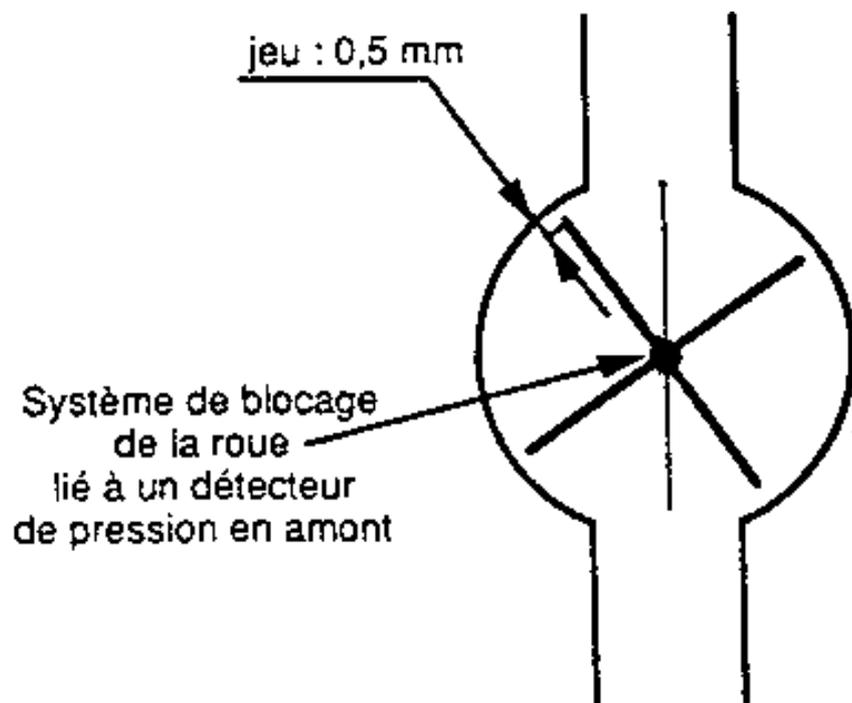
Le principe de cette méthode est de cantonner l'explosion à une installation, voire une partie d'installation, afin d'éviter qu'elle n'atteigne les installations voisines auxquelles l'installation touchée par l'explosion est reliée.

Pour ce faire, l'arrêt de la flamme peut être obtenu par un dispositif obstruant la section de la tuyauterie ou par un dispositif de barrage.

Dans le cas de l'obturation totale de la canalisation, le dispositif de protection (vannes ventex, vannes à fermeture rapide) ainsi que la canalisation doivent pouvoir résister aux effets de la surpression (figure 25). Ces dispositifs de protection ne doivent donc pas être placés trop loin de la source d'explosion, pour limiter la surpression à une valeur voisine d'une dizaine de bar. D'autres dispositifs comme les écluses alvéolaires permettent par laminage d'arrêter la propagation de la flamme et de refroidir les gaz (figure 26).



**Figure 25 :**  
*Vanne d'isolation à fermeture rapide*

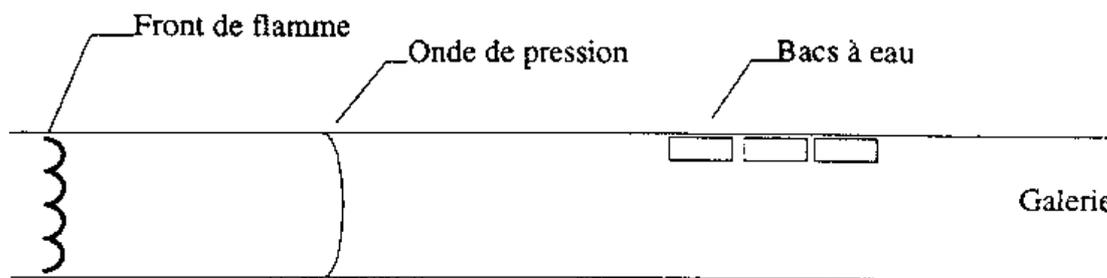


**Figure 26 :**  
*Ecluse alvéolaire*

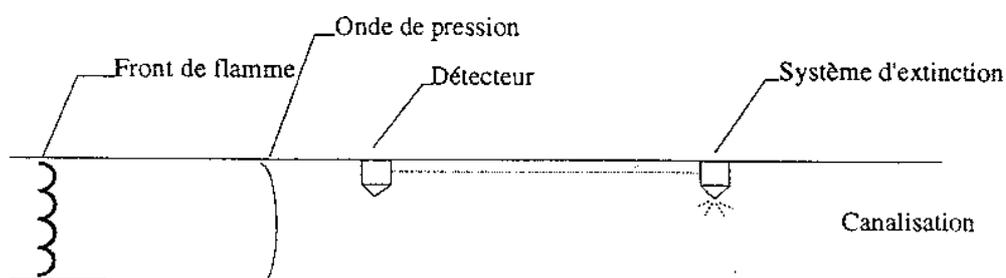
Dans le cas des arrêts-barrages, l'arrêt de la propagation de la flamme (dans une canalisation ou une galerie) est obtenue par l'injection d'agents extincteurs.

La dispersion de l'agent extincteur peut être provoquée par le souffle de l'explosion comme c'est le cas pour les systèmes dits "passifs" constitués de planches recouvertes de pulvérulents inerte ou de bacs en PVC remplis d'eau, que l'on utilise pour protéger les galeries de mines de charbon vis-à-vis des explosions (figure 27).

La dispersion de l'agent extincteur peut être aussi provoquée par une source d'énergie interne au dispositif comme c'est le cas pour les systèmes dits "actifs", dont le fonctionnement est déclenché dès qu'une explosion est détectée (figure 28). La détection de l'explosion est alors réalisée le plus tôt possible après sa naissance afin de réaliser l'extinction, avant qu'une violence dévastatrice ne soit atteinte.



**Figure 27 :**  
*Arrêt-barrage passif*



**Figure 28 :**  
*Arrêt-barrage actif*

D'autres dispositifs, plus communément appelés « cheminée de décharge » ou « pot de découplage » sont parfois associés aux événements (figure 29) pour la protection des appareils situés en aval. Il n'est pas toujours possible d'empêcher de façon fiable la propagation de l'explosion par ces dispositifs de détournement de l'explosion, mais, néanmoins la vitesse de flamme peut être réduite à une valeur plus faible.

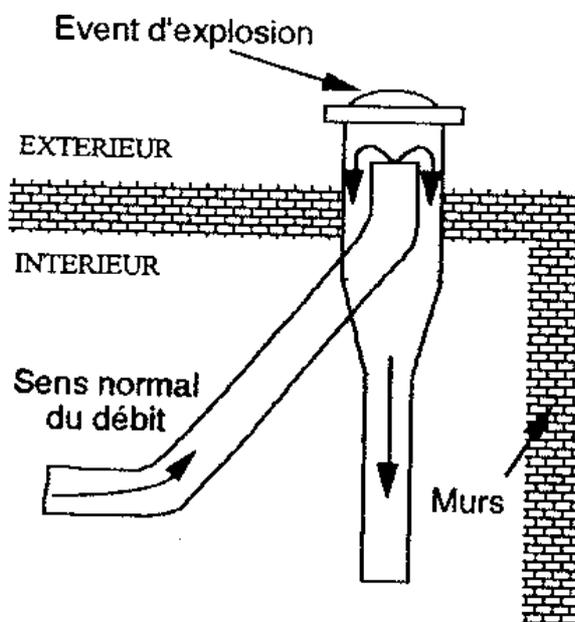


Figure 29 :

*Cheminée de décharge*

**Des essais de qualification des modes de protection et des études d'implantation des dispositifs de protection sont indispensables pour chaque cas particulier.**

### **III.2 Protection de l'incendie**

Dans un stockage de produits agro-alimentaires, les incendies les plus graves susceptibles de se produire, sont ceux survenant dans une, voire plusieurs cellules de stockage. De surcroît, le risque d'avoir une explosion succédant à ce type d'incendie ne peut être écarté.

Les incendies de cellules peuvent se communiquer aux bâtiments contigus, et d'autres produits combustibles (huile, carburant, produit de traitement) peuvent participer à l'incendie et en accroître la violence et les effets (thermique, toxique).

Comme cela a été indiqué auparavant, l'incendie d'une cellule de stockage peut avoir pour origine un auto-échauffement des produits stockés, ou une inflammation extérieure qui peut provenir des installations débouchant dans la cellule (points chauds provenant d'un transporteur ou d'un dispositif de dépoussiérage) ou résulter d'une source de chaleur intense et puissante s'exerçant sur les parois de la cellule (point chaud, incendie).

L'extension extrêmement rapide d'un feu, notamment dans les stockages de produits agro-alimentaires et les conséquences graves des incendies qui leur succèdent, résultent :

- de la découverte généralement tardive du feu,
- de la propagation de l'incendie au sein des installations (engins de manutention, cellules de stockage).

Soulignons que, les moyens de protection à mettre en œuvre pour limiter la gravité d'un incendie se rapportent principalement (/30/) :

- . à la détection précoce des feux,
- . à la limitation des risques de propagation des incendies par le choix de matériaux appropriés pour les installations et les bâtiments (peu propagateurs de la flamme) et des dispositions constructives pour les bâtiments retardant la transmission de la chaleur,
- . à la lutte contre les incendies par le choix de moyens d'extinction et de méthodes adaptées et efficaces, en particulier pour traiter les incendies de cellules de stockage et de séchoir.

L'ouvrage "Incendie et lieux de travail" édité par l'INRS (1996) (/34/) traite en détail la protection de l'incendie dans les entreprises, notamment les moyens de lutte contre l'incendie, dont nous indiquerons ici simplement que les grandes lignes.

#### ***- Détection précoce des feux***

Entre la détection d'un feu et la lutte, il existe quatre phases successives :

- première phase : la détection des feux,
- deuxième phase : la signalisation des feux,
- troisième phase : l'alerte générale,
- quatrième phase : la lutte contre le feu.

La détection humaine d'un feu, peut conduire si la détection n'est pas assurée dans les premiers instants, à un délai relativement long jusqu'au déclenchement de l'alerte générale. Ce délai peut être réduit par la mise en place de détecteurs d'anomalies (sonde de température, détecteur de rotation, ...) sur les installations les plus sensibles (élévateurs à godets transporteurs à bande, ...) couplées à des rondes de contrôle des installations, et l'installation de détecteurs d'incendie.

La règle R7 de l'APSAD définit les règles d'installation des détecteurs d'incendie.

#### ***- Limitation de la propagation***

. Certains éléments d'installation en "linéaire" tels que les câbles électriques, les flexibles, les bandes de convoyeurs, constituent des vecteurs de l'incendie, et peuvent permettre une propagation très rapide des flammes dans l'ensemble d'un bâtiment.

Dès l'installation ou lors des remplacements, le choix doit porter sur l'utilisation de matériaux non-propagateurs de la flamme lorsque le risque est grand d'être confronté à un incendie difficilement maîtrisable.

Les dispositions constructives pour ralentir la progression du feu sont liées au compartimentage et au désenfumage.

#### *Le compartimentage*

Cette opération est presque intuitive : pour éviter qu'un feu se propage, il suffit de séparer les différents éléments que l'on veut protéger. La séparation doit être réalisée pour, d'une part, fragmenter les grands espaces en parties indépendantes et, d'autre part, séparer du reste des bâtiments, les lieux présentant des risques spécifiques et importants.

Lorsque l'on parle de séparer, la première idée qui vient à l'esprit est de séparer géographiquement les espaces. **Dans la séparation par l'espace**, l'écartement peut être calculé en tenant compte de la propagation directe par les flammes mais aussi de la propagation indirecte par la chaleur. En conséquence, l'écartement entre deux bâtiments va dépendre de la charge calorifique, de la hauteur de façade entre ces bâtiments, des vents dominants, de la hauteur estimée des flammes, des matériaux de recouvrement du bâtiment.

**Dans la séparation par des parois**, le cloisonnement est réalisé par des parois dont les caractéristiques sont choisies pour résister un temps donné au passage du feu (notion de paroi coupe-feu). Cette mesure est très efficace pour éviter qu'un incendie au départ localisé n'anéantisse complètement un site industriel. Pour être efficace les parois de séparation doivent résister mécaniquement aux effets de l'incendie. Cette mesure qui présente des avantages indéniables, en dehors de tout contexte réglementaire, semble peu utilisée à en juger par le nombre très important d'usines et d'entrepôts sans séparation.

La règle R15 de l'APSAD définit de manière précise les caractéristiques que doivent posséder les ouvrages séparatifs coupe-feu.

Les portes coupe-feu équipant le petit nombre d'ouvertures pratiquées dans certains ouvrages séparatifs coupe-feu sont également définies par la règle R16 de l'APSAD.

#### *Le désenfumage (évacuation de fumée et de chaleur)*

L'autre manière de contrôler le développement du feu est fournie par le désenfumage et plus précisément par l'usage d'exutoires de fumée et de chaleur.

Le rôle de désenfumage est double : d'une part, il permet de limiter l'extension d'un feu, d'autre part, il facilite l'intervention des pompiers.

- L'énergie des gaz très chauds est libérée vers l'extérieur. La dépression ainsi créée par le tirage empêche la propagation du feu aux locaux adjacents. En son absence, les gaz chauds montent verticalement, s'accumulent sous le plafond et rayonnent leur énergie dans tout le local,

- les températures atteintes par l'incendie sont plus faibles, ce qui permet de s'approcher plus près,
- les fumées sont entraînées hors du bâtiment, limitant ainsi les concentrations de gaz toxiques ou irritants,
- les accès peuvent être protégés de façon plus efficace.

Les exutoires de fumée et de chaleur sont tout simplement des trappes qui s'ouvrent manuellement ou automatiquement en cas d'incendie.

La règle R17 de l'APSAD donne un certain nombre de précisions ou de règles pour l'installation des exutoires de fumées.

### **- Lutte contre les incendies**

La lutte contre les incendies s'opère dans une première phase avec les moyens internes au site industriel (équipe d'intervention et matériel de lutte), puis dans une deuxième phase si nécessaire avec les services de pompiers appelés en renfort.

#### *Moyens internes en personnel*

Les membres des entreprises peuvent être amenés à intervenir en équipe de première intervention pour lutter contre un incendie. Pour cela, ils doivent recevoir une formation sur la conduite à tenir en cas de détection d'un feu et sur l'engagement de la lutte, et être habitués à intervenir dans des équipes de première intervention (intervention près de son local de travail).

Une équipe de deuxième intervention formée à la mise en œuvre de matériels plus puissants doit également être constituée : elle doit être capable d'intervenir dans tout l'établissement. Son effectif dépend de la taille de l'entreprise, de la nature des risques et de la rapidité d'intervention prévisible des secours extérieurs.

Le code du travail régit le cadre d'intervention de ces équipes.

#### *Moyens internes en matériel*

Les moyens de lutte contre l'incendie de première intervention sont principalement des extincteurs mobiles (portatifs et sur roues) et des robinets d'incendie armés (RIA).

Le matériel de deuxième intervention, plus puissant et plus lourd, comprend généralement des installations fixes d'alimentation en eau (collecteur d'incendie, colonne sèche, colonne en charge, ...) des tuyaux à brancher sur les bouches d'incendie ou sur le refoulement d'une motopompe et des lances incendies permettant d'obtenir un jet plein ou pulvérisé.

Les possibilités d'alimentation en eau en permanence, au besoin en disposant de réservoirs, sont évidemment essentielles.

Diverses installations fixes d'extinction, généralement automatiques mais parfois manuelles, peuvent être réalisées lorsque les risques sont graves ou ponctuels ou que la valeur du matériel à protéger est grande.

Ces procédés permettent d'éteindre un foyer d'incendie par une intervention précoce et rapide en l'absence des occupants.

Le code du travail régit la mise en place et l'utilisation du matériel de lutte.

Plusieurs règles APSAD définissent l'installation du matériel de lutte :

- R1 : extinction automatique à eau - type Sprinkler,
- R2 : extinction automatique à halon 1301,
- R3 : extinction automatique à CO<sub>2</sub>;
- R4 : extincteurs mobiles,
- R5 : robinets d'incendie armés.

#### *Moyens externes à l'entreprise*

La troisième intervention est celle des sapeurs-pompiers qui doivent être alertés rapidement et obligatoirement, dès le début de l'incendie, chaque fois que l'équipe spécialisée de deuxième intervention est appelée à intervenir.

## SEPTIEME PARTIE

### **RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION DE NOUVEAUX SILOS, POUR LES AMENAGEMENTS D'ANCIENS SILOS ET POUR L'EXPLOITATION**

Cette partie est consacrée à la prévention et à la protection des risques d'explosion et d'incendie liés à la manipulation et au stockage de produits agro-alimentaires.

Au plan de l'incendie, seuls les aspects liés aux produits agro-alimentaires et aux équipements ont été abordés.

Les mesures de protection incendie actives et passives vis-à-vis du bâtiminaire, non traitées dans ce guide, ont par ailleurs fait l'objet d'un document spécifique réalisé à la demande du Ministère de l'Environnement (/40/).

Ce qui suit n'a pas la vocation de vouloir traiter toutes les situations dangereuses susceptibles d'être rencontrées dans les silos, mais de donner un certain nombre de recommandations en matière de mesures de prévention et de protection de ces risques pour les silos existants et les nouveaux silos.

Bien entendu, d'autres mesures que celles données ici peuvent aussi être retenues, si les éléments des études de dangers le justifient.

En vue d'une meilleure clarté, les différentes parties des silos sont passées en revue tour à tour dans le même ordre que celui de la troisième partie du guide consacrée à la configuration générale d'un établissement stockeur.

Parmi les principes généraux, il faut retenir : éviter l'effondrement du silo, la projection de débris en cas d'explosion et l'apparition de phénomènes d'auto-échauffement pouvant conduire à l'incendie voire à l'explosion.

En aucune manière, la prévention et la protection ne doivent être examinées uniquement pour une partie de l'installation, mais pour l'ensemble dans le cadre de l'analyse de risque (étude des dangers) qui doit aussi considérer les risques d'interaction (effets domino).

## **I./ ACTIVITE DE STOCKAGE**

### **I.1. Les cellules ou capacités de stockage**

Un risque d'explosion et d'incendie existe pour le stockage des produits agro-alimentaires, dont l'occurrence et les dommages dépendent à la fois des caractéristiques des stockages et de la nature des produits stockés.

#### **I.1.1. Vis-à-vis de l'explosion**

La production de poussières conduisant à la formation d'un nuage est importante au cours de l'ensilage du fait des grandes hauteurs de chute des produits, et existe également dans une moindre mesure lors de la vidange des cellules particulièrement lorsque des produits restés collés aux parois tombent soudainement. Ces nuages de poussières inflammables peuvent donner lieu à des explosions en présence de sources d'inflammation active.

