

# COMMENT METTRE EN PLACE DES EVENTS D'EXPLOSION ?

CH. PROUST

INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques)  
Parc Technologique Alata - B. P. 2 - 60550 - Verneuil-en-Halatte.

## 1. INTRODUCTION

En France, la technique des événements d'explosion est très largement employée, bien connue et bien acceptée dans de nombreux secteurs de l'industrie. Compte tenu de l'importance du sujet, il paraît nécessaire de lui consacrer une place spécifique dans ce séminaire d'autant plus que nombre de guides de dimensionnement d'événements sont aujourd'hui publiés et peuvent présenter des contradictions. L'objet de cette présentation est de faire une mise au point.

Dans un premier temps, nous expliquons ce qu'est un événement et la manière dont il fonctionne (principes et paramètres). Ensuite, nous dressons un bref historique qui permet de mettre les différentes méthodes en perspective. Puis, nous résumons les développements actuels et précisons enfin la manière dont les choses pourraient finalement évoluer en vue d'une méthode européenne unifiée dans les prochaines années.

## 2. PRINCIPES ET PARAMETRES

### 2.1 QU'EST-CE QU'UN « EVENT D'EXPLOSION »

Un événement d'explosion est un orifice initialement obturé par lequel peuvent s'échapper les produits de l'explosion. Il est prévu pour s'ouvrir lorsque la pression interne dépasse une valeur critique, choisie significativement plus petite que la pression maximale admissible par l'ensemble de la structure. La surface de cet orifice est choisie suffisamment grande pour que l'excédent de gaz produit par la flamme puisse être déchargé vers l'extérieur de manière à ce que la surpression interne reste en deçà de la pression maximale admissible par la structure.

Il existe aujourd'hui de nombreux types de système d'événement dont certains ont été présentés par les constructeurs au cours de ce séminaire. Les plus courants sont les « membranes » qui se déchirent selon un schéma prédéfini afin d'éviter la fragmentation et les portes (ou « clapets ») qui peuvent se refermer après la décharge (figure 1).

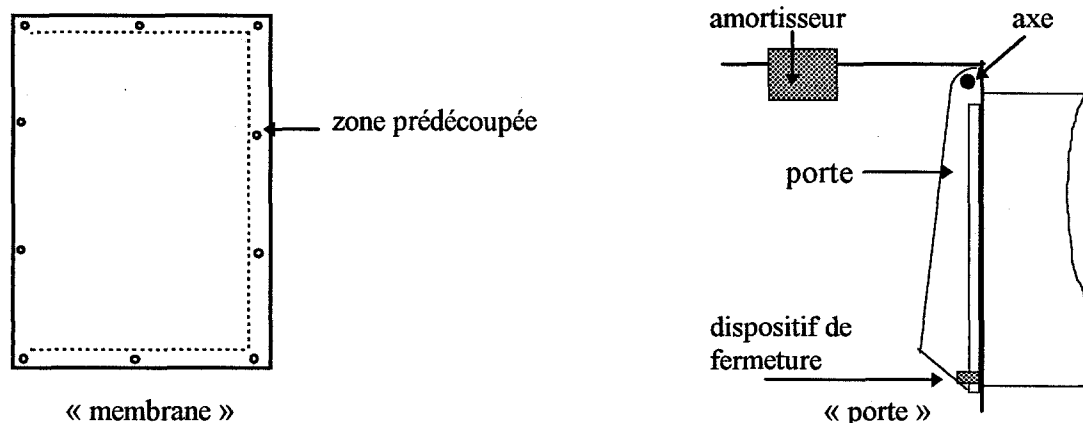


figure 1

## 2.2 LES CRITERES D'EFFICACITE

Pour comprendre le fonctionnement des événements, il est indispensable de rappeler quelques éléments concernant les mécanismes de développement des explosions de poussières.

On suppose qu'un nuage suffisamment dense de poussières inflammables est formé dans un volume clos et qu'une source d'inflammation (étincelle, surface chaude,...) y est présente. Les particules dans le voisinage immédiat de la source sont mises à feu sous l'effet de la chaleur, puis brûlent dans l'air à température élevée (1000 à 2000 °C, parfois plus encore). Ces particules en combustion peuvent elles-mêmes servir de source d'inflammation pour les particules proches si bien qu'une zone de combustion, une flamme, se propage d'elle-même, à travers tout le nuage en transformant sur son passage des réactifs froids (20 °C) en produits de combustion chauds (1000 à 2000 °C). En raison de ce dégagement intense de chaleur, le fluide subit une forte expansion thermique à travers la flamme: une particule de 1 cm<sup>3</sup> subit ainsi une dilatation de 5 à 10. Cette « production de volume » est à l'origine de l'augmentation de la pression dans l'équipement où se produit l'explosion. Notons que le taux de combustion de la flamme dépend non seulement de la nature du milieu et de sa concentration mais également du degré d'agitation, « turbulence », du nuage qui facilite le mélange entre les réactifs et les produits de combustion favorisant ainsi l'inflammation.

Nous nous intéressons essentiellement au cas des équipements à l'intérieur desquels la pression reste homogène pendant l'explosion: il s'agit des « enceintes » dont le rapport entre la plus grande et la plus petite dimension n'excède pas 5 (H/D < 5).

La finalité de l'événement est de décharger à l'extérieur l'excédent de gaz produit par la combustion de manière à limiter la surpression d'explosion à une valeur acceptable,  $P_{red}$ . Si A est la surface offerte à la décharge,  $C_d$  le coefficient de décharge de l'événement,  $P_{stat}$  la surpression d'ouverture de l'événement et  $\rho$  la densité du fluide dans l'enceinte alors on peut estimer que le débit de gaz expulsé par l'événement  $Q^-$  est :

$$Q^- = C_d \cdot A \cdot \sqrt{(2 \cdot P_{red} / \rho)}$$

tandis que le débit de gaz éjecté  $Q^+$  est approximativement la somme de la production de volume par la flamme et de la quantité de gaz accumulée avant l'ouverture de l'événement :

$$Q^+ = S_f \cdot V_c \cdot E + C_d \cdot A \cdot \sqrt{(2 \cdot P_{stat} / \rho)}$$

où  $S_f$ ,  $V_c$  et E représentent respectivement la surface, le taux de combustion de la flamme et le taux d'expansion des produits de combustion. L'événement est correctement dimensionné dès lors que  $Q^-$  est plus grand que  $Q^+$ .

$S_f$  ne peut excéder S la surface interne de l'enceinte. S peut se mettre sous la forme  $S = V^{2/3} \cdot f(H/D)$  où V est le volume de l'enceinte et f un facteur de forme (f = 5.5 pour un cylindre tel que H/D=1 et 7 pour H/D=5). Dans ces conditions, la surface d'événement à installer est exprimée par une loi du type :

$$A / V^{2/3} = [ V_c \cdot E ] \cdot f(H/D) / [ C_d \cdot \sqrt{(2 \cdot P_{red} / \rho)} - C_d \cdot \sqrt{(2 \cdot P_{stat} / \rho)} ] \quad [1]$$

Dans cette expression, le membre de droite comporte a priori les données connues (type de poussières, intensité de la turbulence, surpression maximale admissible de l'enceinte et surpression d'ouverture de l'évent) tandis que l'autre membre contient la valeur recherchée.