Par ailleurs, des gaz inflammables provenant de la fermentation des produits agro-alimentaires, ou de résidu d'hexane contenu dans les tourteaux d'oléagineux peuvent être également à l'origine d'explosion.

Le risque d'explosion dans les cellules de stockage peut être prévenu par les mesures classiques de prévention, notamment des sources d'inflammation traitées dans la sixième partie du guide. Cependant, certains aspects importants méritent d'être soulignés, il s'agit de :

- la réduction de la formation de nuages de poussières par le choix de la forme des cellules verticales pour éviter les écoulements en entonnoir et les effets de voûtes, et par le choix de méthodes d'ensilage et de désilage peu productrices de poussières pour les cellules horizontales (voire les cellules verticales),
- la mise en place, lorsque les conséquences d'une éventuelle explosion peuvent être très importantes (effondrement d'une cellule, silo en zone urbanisée) sur le circuit de manutention d'ensilage, de détecteurs de points chauds, interrompant le circuit d'ensilage, pour éviter l'envoi de matières incandescentes à l'intérieur des cellules,
- une conception d'installation permettant de proscrire l'utilisation intempestive d'outillage générant des sources chaudes actives à proximité des silos (chalumeau, meuleuse).  
L'une des causes avancée pour l'accident de Floriffoux de 1993 est liée à l'utilisation d'une disqueuse et d'un chalumeau,
- une stricte limitation des installations électriques à l'intérieur des cellules, et l'utilisation de matériel adapté pour fonctionnement en atmosphère explosive et bien entretenu. Ce point est particulièrement important pour le matériel d'éclairage et de détection de niveau à l'origine de plusieurs accidents.

Si les mesures de prévention adoptées pour réduire le risque d'occurrence de l'apparition d'atmosphères explosives ou des sources d'inflammation sont mises en défaut, une explosion à l'intérieur d'une cellule pourra avoir des conséquences parfois dramatiques sur l'environnement, notamment au plan des effets des projections de débris et de l'effondrement des cellules.

Dans le cas de silos verticaux, le volume dans lequel se développe l'explosion peut être de l'ordre de 40 000 m<sup>3</sup> pour les cellules les plus grandes (silos portuaires).

Concernant les silos horizontaux, les cases communiquant entre elles, le volume pouvant être concerné par l'explosion peut atteindre pour les plus grands silos 200 000 m<sup>3</sup>.

Malgré un volume pouvant être intéressé par le développement de l'explosion nettement plus petit, les conséquences possibles d'une explosion dans une cellule de **silos verticaux** (cellules principales et as de carreau), sont dans la plupart des cas importantes au plan de la destruction des structures, et des projections de débris, du fait des caractéristiques constructives des cellules des silos verticaux (absence d'ouverture permanente, structure lourde en béton, grande hauteur).

En comparaison, les **silos horizontaux** ont des hauteurs maximum d'une quinzaine de mètres au niveau du faîtage, possèdent en général des ouvertures permanentes vers l'extérieur, et font appel à des matériaux légers pour la construction des toitures qui cèdent rapidement sous la surpression de l'explosion, et les conséquences possibles d'une explosion dans un silo horizontal sont ainsi limitées.

### *Comportement de cellules vis-à-vis de l'explosion*

Pour étudier le comportement de silos vis-à-vis de l'explosion, notamment celui de cellule, l'INERIS a mis au point des logiciels (EFFEX et MISSILE) qui permettent en fonction des produits stockés, de simuler le développement de l'explosion, la ruine des parois et la projection de débris (/41/).

Ces logiciels sont fondés sur une modélisation physique réaliste et éprouvée des phénomènes de propagation de flamme, de décharge de gaz et de balistique. Leurs résultats ont été confrontés à ceux issus d'expériences à grande échelle et au retour d'expérience après accident. L'accord est jusqu'à présent apparu comme tout-à-fait satisfaisant. Il ne s'agit toutefois que de simulations numériques et les conclusions qui en découlent dépendent tout à la fois de l'état de l'art représenté par ces logiciels et des données d'entrée.

Pour faire les calculs, on détermine tout d'abord le taux de turbulence (module TURBULENCE) dans le volume où se produit l'explosion (COMBUSTION). Ceci permet de déterminer le taux de combustion (vitesse de flamme) à partir d'une corrélation de combustion turbulente et de données d'essais (vitesse fondamentale de combustion).

On simule alors, avec le module EXPBAT, le développement de la flamme pas à pas, la formation des produits de combustion, et les effets de pression induits jusqu'à l'apparition de brèches. Lorsque ces brèches se produisent, on introduit dans les équations de bilan un terme de fuite. Cette fuite est variable dans le temps car on simule également la projection des éléments de paroi qui constituent la brèche (Module MISSILE).

MISSILE vient compléter la partie balistique d'EFFEX.

Le résultat du calcul comporte essentiellement la pression maximale dans l'enceinte, la distance et la projection des fragments.

Pour faire les calculs, on doit estimer les effets dynamiques de l'explosion qui peuvent se traduire, soit par un accroissement de la résistance mécanique des équipements, soit par une diminution. Pour les calculs de projection, on retient la valeur la plus élevée de la fourchette (facteur 2 par rapport au cas statique).

A noter, que par rapport aux "modèles simples" que l'on trouve assez classiquement dans les études des dangers, un logiciel comme EFFEX prend en compte la "physique" de l'explosion de poussières, notamment le degré de turbulence dans l'enceinte avant le début de l'inflammation et la vitesse de combustion associée.

A contrario, les "modèles simples" les plus courants sont basés sur une estimation de l'énergie disponible en appliquant un rendement à la manière de "l'équivalent TNT", (souvent 10 %) pour la pressuration 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. Ils ignorent totalement (entre autres) la contribution de la combustion interne à l'impulsion communiquée aux fragments et les éventuelles explosions secondaires.

Les modélisations numériques effectuées avec les logiciels EFFEX et MISSILE sur des cellules de stockage sans évent fournissent les tendances suivantes :

- en terme de projection de débris, les distances calculées pour des cellules horizontales sont plus petites que pour les cellules verticales (divisées par deux au moins),
- dans le cas de cellules verticales, les distances de projection calculées sont d'une manière assez générale voisines de 1,5 fois l'altitude de la partie supérieure de la cellule lorsque **l'explosion débute à l'intérieur de la cellule.**

En revanche, **si l'explosion parvient à se renforcer en passant d'une partie à l'autre du silo avant de déboucher dans la cellule (jet de flamme)**, les calculs indiquent que des fragments peuvent être projetés beaucoup plus loin, parfois à plusieurs centaines de mètres, notamment lorsque l'explosion se propage dans une longue galerie de reprise ou dans une tour de manutention résistante.

Cela montre clairement, que le phénomène d'explosion doit être considéré dans l'ensemble d'un silo avec, notamment, des effets de pression particulièrement violents, quand l'explosion se propage d'une partie de l'installation à une autre (tour de manutention vers une galerie supérieure et des cellules, tour vers un espace sous cellules) (/42/, /43/).

Les distances de projection lointaines de débris lourds mises en évidence par les modélisations sont confirmées par les constatations faites lors d'accidents majeurs, pour lesquels l'existence d'une propagation d'une explosion est hautement probable.

Dans l'accident de Boiry Ste Rictrude de 1982, des débris ont été trouvés à une distance de 500 m, qui concernaient semble-t-il des parties des greniers de deux cellules verticales réalisés en béton léger. Le toit du troisième grenier, réalisé en béton armé s'est semble-t-il effondré sur la structure sans occasionner de projections importantes.

Dans l'accident de Metz survenu en 1982 dans un silo de stockage de malt des projections de débris lourd de béton ont été constatées à une distance de plusieurs centaines de mètres du silo.

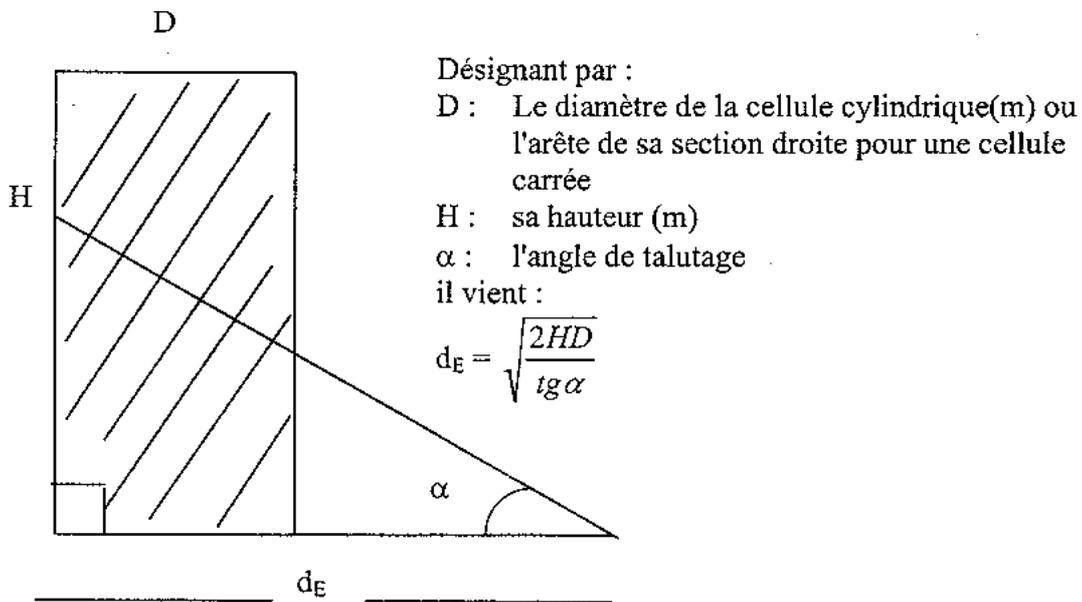
Dans l'accident de Blaye survenu en 1997 (/4/), lors de l'investigation faite pour ce qui concerne les éléments en béton, des morceaux de dimensions métriques ont été retrouvés à environ 50 m du silo, et des débris de petites dimensions (de masse inférieure au kilogramme) ont été projetés, au maximum, jusqu'à environ 140 m des cellules.

Pour évaluer les risques d'ensevelissement sous les produits à la suite de la ruine des parois d'une cellule, 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 (/43/).

A cette fin, on peut poser 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.

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 du maître-couple de la cellule, conformément au schéma suivant.



*Distance d'ensevelissement sous le produit*

Les effets de pression induits dans l'environnement sont aussi des éléments importants à évaluer en cas de ruine des structures.

Lorsque la surpression interne dépasse les limites de résistance de l'équipement, les parois se fragmentent et libèrent ainsi la pression emmagasinée et les produits de l'explosion. Le souffle induit par l'éclatement propulse une onde de pression aérienne dans l'environnement, d'une part et peut d'autre part, éventuellement produire un nuage explosif très turbulent à l'extérieur, ultérieurement amorcé par la flamme provenant de l'équipement. C'est l'explosion dite "secondaire" qui peut également induire une onde de pression aérienne.

L'estimation de l'amplitude du premier type d'onde (consécutive à l'éclatement) qui va s'exercer en dehors de la zone proche peut être faite en estimant l'énergie disponible avant l'éclatement de l'enceinte à partir de l'énergie de pression dite de "Brode", définie comme (/43/) :

$$E_d = \Delta P_{\text{exp}} \cdot V / (\gamma - 1)$$

En désignant par :

$\Delta P_{\text{exp}}$  = la surpression maximale

V = le volume de l'enceinte considéré

$\gamma$  = le rapport des chaleurs spécifiques de l'atmosphère externe (1,33 pour l'air)

### ***Protection des cellules vis-à-vis de l'explosion***

Pour éviter l'effondrement des structures porteuses (parois) et limiter les effets vers l'environnement (flamme, pression, projection de débris), des événements doivent être mis en place sur les cellules.

Au plan des principes généraux, il convient en tout premier lieu d'éviter un effondrement des cellules au cas où l'une d'entre elles viendrait à être le siège d'une explosion.

Par ailleurs, et pour des cellules relativement élevées, il est nécessaire de faire en sorte que la couverture de la cellule, dans sa totalité, soit très significativement moins résistante que tout le reste du fût (fond de cellule et parois cylindriques). Dans le cas contraire, donc pour une cellule qui n'est pas démesurément allongée, il y a lieu de tabler sur la résistance de sa partie la plus faible, et l'on fera en sorte, moyennant la disposition d'une surface d'évent adaptée, que si une explosion venait à se produire sa pression réduite serait inférieure à la résistance de cette partie la plus faible.

Il convient encore de faire en sorte que les parties de couverture soufflables ainsi créées soient retenues pour éviter qu'elles n'aillent frapper une personne, un véhicule ou tout autre équipement. Il y a lieu de souligner dans quelle mesure un espace longiligne relativement long et résistant peut accélérer le front de flamme, et accroître significativement la violence de l'explosion.

Des éléments sur le dimensionnement des événements sont fournis par ailleurs dans la sixième partie du guide.

Pour la construction de silos récents, la solution du "toit soufflable" est largement répandue.

Dans celle-ci, on utilise généralement pour les cellules béton, un plancher rapporté constitué d'une structure porteuse (métallique ou en béton) et d'une couverture étanche en béton léger, et pour les cellules métalliques, une couverture métallique fragilisée au niveau de la fixation, et pour les cellules horizontales un toit en panneaux légers (bardages).

Cette technique du "toit soufflable", largement répandue préserve en général les cellules d'une ruine des parois mais peut conduire malgré tout, en cas d'explosion violente, à des projections de débris conséquents, comme dans le cas de cellules verticales à couverture en béton léger (accident de Boiry St Rictude).

Les cellules béton des silos verticaux de construction ancienne, sans événements dont les toits sont en général en béton armé massif solidarisé par une continuité des ferrillages, aux parois verticales posent, quant à elles, un problème de sécurité spécifique. Lors d'une explosion interne dans ce type de cellules, une dégradation importante et dangereuse des parois verticales, voire leur effondrement et des projections de débris lourds de béton vers l'environnement sont susceptibles de se produire.

L'aménagement d'évent dans le toit de ces silos peut s'avérer cependant de réalisation difficile et remettre en cause la résistance de la structure des cellules. Mais il faut souligner que la présence d'ouverture de décharge même de dimensions insuffisantes pour constituer un événement est toujours préférable à une absence totale d'ouverture notamment, au plan des distances de projection des débris, voire des risques d'effondrement. Ce point est particulièrement important pour les silos anciens qui peuvent être situés à proximité immédiate d'une zone urbanisée.

Une étude des Ingénieurs de Paris réalisée à la demande du Ministère de l'Environnement donne des éléments pour l'aménagement d'événements pour les silos, notamment pour le toit de cellules verticales en béton (/44/).

Soulignons ici, qu'une fragilisation de la dalle du toit d'une cellule verticale béton n'aura pas la même efficacité qu'une ouverture aménagée dans celle-ci, en vue de la réalisation d'événements. En effet, la pression maximale ( $P_{max}$ ) sera plus élevée, et la durée d'impulsion sur les fragments du toit plus longue.

Concernant les silos dômes, des calculs de structure réalisés sur ce type de silo indiquent des surpressions de ruine de quelques centaines de mbar. Cette valeur de résistance apparaît comme très faible au regard des surpressions susceptibles d'être engendrées dans la plupart des cas par des explosions de poussières se développant dans des enceintes fermées, et par ailleurs s'avère inférieure aux valeurs connues habituellement pour les autres types de silos.

Par ailleurs, le comportement à l'explosion des silos dôme, qui font appel à une structure originale est mal connue. Il faut cependant souligner en matière de retour d'expériences, qu'un accident a déjà eu lieu aux Etats-Unis sur une structure similaire, pour laquelle semble-t-il, seule la calotte supérieure du dôme s'est écroulée. Les renseignements disponibles sur cet accident ne permettent pas de dire si des éléments de la structure ont été projetés.

Compte tenu des moyens disponibles, la protection des silos dôme par événements avec un dimensionnement de la surface en extrapolant les abaques de la norme NF U54-540 par application de la loi cubique préconisée par le guide « Les mélanges explosifs » de l'INRS (/13/) apparaît actuellement la mieux appropriée.

Une approche plus précise et plus fiable, nécessiterait de pouvoir disposer d'une méthode de dimensionnement plus adaptée à ces volumes, à ces géométries et à ces structures. En particulier, il faudrait s'interroger sur le comportement du dôme soumis à des sollicitations dynamiques.

Soulignons enfin qu'il est en outre préconisé dans tous les cas, de limiter la pression d'ouverture des événements à la valeur la plus faible possible (faible inertie), et d'empêcher qu'une explosion provenant d'une autre installation n'atteigne les cellules (les méthodes de dimensionnement des événements ne prenant pas en compte cette dernière situation).

### ***Protection contre la foudre et risques liés à des antennes***

Concernant la foudre, une étude des protections contre les effets directs et indirects de la foudre est à faire pour chaque silo comme le demande l'arrêté du 28 janvier 1993 concernant la protection contre la foudre de certaines installations classées pour la protection de l'environnement et la circulaire du 28 octobre 1996 venant compléter cet arrêté.

Pour les effets directs de la foudre, il s'agit dans un premier temps de déterminer le besoin de protection du silo considéré, et le niveau nécessaire de cette protection, et dans un deuxième temps de définir pour les zones susceptibles d'être touchées directement par la foudre les dispositifs de capture, les descentes de foudre et leurs mises à la terre en respectant les règles définies par les normes en vigueur (NF C 17-100) (/45/).

Dans cette étude la présence d'antennes (GSM notamment) doit être prise en compte.

Pour les effets indirects de la foudre, il s'agit de déterminer les besoins de protection contre les surtensions pour les équipements électriques et électroniques du silo et d'en définir les types de protection les mieux adaptés à l'équipement à protéger (parafoudre, éclateur, filtre,...). Dans cette étude, le risque de perturbations du fonctionnement d'équipement électronique par le rayonnement électromagnétique du courant de foudre doit être aussi considéré.

La présence d'antenne (GSM notamment) est susceptible par les champs électromagnétiques créés de produire des étincelles dangereuses dans des structures métalliques, et de perturber les dispositifs de contrôle de commande (par exemple les capteurs d'anomalie de fonctionnement) dans les parties du silo situé à proximité de cette antenne.

Pour chaque silo, une étude doit permettre de s'assurer que la présence d'antenne n'induit pas un risque d'incendie ou d'explosion de poussières. Un document réalisé à la demande du Ministère de l'Environnement par Sechaud et Metz en août 1998 sur les silos fournit des éléments sur ce risque (/46/).

#### **I.1.2. Vis-à-vis de l'incendie des produits stockés**

Les débuts d'incendie de produits agro-alimentaires initiés par des points chauds (interne ou externe à une cellule) ou à la suite d'auto-échauffements peuvent donner lieu à des incendies susceptibles d'intéresser la masse totale de produits stockés.

Le risque incendie n'est pas le même selon la nature des produits stockés et le type d'installation de stockage.

Concernant les produits, comme cela a été signalé précédemment, certaines matières agro-alimentaires comme le maïs, le tournesol, les tourteaux, sont sujettes à l'auto-échauffement.

Les risques d'auto-échauffement pour des stockages en silo existent surtout quand un premier phénomène exothermique, par exemple la fermentation, chauffe le produit.

Concernant les silos, la charge d'incendie représentée par les produits stockés est le plus souvent beaucoup plus importante pour les cellules des silos horizontaux que pour celles des silos verticaux.

Au plan de l'ensilage, les méthodes de chargement utilisées, en concentrant les impuretés légères et lourdes, peuvent avoir une influence sur l'occurrence des auto-échauffements, comme c'est le cas pour les silos horizontaux avec l'ensilage par chariot distributeur.

Par ailleurs, l'extension d'un incendie de cellule dépend étroitement des possibilités de transmission aux cellules contiguës, et des méthodes de lutte utilisées.

La prévention des incendies de cellules réside en dehors des mesures habituelles pour lutter contre l'apparition de sources d'inflammation en des mesures de prévention des auto-échauffements, des mesures de conservation quand les conditions de stockage le nécessitent (produit sensible, taux d'humidité à la réception, durée de stockage), complétées par des mesures de contrôle de température qui sont développées dans ce qui suit.

### *Prévention des auto-échauffements*

Les mesures de conservation des grains si elles permettent de lutter contre les auto-échauffements, visent surtout à limiter les pertes de poids et à conserver aux matières le maximum de qualité, et constituent les objectifs prioritaires du stockage.

Deux techniques existent pour assurer la conservation des grains selon que l'on agisse sur le taux d'oxygène (stockage sous inerte) ou sur la température et dans une moindre mesure sur l'humidité (ventilation). Concernant ce dernier point, il faut remarquer qu'il n'existe pas de technique permettant de conserver valablement du grain trop humide sur une longue période.

Le principe du **stockage sous inerte** est de stocker les matières en atmosphère inerte pour stopper toute possibilité de dégradation du grain. Pour ce faire, le stockage doit être réalisé dans des cellules étanches (en béton généralement) ce qui entraîne un surcoût de la construction (20 à 30 %). Le gaz inerte le plus souvent employé est de l'azote, qui est soit approvisionné de l'extérieur et stocké sur le site dans des citernes, soit généralement produit sur le site par un appareil extrayant l'azote de l'air.

Même si les quantités d'azote introduites peuvent être réduites grâce à l'auto-inertage du ciel de la cellule après remplissage par la production de CO<sub>2</sub> dégagée par les produits stockés, cette technique qui offre le maximum de garantie vis-à-vis du risque d'auto-échauffement demeure coûteuse.

En France, l'utilisation du stockage sous inerte est largement développée pour la conservation des produits déshydratés, notamment la luzerne, pour des exigences de qualité nutritive de la production.

Une partie de la production de luzerne est encore stockée dans des cellules non inertées, cependant, les risques d'échauffements ont diminué depuis la mise en place d'un cycle de refroidissement dans le process de fabrication des usines de déshydratation.

Des essais de faisabilité ont été réalisés en France notamment par la FFCAT pour appliquer cette technique de conservation au blé, colza et maïs humides, mais n'ont pas débouché pour le moment sur des applications industrielles (/47/).

Les nouvelles exigences du marché au plan de la qualité des produits, pourraient jouer un rôle incitatif pour l'utilisation du stockage sous inerte pour certaines matières particulières notamment pour les blés sans résidus pesticides. Cependant, le développement du stockage sous inerte semble devoir rester limité.

Soulignons que pour être efficace, le système d'inertage (qui est un moyen de prévention) doit respecter un certain nombre de règles (/48/) :

- disposer d'une source de gaz inerte suffisante pour maintenir l'enceinte dans sa totalité à un taux d'oxygène inférieur au taux que l'on s'est fixé dans des conditions normales (et anormales) de marche de l'installation. En règle générale, on maintient le taux d'oxygène à 2 % en dessous de la concentration limite en oxygène. Ce facteur de sécurité doit prendre en compte les fluctuations du système, la sensibilité et la fiabilité des appareils de mesure et la probabilité et les conséquences d'une explosion,
- contrôler le taux d'oxygène en continu en divers points de l'enceinte et dans tous les appareils où il y a risque d'explosion,
- déclencher une alarme, en cas de dépassement d'un seuil d'oxygène, pour avertir le personnel,
- établir des consignes de démarrage et d'arrêt de l'installation pour que ces opérations se déroulent sous atmosphère inerte;
- prévoir un plan d'action en cas de panne de gaz inerte ou manque d'atmosphère inerte (déclenchement, mise en sécurité, ...),
- en cas d'utilisation de fumées de combustion, s'assurer que les gaz sont propres (sans poussière) et à une température compatible avec le procédé,
- s'assurer que le gaz inerte est évacué de façon à ne pas nuire à la santé du personnel et prévoir une protection du personnel en cas de fuite hors des équipements.

Quand un organisme stockeur a reçu des matières trop humides, il n'y a pas d'autre alternative que de les sécher dans des séchoirs pour diminuer le taux d'humidité. Pour les grains dont l'humidité est proche des normes commerciales, dès l'ensilage il faut agir sur le deuxième facteur de conservation, la température des grains. Ceci peut être obtenu le plus aisément par la **ventilation** du grain, ou à défaut par un **transilage**.

Le déclenchement de ces opérations nécessite d'avoir des indicateurs, dont le mieux adapté est la surveillance de la température interne de la masse ensilée.

L'expérience montre qu'il faut maintenir le grain en dessous de 15°C pour avoir une bonne conservation, et lutter contre les auto-échauffements (tableau 10).

Espèce		Maïs		Blé
Humidité (%)		12	16	16
Température de stockage (°C)	0	0,1	0,4	0,025
	5	0,2	0,8	0,05
	10	0,4	1,7	0,1
	15	0,8	3,4	0,2
	20	1,6	6,8	0,4
	25	3,2	13,6	0,8

**Tableau 10 :**

*Production de chaleur du blé et du maïs en kcal/tonne et par heure, en fonction de leur température et de leur teneur en eau (/49/)*

Par ailleurs, il faut souligner que ce n'est que lorsque l'humidité se situe au seuil de stabilisation que l'activité respiratoire est très faible. Pour les produits présentant des humidités de normes commerciales il subsiste un risque de mauvaise conservation (tableau 11).

	Blé, orge	Maïs, sorgho	Pois	Oléagineux
Norme commerciale (%)	15	15	15	9
Seuil de stabilisation (%)	14	12	12	7

**Tableau 11 :**

*Décalage de teneur en eau entre la norme commerciale et le seuil de stabilisation pour différentes espèces de grains (/49/)*

La **ventilation** est la méthode la mieux adaptée pour refroidir la masse de grains par utilisation des frigories de l'air froid. Elle peut aussi contribuer au séchage des produits.

La ventilation en aération (du grain) est réalisée par une circulation d'air forcé à travers la masse de matières ensilées. L'air pulsé ou aspiré par un ventilateur est distribué par un réseau plus ou moins complexe de gaines de distribution.

L'efficacité de la ventilation peut être mise en défaut, en cas de l'inobservation de quelques principes de base ; des auto-échauffements, voire des incendies de cellules peuvent alors se produire. On peut, indiquer notamment que :

- la ventilation doit s'effectuer avec un air d'une température nettement inférieure à celle du grain, pour ne pas le réchauffer,

- l'installation doit être bien calculée et bien conçue pour répondre aux objectifs de débits, en particulier :
  - . le type de ventilateur doit être en rapport avec la charge de ventilation. Celle-ci dépend des caractéristiques de la masse ensilée et du circuit de distribution (taille des cellules, nombre de cellules, taille des grains, ...) ; le temps d'établissement du circuit de ventilation, représenté par la durée du passage de l'air à travers le stockage peut être long si la masse ensilée est "épaisse" et "compacte" et si le ventilateur est sous-dimensionné ; dans cette situation, un risque d'auto-échauffement existe, surtout si les produits sont humides,
  - . la conception des circuits de ventilation doit éviter les coudes et les rétrécissements inutiles, créateurs de pertes de charge ; ceci est particulièrement important pour la ventilation des silos horizontaux qui comporte des circuits de distribution à la fois longs et complexes,
  - . le maintien des débits de ventilation doit être assuré dans le temps par un entretien rigoureux des installations notamment des ventilateurs et des circuits de distribution ; ce dernier point concerne surtout les silos horizontaux dont la ventilation est réalisée par des canalisations noyées dans la masse du grain qui sont particulièrement vulnérables et peuvent subir des détériorations lors des vidanges des cellules,
- en dehors des phases de ventilation, les canalisations de soufflage doivent être maintenues étanches (absence de fuite d'air),
- les dépôts de poussières présentes dans les conduites de soufflage d'air doivent être régulièrement enlevés.

L'installation du ventilateur doit se faire de préférence à l'extérieur, mais il faut veiller au bruit pour l'environnement.

En dehors des risques d'auto-échauffement que peut entraîner une ventilation déficiente, l'enjeu économique de la ventilation est important au plan des consommations d'énergie, et de la valorisation des matières (pertes de poids, attaques d'insectes, développement de moisissures). Pour aider les organismes stockeurs, la FFCAT a édité des règles de ventilation pour les céréales et les oléoprotéagineux (/50/).

Au niveau des techniques, celle la plus couramment utilisée est la ventilation par soufflage dans laquelle la cellule est sous pression et l'air circule dans le sens ascendant.

Avec cette technique, l'air, comprimé par le ventilateur, subit un réchauffement qui peut atteindre dans certains cas 10°C.

Ce phénomène qui constitue le principal inconvénient de la ventilation soufflante est d'autant plus marqué que le grain est traversé sur une grande hauteur, et que la vitesse de refroidissement désirée est grande.

Pour supprimer cet inconvénient, il est possible de souffler de l'air refroidi artificiellement. Cette technique, au demeurant coûteuse en investissement et en énergie, est réservée dans la pratique aux produits dont le coût d'une dégradation est élevé.

Depuis quelques temps on assiste à un début de développement de la ventilation par aspiration, dans laquelle l'air entre par le haut de la cellule, passe par le grain, et ressort en bas de la cellule à travers le ventilateur.

Avec cette technique, le réchauffage de l'air par compression dans le ventilateur, a lieu après son passage dans le grain, ce qui constitue un avantage indéniable pour le refroidissement des masses ensilées dès la récolte.

Par contre, son utilisation est parfois délicate et problématique, la circulation de l'air dans le sens descendant implique de ne pas compléter une cellule en cours de ventilation par des grains chauds, pour ne pas risquer un échauffement dû aux effets de condensation de vapeur d'eau.

Les problèmes techniques notamment de résistance du toit des cellules que pose la mise en place du ventilateur au sommet des cellules et qui permettraient de s'affranchir de ce risque d'échauffement apparaissent comme rédhibitoire pour un développement important de cette technique de ventilation.

Pour les silos dépourvus d'installation de ventilation, l'utilisation du **transilage** pour refroidir les produits ne permet pas des performances très élevées, le refroidissement ne s'opérant que très localement.

Le transilage consiste à déplacer les produits agro-alimentaires d'une cellule dans une autre, afin de les refroidir au cours de leur manutention. A noter que le transilage, en occasionnant la casse des grains, peut constituer, si l'opération est renouvelée, un facteur aggravant pour la production de poussières.

En résumé, il est très important de s'entourer d'un maximum de précautions sur la qualité des matières avant de les ensiler afin de limiter les risques d'échauffement (taux d'humidité, température), notamment pour les stockages de longue durée.

### ***Contrôle de températures***

La mesure de température des matières stockées dans les cellules, doit intervenir dès l'ensilage.

Plusieurs types de sondes (thermocouple à résistance, à thermistance, ...) existent qui présentent des caractéristiques d'utilisation différentes au niveau des performances, du coût et de la maintenance.

Le degré de sophistication des installations de mesure de température est très variable.

Dans les systèmes les plus simples, un opérateur se déplaçant sur le tas de produits, effectue des mesures de température avec un appareil portable, en enfonçant une canne supportant la sonde dans la masse ensilée.

Cette technique simple, qui a ses limites, est adaptée à la surveillance des cellules, dont l'épaisseur de stockage est faible (cas de certains silos horizontaux).

Les systèmes de silothermie adaptés à la surveillance des grandes cellules (cellules principales et as de carreau des silos verticaux notamment), comprennent des sondes de température mises en place à demeure, des circuits de transmission de l'information, des appareils de traitement pour la conversion des signaux électriques en mesure de température.

Les informations fournies par les différents capteurs de températures sont rassemblées sur un tableau synoptique.

Sur certaines installations des accessoires sont ajoutés : scrutateur automatique, alarme en cas de dépassement de seuil pré-programmé, imprimante, asservissement à l'installation de ventilation.

Le principe de mesure des sondes de température utilisées en silothermie, conduit à une mesure très localisée au voisinage de la sonde, et non pas à une mesure à distance dans la masse du grain, ce qui peut avoir des conséquences sur la précocité de la détection des échauffements.

Une étude réalisée conjointement par l'ITCF et l'INRA (/49/), a montré que, du fait de la mauvaise conductibilité thermique des grains, un échauffement localisé se produisant à une distance relativement proche d'une sonde de température peut passer inaperçu.

Aussi dans la pratique, il est préconisé de faire une double scrutation thermométrique, la seconde étant précédée d'une courte ventilation de 15 minutes, pour provoquer la migration rapide d'une éventuelle zone chaude vers un point de mesure. En cas d'écart important (on peut retenir que pour 5°C : il y a doute et il faut reconfirmer, avec 10°C : la présence d'un point chaud est très probable).

Pour détecter un début d'auto-échauffement, il est possible de compléter la mesure de température à l'intérieur de la masse ensilée, par des mesures de température de l'air sortant de la cellule pendant la ventilation pour détecter des variations suspectes, et à défaut, de détecter, si on est entraîné, l'odeur caractéristique d'une matière agro-alimentaire en échauffement.

Cette mauvaise sensibilité de la détection pose des problèmes pour les silos qui ne sont pas équipés de ventilation, pour lesquels il faut être très prudent sur les données fournies par la silothermie, et procéder avec précaution à un transilage même inutile pour déplacer la masse du grain et permettre ainsi de détecter un éventuel échauffement.

Au plan de la position des points de mesure de température, la norme NFY 30-106 préconise de disposer un point de mesure par sphère de rayon 3 à 5 m, et de prévoir un recoupement entre les sphères.

Soulignons qu'il est préférable de placer les sondes au niveau des points de chute où s'accumulent les impuretés lourdes et les grains cassés, et des zones où la hauteur de grain est plus importante. A ces endroits, l'air passant difficilement, le refroidissement s'effectuera mal et les risques d'échauffements seront plus importants. Ceci est particulièrement vrai pour les silos horizontaux.

Pour les installations de silothermie, la bonne conservation dans le temps du positionnement des sondes de température, ainsi que le bon état est difficile à assurer, du fait du déplacement possible des sondes lors des opérations d'ensilage et de déchargement par les engins de manutention, ou le flux des produits. Dans certains cas, l'effort de traction exercé sur les câbles est très important et doit être pris en compte dès la conception de l'installation de silothermie. Il y a donc lieu d'une part d'en tenir compte dans l'interprétation des mesures de température, et d'autre part, d'assurer la maintenance des câbles de mesure avant l'ensilage d'une cellule.

### ***Lutte contre l'incendie***

Quand une montée anormale de la température dans une cellule indiquée par la silothermie ou par tout autre moyen est détectée, laissant supposer un début d'incendie, la vidange de la cellule incriminée peut être entreprise.

Cette technique bien adaptée aux cellules verticales, l'est beaucoup moins pour les cellules des silos horizontaux du fait des masses importantes ensilées, et des plus faibles performances des installations de vidange.

Lorsqu'il n'a pas été possible de traiter au début de son développement un incendie de cellule notamment par vidange de la cellule, la lutte doit être engagée pour éteindre l'incendie.

Il faut souligner que les systèmes à pulvérisation d'eau (déluge) permettent de refroidir les parois des installations et des bâtiments mais non d'arrêter des feux couvants et des incandescences avec combustion.

Pour les matériaux granulaires présentant des feux couvants, seule l'injection prolongée de gaz inerte ou inertage, combinée si nécessaire avec de la mousse, en permettant de balayer l'ensemble de la masse auto-échauffée ou en combustion est véritablement efficace et conduit à l'inertisation. Il est rappelé que l'utilisation de lance, est à proscrire compte tenu du risque d'explosion engendré par le soulèvement de poussières.

C'est particulièrement le cas, pour les feux dans les cellules de stockage vertical de grandes capacités, de produits agro-alimentaires pour lesquelles un risque explosion existe en cas de formation d'atmosphères explosives (poussiéreuses ou gazeuses) (/17/).

L'objectif de l'inertage, est à la fois de stopper le feu couvant en le privant de comburant, et de prévenir le risque d'explosion.

Pour faciliter la mise en œuvre de l'opération d'inertage, il est souhaitable qu'un accord préalable soit passé avec un fournisseur pour définir le type de gaz inerte à utiliser, les conditions d'une livraison rapide d'une quantité de gaz suffisante ainsi que les caractéristiques techniques telles que les pressions d'alimentation, les types de raccord à mettre en place sur l'installation, ... La disposition à demeure d'une grande quantité de gaz inerte n'est donc pas obligatoire.

Cette technique délicate de mise en place impose d'informer les pompiers et si possible de les faire participer aux entraînements.

Par ailleurs, le silo doit être suffisamment étanche et équipé de préférence à l'avance, de piquages pour l'injection en partie basse et en partie haute de gaz inerte et le contrôle de l'opération.

Le gaz inerte injecté dans le ciel du silo permet uniquement d'éviter l'explosion. Le gaz injecté dans la base du silo est destiné à lutter contre le feu ; le lieu des piquages doit se situer à 1,5 m environ au-dessus du dispositif d'extraction du silo, la hauteur de produit à ce niveau faisant office de bouchon (vis-à-vis des entrées d'air et des sorties de gaz inerte).

Pour définir les paramètres de l'injection (volume, pression), les caractéristiques dimensionnelle et dynamique de la cellule doivent être connues.

Au niveau du suivi du déroulement du traitement de l'incendie, on doit pouvoir mesurer au minimum la température, le taux de CO (évolution de l'incendie) dans le silo et d'O<sub>2</sub> (degré d'inertage).

Pendant toute l'opération, on doit veiller à ne pas exposer le personnel au risque d'asphyxie.