On constate également que l'accroissement des facteurs suivants augmente la surface d'évent requise, toutes choses égales par ailleurs:

- le volume de l'enceinte ;
- le taux de combustion ;
- le taux d'expansion ;
- la surpression maximale admissible .

Enfin, la diminution de l'écart entre  $P_{stat}$  et  $P_{red}$  entraîne une augmentation de A.

## 2.3 REMARQUES

Le raisonnement ci-dessus implique que la pression reste homogène dans l'équipement c'est pourquoi, il s'adresse prioritairement aux enceintes. Dans le cas inverse, les « canalisations », la pression au droit de la flamme est très différente de celle exercée sur les parois notamment assez loin de la flamme si bien que l'évent, du point de vue de la diminution de la pression, n'a qu'un effet local. De surcroît, la propagation de la flamme semble dépendre largement de l'interaction avec les ondes de pression qui se propagent dans l'équipement et il a été montré que, dans un certain nombre de circonstances, l'onde de détente produite par l'évent lors de son ouverture peut avoir un effet promoteur sur le développement de l'explosion. Aussi, les critères d'utilisation des événements sont-ils très différents pour les enceintes et pour les canalisations.

Remarquons enfin que les arguments théoriques présentés ci-dessus datent des années 1960-1970 alors que les premières méthodes de dimensionnement d'évent ont été mises au point bien avant.

## 3. EVOLUTIONS DE LA TECHNIQUE

### 3.1 LA METHODE DU « COEFFICIENT D'EVENT » : 1920 (?) - 1980

Historiquement, l'une des premières méthodes utilisées est celle du « coefficient d'évent » mise au point aux USA. La surface d'évent à installer est proportionnelle au volume de l'enceinte et dépend de la violence de l'explosion (classe A, BAR ou C : tableau 1) selon le schéma suivant (figure 2). La détermination de la violence de l'explosion est réalisée à l'intérieur d'une petite enceinte d'explosion : la « bombe de Hartmann » de 1,2 litre (figure 3) en mesurant la « vitesse maximale d'augmentation de la pression ».

| Classe d'explosion | $dP/dt \text{ max (bar/s)}$ | Commentaire      |
|--------------------|-----------------------------|------------------|
| A                  | < 345                       | violence faible  |
| BAR                | 345-690                     | violence moyenne |
| C                  | > 690                       | violence élevée  |

Tableau 1

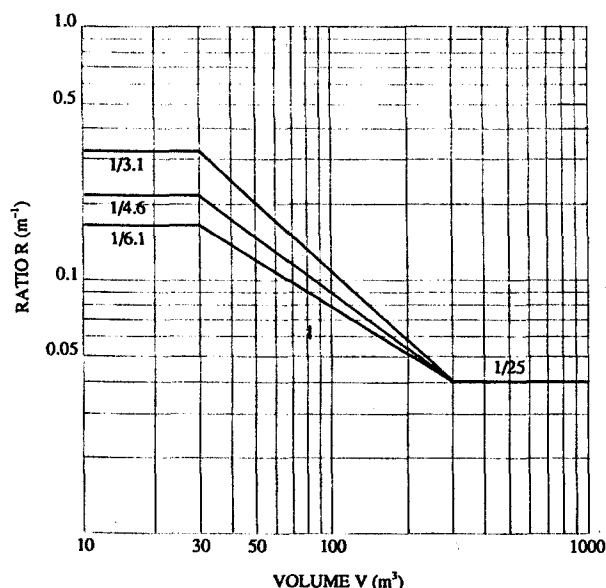


Figure 2

Les valeurs retenues pour le coefficient d'évent devaient limiter la surpression interne à moins de 140 hPa.

Le postulat de base dont est issue semble-t-il cette méthode serait que la combustion interne est supposée volumétrique et ne se produit pas à l'intérieur d'une flamme d'épaisseur relativement faible, c'est pourquoi le facteur d'échelle est  $A/V$  au lieu de  $A/V^{2/3}$ . On sait aujourd'hui que cette hypothèse n'est pas vérifiée du moins pour les équipements de dimensions industrielles et pour cette raison de principe, la méthode est devenue caduque dans la communauté scientifique.

La pratique a également eu raison de cette méthode notamment parce qu'elle conduit à des surfaces d'évent beaucoup trop élevées lorsque les enceintes sont de grandes dimensions.

### 3.2 LA METHODE DU « FACTEUR K » : 1970-1985

Cette méthode a été proposée en Angleterre dans les années 1970 et semble encore utilisée de nos jours. Le paramètre d'échelle retenu est le facteur K en accord avec la théorie présentée ci-dessus (cf 3.2):

$$K = V^{2/3} / A \quad \text{avec} \quad K = 0,8 + 4 \cdot P_{\text{red}} \quad (P_{\text{red}} \text{ en bar relatif})$$

Avec les hypothèses suivantes:

- Pstat est environ 100 hPa (pression relative) ;
- explosions de violence modérée (classe ST2: cf 3.3) ;
- volumes plus petits que 1000 m³ ;
- événements à faible inertie (masse spécifique plus petite que 10 kg/m²).

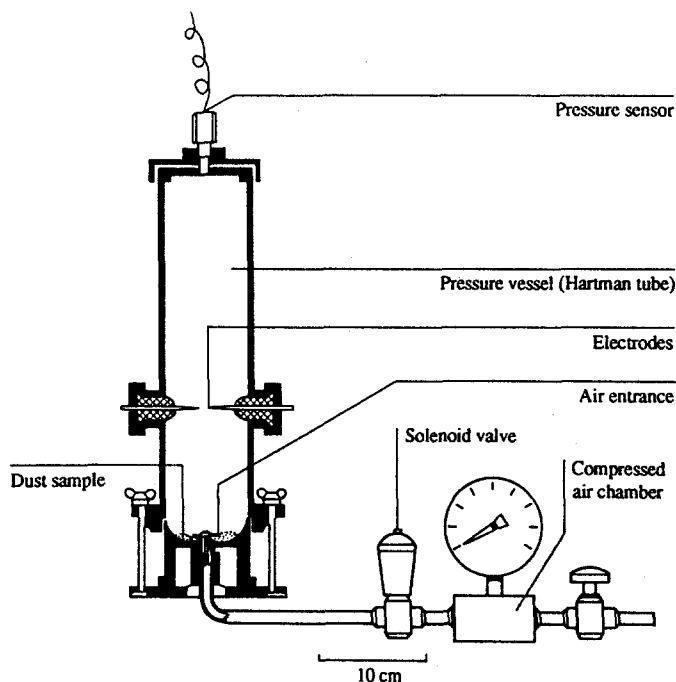


Figure 3

On constate que cette méthode est cohérente avec la phénoménologie décrite précédemment et permet d'obtenir rapidement un ordre de grandeur de la surface d'évent à installer, c'est pourquoi elle est toujours employée. Cependant, son caractère trop approximatif a motivé une approche plus fine, utilisée de nos jours.

### 3.3 LA METHODE DES « NOMOGRAMMES » : 1980-1995

Cette méthode complète et précise la précédente sur plusieurs points. Elle respecte également la phénoménologie incluse dans l'expression [1] mais permet en plus de tenir compte explicitement de la violence de l'explosion, de  $P_{stat}$  et offre la possibilité de tenir compte de la présence, souvent nécessaire, d'une canalisation prolongeant l'évent dont la finalité est de décharger les produits de l'explosion vers une zone non dangereuse. Elle est issue d'essais effectués en Suisse, en Allemagne et en France dans les années 1970-1985. En France, elle a été formalisée sous la forme d'une norme expérimentale AFNOR U54-540 toujours en vigueur.