L'inertage doit commencer (en préalable de l'opération d'inertage de la masse stockée) par le ciel. On inerte ensuite le bas pour compenser le tirage thermique et éviter les entrées d'air dans le silo. L'injection doit être régulière pour éviter de mettre en suspension des poussières ou de créer des charges d'électricité statique dans la mesure où ces deux incidents peuvent être générateurs d'explosions de poussières. L'opération peut parfois durer plusieurs jours. A titre indicatif, la quantité de gaz inerte à prévoir pour se mettre hors explosion peut être de l'ordre de 2 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> ou 1 Nm<sup>3</sup>N<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

La vidange du silo peut ensuite se faire quand la température à l'intérieur des produits est descendue au-dessous de 150°C par exemple, en continuant, si nécessaire, l'injection de gaz inerte. On peut procéder alors à l'arrosage des produits en sortie pour éviter la formation de nuages de poussières et pour en assurer le refroidissement.

L'avantage de cette technique en dehors de prévenir le risque explosion, est d'éviter au maximum la prise en masse dans le silo si l'incendie est traité au début de son développement et les difficultés de nettoyage qui s'ensuivent.

Le principal inconvénient est sans doute, en dehors du coût, le temps nécessaire à l'extinction qui est parfois long. D'autre part, pour utiliser cette technique, il faut se trouver non loin d'un lieu de production ou de stockage de gaz inertes.

Pour les cellules horizontales, lorsque l'incendie est encore localisé, et ne s'est pas propagé à une trop grande partie de la masse ensilée, un accès dans la masse ensilée peut être pratiquée au chouleur, et les produits incandescents peuvent être sortis à l'extérieur de la cellule pour y être arrosés. Une procédure précise est à définir.

## **I.2. Les tours de manutention**

Les tours de manutention contiennent des matériels (élévateur à godets, nettoyeur, cyclone, filtre) qui peuvent donner lieu à la fois à des émissions de poussières (nuages et dépôts) et à des sources d'inflammation (explosion à l'intérieur d'un matériel par exemple) et constituent donc un lieu privilégiée pour le démarrage d'une explosion.

Dans le cas d'une construction résistante de la tour de manutention, l'explosion qui se développe va se transmettre vers l'espace sous cellule et la galerie supérieure, avec une violence renforcée.

Pour limiter la violence des explosions, il est nécessaire de constituer un découplage dans la transmission de l'explosion entre la partie inférieure (espace sous cellules) et la partie supérieure (galerie supérieure et ciel de silo) en fragilisant au maximum les parois de la tour (squelette métallique et parois en bardage par exemple). Dans le cas de tours de manutention en béton, la norme NF U54-540 préconise de prévoir que 25 % de la surface latérale serve d'évents.

Au plan de la prévention, il est souligné qu'une attention particulière doit être portée au nettoyage des dépôts de poussières dans les cages d'ascenseurs.

## **I.3. Les espaces sous cellules**

Une construction résistante et peu ouverte vers l'extérieur des espaces sous cellules peut être à l'origine de surpressions importantes en cas d'explosion interne, et donner lieu à des effets de souffle et de flamme vers l'extérieur (à travers les baies d'éclairage) et favoriser la propagation de l'explosion dans les installations contiguës telles que les tours de manutention (à travers les ouvertures de communication). Il est conseillé d'installer le maximum de surface éventable compatible avec la stabilité de la structure. La construction des espaces sous cellules dont les parois extérieures participent directement à la tenue mécanique des cellules verticales, doit prendre en compte le risque d'effondrement de ces dernières.

Les mesures préventives pour limiter les risques d'explosion dans les espaces sous cellules consistent à limiter les émissions et dépôts de poussières (transporteurs capotés, dépoussiérage, nettoyage) et à éliminer les sources d'inflammation notamment sur les engins de manutention.

#### **I.4. Les galeries supérieures**

Les galeries supérieures de manutention peuvent contribuer, si elles sont de construction résistante, au renforcement l'explosion provenant de la tour de manutention, et induire, à l'intérieur de cellules de stockages verticales, un jet puissant de poussières et de flamme. Des explosions très violentes peuvent alors se produire à l'intérieur des cellules, comme cela a été le cas dans des accidents majeurs de silos.

Une partie des parois doit pouvoir être soufflée en cas d'explosion, afin de limiter la surpression interne.

#### **I.5. Les galeries de manutention**

Les silos de stockage de produits agro-alimentaires (notamment de céréales) comportent souvent des galeries souterraines et des galeries aériennes, qui peuvent, si elles sont suffisamment résistantes à la pression, favoriser le renforcement d'une explosion en permettant sa propagation dans plusieurs installations des silos.

On peut ainsi arriver à la destruction de la tour de travail et des bâtiments ou cellules de stockage. De tels accidents sont déjà survenus et pour la France on peut notamment citer l'accident dans un silo de stockage de maïs où plus de 500 m de galerie souterraine ont été parcourus par une explosion.

Pour lutter contre le risque de propagation dans les galeries de manutention deux méthodes sont possibles :

- la construction de la galerie en matériaux légers, qui vont céder rapidement sous la surpression de l'explosion et assurer un découplage,
- la mise en place de dispositifs pour arrêter l'explosion.

L'installation d'éléments légers soufflables en cas d'explosion, est une solution bien adaptée pour la protection des galeries aériennes.

Par contre, la protection par événements n'est pas adaptée aux galeries souterraines résistantes, car elle peut aller au contraire de l'effet désiré en renforçant la violence de l'explosion, et d'autres méthodes sont à rechercher.

Des systèmes d'arrêt-barrage étant utilisés pour la protection des galeries minières, il est apparu intéressant d'examiner les conditions possibles d'application d'un tel système pour les galeries souterraines de silos qui sont de section nettement plus faible (quelques m<sup>2</sup> au lieu de 10 m<sup>2</sup> et plus) et de longueur plus courte (souvent la centaine de mètres au lieu de plusieurs milliers de mètres).

Des essais pour examiner l'efficacité d'arrêts-barrages, pour stopper la propagation d'explosions de poussières agro-alimentaires ont été réalisés récemment en Pologne à la Mine Expérimentale BARBARA avec des poussières de blé, notamment dans le cadre des travaux du présent guide (/51/).

Les résultats de ces campagnes d'essais ont montré qu'il était possible d'éteindre la flamme d'explosions de poussières de produits agro-alimentaires dont la vitesse de propagation se situait entre 100 m/s et 150 m/s, en disposant dans la galerie d'essai des systèmes d'arrêts-barrages (passifs et actifs).

A notre connaissance, il n'existe pas actuellement sur le marché d'arrêt-barrage actif (ou déclenché) opérationnel, qui présente l'avantage par rapport aux arrêts-barrages passifs d'avoir un fonctionnement indépendant de la violence de l'explosion. Concernant les arrêts-barrages passifs à eau, les experts s'accordent pour dire qu'ils ne fonctionnent correctement que si le souffle produit par l'explosion est suffisant pour engendrer une vitesse de l'air dans la zone où sont installés les bacs à eau de l'ordre de 90 m/s.

Des essais réalisés à l'INERIS ont prouvé la réalité de ce seuil de fonctionnement des arrêts-barrages passifs à bacs d'eau qui correspondent à une pression dynamique de 50 mbar. Pour les arrêts-barrages passifs à stérile, ce seuil est plus faible et de l'ordre de 10 à 20 mbar.

Contrairement aux chantiers miniers où il existe des zones de plus fortes probabilités de démarrage d'une explosion, dans une galerie souterraine de silos une explosion est susceptible de se produire en tout point de la galerie, et la surpression induite au droit d'un arrêt-barrage passif, risque d'être insuffisante pour le faire fonctionner.

Par ailleurs, les galeries souterraines de silos étant de faible élancement, la zone disponible peut se révéler trop courte pour obtenir l'extinction complète de la flamme.

L'arrêt de l'explosion ne peut donc être assurée en toute circonstance par la mise en place d'arrêts-barrages passifs dans les galeries souterraines des silos, mais on peut au moins en attendre un certain affaiblissement de la violence de l'explosion. Dans tous les cas une étude particulière est requise.

En l'absence actuellement d'un moyen de protection parfaitement adapté au cas des galeries souterraines résistantes des silos, il y a lieu de veiller particulièrement à la prévention dans ces galeries des dépôts de poussières et des sources d'inflammation, et de veiller au découplage de l'explosion au niveau des installations reliées à cette galerie (construction peu résistante).

## **I.6. Les postes de réception**

### ***Déchargement gravitaire***

Dans une installation de stockage, le déchargement des matières dans les fosses de réception, constitué avec le remplissage des cellules, les opérations qui entraînent des émissions de poussières importantes.

Les fosses de réception doivent pour cette raison être séparées physiquement des bâtiments principaux, pour limiter la formation de dépôts de poussières hors des appareils.

Pour ce type d'installation, la prévention de l'explosion peut être réalisée de deux manières :

- en ouvrant largement le poste de déchargement, pour permettre la circulation de l'air et limiter ainsi le confinement,
- en collectant les poussières émises au déchargement par un dispositif de dépoussiérage séparé (avec évacuation des poussières) et un poste de déchargement fermé sur plusieurs faces.

La deuxième solution présente l'avantage de limiter la diffusion des poussières dans l'environnement et de réduire l'humidité à l'intérieur de la fosse de réception.

Par ailleurs, les fosses de réception constituent des vecteurs de sources d'inflammation potentielles, qui nécessitent des mesures de prévention :

- les produits réceptionnés peuvent contenir des corps étrangers (pierre, pièce métallique),
- des amas de produits humides peuvent s'être auto-échauffés, après un séjour prolongé dans la fosse de réception.

Les fosses de réception sont recouvertes d'une grille, dont la destination est de retenir les corps étrangers indésirables.

Les installations de stockage pouvant stocker plusieurs produits, la dimension des mailles est choisie pour les produits les plus gros, ce qui ne va pas toujours dans le sens d'une élimination optimum des corps étrangers "dangereux".

Un juste compromis doit donc être trouvé entre les impératifs de fonctionnement des installations et de sécurité.

Lorsque l'utilisation d'une grille à grosse maille se révèle absolument nécessaire, des mesures de prévention vis-à-vis des corps étrangers en aval peuvent être prises notamment lors de la préparation des matières.

### ***Déchargement pneumatique***

Le déchargement pneumatique des produits pose des problèmes spécifiques de sécurité liés au transport des produits par flux d'air :

- Il est difficile, au risque de faire chuter les performances, de retenir le maximum de corps étrangers au niveau de l'aspiration, des pierres ou des morceaux de métal peuvent donc circuler à grande vitesse dans les canalisations, et créer des étincelles mécaniques.
- Le frottement des produits sur les conduites peut engendrer des charges électrostatiques pouvant être à l'origine d'étincelles électrostatiques.

La prévention de ces risques est traitée dans le chapitre I.8 de la septième partie du guide consacré à la manutention pneumatique.

## **I.7. Les postes d'expédition**

Avant leur conditionnement en sacs ou leur expédition en vrac, les produits agro-alimentaires sont stockés dans des cellules de volume limité (d'une centaine de m<sup>3</sup> en général).

Ces cellules pouvant être alimentées par des procédés de chargement induisant de la turbulence (transport pneumatique notamment), ou se situer à l'intérieur de bâtiments ou à proximité du personnel, il doit être envisagé de les protéger par des événements d'explosion.

### ***Expédition en sacs***

Dans le cas de conditionnement en sac, afin de ne pas exposer le personnel occupé aux lignes d'ensachage à la flamme d'une éventuelle explosion, il doit être également envisagé de bien séparer les postes de conditionnement des installations du silo susceptibles d'être le siège d'explosion. Par ailleurs, le remplissage (et la vidange) des G.R.V.S. (grands récipients vrac souples) plus couramment appelés "conteneurs souples" ou "big-bag" constitués généralement de polypropylène et de polyéthylène entraîne le transfert de charges électrostatiques qui s'accumulent sur l'ensemble contenu - produits pulvérulent.

Cette accumulation peut être dangereuse et provoquer l'inflammation d'un nuage explosif de poussières.

Les produits agro-alimentaires pulvérulents qui ont des énergies minimales d'inflammation comprises entre quelques dizaines de millijoules et un peu plus d'un joule peuvent être concernés par ce type d'explosion, et les G.R.V.S. utilisés doivent être adaptés à ce risque (/52/).

Après conditionnement, pour le stockage des sacs en entrepôt, des dispositions adaptées à la taille de stockage, doivent être prises afin de limiter les risques de propagation d'un incendie dans l'entrepôt, et aux autres parties du silo. On peut citer notamment :

- la limitation des hauteurs de stockage,
- la séparation des aires de stockage,
- l'installation de dispositifs de désenfumage,
- la séparation par des parois coupe-feu,
- la mise en place de système de détection d'incendie et de lutte (RIA par exemple).

Le papier, le carton, les films d'emballage, les palettes en bois, s'ils sont stockés en quantités importantes dans l'entrepôt peuvent représenter un facteur aggravant dans le développement d'un incendie et doivent donc être entreposés à part séparément des produits agro-alimentaires.

### ***Expédition en vrac***

Dans le cas de l'expédition en vrac, des dispositions doivent être prises pour prévenir :

- les nuages de poussières par la mise en place notamment de point d'aspiration de poussières,
- des sources d'inflammations particulièrement pour les camions lorsque le poste de chargement est en partie confiné, en arrêtant le moteur du camion pendant le chargement, et en mettant à la terre le camion.

## **I.8. Les dispositifs de transport et de distribution**

### **I.8.1. Les dispositifs de transport**

#### ***Elévateurs à godets***

Ces installations dont la hauteur peut atteindre 60 mètres posent des problèmes de sécurité et constituent l'une des principales causes des explosions survenant dans les silos de stockage de produits agro-alimentaires, d'après les retours d'expérience d'accidents. Durant le fonctionnement des élévateurs à godets, de la poussière est en suspension en permanence, et peut être mise au contact de sources d'inflammation. On peut citer notamment parmi celles-ci :

- les étincelles d'origine mécanique à la suite d'un désalignement de la sangle, d'une rupture de la sangle, du coincement d'un corps étranger,
- les sources chaudes pouvant provenir d'échauffements de paliers, de frottements et de la combustion de la sangle, d'une accumulation de matières agro-alimentaires auto-échauffées,
- les étincelles d'origine électrostatique dangereuses dans le cas de produits à faible énergie d'inflammation comme le sucre.

Par ailleurs, l'explosion peut parcourir l'élévateur, entraîner l'éclatement du caisson, induire des effets à l'extérieur de l'élévateur.

En cas de présence de dépôts de poussières à proximité de l'appareil, une explosion secondaire peut se produire, dont les conséquences pour l'environnement vont dépendre de la nature du bâtiment abritant l'élévateur à godets.

Compte tenu des risques encourus, des mesures visant à limiter l'occurrence des sources potentielles d'inflammation, et les conséquences d'une éventuelle explosion à l'intérieur des élévateurs à godets doivent être prises.

Au plan de la prévention des sources d'inflammation, les mesures de base suivantes peuvent être adoptées :

- utilisation de matériel intégrant la lutte contre le risque explosion dès la conception (palier extérieur, réglage de la tension de la sangle, trappe de débouillage, résistance de la structure extérieure),

- mise en place de capteurs pour détecter les anomalies de fonctionnement (capteur de température, détecteur de rotation, déport de bande, détecteur de bourrage, ...),
- visite et entretien périodique des installations (des équipements mécaniques, de la sangle, des godets). La présence de trappes de visite judicieusement placées facilite ces interventions,
- points d'aspiration des poussières en tête et en pied de l'élévateur,
- nettoyage des poussières autour de l'élévateur.

Dans le cas où le risque d'explosion est important, soit au niveau de l'occurrence (produit à réactivité élevée), soit au niveau des dommages prévisibles (bâtiment en béton, bâtiment en communication avec d'autres bâtiments), des mesures supplémentaires sont préconisées. On peut citer :

- . la suppression des corps étrangers par la mise en place en amont d'épierreur et de séparateur magnétique,
- . l'utilisation de sangle résistante à la flamme,
- . l'utilisation de godets en plastique,

De plus, le choix d'une bande en matériau "antistatique" ayant une résistivité  $\rho_s$  de surface suffisamment faible, est fortement recommandé pour des produits à faible énergie d'inflammation. Par ailleurs, les parties conductrices des équipements doivent être reliées à la terre.

Pour la protection, l'installation d'évents est favorable à la limitation du niveau de pression interne et donc, à la réduction des conséquences des effets d'une explosion sur l'environnement de l'installation. Cependant, il n'est pas possible d'avoir la certitude absolue de pouvoir préserver l'intégrité de l'élévateur compte tenu, en général, de la faible résistance de la structure, comme l'indique la norme expérimentale NF U 54-540 de décembre 1986.

En tout état de cause, l'installation d'évent, en tête (et au pied) des élévateurs est recommandée, notamment pour réaliser un découplage vis-à-vis des appareils de manutention situés en amont et en aval de l'élévateur.

Par ailleurs, la norme NFPA 68 note également la possibilité d'installer des dispositifs de suppression d'explosion (extincteurs déclenchés) aux points d'alimentation et de décharge de l'élévateur afin de limiter la propagation d'une explosion dans les structures ou dans d'autres équipements (et de particules incandescentes).

Dans le cas de la protection par extincteurs déclenchés, une étude spécifique est nécessaire pour déterminer les paramètres d'installations appropriées au cas traité (type, nombre, position des bouteilles et des détecteurs).

Dans ce contexte, compte tenu de la difficulté de protéger convenablement les élévateurs à godets, le risque d'une explosion secondaire dans le bâtiment où ils sont installés existe. Il est donc préconisé d'installer les élévateurs dans des bâtiments peu résistants, voire mieux, de les disposer à l'extérieur des bâtiments.

### ***Transporteur à bande***

Au plan des sources d'inflammation, les frottements d'une bande sur l'infrastructure ou les échauffements de paliers, peuvent générer des points chauds (début de combustion de la bande, ou des produits transportés) susceptibles d'être la cause d'explosions et d'incendies à l'intérieur des cellules.

Des mesures existent pour se prémunir de ce risque notamment celles prévues par l'arrêté du 25 janvier 1983 :

- utilisation de matériel apte à limiter les causes d'inflammation (sous-ensembles mécaniques et électriques),
- mise en place de dispositifs permettant de déceler rapidement les anomalies de fonctionnement pour y remédier (détecteur de rotation, sonde de température, déport de bande, sonde de bourrage, arrêt d'urgence, ...),
- visite et entretien régulier des installations,
- mise en place de moyens de lutte contre l'incendie aux endroits les plus vulnérables.

Si les conséquences d'un incendie de bande peuvent être importantes pour le site de stockage en terme économique (engins de manutention stratégique) ou de risque (installations "sensibles" situées en aval) des mesures complémentaires sont recommandées notamment (/53/, /54/) :

- l'utilisation de bande résistante à la flamme,
- l'optimisation des systèmes de lutte contre l'incendie (détecteur, système d'extinction automatique).

De plus, le choix d'une bande en matériau "antistatique" (ayant une résistivité  $\rho_s$  de surface suffisamment faible), est fortement recommandé pour des produits à faible énergie d'inflammation. Par ailleurs, les parties conductrices des équipements doivent être reliées à la terre.

Au plan des poussières, l'utilisation de transporteurs à bande, nécessite des dispositions particulières pour limiter la production de poussières :

- limitation des vitesses des transporteurs et des hauteurs de chute,

- limitation de la vitesse du courant d'air au-dessus des transporteurs. L'expérience indique que le soulèvement de poussières peut se produire pour des vitesses voisines de 5 m/s,
- aspiration des poussières aux points de transfert, capotage du brin supérieur,
- installation de dispositif de nettoyage du brin inférieur de la bande quand cela se justifie (produit humide et collant).

### ***Transporteurs métalliques***

L'utilisation de transporteurs métalliques (redlers, vis,...) bien entretenus est favorable à la réduction des dépôts de poussières dans les galeries de manutention par émission ou chute des produits, mais ils ont tendance à plus casser les grains.

Pour prévenir les sources d'inflammations les mesures suivantes peuvent être adoptées :

- mise en place de capteurs pour détecter les anomalies de fonctionnement (capteur de température, détecteur de rotation, détecteur de bourrage....),
- visite et entretien périodique des installations (des équipements fixes et des équipements mobiles),
- points d'aspiration des poussières.

Comme pour les élévateurs, la structure allongée des convoyeurs métalliques peut favoriser la propagation d'une explosion.

La conception des installations doit intégrer ce risque, et prévoir des surfaces de moindre résistance pour assurer un découplage de l'explosion, comme par exemple, des fixations légères des tôles de fermetures des redlers.

### ***Manutention pneumatique***

Le transport du produit solide en vrac est réalisé au moyen d'un courant gazeux dans une conduite étanche (/55/).

Deux types d'installations peuvent être distingués :

- les transports en phase diluée (vitesse du gaz élevée : 15 à 30 m/s, faible concentration de produits) comme pour les installations de dépoussiérage,
- les transports en phase dense (vitesse du gaz faible : 1 à 8 m/s, forte concentration des produits) comme pour les installations de manutention pneumatique utilisées dans les silos pour le déchargement à l'arrivée des produits, ou pour les transports de produits d'une installation à une autre.

Dans une installation de manutention pneumatique on peut distinguer trois zones :

- la zone d'introduction du produit dans le circuit de transport pneumatique,
- le circuit de transport pneumatique,
- la zone de séparation gaz / solide à l'arrivée du circuit.

Les mesures générales à adopter sur ce type d'installation sont les suivantes :

- pour la prévention des étincelles électrostatiques, l'interconnexion des éléments, la mise à la terre, et le choix des matériaux constitutifs,
- pour la prévention des étincelles mécaniques, la mise en place de dispositifs pour éliminer les corps étrangers, en amont de l'installation de manutention mécanique,
- pour la prévention des masses incandescentes, élimination des points de rétention où les poussières s'accumulent pour éliminer les auto-échauffements de produits.

Par ailleurs, il faut veiller particulièrement à la protection des installations réceptrices alimentées par une manutention pneumatique, l'explosion susceptible de s'y développer pouvant être plus violente que pour une alimentation gravitaire du fait d'une turbulence plus importante.

#### ***Engins à moteur thermique :***

La présence d'engins comportant des installations thermiques (chouleur, camion, chargeuse, ...) est susceptible de générer des sources potentielles d'inflammation qui, compte tenu de la présence de poussières sous forme de nuages ou de dépôts, peuvent donner lieu à des explosions.

Selon que les véhicules fonctionnent en permanence dans un environnement poussiéreux comme les chouleurs, où qu'ils y soient de manière temporaire pour des opérations bien précises comme les camions, les mesures de prévention préconisées sont différentes et vont consister en des dispositions constructives pour les véhicules affectés à l'exploitation et des définitions de consignes pour les véhicules en transit.

**Pour les véhicules affectés à l'exploitation** les recommandations pour les dispositions constructives, concernent les aspects suivants :

- Surfaces chaudes : les composants qui présentent des températures élevées peuvent être confinés dans des enveloppes afin d'éviter leur contact avec l'atmosphère dangereuse, en s'inspirant des protections utilisées pour le matériel électrique.

La température maximale de surface est celle des équipements susceptibles de s'échauffer fortement qui peut être surveillée en permanence par un dispositif donnant un ordre d'arrêt lorsqu'un seuil est dépassé. Ce dispositif doit être fiable, à sécurité positive et doit tenir compte de l'inertie thermique.

Les moteurs diesel, un moteur turbocompressé peut atteindre, sur le corps du turbocompresseur des températures de l'ordre de 450°C. Les températures du circuit d'échappement décroissent en fonction de l'éloignement par rapport au moteur, au niveau de la sortie des gaz, on peut avoir une température dans certains cas supérieure à 100°C.

- Étincelles d'origine mécanique : les étincelles qui se produisent lorsqu'il y a frottements ou choc très violents peuvent être évitées à la conception :
  - en garantissant des distances suffisantes entre les parties mobiles possédant une vitesse importante et les parties fixes (ventilateur, arbre, accouplement) et en empêchant l'introduction de corps étrangers,
  - en utilisant des matériaux ou des couples de matériaux non-générateurs d'étincelles (laiton, bronze, cuivre, acier inoxydable, fonte) lorsqu'il y a risque de friction fonctionnelle ou non (frein, embrayage, galet, fourche),
  - en proscrivant pour les pièces susceptibles de frotter avec du fer ou de l'acier rouillé, l'utilisation d'alliages légers contenant plus de 6 % de magnésium. Cette restriction qui est basée sur l'expérience acquise dans le domaine du matériel électrique est jugée insuffisante par certains experts qui voudraient également limiter la quantité d'aluminium à 10 %,
  - en confinant les composants générateurs d'étincelles, qui ne peuvent pas de par leur conception répondre aux exigences définies ci-dessus, dans des enveloppes appropriées.
- Étincelles d'origine électrostatique : pour les poussières à faible énergie d'inflammation il faut éviter la production de charges électrostatiques et, si celle-ci ne peut pas être évitée, empêcher leur accumulation en les évacuant vers la terre.

Pour cela il faut éviter l'utilisation d'éléments en matière plastique ayant des surfaces importantes et dont la résistance d'isolement de surface dépasse  $10^9$  ohms si ces éléments sont susceptibles d'être chargés (siège, paroi, écran, ventilateur). La norme CENELEC EN 50014 fournit une méthode de mesure.

Les organes de transmission, telles que les courroies, doivent être "antistatiques" (ayant une résistivité de surface  $\rho_s$  suffisamment faible).

Pour permettre l'évacuation des charges, l'équipement doit être relié à la terre ; pour les équipements mobiles sur rails, la liaison par les roues ou galets métalliques est suffisante.

En ce qui concerne les équipements possédant des pneus ou des bandages plastiques, il faut que la résistance entre le sol et l'équipement ait une valeur suffisamment faible (au sens de l'électricité statique) ;  $10^6$  ohms est une valeur minimale qu'il ne faut pas dépasser. Toutefois, l'utilisateur devra tenir compte de la nature de son sol. En effet, une telle mesure est illusoire lorsque l'équipement évolue sur un revêtement plastique isolant.

- Étincelles de combustion : Dans certains cas, en fonction de l'entretien du moteur, des particules incandescentes peuvent être émises par l'échappement des moteurs.

Le projet de norme EN 1834-3 qui définit la protection des moteurs diesel fonctionnant en atmosphères explosibles poussiéreuses, impose un filtre à air efficace à l'admission du moteur et un pare étincelles à l'échappement. Des essais sont définis par la norme, qui ont pour but de démontrer l'efficacité de ce pare-étincelles.

**Les véhicules en transit** présentant toutes les sources d'inflammation active citées précédemment, la solution radicale pour éviter les risques d'explosion serait l'exclusion de ces véhicules.

Dans la mesure où le chargement à l'extérieur est impossible, il semble inconcevable d'imposer toutes les exigences constructives définies dans les projets de normes précédents à des camions.

Les risques prépondérants sont liés à la présence simultanée d'un nuage de poussières et de sources d'inflammation active sur le camion. Le nuage peut être créé :

- soit par le camion, par l'intermédiaire des gaz d'échappement ou par une vitesse excessive,
- soit par la chargeuse, au moment du chargement de la benne.

Les sources potentielles d'inflammation prépondérantes sur le camion sont les surfaces chauffées, les gaz chauds, l'éjection de particules incandescentes à l'échappement et des étincelles liées aux décharges électrostatiques.

Les surfaces et gaz chauds à considérer sont ceux qui sont ou seront en contact avec le nuage de poussières. L'environnement immédiat du moteur n'est pas concerné puisque ce dernier est confiné dans son capotage.

Les charges électrostatiques à considérer sont celles stockées sur le camion et qui ont été produites pendant la circulation de celui-ci. Une fois le véhicule arrêté, elles s'écouleront vers la terre par l'intermédiaire des pneumatiques ou lorsque le conducteur descend du véhicule.

Selon la nature du sol, la résistance électrique des pneumatiques et l'humidité relative ambiante, le temps de charge ou décharge sera plus ou moins long. Dans l'hypothèse d'un temps long, il pourrait avoir production d'une étincelle entre une structure métallique reliée directement ou indirectement à la terre et une partie métallique du camion en liaison avec le châssis, par exemple un contact accidentel entre le godet de la chargeuse et un longeron de la benne du semi-remorque.

Il conviendrait d'interdire l'accès des camions en zone 20 et de limiter l'accès des véhicules non protégés dans les zones 21 et 22 préalablement définies et d'appliquer les consignes et dispositions suivantes en cas d'entrée dans ces dernières zones afin d'éviter la simultanéité d'un nuage de poussières et d'une source d'inflammation :

- limitation du nombre de camions présents simultanément dans le silo, à un seul camion à la fois,
- définition des parcours et des zones de circulation autorisés avec limitation des vitesses, pour :
  - éviter les zones où il existe des dépôts de poussières incontrôlés pouvant être soulevés par l'échappement du véhicule,
  - éviter les manœuvres pouvant conduire à des chocs avec les structures du bâtiment,
  - la circulation ne devra se faire que dans un seul sens, le camion une fois chargé doit repartir en marche avant afin d'éviter de soulever les poussières retombées du côté du chargement,
  - le côté gauche du camion (sortie des gaz d'échappement) de devrait jamais être à proximité des parois du bâtiment car c'est à ces endroits que les couches de poussières sont les plus épaisses.
- mise en place préalable, avant l'entrée dans le silo, d'un pare-étincelles empêchant l'éjection de particules incandescentes,
- arrêt du moteur avant et pendant le chargement (si possible),
- mise à la terre préalable avant le chargement ; cette mise à la terre a pour but de transférer les charges électrostatiques vers la terre,
- démarrage autorisé en dehors de tout nuage, le véhicule ne pouvant démarrer que lorsque le nuage est retombé,
- nettoyage fréquent des voies de circulation dans le stockage.

Une information des conducteurs concernés, serait souhaitable afin de les sensibiliser aux risques liés aux poussières inflammables (interdiction de fumer notamment) et d'expliquer le pourquoi de ces dispositions.

Les dispositions précédentes ont été établies en prenant comme hypothèse des camions en bon état et correctement entretenus. Le contrôle annuel des camions amenés à transiter dans les silos pourrait être complété par un examen visuel des circuits d'échappement afin de vérifier l'état de ces circuits et l'absence de perforation.

## **I.8.2. Les dispositifs de distribution**

### ***Ensilage des cellules***

Cette opération peut entraîner une production importante de poussières pouvant donner lieu à une explosion dans un milieu confiné (galerie ou grenier de manutention sur cellules).

L'utilisation de transporteurs métalliques, et pour les transporteurs à bandes la mise en place de dépoussiérage sur le chariot de distribution conjugué à une bonne étanchéité au niveau de la trappe d'ensilage permet de réduire notablement les poussières.

Pour les cellules verticales et les cellules horizontales, la chute des produits forme des poussières.

Les quantités de poussières en suspension sont plus importantes lorsqu'on utilise pour remplir les cellules des systèmes de projection ou de transport pneumatique et une vigilance accrue au plan de la prévention des sources d'inflammation est dans ce cas recommandée.

Compte tenu des risques d'explosion encourus, il y a tout intérêt chaque fois que cela est possible techniquement d'utiliser des dispositifs de distribution produisant le moins possible de poussières.

Par ailleurs, au plan de l'incendie, l'ensilage des silos plats, peut conduire à une concentration des poussières et des grains cassés au droit du point de chute des produits et accroître les risques d'auto-échauffement dans ces endroits.

Cet aspect particulier doit donc être pris en compte dans le contrôle des températures du stockage.

L'ensilage par engins à moteur thermique est traité dans le paragraphe précédent.

### ***Vidange des cellules***

Cette opération peut entraîner une production importante de poussières pouvant donner lieu à une explosion dans un milieu confiné (galerie souterraine, ou espace sous cellules).

L'utilisation de transporteurs métalliques et pour les transporteurs à bandes la mise en place de points de dépoussiérage au niveau des trappes de vidange et une bonne étanchéité au niveau de celle-ci permet de réduire notablement les poussières.

En fin de vidange, les systèmes utilisant un soufflage d'air pour fluidiser les produits, peuvent entraîner dans la cellule la formation d'un nuage de poussières plus important que pour les procédés vidange exclusivement gravitaire, et une vigilance accrue au plan de la prévention des sources d'inflammation est recommandée.

Dans le cas d'une vidange assurée totalement ou assistée par un système d'extraction (vis, extracteur) placé à l'intérieur de la cellule, il faut veiller particulièrement à prévenir les sources d'inflammation sur ces installations.

La vidange par engins à moteur thermique est traitée dans le paragraphe précédent.

### **1.9. Le nettoyage des produits agro-alimentaires en grain**

L'objet du nettoyage est de retirer des produits les gros déchets présents légers et lourds provenant des produits agro-alimentaires (tige, rafle) et de corps étrangers (pierre, métal).

Le nettoyage des grains humides avant séchage est très important pour éviter les dépôts dans le séchoir, souvent responsables d'incendie suite à un auto-échauffement. Le séchage participe également à la propreté des matières, facteur favorable pour diminuer les émissions de poussières lors des manipulations de produits.

Le nettoyage des grains, est loin d'être généralisé dans tous les silos, et même certains silos de collecte amenés à sécher du grain n'en sont pas toujours équipés.

Ces appareils de nettoyage qui débarrassent les produits des impuretés provenant des matières agro-alimentaires elles-mêmes, peuvent être complétés par des séparateurs magnétiques (pour éliminer les corps étrangers métalliques) et des épierreurs.

Cela doit être particulièrement le cas, lorsque le risque d'explosion par étincelle mécanique existe dans les installations situées en aval (broyeur, malaxeur, transport pneumatique, ...).

Les nettoyeurs sont en général implantés dans les tours de manutention avec les élévateurs à godets, et doivent donc, compte tenu de cette situation, être particulièrement surveillés, quant aux émissions de poussières pendant leur fonctionnement.

### **I.10. Le dépoussiérage**

Les quantités de poussières déposées dans les structures d'un silo, peuvent être sensiblement réduites par la mise en place de points de captage de poussières par aspiration (dépoussiérage) aux endroits où les productions sont les plus importantes. On peut limiter ainsi la présence de nuages de poussière dans et à proximité d'installations en fonctionnement.

Il y a donc toujours un grand intérêt à mettre en place, quand cela se justifie, des points de dépoussiérage sur les installations (/56/, /57/, /58/).

Les appareils de séparation utilisés pour les installations de dépoussiérage dans les silos de stockage sont les cyclones et les filtres à médias filtrants (comme les filtres à manche). Parfois, les cyclones sont associés à des filtres à médias filtrants (cas des cyclo-filtres).

### **I.10.1. Règles de conception et d'exploitation**

Les installations doivent être conçues et calculées au départ en fonction des points de captage retenus sur les installations. Trois options techniques sont possibles pour dépoussiérer un silo de stockage de produits agro-alimentaires : le dépoussiérage centralisé, le dépoussiérage par zone, le dépoussiérage point par point.

Le **dépoussiérage centralisé** consiste à centraliser les différents débits d'aspiration jusqu'à un appareil de séparation unique. L'utilisation de ce type d'installation conduit à une gestion difficile de la répartition des débits d'aspiration, lorsque les points d'aspiration sont nombreux et dispersés. De plus, l'aspiration fonctionne à pleine puissance dès qu'une installation est mise en route.

Le **dépoussiérage par zone**, se limite au dépoussiérage d'une zone comportant quelques installations. Il permet de s'affranchir des problèmes précédents, et conduit à une meilleure souplesse dans l'utilisation du dépoussiérage. Cette technique permet de traiter facilement le dépoussiérage de nouvelles installations à la suite d'une extension d'un silo de stockage existant, alors que l'on peut se trouver en limite de capacité avec une installation centralisée.

Le **dépoussiérage point par point** traite à la source ponctuellement chaque débit d'air poussiéreux. Le transport est donc réduit à sa plus simple expression. Cette solution est surtout utilisée lorsque les différentes installations dépoussiérées sont amenées à fonctionner indépendamment les unes des autres, ou lorsqu'il n'y a que quelques points à dépoussiérer, ou lorsque l'appareil à dépoussiérer est mobile. Les poussières récupérées avec ce type d'installation sont souvent remises dans le circuit de transport et peuvent être de nouveau dispersées dans l'atmosphère, au niveau des installations situées en aval. De telles dispositions sont à éviter et il est préconisé de collecter dans des trémies les poussières récupérées dans les installations de dépoussiérage.

Les installations centralisées et par zone, doivent être particulièrement bien suivies et entretenues au cours de leur exploitation. Les points suivants doivent faire l'objet d'une surveillance attentive :

- L'étanchéité des captages des points d'aspiration doit être maintenue.
- Les réglages des différentes branches de réseaux doivent être conservés. Un repérage de la position des papillons de réglage est préconisé.
- Les prises d'air parasites doivent être supprimées, notamment les trous dans les tuyauteries.
- Le fonctionnement des installations de dépoussiérage doit être asservi aux installations qu'elles desservent.

Afin de détecter une dérive dans le fonctionnement d'une installation de dépoussiérage, il est recommandé d'effectuer régulièrement un contrôle des débits de circulation de l'air dans les différentes branches du réseau, si celui-ci est étendu.