Le principe consiste à remarquer (cf [1]) qu'on peut extrapoler à une enceinte de volume quelconque les surfaces d'évent déterminées initialement pour un volume de  $1 \text{ m}^3$  en multipliant les surfaces mesurées par  $V^{2/3}$ , toutes choses égales par ailleurs, dont en particulier la violence de l'explosion représentée par le paramètre  $V_c \cdot E$ . Il « suffit » alors d'être capable de prédire la violence de l'explosion pour obtenir un outil capable de prédire les surfaces d'évent à installer en fonction de la situation industrielle concernée.

On peut en théorie estimer la violence de l'explosion en mesurant l'évolution de la pression dans une enceinte fermée ( $Q^- = 0$ ) en notant que la production de volume,  $Q^+$ , permet l'augmentation de la pression interne,  $P$ , selon une loi du type (compression « isentropique ») :

$$dP/dt = \gamma \cdot P / V \cdot Q^+$$

Lorsque  $Q^+$  est maximal ( $Q^+ = S \cdot V_c \cdot E$  où  $S = V^{2/3} \cdot f(H/D)$ ),  $dP/dt$  est maximum et on obtient finalement :

$$(dP/dt)_{\max} = \gamma \cdot P / V \cdot V^{2/3} \cdot f(H/D) \cdot V_c \cdot E$$

soit

$$(dP/dt)_{\max} = K_{ex} / V^{1/3} \quad \text{avec} \quad K_{ex} = \gamma \cdot P \cdot f(H/D) \cdot V_c \cdot E \quad [2]$$

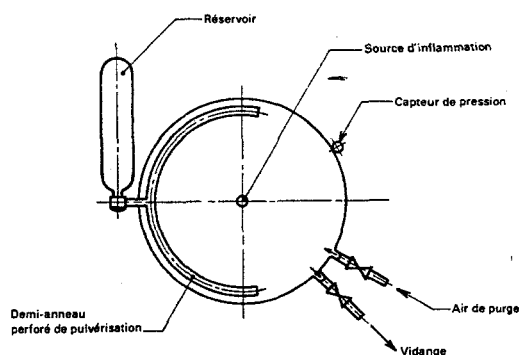


Figure 4 : chambre de  $1 \text{ m}^3$  cubique

Le coefficient «  $K_{ex}$  » donne une mesure de la violence de l'explosion indépendante du volume et pour toute une gamme de géométrie d'enceintes car le facteur de forme est assez peu variable tant que  $H/D < 5$ . Cependant, il faut bien garder à l'esprit que, s'il est vrai que «  $K_{ex}$  » dépend de la nature des poussières, il est aussi largement fonction des autres caractéristiques du nuage dont spécifiquement le niveau de turbulence et dans une moindre mesure de la concentration (cf 2.2). En France, on propose de mesurer «  $K_{ex}$  » en tenant compte du niveau de turbulence. Pour cela, on utilise des appareils standard de  $1 \text{ m}^3$  (figures 4 et 5) qui permettent une mesure directe de «  $K_{ex}$  ». L'appareil sur la figure 4 a été conçu en Allemagne, la « chambre de  $1 \text{ m}^3$  »

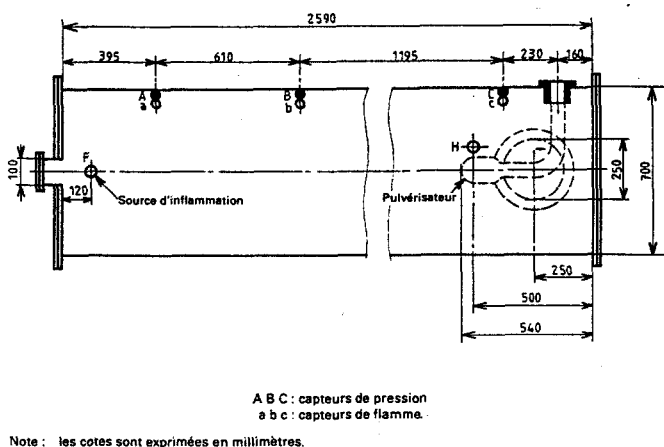


Figure 5 : chambre de 1 m<sup>3</sup> allongée

cubique », et la valeur de «  $K_{ex}$  » mesurée s'appelle par convention «  $K_{max}$  » ou «  $K_{st}$  » tandis que l'appareil sur la figure 5 a été conçu en France, la « chambre de 1 m<sup>3</sup> allongée », et la valeur de «  $K_{ex}$  » mesurée s'appelle par convention «  $K_{maxT}$  ». Les valeurs de «  $K_{st}$  » correspondent aux situations courantes où le degré d'agitation du nuage au moment de l'inflammation est jugé moyen ou faible comme dans les silos en cours de remplissage tandis que les valeurs de «  $K_{maxT}$  » correspondent aux situations spécifiques où le degré d'agitation du nuage au moment de l'inflammation est fort comme dans les broyeurs ou lorsque l'explosion provient d'un autre endroit de l'installation via une canalisation. On précise qu'il n'existe aucune corrélation permettant de relier pour un même produit les valeurs de «  $K_{maxT}$  » et «  $K_{st}$  ».

Des abaques de dimensionnement d'évent ont été produits à l'aide de la loi d'échelle [1] et calés sur l'expérience. Les paramètres de base sont V, Pred, Pstat, la nature du produit et le degré de turbulence («  $K_{maxT}$  » et «  $K_{st}$  »). Pour simplifier, nous pouvons définir, sur la base des mesures de «  $K_{maxT}$  » et «  $K_{st}$  », des « classes d'explosivité » comme indiqué dans le tableau 2.

| Turbulence « faible » et « moyenne » |                                   | Turbulence « forte » |                                     |
|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| groupe ST1                           | pour $0 < K_{st} < 200$ bar.m/s   | groupe P1            | pour $0 < K_{maxT} < 100$ bar.m/s   |
| groupe ST2                           | pour $200 < K_{st} < 300$ bar.m/s | groupe P2            | pour $100 < K_{maxT} < 400$ bar.m/s |
| groupe ST3                           | pour $300 < K_{st} < 600$ bar.m/s | groupe P3            | pour $400 < K_{maxT} < 600$ bar.m/s |

Tableau 2

On rappelle qu'il n'y a pas de correspondance formelle entre les groupes de type ST et de type P.

Les abaques sont présentés sur les figures 6 et 7 respectivement pour les niveaux de turbulence faible/moyen et fort et sont valables pour Pstat plus petit que 100 hPa environ. On peut cependant avec une bonne précision déduire les valeurs de Pred correspondant à des valeurs de Pstat plus grandes que 100 hPa. Pour cela, il suffit d'ajouter aux valeurs de Pred du graphe l'écart entre Pstat et 100 hPa. Cette façon de procéder est acceptable jusqu'à Pstat de l'ordre de 500 hPa au moins.

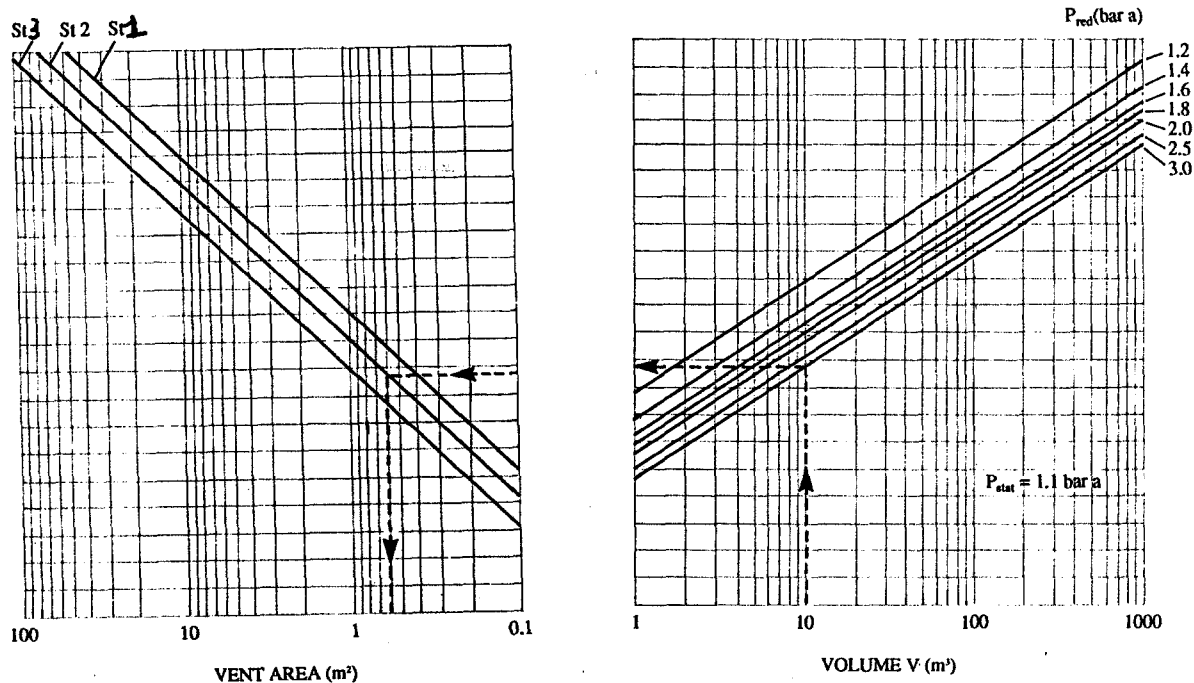


Figure 6 : nomogramme pour turbulence « faible » et « moyenne »

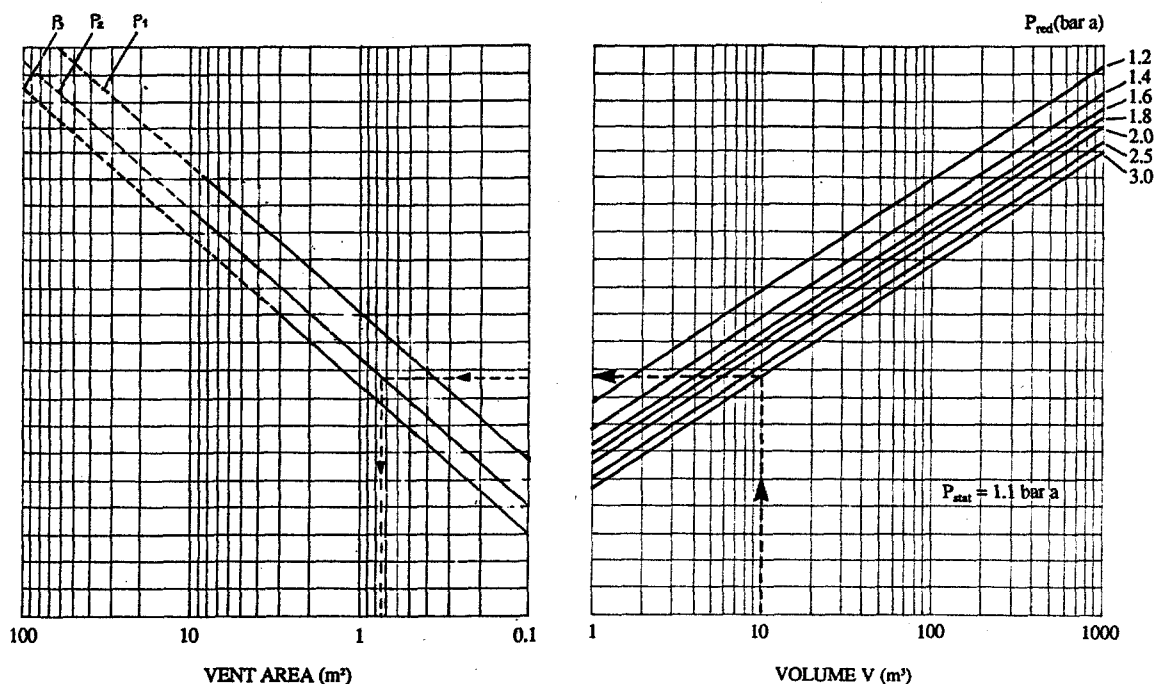


Figure 7 : nomogramme pour turbulence « forte »

Il n'est souvent pas envisageable d'admettre que la décharge des produits de l'explosion d'un récipient protégé par un évent puisse se faire dans un atelier en raison des risques de blessures au personnel mais également du risque d'une « explosion secondaire » amorcée sous la double action du souffle qui soulève les poussières dans l'atelier et de la flamme issue de l'événement et susceptible de mettre à feu le mélange ainsi formé (cf 2.2). Aussi, est-il indispensable de pouvoir diriger le flux de produits de l'explosion vers une zone non dangereuse à l'extérieur de

l'atelier. On a recours pour cela à des « canalisations de décharge » dont la longueur dépend de la géométrie de l'atelier. Il a été constaté que cette canalisation, dont le diamètre doit au moins être égal à celui de l'évent, induit une perte de charge qui s'oppose à la décharge et peut dans certaines situations être le siège d'une explosion. Pour ces raisons, la surpression interne maximale dans l'enceinte 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 de définir un paramétrage cohérent de l'incidence de cette canalisation, et, à défaut de mieux, on utilise les corrélations graphiques suivantes (figure 8) fondées sur des résultats expérimentaux pour estimer l'accroissement de  $P_{red}$ .

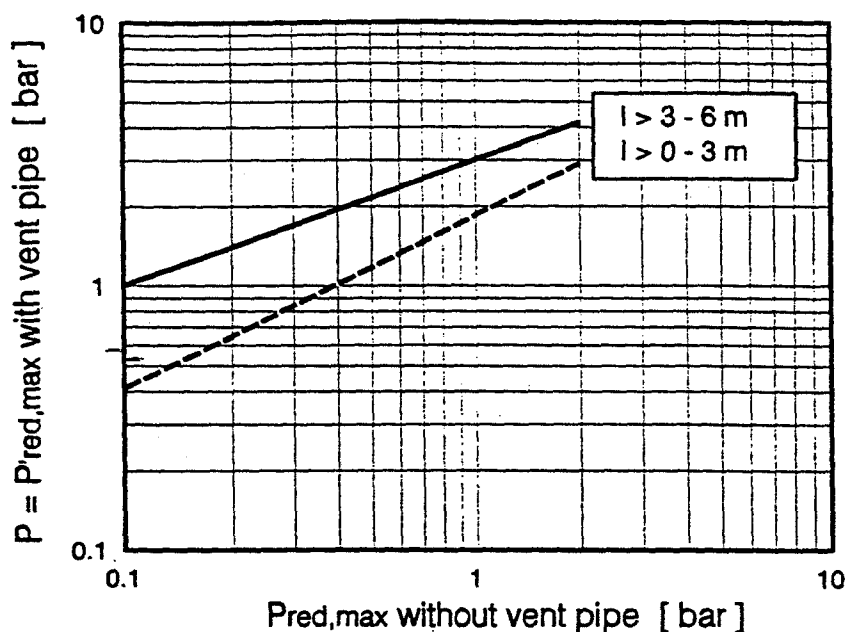


Figure 8 : incidence d'une « canalisation de décharge »