### **I.10.2. Prise en compte du risque explosion**

Dans les installations de dépoussiérage, la concomitance d'atmosphères explosives et de sources d'inflammation potentielles conduit à un risque d'explosion interne, et de propagation de l'explosion à plusieurs installations, voire plusieurs bâtiments.

Les dépoussiérages centralisés sont capables d'exporter l'explosion dans l'ensemble d'un silo, et à ce titre, présentent le risque le plus important.

Des mesures de prévention doivent donc être prises pour prévenir les sources d'inflammations principalement au niveau des médias filtrants (pour les filtres) et des ventilateurs d'extraction qui ne devraient jamais être placés dans le flux contenant des poussières.

Des mesures doivent être également prises pour empêcher qu'une explosion venant d'une installation voisine connectée puisse entraîner, à l'intérieur de l'appareil de séparation des poussières d'un système de dépoussiérage de type centralisé (centralisé, par zone), une explosion d'autant plus violente que le système a une grande extension. Il faut donc isoler l'appareil de séparation des poussières, par des moyens de découplage, de la trémie de récupération des poussières (écluse alvéolaire par exemple) et du réseau "air sale" (cheminée de décharge, par exemple).

L'appareil de séparation des poussières d'un système de dépoussiérage de type centralisé (cyclones, filtres, ...) doit être aussi protégé vis-à-vis des explosions de poussières. Pour cela, il doit être clos, ce qui exclut l'utilisation par exemple de filtres à médias filtrants avec manches apparentes. La protection des appareils de séparation des poussières (cyclones et filtres), qui ne sont pas actuellement conçus pour résister à la pression maximale d'explosion, peut être assurée par des événements ou des suppresseurs d'explosion. Dans le cas de la protection par événement d'un appareil de séparation placé dans un bâtiment, il est nécessaire d'aménager une sortie de l'événement vers l'extérieur du bâtiment où est situé l'appareil de séparation des poussières, dans une zone inoccupée par le personnel et à travers une canalisation de décharge courte pour ne pas annihiler le rôle de l'événement. On peut aussi mettre l'appareil de séparation muni de son événement à l'extérieur.

En cas d'emploi de filtres ponctuels, l'exploitant doit s'assurer auprès du constructeur que ces appareils sont utilisables dans des zones où peuvent apparaître des atmosphères explosives.

Enfin, au plan du risque incendie, compte tenu du retour d'expérience d'accidents, l'installation d'un système d'extinction à l'intérieur de l'appareil de séparation des poussières est fortement recommandée.

Au total, au plan du risque explosion, la solution technique du dépoussiérage par zone apparaît préférable aux dépoussiérages centralisés et individuels.

Au plan de la prévention et de la protection des filtres vis-à-vis de l'explosion, il faut insister sur les autres aspects suivants :

- l'intérieur du dépoussiéreur doit être conçu de manière à limiter les turbulences d'air et les dépôts de poussières,
- l'utilisation de médias "antistatiques" (ayant une résistivité de surface  $\rho_s$  suffisamment faible) et la mise à la terre des éléments métalliques permettent de limiter le risque dû aux étincelles électrostatiques,
- le dimensionnement des événements doit prendre en considération le volume total des filtres,
- les événements doivent être positionnés de telle façon que les éléments filtrants ne puissent pas les obstruer lors de l'explosion,
- la position des cheminées de décharge utilisées pour protéger les filtres côté entrée "air sale" doit être judicieusement choisie afin de ne pas renforcer une explosion,

### **I.11. Nettoyage des poussières**

La plupart des accidents graves dus à des explosions, a mis en évidence la propagation d'une explosion dans plusieurs bâtiments ou installations dans lesquels des dépôts de poussières existaient. Une mince couche de poussières, très inférieure à 1 mm d'épaisseur, suffit pour "entretenir" une explosion.

Par ailleurs, des incendies sont susceptibles de se produire lorsque des dépôts de matières combustibles sont en contact avec des surfaces échauffées, comme par exemple des paliers de machine.

L'enlèvement des dépôts de poussières agro-alimentaires dans les silos de stockage, constitue donc une mesure essentielle dans la prévention des explosions et des incendies.

Pour faciliter la mise en œuvre des opérations de nettoyage dans les silos de produits agro-alimentaires des moyens pratiques sont à rechercher pour évaluer les quantités de poussières déposées, pour pouvoir déclencher le nettoyage lorsqu'un seuil limite d'empoussiérement est atteint.

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  $50 \text{ g/m}^3$ .
- 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 suspension. Par ailleurs, des méthodes simples, basées sur l'observation visuelle de cibles placées au sol permettent d'estimer la quantité de poussières déposée (projet de norme NF U 54-51 "Bâtiments agricoles et installations de stockage - sécurité des silos -détermination des dépôts de poussières"). La vue de la cible peut par exemple disparaître lorsqu'un dépôt de  $50 \text{ g/m}^2$  est atteint.

Le nettoyage des poussières peut être réalisé soit manuellement, soit avec des appareils (par le vide).

Le nettoyage manuel, avec des balais, doit être mis en œuvre avec prudence, de façon à éviter la mise en suspension de poussières, particulièrement lors du traitement des surfaces non planes. La tentation peut être grande, malgré les dangers présentés, d'utiliser un soufflage à l'air comprimé, pour rassembler les poussières avant de les enlever, particulièrement pour les zones difficilement accessibles. Là aussi, une grande prudence est à observer.

Il est important de souligner que l'accident du silo à grains de Floriffoux en Belgique (le 7 avril 1993), qui a fait cinq morts, est consécutif à des opérations simultanées de nettoyage manuel et d'exploitation, et de travaux par points chauds (découpage à la disqueuse et au chalumeau). L'utilisation pour nettoyer les dépôts de poussières de balais et d'air comprimé nécessite donc impérativement l'établissement de consignes particulières.

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 (/58/).

Une installation de nettoyage centralisé comprend un réseau de tuyauteries (pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres) relié à un système déprimogène muni de prises d'aspiration (2 ou 3 en service simultanément) réparties dans les locaux à nettoyer. Un dispositif de filtration et de collecte des poussières complète l'installation.

Dans tous les cas, la conception des appareils de nettoyage sous vide doit prendre en compte le fonctionnement en atmosphère poussiéreuse explosive notamment pour ce qui concerne la filtration des poussières.

Ces systèmes de nettoyage nécessitent des investissements pouvant être coûteux. Ils permettent toutefois avec un personnel limité de réaliser en toute sécurité l'enlèvement des dépôts de poussières, et de pouvoir obtenir un haut niveau de propreté difficile à satisfaire avec un nettoyage manuel.

### **I.12. Appareils, dont les installations électriques**

Dans les zones où peuvent apparaître des atmosphères explosives, les appareils et systèmes de protection, dont les installations électriques doivent être entièrement constituées de matériels utilisables dans les atmosphères explosives.

Le décret 96-1010, qui transpose la Directive 94/9/CE (directive ATEX en droit français), concerne la construction des appareils et système de protection destinés à être utilisés dans les atmosphères explosives. Ce décret prévoit que durant une période transitoire allant jusqu'au 30 juillet 2003, on pourra continuer à mettre sur le marché du matériel électrique conforme au décret 78-779.

A ce jour, aucun matériel électrique n'ayant été certifié selon le décret 78-779 pour une utilisation en atmosphère explosive poussiéreuse, le décret 96-1010 couvre lui ce type de matériel et l'utilisation de matériels électriques conformes à l'arrêté 96-1010 (directive ATEX 94/9/CE) se justifie donc pleinement, à savoir :

- pour la zone 20 : appareils de Groupe II, catégorie 1,
- pour la zone 21 : appareils de Groupe II, catégorie 2 et catégorie 1,
- pour la zone 22 : appareils de Groupe II, catégorie 3 et catégories 1 et 2.

Remarque :

L'utilisation des modes de protection prévues pour les gaz et vapeurs (enveloppe antidéflagrante, suppression interne, ...) aux poussières est en cours d'étude.

Les trois zones pour les atmosphères poussiéreuses (20, 21, 22) sont définies sous la responsabilité de l'exploitant.

Pour ce classement deux points importants sont à souligner :

- chaque cas doit être traité individuellement (le même appareil dans un autre environnement peut être classé différemment),
- dans le cas où le risque résiduel d'explosion n'est pas acceptable, il faut recourir à un système de protection contre l'explosion.

Une norme CENELEC en cours d'élaboration (CENELEC Pr EN 5081-1-3) fournit une méthode de classement avec une procédure en plusieurs étapes (/59/) :

- comprendre le fonctionnement de l'installation,
- connaître les caractéristiques des produits,
- identifier les sources de dégagement des poussières à l'intérieur et à l'extérieur des appareils,
- déterminer la probabilité d'apparition d'une atmosphère explosive à partir des sources de dégagement des poussières,
- identifier l'étendue des zones en fonction de la probabilité d'occurrence,
- documenter les résultats (matérialisation des zones).

Pour la zone 20, c'est-à-dire là où l'atmosphère est explosive en permanence ou pendant une longue période ou fréquemment, on ne peut utiliser qu'un matériel de très haut niveau de sécurité fabriqué de façon à éviter l'inflammation d'un mélange explosif, même en cas de dérangement rare (grippage d'un roulement par exemple).

Les seuls matériels électriques acceptables en zone 20 sont :

- les systèmes de mesure (détecteur de niveau par exemple) travaillant sous faible tension (sécurité intrinsèque de catégorie "ia"),
- les matériels protégés par un double mode de protection.

Remarque :

En ce qui concerne le matériel mécanique et les systèmes de protection, l'arrêté silo n'indiquant pas de certifications pour les matériels mécaniques et les systèmes de protection, l'INERIS préconise, compte tenu de la difficulté de trouver du matériel conforme au décret 96.1010 d'utiliser jusqu'au 30 juin 2003 du matériel standard en veillant à ce qu'il ne soit pas une source d'inflammation.

En dernier lieu, certains principes doivent guider la conception des installations électriques. On peut citer notamment :

- la séparation des transformateurs du reste des installations industrielles,
- l'installation de chemins de câbles permettant de limiter les dépôts consécutifs de poussières (non horizontaux),
- la protection contre les agressions (incendie, inondation, ...) des circuits de contrôle et de commande des installations,
- l'installation des matériels électriques, surtout les moteurs hors des zones ou des dépôts importants de poussières sont susceptibles de se produire,
- la mise à la terre de toutes les parties métalliques après avoir réalisé des liaisons équipotentielles,
- le choix du régime de neutre qui dépend de plusieurs facteurs :
  - l'obligation d'assurer la protection des travailleurs en cas de défaut d'isolement en évitant l'apparition d'une tension dangereuse entre la terre et la masse métallique d'un appareil électrique pendant une durée supérieure au temps de coupure du dispositif de protection. Les différents textes donnent en fonction de la tension de contact présumée le temps de coupure maximal. L'arrêté du 25 octobre 1991 prévoit deux tableaux et définit deux tensions limites conventionnelles de sécurité. Une pour des conditions classiques (50 V) et une autre pour les installations temporaires des chantiers (25 V),
  - la protection de l'installation contre les risques d'incendie d'origine électrique,
  - la nécessité ou non d'assurer la continuité de la disponibilité de l'énergie électrique,
  - la sensibilité des équipements aux perturbations électromagnétiques.

Rappel sur les régimes de neutre en basse tension :

- IT : le neutre de la source d'alimentation est isolé ou relié à la terre par une impédance. Les masses métalliques des matériels électriques sont reliées à la terre. Dans le cas d'un défaut simple entre une phase et la masse, le courant de circulation entre phase et terre est très faible et dépend des capacités de fuite si le neutre est isolé. Si le neutre est impédant le courant est limité par l'impédance et la résistance de terre. Dans ces deux cas, la tension entre masse et terre est faible. L'installation peut fonctionner en présence d'un défaut, mais il faut un dispositif de contrôle permanent de l'isolement. La protection contre les contacts indirects est assurée par ce dispositif et un disjoncteur en cas d'un second défaut.

L'avantage du régime IT, surtout pour les réseaux peu étendus est d'avoir, en cas de défaut simple, des courants de défaut à la terre relativement faibles, ce qui permet de poursuivre l'exploitation tout en recherchant le défaut (les autres schémas impose la coupure au premier défaut).

- TT : le neutre de la source d'alimentation et les masses métalliques des matériels électriques sont reliés à la terre. Dans le cas d'un défaut simple entre une phase et la masse, le courant de circulation entre phase et terre est limité par les résistances de terre. La protection contre les contacts indirects est assurée par un dispositif de protection à courant résiduel.
- TN : le neutre de la source d'alimentation est relié à la terre et les masses métalliques sont reliés au neutre de la source. La liaison entre les masses et le neutre peut être faite par le conducteur de neutre. C'est le schéma TN-C (C comme commun). Cette liaison peut être également réalisée par un conducteur spécifique relié au neutre, c'est le schéma TN-S (S comme séparé). Dans le cas d'un défaut simple entre une phase et la masse, le courant de circulation entre phase et terre est limité uniquement par la résistance du conducteur de phase et du conducteur de protection (c'est pratiquement le courant de court-circuit). La protection contre les contacts indirects est assurée par les dispositifs de protection contre les surintensités (fusible ou disjoncteur).

### **I.13. Alimentation en énergie :**

Les chaudières de chauffage et les équipements de production d'air chaud des séchoirs peuvent être alimentés par le réseau de ville (gaz naturel) ou par du propane ou du butane à partir d'un réservoir placé sur le site.

En cas de fuite non maîtrisée, les gaz de chauffage, compte tenu de leur pouvoir calorifique, représentent un potentiel dangereux pour l'incendie, mais également pour l'explosion.

Les chaudières et équipements de production d'air chaud doivent notamment être installés dans des locaux largement ventilés, séparés des autres installations par des parois coupe-feu et équipés de dispositifs visant à prévenir les fuites de gaz (vanne de coupure,.....).

L'implantation des réservoirs de gaz doit permettre de les soustraire aux effets thermiques d'incendie, et aux effets de projection d'explosion, survenant sur des installations voisines (éloignement, mur d'isolement).

## **II. ACTIVITES CONNEXES**

### **II.1 Séchage**

Certains produits très humides avant la récolte doivent être séchés pour obtenir un taux d'humidité adapté pour leur conservation.

En France, le séchage concerne principalement le maïs, mais également des oléagineux (tournesol et colza) des protéagineux (pois) et d'autres produits (sorgho, œillette, ricin, ...).

Les principaux séchoirs utilisés fonctionnent selon le principe de séchage à flux mixtes ou alternés, appelés aussi séchoirs à canaux ou à dièdres, caractérisés par leur forte capacité unitaire.

Les températures de séchage s'échelonnent de 45°C pour la température la plus basse (orge de brasserie) à 110°C pour le maïs de l'alimentation animale.

Jusqu'en 1988, le séchage des céréales et des oléagineux a été à l'origine de nombreux incidents en France.

Sur la période 1983-1988, des relevés d'accidents faits par GROUPAMA, montrent qu'en moyenne une quinzaine de séchoirs ont subi de graves dégâts dus à des incendies, chaque année. Cela peut s'expliquer par l'importance des quantités de tournesol séchées et l'évolution des techniques de séchage (recyclage de l'air usé, passage au gaz en chauffe directe, augmentation des températures de séchage) (/60/).

Depuis 1989, on assiste à une baisse notable des sinistres, du fait notamment de la baisse des tonnages de tournesol et maïs traités (années sèches), de l'arrêt définitif d'installations vétustes et obsolètes, mais également de l'amélioration de la prévention et de la protection suscitée par les assureurs, et relayée par les exploitants de séchoirs, les constructeurs et les organismes professionnels.

Les combustibles à considérer dans un séchoir peuvent a priori être classés en quatre catégories :

- graines entières,
- graines plus ou moins cassées ou écrasées,
- poussières de graines de différentes origines (écrasement),
- graines fermentées (présence possible de gaz inflammables (H<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>)).

L'oxyréactivité de ces produits est liée à la nature du combustible (maïs, tournesol, colza, ricin, œillette, sorgho, etc.), mais aussi à la surface spécifique, à la présence ou non d'huile généralement plus facilement inflammable que la graine seule.

Parmi les produits séchés, le tournesol, le ricin, l'oeillette et le sorgho sont les produits les plus réactifs donc les plus dangereux.

Le maïs se retrouve souvent impliqué dans les incendies de séchoir en raison des importants tonnages traités.

La longueur des campagnes de séchage, celles du tournesol précédant celles du maïs, peut constituer également un facteur favorable à l'occurrence d'incendies, en effet :

- un long préstockage de produits humides, les automnes pluvieux peuvent se traduire par une dégradation des grains et leur fermentation,
- l'augmentation nécessaire des cadences de séchage se traduit par l'augmentation des températures de séchage, et la réduction des opérations de nettoyage (présence résiduelle de dépôts de tournesol qui a été séché à 70°C lors du séchage de maïs effectué à 110°C).

Le point de départ d'un grand nombre d'incendies de séchoirs correspond à l'introduction de particules incandescentes, végétales, ou métalliques, en provenance du générateur d'air chaud et impactant la masse de grains et/ou de déchets plus ou moins surséchés présents dans le volume sécheur. Les lieux préférentiels de démarrage de ces incendies sont l'intérieur de la colonne sécheuse et le système de filtration.

Le feu se propage alors très rapidement dans la colonne sécheuse, du fait de la présence d'une grande quantité de matières combustibles et d'une ventilation importante (apport d'oxygène).

Les incendies de séchoir peuvent provenir également de phénomènes d'auto-inflammation lorsque le grain et les poussières ont séjourné longtemps dans une zone plus ou moins ventilée sous forme de dépôt (dépôt dans la colonne de séchage mais aussi dans les parties annexes, par exemple dans les circuits d'air chaud).

Au plan de l'explosion, l'accumulation de poussières à très faible granulométrie surtout dans la chambre de filtration, dans les circuits de recyclage ou sacs de récupération et dans le local du séchoir peut mener à l'explosion lorsqu'il y a présence simultanée de ces poussières en nuage et d'une source d'inflammation (en 1993 une explosion est survenue dans un séchoir équipé d'un filtre).