#### 4. DEVELOPPEMENTS ACTUELS

La méthode des « nomogrammes » constitue l'armature des recommandations officielles pour le dimensionnement des événements en Europe et aux USA. Cependant, de nombreux aspects pratiques ne sont toujours pas pris en compte et il s'est avéré nécessaire de la compléter. Par exemple, on a tenté de prendre en compte notamment les points suivants:

- efficacité réelle des systèmes d'évent commercialisés ;
- incidence du facteur de forme ;
- dimensionnement des surfaces d'évent pour les niveaux de turbulence « faibles » ou « très faibles » ;
- protection par évent des enceintes interconnectées par des canalisations ;
- protection par évent des enceintes de très faible résistance ;
- effets externes de l'explosion.

Nous présentons dans ce qui suit l'état actuel de ces évolutions mais dans ce domaine, encore largement sous le feu de la critique scientifique et technique, rien n'est encore réellement fermement établi et les résultats présentés sont à ce titre sujets à évolution non simplement dans leur forme mais également sur le fond. Cependant, certaines de ces évolutions figurent déjà dans des recommandations étrangères (VDI, NFPA, ICHemE...) connues en France et doivent de ce fait être commentées.

#### 4.1 L'EFFICACITE DES SYSTEMES D'EVENT D'EXPLOSION

Les abaques de dimensionnement (« nomogrammes ») ont été établis au moyen de membranes fines et extrêmement légères (moins de  $10 \text{ kg/m}^2$ ) qui s'ouvrent très rapidement. Les systèmes d'évent commerciaux peuvent selon leur constitution, leur inertie notamment, s'ouvrir moins bien et moins vite si bien que la surface moyenne offerte à la décharge des produits de l'explosion est plus petite que la surface maximale d'ouverture. L'efficacité des ces systèmes d'évent est donc réduite par rapport à celle des membranes fines. Par ailleurs, il a été observé que la surpression à laquelle s'ouvre un système d'évent lors d'une explosion réelle ( $P_{\text{dyn}}$ ) peut être significativement différente de celle mesurée sous chargement statique,  $P_{\text{stat}}$  (figure 9). L'écart semble dépendre considérablement de la structure du système d'évent. Or, on constate au vu des abaques que la surpression maximale d'explosion dépend assez significativement des caractéristiques d'ouverture de l'évent (représentées par  $P_{\text{stat}}$  pour les membranes fines).

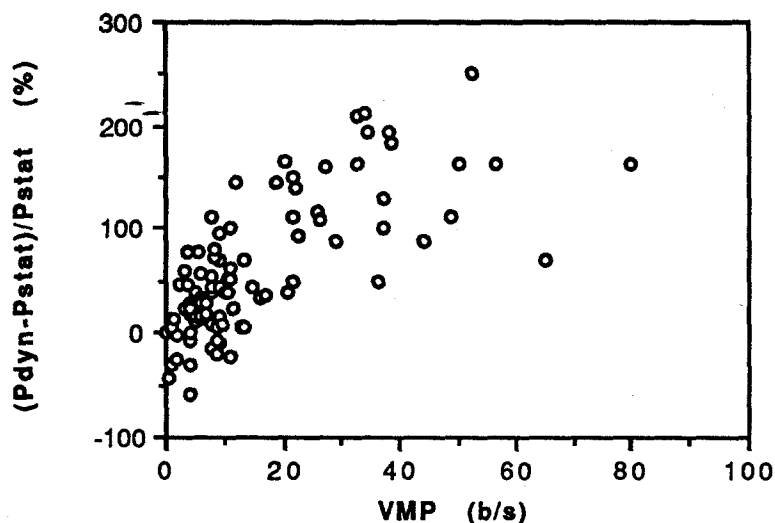


Figure 9

Il en résulte que l'efficacité des systèmes d'évent commercialisés peut s'avérer extrêmement différente des membranes fines utilisées pour établir les nomogrammes à la fois aux plans de la surface réellement offerte à la décharge et de la pression d'ouverture lors d'une explosion.

Pour ces raisons, il est envisagé de comparer ces systèmes d'évent aux membranes fines et d'en déduire un « coefficient d'efficacité ». Il est supposé que l'efficacité est correctement représentée par un coefficient établi sur la base d'essais comparatifs. On produit pour cela dans une chambre d'essai équipée du système d'évent à tester (surface de décharge nominale =  $A_r$ ) une explosion de poussières dans les conditions standard des nomogrammes et on mesure  $P_{\text{red}}$ .

On détermine par ailleurs, à l'aide des nomogrammes, la surface de décharge,  $A$ , juste suffisante pour obtenir cette même valeur de  $P_{red}$  (donc obtenue avec des membranes fines). Le coefficient d'efficacité est le rapport  $A/A_s$ , inférieur à 1. En France, on suggère une méthode de test sur la base d'une chambre de  $10 \text{ m}^3$  avec une turbulence forte et en Allemagne des essais au moyen d'une enceinte de  $60 \text{ m}^3$  avec une turbulence moyenne (recommandations VDI).

Cependant, l'analyse phénoménologique suggère que tous les paramètres d'efficacité d'un système d'évent, surpression d'ouverture en régime d'explosion et vitesse d'ouverture, dépendraient essentiellement du taux d'augmentation de la pression ( $dP/dt$ ). Or l'expression [2] indique que ce dernier paramètre dépend à la fois de la violence de l'explosion ( $V_c$  qui dépend de la nature de la poussière et du degré de turbulence) et du volume de l'enceinte. Dans ces conditions, on comprend que les méthodes françaises et allemandes sont susceptibles de fournir des résultats très différents pour un même système d'évent et il est nécessaire d'approfondir le sujet pour définir une méthode unifiée et cohérente.

## 4.2 L'INCIDENCE DU FACTEUR DE FORME

L'analyse théorique le suggère et les résultats expérimentaux le confirment, le facteur de forme de l'équipement à protéger a une incidence significative sur la dimension des surfaces d'évent. On observe ainsi que plus l'allongement de l'appareil est grand ( $H/D$  croît), plus la pression d'explosion est importante, toutes choses supposées égales par ailleurs notamment le volume de l'enceinte et la surface d'évent (figure 10).

On suppose que l'influence de l'allongement de l'enceinte permet à la fois l'augmentation de la surface de la flamme et le développement d'un niveau de turbulence plus élevé que celui existant au moment de l'inflammation, sous l'effet du souffle de la flamme (cf 2.2). Ces deux effets seraient d'autant plus marqués que le rapport  $H/D$  est grand et que la surface de l'évent est importante ( $P_{red}$  d'autant plus petit) ce que corroborent les résultats des essais. Il est actuellement suggéré d'extrapoler les résultats de la figure 10 par exemple, en remplaçant l'échelle verticale graduée en valeurs de  $A$  par une échelle graduée selon  $A/V^{2/3}$  (figure 11).