La réduction des risques d'accidents dus à des incendies (voire à des explosions) lors des campagnes de séchage passe par la mise en application de mesures de prévention et de protection sur les séchoirs (/61/). On peut citer notamment les mesures suivantes :

- un préstockage des grains humides le plus court possible dans des cellules d'attente ventilées ou la conservation sous atmosphère modifiée telle le gaz carbonique, l'azote, etc. qui nécessite une grande étanchéité des cellules de stockage,
- le pré-nettoyage du grain de manière à éviter les gros déchets et donc limiter les bourrages aux grilles d'extraction et au niveau des dièdres,

- l'élaboration de procédures décrivant la préparation du séchoir avant la campagne, la conduite du séchoir pendant la campagne, en particulier pour les arrêts,
- le nettoyage régulier du séchoir surtout dans le cas du séchage des oléagineux et d'installations polyvalentes, et surtout au changement de produits (par exemple une situation à haut risque existe lors du passage du tournesol au maïs),
- la mise en place de capteurs de suivi de fonctionnement en particulier pour les températures avec systèmes d'alarme pour les dépassements de température de consigne.
- une implantation prévoyant l'installation du séchoir en dehors des zones de fosses de réception, des lieux de stockage (de produits agro-alimentaires et de produits inflammables) et des zones de nettoyage (afin d'éviter les aspirations de poussières par les générateurs d'air chaud) et un accès facile par l'extérieur à plusieurs niveaux,
- la détection d'un début d'incendie par la mise en place de détecteurs,
- la mise à disposition de moyens de lutte contre l'incendie performants :
  - . moyens de premier secours judicieusement placés (extincteurs portatifs, RIA),
  - . installation d'un système fixe d'aspersion avec buses de pulvérisation en tête des caissons d'air chauds et usés, et en tête de colonne sécheuse ; à défaut de ce système, l'installation conseillée est une colonne sèche alimentée, soit par le réseau public, soit par un bac tampon,
  - . projection de mousse à moyen foisonnement en partie haute du séchoir, si l'installation n'est pas équipée d'un système utilisant de l'eau (aspersion, colonne sèche),
- la vidange rapide du grain de la colonne séchante vers l'extérieur par un système de trappes en bas du séchoir après arrêt total de l'installation (brûleur et ventilateur). Cette mesure est primordiale.

Remarques :

- Le séchage fragilise le grain, accroît donc sa sensibilité à la casse et à la fissuration. Par conséquent, les graines se brisent plus facilement lors de leur manutention et de leur traitement et produisent davantage de poussières. De plus, les graines surséchées ou cassées s'altèrent par oxydation des acides gras et dégradation des protéines (risque d'auto-inflammation des graines écrasées).

Ces aspects sont à prendre en compte pour les opérations de manutention et de stockage qui suivent le séchage.

## **II.2. Exploitation des installations**

Les installations utilisées dans les silos de stockage de produits agro-alimentaires (tamis, transporteur de manutention, ...) comportent des pièces en mouvement et sont soumises à des conditions de travail souvent difficiles pouvant être à l'origine des situations dangereuses par échauffements de pièces tournantes, casses d'éléments d'appareil, dérèglements d'installation, ...

Ceci sous-entend, pour limiter les risques d'accidents, des interventions du personnel d'entretien, qui doivent s'inscrire dans le cadre d'une organisation rigoureuse de la maintenance.

Une procédure de maintenance et de contrôle des installations précisant la nature et les fréquences des interventions, est à mettre en place dans chaque silo de stockage.

Une attention particulière doit être portée aux installations électriques et aux installations "sensibles" telles que les élévateurs à godets.

Pour les silos de stockage dont la gestion du fonctionnement des installations fait appel à l'informatique, l'enregistrement des durées de marche des installations peut permettre une programmation plus facile et plus fiable des opérations de maintenance.

Au plan de la sécurité, la conception des installations doit intégrer la nécessité de pouvoir réaliser la maintenance sans trop gêner l'exploitation afin de ne pas retarder les interventions, et de pouvoir limiter au maximum, par des parties démontables, l'usage d'outillage générateur de sources chaudes (soudage, oxycoupage) sur les lieux des installations.

Si toutefois, l'utilisation de ce type d'outillage est nécessaire, celle-ci doit être strictement réglementée par la délivrance d'un permis de feu qui précise au personnel intervenant, le travail à effectuer, les consignes particulières, signale les risques et précise les moyens de protection. Lors d'une intervention de soudage, d'oxycoupage le personnel doit :

- avant de commencer le travail, s'assurer dans la zone d'intervention de l'absence de matières combustibles ou inflammables, et vérifier la présence des moyens de lutte contre l'incendie (extincteurs, RIA, ...),
- pendant le travail, surveiller attentivement les points de chute des projections incandescentes,
- après le travail, inspecter les endroits susceptibles d'avoir été exposés aux projections incandescentes et à la chaleur dégagée, et maintenir une surveillance rapprochée pour prévenir tout risque d'incendie retardé.

Dans le cadre de la maintenance des installations, des produits combustibles sont mis en œuvre (gasoil, huile, solvants, gaz de soudage...).

Dans le cas des faibles quantités embarquées sur les installations et les véhicules, les huiles et le gasoil sont dangereux par le fait que, lors de fuites, ils peuvent être, en présence d'une source chaude, à l'origine d'un début incendie qui peut se propager à d'autres installations (par feu de nappe).

Dans le cas de quantités importantes stockées au même endroit, les huiles et le gasoil constituent une charge thermique élevée, susceptible d'accroître notablement la violence d'un incendie.

Les gaz de soudage les plus couramment employés sont l'oxygène et l'acétylène.

L'oxygène en cas de fuite, augmente très fortement les effets d'un début d'incendie.

En cas de fuite d'acétylène, compte tenu de sa nature très inflammable et de la puissance calorifique dégagée par un jet enflammé, le risque de communiquer le feu aux installations voisines est important.

Par ailleurs, lorsque des bouteilles de gaz de soudage, et en particulier celles d'acétylène, sont prises dans un violent incendie, une surpression s'établira à l'intérieur des enveloppes qui peut, si elle dépasse les limites de résistance des bouteilles faire éclater celles-ci, et propager les effets de l'explosion dans l'environnement immédiat. Il y a lieu de limiter les quantités de bouteilles stockées au même endroit les unes à côté des autres.

En dernier lieu, les quantités de produits très inflammables tels que les solvants doivent être limitées et stockées dans des armoires adaptées au risque.

### **III/. ACTIVITES ANNEXES**

#### **III.1. Stockage des agro-pharmaceutiques**

Au regard du risque feu, la quasi-totalité des produits agro-pharmaceutiques solides ou liquides sont au moins partiellement combustibles, à défaut de pouvoir être considérés comme inflammables (au sens réglementaire du terme pour les liquides, en se basant sur le point d'éclair).

De plus, de nombreuses spécialités sont particulièrement inflammables principalement les préparations formulées sous forme d'émulsions concentrées (code EC), en raison de la dilution des matières actives dans des solvants organiques.

Pour les produits agro-pharmaceutiques, au risque incendie, vient s'ajouter un grave danger de toxicité et d'écotoxicité.

Même les spécialités fortement chargées en matériaux inertes donc peu combustibles, peuvent être largement impliquées dans un incendie et contribuer à la toxicité globale du feu.

La présence de quantités notables de produits agro-pharmaceutiques dans un silo de stockage de produits agro-alimentaires doit être prise en compte dans l'étude des dangers, notamment pour le risque incendie supplémentaire qu'il induit.

Un certain nombre de mesures de prévention et de protection permettent de prévenir ce risque, telles que :

- le stockage séparé des produits inflammables,
- l'isolement du stockage par rapport aux autres installations (chaufferie, ...),
- la prévention des sources d'inflammation,
- les systèmes de détection d'incendie,
- les équipements de première intervention (extincteurs, RIA, ...),
- les cuvettes de rétention.

### **III.2. Stockage d'engrais**

Les engrais solides comprennent les engrais NPK et les ammonitrates.

Les engrais NPK sont des engrais composés de matières chimiques minérales, contenant trois éléments chimiques majeurs nécessaires au développement des végétaux : azote (N), phosphore (P) et potassium (K).

Ils présentent un danger au plan de l'incendie, qui se traduit plus exactement en décomposition thermique. Les principales caractéristiques en sont en partie connues :

- elle se fait sans flamme, selon un processus entretenu,
- elle n'a pas besoin d'air (d'oxygène) pour se développer,
- ses effets thermiques sont limités, les températures maximales atteintes se situant entre 300 et 600°C.

L'amorçage de la décomposition peut se faire par un phénomène d'auto-échauffement, mais a lieu le plus souvent par application d'un point chaud.

Le dégagement de fumées colorées du blanc ou roux, est très important (0,3 à 0,5 m<sup>3</sup>/kg d'engrais décomposés).

Les fumées sont constituées de beaucoup d'eau (H<sub>2</sub>O) et d'azote et de produits toxiques, les plus toxiques étant HCl, Cl<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, ...,

Les ammonitrates qui contiennent une grande quantité de nitrate d'ammonium peuvent dans des conditions bien particulières (incendie violent, présence d'impuretés, confinement) donner lieu à des explosions.

Compte tenu des risques présentés, les stockages d'engrais solides doivent être pris en compte dans l'étude des dangers des silos de stockage de produits agro-alimentaires.

Parmi les mesures propres à limiter les risques on peut citer :

- choix d'un lieu de stockage éloigné des autres installations susceptibles de faire l'objet d'incendie, d'explosion,

- stockage des engrais sous abri dans des cases non confinées, séparées par des parois coupe-feu,
- gestion du stockage pour ne pas y introduire d'autres matières, spécialement des matières combustibles,
- prévention des sources de chaleur (permis de feu, éclairage, engin thermique...).

Les risques induits par les engrais liquides sont moindres que pour les engrais solides lorsque les conditions de stockage sont normales. Cependant, le retour d'expérience d'accidents, montre qu'il y a eu déjà des explosions au cours d'incendies ayant affecté des réservoirs de stockage, notamment de solution d'urée et de nitrate d'ammonium. Il y a donc lieu d'éloigner les stockages d'engrais liquide de toutes installations susceptibles d'être concernées par un incendie violent.

En dernier lieu, on trouve dans certains silos de stockage de produits agro-alimentaires, des réservoirs d'ammoniac. Compte tenu de la forte toxicité de ce produit, là aussi, on doit éloigner les stockages d'ammoniac de toutes installations qui pourraient donner lieu à la suite d'un incendie, d'une explosion par les effets thermiques et de projection de débris, à une détérioration du réservoir d'ammoniac et à des fuites toxiques.

#### **IV./ GESTION GLOBALE DES RISQUES**

La prévention des explosions et des incendies dans les silos, ainsi que la protection contre les effets d'accidents ont été largement développées dans les chapitres précédents pour les différents produits et les différents matériels et techniques susceptibles d'être rencontrés dans les silos de stockages de produits agro-alimentaires.

L'efficacité des mesures prises en fonction des choix techniques opérés pour lutter contre les risques explosion et incendie, dépendent également de la mise en place de procédures de gestion, de maintenance et de contrôle des installations, de formation du personnel, de mesures de sécurité, spécifiques adaptées.

##### **IV.1. Choix stratégiques**

Au plan de la conception d'un nouveau site de stockage, les décisions prises au plan de la structure et de la géométrie des installations, peuvent avoir des implications sur la nature et les niveaux de risque auxquels seront confrontés les futurs exploitants.

Les aspects liés aux risques explosion et incendie en terme d'occurrence et de conséquence d'un éventuel accident, doivent donc être pris en compte dès le stade préliminaire d'un projet de construction.

Par ailleurs, pour les mêmes raisons, il est également primordial d'intégrer les risques explosion et incendie dans le cahier des charges de nouveaux équipements, ou d'extensions d'équipements existants.

Pour réduire les effets d'une explosion éventuelle dans les bâtiments et les installations d'un silo de stockage de produits agro-alimentaires, il faut éviter l'effondrement de la structure et limiter la propagation de l'explosion.

Pour des bâtiments reliés les uns aux autres, l'arrêt d'une explosion qui se propage est souvent problématique, car :

- des communications entre les différents bâtiments sont souvent nécessaires pour assurer le passage des engins de manutentions notamment,
- les portes ou les murs séparatifs, doivent en général être très massifs pour pouvoir résister à la pression développée par une explosion.

Dans la conception de bâtiments ou d'installations de silos de stockage de produits agro-alimentaires, pour réduire les conséquences d'une éventuelle explosion qui se propagerait (projection, effondrement), les préconisations suivantes peuvent être données :

- . favoriser la construction de cellules avec des ouvertures permanentes plutôt que de cellules totalement fermées, chaque fois que cela est possible.
- . utiliser des toits de cellules soufflables en matériau léger fixé le plus légèrement possible, lorsque les conditions d'exploitation exigent la fermeture des cellules (étanchéité des cellules notamment) particulièrement pour les cellules verticales de forme allongée,
- . utiliser des matériaux légers, fixés légèrement aux structures pour les bâtiments, tels que les tours de manutention, les ateliers de conditionnement et d'expédition, les galeries aériennes, (cette disposition limite par découplage le risque de propagation de l'explosion),
- . implanter dans toute la mesure du possible les appareils pouvant en cas d'explosion produire un souffle et une flamme (filtre, élévateur), à l'extérieur des bâtiments et des installations ou tout au moins, dans une zone en structure légère.
- . séparer les aires de déchargement et de chargement et les séchoirs des autres installations.
- . éviter l'utilisation de galeries souterraines résistantes.
- . équiper les enceintes résistantes telles que les espaces sous les cellules verticales du maximum d'ouvertures compatibles avec la résistance des structures porteuses.
- . limiter l'usage des as de carreau dans les silos verticaux dont le rapport longueur sur diamètre est élevé (supérieur à 5).
- . limiter les communications entre espaces au strict minimum et si possible les éviter,
- . séparer les locaux où il y a du personnel d'exploitation en permanence des zones à risque potentiel important (élévateur à godets, filtre, séchoir, ...).

- . éloigner les locaux des personnels non strictement nécessaires à l'exploitation du silo.

#### **IV.2. Politique de sécurité**

Le personnel d'exploitation des silos de stockage de produits agro-alimentaires est restreint, et chaque personne a, en contrepartie, la responsabilité du fonctionnement de multiples installations.

Par conséquent, des moyens "d'assistance" sont à prévoir pour permettre la détection rapide des anomalies de fonctionnement, qui pourraient, si elles ne sont pas traitées rapidement, donner lieu à des explosions et à des incendies. Ces moyens consistent notamment à :

- La mise en place de tableaux synoptiques rassemblés dans une salle de contrôle, visualisant la marche des installations et les défauts de fonctionnement (contrôleur de rotation, sonde de température, ...). Pour informer et aider le personnel d'exploitation dans la gestion du fonctionnement des installations, il faut disposer d'informations sur :
  - . la marche et l'arrêt des installations en fonction des besoins et du suivi de paramètres (niveau dans les silos, ...),
  - . l'arrêt d'urgence des installations lorsqu'une situation critique est détectée, seuil d'alarme sur les détecteurs (de température, de rotation, ...), arrêt d'un convoyeur, arrêt du dépoussiérage.
- La sensibilisation des personnels d'exploitation aux problèmes spécifiques d'explosion et d'incendie posés par les produits agro-alimentaires et les installations de silos, notamment sur les risques liés aux dépôts de poussières, aux échauffements, ... Il est essentiel de veiller tout particulièrement à dispenser cette information aux nouveaux embauchés, dès leur arrivée.
- La mise en place d'une personne formée sur les risques d'explosion et d'incendie chargée des aspects liés à la sécurité en prise directe avec l'exploitation, et plus particulièrement de :
  - . s'assurer de l'existence et du suivi des consignes de sécurité et des procédures d'exploitation (vérification et entretien des installations, nettoyage des poussières, permis de feu, qualité, ...),
  - . diagnostiquer les dysfonctionnements afin d'améliorer la sécurité des installations,
  - . former sur le site le personnel d'exploitation.

En plus d'un bénéfice attendu au plan de la sécurité "au quotidien", cette fonction peut contribuer à une meilleure efficacité des relations avec les différents acteurs de la sécurité (Inspection des installations classées, Inspection du Travail, assureurs, fabricants de matériels, ...).

### **IV.3. Intervenant extérieur**

L'expérience tirée d'accidents récents indique que les interventions d'entreprises extérieures si elles ne sont pas faites dans un cadre bien défini, notamment au plan de la sécurité, peuvent être à l'origine de situations dangereuses, pouvant conduire à des accidents dramatiques, comme cela a été le cas pour l'accident de Floriffoux de 1993 et de Metz de 1982.

Ces accidents se sont produits à la suite de la concomitance de travaux d'exploitation et de travaux d'entretien utilisant des outillages présentant des sources chaudes intenses (poste de soudage, disqueuse, ...).

Les modalités d'intervention d'une entreprise extérieure doivent donc, pour prévenir les risques, être arrêtées avec les entreprises utilisatrices (décret du 20 février 1992). Une visite commune préalable pour recenser les risques doit précéder l'établissement d'un plan de prévention, qui doit être écrit si la durée prévisible des travaux est supérieure ou égale à 400 heures, ou si les travaux sont dangereux (comme c'est souvent le cas pour les stockages de produits agro-alimentaires) (/62/).

L'inspecteur du travail doit être informé avant le début des travaux.

L'entreprise extérieure doit informer ses salariés des éléments du plan d'intervention notamment des dangers et des mesures de prévention et de protection, et s'assurer de l'application du plan de prévention. L'entreprise utilisatrice doit veiller à l'application du plan de prévention, et alerter l'entreprise utilisatrice, en cas de détection de situations dangereuses.

Des réunions et des inspections périodiques sont organisées à l'initiative de l'entreprise utilisatrice.

## **V./ LUTTE INCENDIE**

Les responsables de silo de stockage de produits agro-alimentaire, doivent prendre en compte les particularités des produits stockés et des installations pour mettre en place un matériel de lutte contre l'incendie adapté.

Le matériel de base pour la première intervention, est constitué par les extincteurs que l'on doit trouver à proximité des moteurs, des appareils, des armoires électriques, ...

Des extincteurs supplémentaires doivent être disposés dans les zones à risques incendie importants, par exemple le long des transporteurs à bande.

Les extincteurs sont à compléter par des RIA, alimentés par des colonnes sèches de préférence chaque fois qu'un incendie violent est à craindre (tour de manutention, entrepôt de stockage, ...).

Des détecteurs d'incendie, couplés selon le cas à des systèmes d'extinction automatique, sont à envisager pour la protection d'installations dont les risques sont les plus élevés telles que : les séchoirs, les transporteurs à bande non équipés de bande de sécurité vis-à-vis de l'incendie, et pour les installations vitales pour le fonctionnement du silo telles que : la salle de contrôle, les armoires électriques, ...

Le personnel d'exploitation doit être entraîné à l'utilisation des moyens de première intervention, et informé des procédures d'urgence en cas d'incendie (alerte, évacuation, ...).

Par ailleurs, les conditions d'intervention des secours extérieurs, doivent être définies avec les services intéressés (pompiers, SAMU, ...), les procédures doivent intégrer la topologie du site, notamment au plan de la circulation et des accès (/63/).

Des points d'eau sont à prévoir (réserve d'eau, poteaux d'incendie) pour permettre en tout point du site, une alimentation convenable en eau des moyens de lutte mis en œuvre par les pompiers.

Des dispositions doivent être également prises en vue de l'utilisation de gaz inerte pour combattre les incendies de cellules (piquages, contrat de fourniture de gaz inerte).