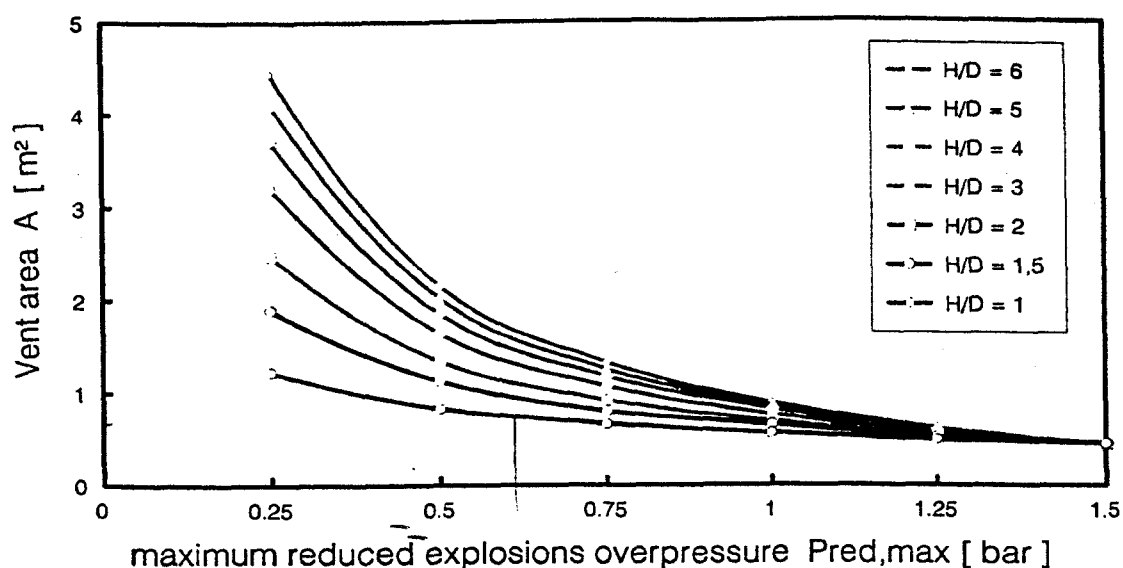


Figure 10 : évolution de la surface de l'évent en fonction de  $H/D$  et de  $P_{red}$  pour un silo de  $20 \text{ m}^3$  avec une turbulence moyenne et une poussière de type ST1

Il semble cependant que les dimensions de l'enceinte et non uniquement un rapport de dimensions peuvent également avoir une incidence sur l'effet de l'allongement (par exemple, la production de la turbulence par l'écoulement au devant de la flamme dépend d'un nombre de Reynolds, fonction de  $D$  et non uniquement de  $H/D$ ). Par ailleurs, l'incidence de la violence de l'explosion n'est actuellement pas prise en compte. Une analyse plus fine est donc requise pour préciser les limites de l'exercice d'extrapolation. On peut simplement préciser à l'heure actuelle que l'effet de l'allongement peut être évalué raisonnablement à l'aide du graphe 11, pour des violences d'explosion moyenne (turbulence moyenne et produits de type ST1) et des enceintes dont le volume n'excède par quelques centaines de  $m^3$ .

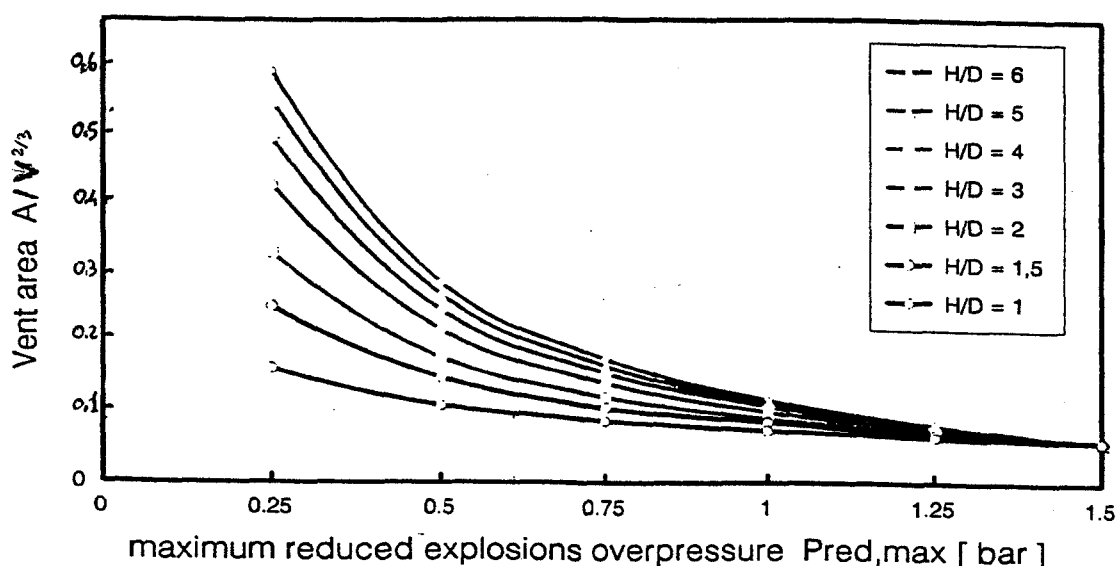


Figure 11 : variation de  $A/V^{2/3}$  en fonction de  $H/D$  pour une turbulence moyenne et une poussière de type ST1

#### 4.3 TURBULENCE « FAIBLE » ET « TRES FAIBLE »

Une critique fréquente à l'égard des méthodes actuelles de dimensionnement des événements est que leur dimension est beaucoup plus grande que nécessaire lorsque le degré de turbulence est assez faible comme par exemple pour de grands silos remplis au moyen d'un convoyeur pneumatique ou pour des enceintes remplies gravitairement.

Des essais complémentaires ont été réalisés en Suisse et en Allemagne sur des silos de différents volumes remplis au moyen d'un transporteur pneumatique (figure 12 où  $P=P_{red}$ ). Les auteurs ont tenté une généralisation de ces résultats dans les guides du VDI en Allemagne mais la controverse est vive car certains résultats montrent que la méthode proposée ne fournit pas une estimation fiable des surfaces d'événement notamment pour des enceintes de petites dimensions remplies pneumatiquement avec de la poussière (figure 13).