Si cela se justifie, les pompiers doivent être informés des risques spécifiques posés par des installations particulières (feux de silos, incendie de produits agro-pharmaceutiques) afin d'en tenir compte dans leur intervention.

## CONCLUSION

Des incendies, des explosions se produisent chaque année dans les stockages de produits agro-alimentaires.

Les accidents industriels en résultant peuvent avoir des conséquences pour le personnel et les installations d'un site industriel, mais également pour son environnement proche.

Les risques d'incendie et d'explosion en terme d'occurrence et de dommages dépendent aussi bien des produits stockés que des installations (appareils et bâtiments).

Il existe toute une batterie d'essais qui permettent à un industriel de connaître les risques que vont présenter les produits qu'il sera amené à stocker.

Cependant, il est important de souligner que, pour un même produit générique, les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité vont varier, notamment en fonction de la nature, de la granulométrie et de l'humidité de la poussière.

Au plan des installations, les risques sont plus ou moins élevés selon le type d'appareil et la nature des matériaux des éléments constitutifs.

Par exemple, les appareils comportant des pièces mobiles à l'intérieur d'enceintes confinées posent des problèmes d'explosion (élévateurs à godets, broyeur, ...).

A contrario, l'utilisation de matériaux résistants à la flamme est favorable à la diminution du risque incendie.

Les conditions d'exploitation de ces installations (maintenance, compétence du personnel, ...) et la sensibilisation du personnel aux risques ont aussi une incidence pour réduire les risques d'incendie et d'explosion.

Concernant la conception des bâtiments, les choix techniques opérés influent directement sur les conséquences possibles d'un accident. Au plan du risque d'explosion, des bâtiments très résistants ou reliés les uns aux autres, des galeries souterraines constituent des éléments pénalisants.

De même, des matériaux capables de propager très facilement la flamme sont pénalisants pour le risque incendie.

Une analyse des risques réalisée au stade de la conception d'un nouveau complexe de stockage, ou en cours d'exploitation d'un site de stockage existant est la plus à même de pouvoir permettre à un industriel de déterminer les situations dangereuses auxquelles il pourra être confronté, et de choisir les dispositions propres à éviter des accidents industriels et à en réduire les effets.

Soulignons que l'analyse des risques doit aussi prendre en compte les stockages de produits agro-pharmaceutiques, d'engrais, de gaz, ...

Parmi ces dispositions, les mesures préventives sur les accumulations de matières dangereuses (poussières inflammables, produits combustibles) et sur les sources d'inflammation sont essentielles car elles visent à l'élimination des facteurs conduisant à l'accident.

Malgré une prévention adaptée, un accident industriel est toujours possible et des mesures de protection efficaces doivent également être adoptées.

Les fabricants de matériel de sécurité proposent des dispositifs de protection vis-à-vis de l'incendie et de l'explosion, pour les différentes situations industrielles rencontrées. Il est nécessaire de s'assurer que les dispositifs de protection retenus seront efficaces pour l'application industrielle considérée.

Le choix de ces matériels peut être facilité par une bonne connaissance des conséquences possibles d'un accident industriel qui peuvent être évaluées à partir d'études de modélisation des impacts des effets thermiques, toxiques et dynamiques d'une explosion (ondes de pression, projections de débris). Il faut noter qu'il ne sert à rien de s'équiper de dispositifs très sophistiqués, si le gain au plan de la sécurité n'est pas en rapport avec l'investissement consenti.

Il faut souligner enfin, le rôle important que peuvent tenir actuellement les organismes d'assurance dans la promotion d'actions en faveur de l'amélioration de la sécurité en complément de l'évolution du cadre réglementaire.

Depuis quelques décennies, de nombreuses études expérimentales ont permis d'acquérir des connaissances directement utilisables pour améliorer la prévention et la protection des incendies et des explosions dans les stockages de produits agro-alimentaires.

Cependant, ces données apparaissent encore fragmentaires, et certains domaines nécessitent des études supplémentaires afin d'améliorer la sécurité globale des sites de stockage.

On peut citer notamment les domaines suivants :

- les méthodes de protection contre les effets des explosions, notamment au plan du dimensionnement des événements, de l'efficacité des extincteurs déclenchés et des arrêts-barrages,

- la propagation des explosions dans les installations industrielles, particulièrement au plan des effets des obstacles sur la "violence des explosions" pour mettre en place des outils de modélisation,
- le comportement aux effets dynamiques de l'explosion des silos de stockage, notamment ceux à la structure monolithique, tels que les silos dôme,
- les émissions de poussières, en particulier au plan de moyens d'ensilage moins producteurs de poussières, et du traitement des produits pour éviter le soulèvement des poussières. Pour ce dernier aspect, il s'agirait par exemple de poursuivre les travaux réalisés sur l'addition d'huile de colza et d'étudier notamment l'éventuelle incidence sur les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité des poussières (/64/),
- les sources d'inflammation au niveau de leur aptitude à pouvoir déclencher un incendie ou une explosion de poussières,
- la définition des zones à risques pour assister les industriels dans l'application des dispositions des nouvelles directives européennes,
- l'exploitation des informations disponibles sur les accidents caractéristiques graves (explosion et incendie) pour en tirer des enseignements afin d'améliorer la sécurité dans les stockages de produits agro-alimentaires.

**ORGANISATIONS PROFESSIONNELLES**  
**(liste non exhaustive)**

---

- Association Nationale de la Meunerie Française
- Centre d'Etude Technique de l'Industrie des Oléagineux Métropolitains (CETIOM)
- Chambre Syndicale de la Malterie Française (C.S.M.F.)
- Comité Français de la Semoulerie Industrielle
- Fédération des Coopératives d'Alimentations Animales (SYNCOPAC)
- Fédération Française des Coopératives Agricoles de Collecte d'Approvisionnements et de Transformation (F.F.C.A.T.)
- Fédération du Négoce Agricole (F.N.A.)
- Fédération des stockeurs de céréales et oléagineux
- Groupe de liaison sur la conservation du grain (GLCG).
- Groupement des Exportateurs Français d'Equipements pour le Grain (GEFEG)
- Groupement Professionnel des Conseillers Techniques en Sécurité Incendie (GPCTSI)
- Institut Français des Boissons, de la Brasserie et Malterie (IFBM)
- Institut Technique des Céréales et du Fourrager de France (ITCF)
- Office National Interprofessionnel des Céréales (O.N.I.C.)
- Syndicat National du Commerce Extérieur des Céréales (SYNACOMEX)
- Syndicat National des Déshydrateurs de France (S.N.D.F.)
- Syndicat National des Industriels de la Nutrition Animale (S.N.I.A.)
- Syndicat National du Sucre de France (S.N.F.S.)
- Union des Semouleries de Maïs
- Union des Syndicats des Industries de Produits Amylacés (USIPA)

**ORGANISMES**  
**(liste non exhaustive)**

---

AFNOR	: Association Française de Normalisation
APSAD	: Assemblée plénière des Sociétés d'Assurances Dommages
BARPI	: Bureau d'Analyses des Risques et Pollutions Industrielles
CDIA	: Centre de Documentation et d'Information de l'Assurance
CEE	: Communauté Economique Européenne
CEI	: Commission Electronique Internationale
CEN	: Comité Européen de Réglementation
CGSS	: Caisses Générales de Sécurité Sociale
CNPP	: Centre National de Prévention et de Protection
CRAM	: Caisses Régionales d'Assurance Maladie
DDAF	: Directions Départementales de l'Agriculture et de la Forêt
DDASS	: Direction Départementale Affaires Sanitaires et Sociales
DDE	: Directions Départementales de l'Equipement
DPPRSEI	: Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques - Service de l'Environnement Industriel (Ministère de l'Environnement)
DRIRE	: Direction Régionale de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement
Direction de la Réglementation : Service Interministériel de Défense et de Protection Civile	
GIG	: Institut Central des Mines Polonais
INERIS	: Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
INRS	: Institut National de la Recherche et de Sécurité (pour la Prévention des Accidents du Travail et des Maladies Professionnelles)
MSA	: Mutualité Sociale Agricole
NFPA	: National Fire Protection Association (USA)
VDI.	: Verein Deutsche Ingenieure
VVUU	: Institut de Recherche des Mines de République Tchèque

## BIBLIOGRAPHIE

- (/1/) **AFNOR** : NORME NFU 54-540 « Bâtiments agricoles et installations de stockage-sécurité des silos - Atténuations des effets des explosions par les événements de décharge-calcul des surfaces d'événements » Décembre 1986.
- (/2/) **AFNOR** : Projet de norme U54<sup>E</sup>.doc 18 « Conception générale des silos » Mars 1986.
- (/3/) **B. GOUPIL - GROUPAMA** : « Retour d'expérience - Analyse d'accidents » EUROFORUM 1997.
- (/4/) **F. MASSON – INERIS** : « Explosion d'un silo de céréales - Blaye 33 » Rapport de synthèse 1998.
- (/5/) **J.P. PINEAU – INERIS** : « Guide for fire and explosion protection of agro and food industry » contrat CIPACT 93018 CDG 12, HSMU 1996.
- (/6/) **J. JARRY - Ministère de l'Environnement** : « Applications des différentes directives et normes dans la réglementation française » Séminaire européen sur les explosions de poussières 1999.
- (/7/) **Ministère de l'Environnement** : « Guide méthodologique - Etude de danger d'une installation industrielle » 1995.
- (/8/) **J.P. PINEAU – INERIS** : « Explosions des poussières - Applicabilité des normes » EUROFORUM 1998.
- (/9/) **GEFEG** : « Les technologies françaises de stockage des grains ».
- (/10/) **Ministère de l'Environnement** : « Les silos et leurs équipements – enquêtes » Journée d'information Silo du 13 mars 1997.
- (/11/) **ONIC** : « Evolution des capacités de stockage en France » 1997.
- (/12/) **J.P. PINEAU - CERCHAR** : « La maîtrise des risques dans la manutention et le stockage des pulvérulents alimentaires » 1985.
- (/13/) **A. CLEUET - P. GROS - M. PETIT- INRS** : « Les mélanges explosifs » mise à jour 1994.

- (/14/) **R. LÖDEL - F. MASSON - D. CARSON – INERIS** : « Analyses d'accidents et retours d'expériences » Séminaire européen sur les explosions de poussières 1999.
- (/15/) **BARPI** : « Base de données ARIA » « Accidents survenus dans les installations de stockage de produits agroalimentaires ou dans les installations connexes » Etat au 30 novembre 1997.
- (/16/) **FFCAT** : « Guide silos, céréales, oléagineux, protéagineux » 1999.
- (/17/) **G. COLIN - GROUPAMA - A. HUMEZ - Service d'Incendie et de secours du Val d'Oise** : « Etude de cas d'une gestion de crise : incendie en silo de luzerne » EUROFORUM 1998.
- (/18/) **P. ROUX – INERIS** : « Les risques d'incendie et d'explosion dans les stockages agroalimentaires » Préventique et sécurité n° 35 et 36 1997.
- (/19/) **M. BOUDALAA – INERIS** : « Comment identifier les principales sources d'inflammation et d'explosions des poussières » EUROFORUM 1998.
- (/20/) **A. CZYZ – INERIS** : « Les sources d'inflammation et leur impact sur la conception des usines » Séminaire européen sur les explosions des poussières 1999.
- (/21/) **D. GUIONNET – INERIS** : « Risques électrostatiques dans les silos » Journée d'information SILO du 13 mars 1997.
- (/22/) **D. CARSON - R. LÖDEL – INERIS** : « Inflammation spontanée des poussières » Face au risque n° 320 1996.
- (/23/) **R. LÖDEL – INERIS** : « Self ignitions and fermentations - Principles and products concerned » Séminaire européen sur les explosions de poussières 1999.
- (/24/) **J.P. PINEAU – INERIS** : « Guide for fire and explosion protection of agro and food industry- Appendix 1 – Self heating and self ignition tests performed at INERIS and VVUU with agricultural dusts » 1996.
- (/25/) **C. PROUST – INERIS** : « Les mécanismes des explosions de poussières » EUROFORUM 1998.
- (/26/) **B. VEYSSIERE – ENSMA** : « Modélisations des explosions de poussières : quelles sont les connaissances actuelles ? » EUROFORUM 1998.
- (/27/) **G. LUNN – HSL** : « Gas and dust explosions » Séminaire européen sur les explosions de poussières 1999.
- (/28/) **K. LEBECKI – GIG** : « Recent advances in agricultural dust explosions » Séminaire européen sur les explosions de poussières 1999.
- (/29/) **CERCHAR** : « Influence de la géométrie de l'installation et de la turbulence induite par la propagation d'une explosion » Congrès EUROPEX 1987.

- (/30/) **CNPP** – « traité pratique de Sécurité Incendie ».
- (/31/) **J. JARRY – Ministère de l’Environnement** : « Maîtrise de l’urbanisation - La prise en compte des effets thermiques, mécaniques et toxiques » Sécurité, Revue de préventique n° 15 1994.
- (/32/) **CEN** : Norme européenne EN 1127-1 :1997. « Atmosphères explosives- Prévention de l’explosion et protection contre l’explosion – Partie 1 : Notions fondamentales et méthodologiques ».
- (/33/) **INERIS** : « Poussières : quels risques pour l’entreprise » Références n° 18 1997.
- (/34/) **INRS** : « Incendies et lieux de travail » La ligne Prévention 1996.
- (/35/) **C. BOCQUET – SICLI** : « Généralités sur la protection contre les explosions de poussières » EUROFORUM 1998.
- (/36/) **C. GERARDOT – FIKE France** : « Maîtrise des explosions de poussières » EUROFORUM 1997.
- (/37/) **VDI 3673** : Kommission Reinhaltung der Luft « Drückentlastung von Staubexplosionen » 1979.
- VDI 3673** : Kommission Reinhaltung der Luft « Drückentlastung von Staubenexplosionen » 1995
- (/38/) **NFPA 68** : « Guide for explosions venting » 1954.  
 « Venting of deflagrations » 1988.  
 « Guide for venting of deflagrations » 1994.
- (/39/) **P. ROUX - C. PROUST - INERIS** : « Méthode de protection contre les explosions-Events » Rapport d’étapes pour le Ministère de l’Environnement 1999.
- (/40/) **Centre Technique Industriel de la Construction Métallique** : « Sécurité d’applications des Mesures de Sécurité Incendie dans les silos » Lettre commande n° 86/98 du Ministère de l’Environnement 1999.
- (/41/) **C. PROUST - P. ROUX - B. CHUON - INERIS** : « Prévoir les effets des explosions de poussières sur l’environnement - EFFEX, un outil de simulation » - Etude pour le Ministère de l’Environnement 2000.
- (/42/) **P. ROUX - C. PROUST – INERIS** : « Modélisation d’explosions et définition des scénarios / cas des silos » EUROFORUM 1998.
- (/43/) **R. LÖDEL - J.P. HOUEIX - F. VARIN – INERIS** : « Scénarios d’accidents dans les silos et modélisations associées » EUROFORUM 1999.

- (/44/) **Ingénieurs de Paris** : « Dispositions constructives destinées à limiter des effets d'une explosion dans les silos à céréales en béton armé - Création d'événements » Etude pour le Ministère de l'Environnement 1999.
- (/45/) **S. HALAMA - E. ERB – INERIS** : « Protection des installations industrielles contre les effets de la foudre » RST 03 1995.
- (/46/) **SECHAUD et METZ** : « Etudes génériques de l'influence des antennes GSM sur les silos » - Etude pour le Ministère de l'Environnement 1998.
- (/47/) **FFCAT** « Stockage et conservation - Environnement - Sécurité » 1993.
- (/48/) **D. CARSON – INERIS** : « Sécurité Explosion-Incendie par inertage des installations utilisant des produits pulvérulents » EUROFORUM 1997.
- (/49/) **ITCF** : « Le séchage du grain » 1994.
- (/50/) **FFCAT** : « Conservation des grains ».
- (/51/) **J.P. PINEAU – INERIS** : « Guide for fire and explosion protection of agro and food industry - Resultats of the test with tigered barriers at experimental Mine Barbara (CMI, PL ) » 1996.
- (/52/) **D. GASTON – INERIS** : « Les équipements spécifiques pour éviter l'électricité statique sur les conteneurs souples » INFOVRAC 1997.
- (/53/) **C. LOYER - J. BROZ - D. GUIONNET – INERIS** : « Les risques Incendie engendrés par les courroies transporteuses » INFOVRAC 1996.
- (/54/) **J. POULIN** : « Les courroies transporteuses anti-chaueur et anti-feu » INFOVRAC 1996.
- (/55/) **T. DESTOOP – D. PERARD - NEU TRANSF AIR** : « Manutentions pneumatiques et explosions de poussières » EUROFORUM 1998.
- (/56/) **P. de MAISONNEUVE** : « Les critères de choix d'un filtre de dépolluierage » revue INFOVRAC Août-Septembre 1993.
- (/57/) **G. OLLINGER** : « Captation de poussières sur transporteurs : dépolluierage centralisé ou point par point » revue INFOVRAC Octobre-Novembre 1993.
- (/58/) **J.F. PETITPREZ** : « Des solutions pour prévenir les risques d'explosions de poussières » revue INFOVRAC Octobre-Novembre 1997.
- (/59/) **D. CARSON – INERIS** : « Le classement des zones de poussières explosives » EUROFORUM 1999.
- (/60/) **P. BURGHART - CETIM - R. LÖDEL - INERIS** : « Les incendies de séchoirs de tournesol » revue R.G.S. n° 95 Juin-Juillet 1990.

- (/61/) **G. COLIN - J.P. MIGUET - GROUPAMA Prévention** : « Incendie de séchoirs à grains - Prévention-Protection » 1992.
- (/62/) **INRS** : « Intervention d'entreprises extérieures - Aides mémoires pour la prévention des risques » La Ligne de prévention ED 757 1994.
- (/63/) **Lieutenant-Colonel LAPICQUE et FRANOZ - DPSIS** : « Interventions des services d'incendie et de secours face aux risques silos » Journée d'information SILO du 13 mars 1997.
- (/64/) **CETIOM** « Usage d'huile de colza comme additif anti-poussière dans les manipulations de céréales » 1991.

**Autres documents de référence :**

**INRS** : « Stockage des produits alimentaires pulvérulents » 1986.

**INRS** : « Silos – la sécurité dans la conception et l'exploitation » 1986.

**La Prévention Rurale** : « Connaissance des risques et recherche de la sécurité dans les silos à grains ».

**FFCAC – ITCF** : « Entretien et sécurité dans les silos » guide 1983.

**INERIS - INRS** : « Guide méthodologique relatif aux risques d'incendies et d'explosions dus à l'électricité statique » à paraître.

**FFCAC** : « Guide permanent Hygiène-Sécurité –Environnement » 1991.