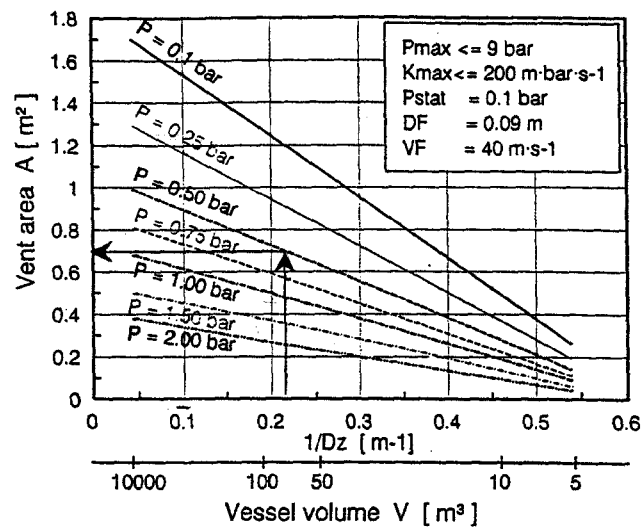


Figure 12

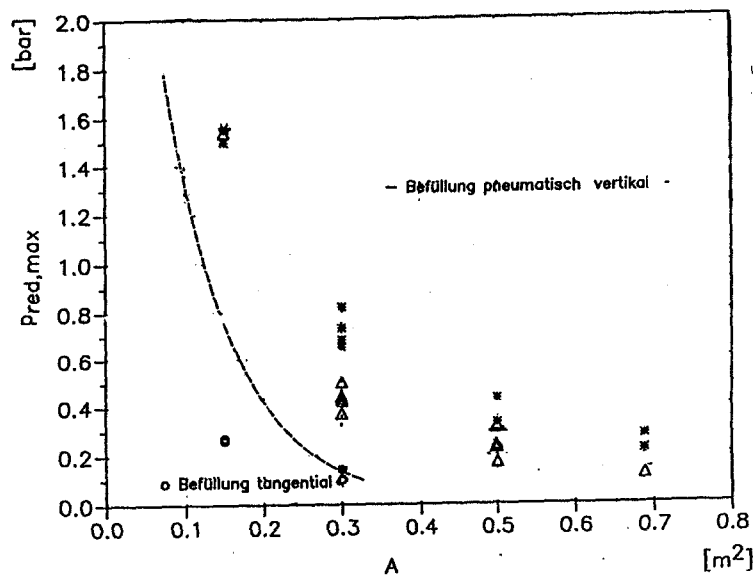


Figure 13 :  $P_{red}$  ( $P_{stat} = 0,1 \text{ hPa}$ ) en fonction de la surface de l'évent pour un silo de  $9,4 \text{ m}^3$  rempli pneumatiquement au moyen d'une poussière telle que  $K_{st}=140 \text{ bar.m/s}$ .  
Les points représentent les résultats d'essai tandis que la courbe représente la corrélation proposée pour ce type de « turbulence » et de silo

Enfin, il reste à définir une valeur de «  $K_{ex}$  » adaptée à ces conditions de « turbulence faible ». Plusieurs études convergent pour montrer que le coefficient «  $K_{st}$  » n'est pas adapté (figure 14) pas plus qu'il n'est adapté pour les conditions de « turbulence forte » (cf 3.3).

En conclusion, ces nouveaux résultats concernant la turbulence faible doivent être utilisés avec beaucoup de précautions et ne doivent pas être extrapolés indûment avant qu'une analyse cohérente ne soit disponible et acceptée.

#### 4.4 ENCEINTES INTERCONNECTEES

Dans une installation industrielle, les enceintes sont fréquemment reliées entre elles par des canalisations si bien qu'une explosion peut se transmettre d'une enceinte à l'autre du moins si le diamètre de la canalisation est suffisant.

Le schéma de propagation de l'explosion devient alors très complexe. Si le diamètre de la canalisation est suffisant, la combustion dans la première enceinte (celle où se situe la source d'inflammation) est loin d'être achevée au moment où la flamme pénètre dans le tube. En raison de la présence d'un écoulement (induit par la décharge de la première enceinte) puissant et donc turbulent dans la canalisation, la flamme s'accélère alors violemment en produisant un surplus soudain de pression notamment dans la première enceinte. Un jet puissant de réactifs est injecté dans la seconde enceinte pendant ces deux premières phases de l'explosion, augmentant à la fois la pression interne et le degré de turbulence. La flamme s'accélère dans la canalisation puis pénètre violemment dans la seconde enceinte. Une explosion très puissante peut alors y avoir lieu, caractérisée par une forte et très rapide augmentation de la pression si bien que l'écoulement peut s'inverser dans la canalisation. Un « retour de flamme » peut alors se produire dans la première enceinte où la combustion n'est pas achevée et induire une nouvelle et brusque augmentation de la pression. L'importance de ce « retour de flamme » est minimisée si la combustion dans la première enceinte est presque achevée lorsque la flamme pénètre dans la canalisation, c'est-à-dire lorsque le diamètre du tube est suffisamment petit.

Des travaux récents ont été effectués en Angleterre sur ce sujet mais faute d'un outil d'interprétation adapté, il n'est guère possible à l'heure actuelle d'en tirer des conclusions générales. Il faut donc retenir que les événements sont principalement réservés aux enceintes « isolées ».

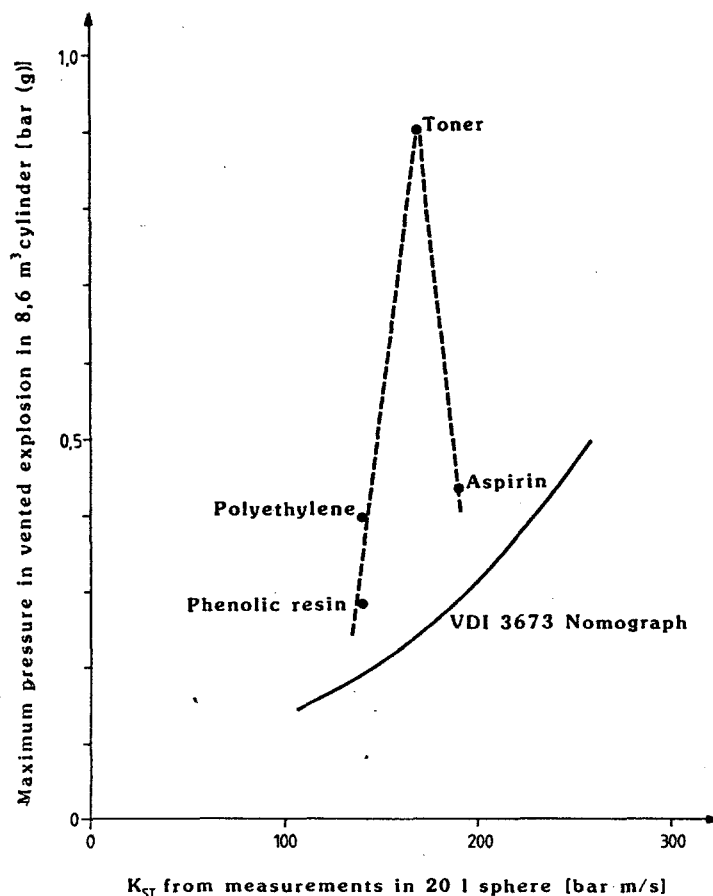


Figure 14

Experimental explosion pressures measured by Lunn and Cairns [12] in a cylindrical vessel of volume 8.6 m³ and L/D ≈ 6, and with one end fully open for venting ( $A = 1.1 \text{ m}^2$ ). Ignition 3 m from closed end, on the vessel axis. Comparison with VDI 3673 nomograph data

#### 4.5 LES ENCEINTES DE FAIBLE RESISTANCE

On peut constater que les méthodes actuelles ne permettent guère de prévoir la dimension des événements pour des enceintes de très faible résistance ( $P_{red} < 200$  hPa) comme le sont en général les grands équipements. Or, de plus en plus, on est amené à s'interroger sur la possibilité d'installer des événements par exemple sur de grands bâtiments de stockage.

Depuis quelques années, une méthode a été proposée aux USA (NFPA) pour tenter d'apporter des éléments de réponse. Le fondement de la méthode repose sur l'analyse théorique du paragraphe 2.2 mais n'a pas fait à ce jour l'objet d'une validation expérimentale pour les poussières. Il est supposé que le bâtiment est raisonnablement vide et que le degré de turbulence est « faible ». L'allongement  $H/D$  doit être plus petit que 3. L'expression proposée peut être mise sous la forme :

$$A / S = C / \sqrt{P_{red}} \quad [3]$$

On rappelle que  $S$  représente la surface interne du bâtiment. On remarque facilement que l'expression [3] est une version simplifiée de [1] où on suppose que  $P_{stat}$  est très petit devant  $P_{red}$  et où  $C$  contient les termes caractéristiques de la violence de l'explosion.  $P_{red}$  doit être plus petit que 100 hPa et  $P_{stat}$  de l'ordre de 10 hPa. La masse spécifique de l'événement doit être aussi faible que possible (moins de 10 kg/m<sup>3</sup>). Les valeurs de  $C$  suggérées sont fournies dans le tableau 3.

| <i>Poussières de type...</i> | <i>Valeur de C (kPa<sup>-0.5</sup>)</i> |
|------------------------------|-----------------------------------------|
| ST1                          | 0,26                                    |
| ST2                          | 0,30                                    |
| ST3                          | 0,51                                    |

Tableau 3

Certains auteurs ont noté une convergence entre l'extrapolation des nomogrammes à l'aide de l'expression [1] et cette méthode, surtout pour les poussières du groupe ST1. Quoique très fragmentaires, des résultats expérimentaux récents semblent confirmer ce point du moins pour un niveau de turbulence comparable à celui des nomogrammes (turbulence « moyenne »). Pour les autres groupes de poussières, les valeurs de  $C$  fournies paraissent un peu trop petites par rapport aux nomogrammes. En réalité cela signifie que les valeurs de  $C$  retenues correspondent à des niveaux de turbulence plus faibles que ceux retenus dans la méthode des nomogrammes. Compte tenu de ce qui précède (cf 4.3), on peut alors s'interroger sur la validité du choix du coefficient  $K_{st}$  pour caractériser la violence des explosions dans ce cas particulier. De plus, l'examen des expertises d'accident et les expertises que nous avons effectuées indiquent clairement que le niveau de turbulence joue un rôle prépondérant. Le scénario d'explosion peut être extrêmement différent selon qu'il s'agit d'un atelier comportant un procédé d'où fuit un puissant jet de poussières (sous l'effet d'une explosion interne) ou s'il s'agit d'un simple silo horizontal. Enfin des simulations numériques ont clairement montré que l'inertie de l'événement joue un rôle important pour de très faibles valeurs de  $P_{red}$ .

En conclusion, il est suggéré à l'heure actuelle de n'utiliser l'expression [3] que dans les conditions suivantes :

- le degré d'agitation du nuage de poussières est faible (ce qui exclut en pratique l'explosion d'un jet de poussières provenant d'un équipement) ;
- de préférence, uniquement pour des poussières de type ST1 ;
- $P_{stat}$  au maximum égal à 10% de  $P_{red}$  ;
- une masse spécifique plus petite que  $10 \text{ kg/m}^3$ .

#### 4.6 LES EFFETS SECONDAIRES

On a remarqué depuis longtemps que l'ouverture d'un événement est accompagnée de l'émission d'une onde de pression dans l'environnement et qu'un nuage de poussières est souvent formé à l'extérieur de l'enceinte, parfois violemment enflammé par la flamme de l'explosion interne. L'explosion externe qui en résulte est parfois très puissante et ses effets de pression et de flamme sur l'environnement s'ajoutent à ceux induits par l'explosion interne.

On sait que la violence de cette explosion externe a pour cause le degré de turbulence très intense à l'intérieur du jet de poussière issu de l'événement, sans commune mesure avec la turbulence interne. On commence aujourd'hui à être capable de modéliser ces phénomènes pour les explosions de gaz mais pas encore pour les explosions de poussières, en partie parce que l'aérodynamique d'un jet biphasique est beaucoup plus complexe que celle d'un jet monophasique.

On peut dire simplement, sur la base des connaissances actuelles, que :

- la surpression maximale de l'explosion externe (dans le jet) doit dépendre de  $P_{red}$  et de la nature de la poussière mais ne doit guère pouvoir être corrélée raisonnablement avec  $K_{st}$  ;
- l'atténuation de l'onde de pression en fonction de la distance doit suivre une loi de décroissance hyperbolique (facteur -1 ou -2) et doit dépendre de la dimension de l'événement ;
- la longueur maximale de la flamme peut être proportionnelle à la dimension de l'événement c'est-à-dire (équation [1]) à  $V^{1/3}$  avec une dépendance légère de  $P_{red}$ . Elle ne doit guère dépendre de la nature de la poussière ;
- il existe un endroit optimum dans le jet tel que si l'inflammation s'y produit, les effets les plus violents sont observés. La position de ce lieu doit dépendre de la taille de l'événement (son éloignement par rapport à l'événement doit être au moins égal à 5 fois le diamètre) mais également de la richesse du mélange à l'intérieur de l'enceinte.

Les corrélations actuellement disponibles sont les suivantes :

- la longueur maximale de la flamme  $L_f = 8 \cdot V^{1/3}$  ;
- le lieu optimum d'inflammation du nuage externe serait située à environ  $0,25 \cdot L_f$  de l'événement ;
- la surpression aérienne maximale,  $P_m$ , dépend de la nature du produit et de  $P_{red}$  et obéirait à une loi du type :  $P_m = 0,2 \cdot A^{0,1} \cdot V^{0,18} \cdot P_{red}$  ;
- la loi d'atténuation de la surpression aérienne serait du type:  $P_x = (4 \cdot x / L_f)^{-1,5} \cdot P_m$  où  $x$  désigne l'éloignement par rapport à l'événement.

Ces corrélations sont dans l'ensemble raisonnables mais doivent absolument recevoir une justification théorique surtout pour ce qui concerne les deux dernières corrélations. Il est nécessaire en particulier de pouvoir préciser l'incidence de la nature du produit. Il est donc suggéré de n'utiliser ces relations qu'avec une grande prudence.

## 5. CONCLUSIONS-PERSPECTIVES

On dispose aujourd'hui d'outils permettant de réaliser un dimensionnement raisonnable des surfaces d'évent: la méthode des « nomogrammes » mais il devient indispensable de les actualiser et de les étendre pour mieux couvrir les besoins actuels et à venir de l'industrie. Des travaux expérimentaux sont encore nécessaires pour mettre au point des normes adaptées et tenir compte de ces nouvelles données dans des guides consacrés à ce thème. Ce travail normatif est actuellement réalisé à l'échelon européen en tentant notamment de réaliser des travaux complémentaires dans chaque pays (groupe de normalisation du CEN TC305/WG3). Nous participons activement à ces actions en tentant d'apporter notamment une analyse physique cohérente de la phénoménologie qui seule permet des extrapolations fiables. Ces travaux ne devraient pas aboutir à des textes réglementaires européens avant quelques années mais il est d'ores et déjà possible d'affirmer qu'ils seront assez différents de ce qui existe.

En particulier, les points suivants devront être tout spécialement étudiés :

- les limites d'utilisation des « nomogrammes » ;
- les événements pour des enceintes de faible résistance ;
- l'incidence d'une canalisation de décharge ;
- le problème des enceintes interconnectées.