



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

Prévoir les effets des explosions de poussières sur l'environnement

EFFEX, un outil de simulation

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

Ch. Proust

*Direction des Risques Accidentels
Unité « Phénoménologie »*

7 janvier 2000

Prévoir les effets des explosions de poussières sur l'environnement

EFFEX, un outil de simulation

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

7 janvier 2000

CH. PROUST, P. ROUX, B. CHHUON

Ce document comporte 50 pages (hors couverture et annexes).

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Ch. Proust	Y. Mouilleau	C. Cwiklinski
Qualité	Ingénieur à la Direction des Risques Accidentels (DRA)	Responsable de l'Unité « Phénoménologie » de la DRA	Délégué « Appui technique à l'Administration » de la DRA
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. RESUME	3
2. INTRODUCTION	4
3. LES PHENOMENES	5
3.1 Les conditions d'apparition	5
3.2 Le déroulement possible des événements	8
3.3 Quelques exemples de modèles " simples " utilisés	11
4. LE TYPE DE MODELES UTILISES DANS EFFEX	14
4.1 Turbulence	14
4.2 Vitesse de combustion et taux d'expansion	15
4.3 Propagation de la flamme dans une enceinte	18
4.4 L'eclatement de l'enceinte	23
4.5 La projection des fragments	29
4.6 Les effets de pression externes	33
5. COMPARAISON PAR RAPPORT A DES ACCIDENTS REELS	35
5.1 Utilisation d'EFFEX	35
5.2 Accident de Boiry Ste Rictude	37
5.3 Accident de Blaye	41
6. CONCLUSION	44
7. REFERENCES	45
8. LISTE DES ANNEXES	50

1. RESUME

A la fin des années 1980, est apparue la nécessité d'être capable de prédire les effets sur l'environnement des explosions de poussières, surtout pour celles qui peuvent affecter les installations de grandes dimensions comme les silos de stockage de produits agroalimentaires.

Ce travail de synthèse de l'état de l'art dans ce domaine a été effectué à la demande des pouvoirs publics.

Les effets redoutés sont en premier lieu la projection de fragments, l'émission d'une onde de pression aérienne en second lieu et enfin l'éjection d'une flamme. Quelques méthodes « simples » existent, qui sont évaluées. Leurs limites proviennent notamment des hypothèses exagérément schématiques qui les sous-tendent. En réalité, pour parvenir à estimer avec un degré suffisant de confiance les effets précités, le recours à de nombreux éléments de mécanique des fluides, de combustion, de propagation des flammes, de thermodynamique, de résistance des structures, de balistique... est nécessaire. Compte tenu de ce degré de complexité, l'utilisation de l'informatique s'impose et un logiciel a été créé à l'INERIS. Il est présenté dans ce document.

Dans sa version actuelle, EFFEX comporte 8 modules programmés sur PC qui permettent la résolution d'au moins 40 équations différentielles, non linéaires pour la plupart. Ces équations ont été élaborées sur la base des connaissances les plus précises concernant les explosions de poussières, notamment celles provenant des travaux de recherche conduits par l'INERIS.

Le logiciel est bâti sur un choix raisonné d'hypothèses et la formulation mathématique qui en découle exclut d'emblée tout paramètre « ajustable ». Les données existantes ont permis dans la mesure du possible de corroborer les modèles retenus comme nous le montrons dans ce document. Par ailleurs, les diverses simulations d'accidents réels que nous avons faites fournissent des résultats en bon accord avec les observations sur le terrain. Deux exemples type sont donnés dans ce document.

En annexe est présenté, un exemple d'utilisation d'EFFEX sur une situation concrète.

2. INTRODUCTION

Lorsqu'un danger d'explosion de poussières est avéré dans une installation industrielle, la première étape consiste à mesurer ce danger. En pratique, cela signifie bien souvent qu'on recherche parmi les scénarios d'accidents plausibles ceux qui permettraient d'observer les conséquences les plus sérieuses pour les personnes, les biens et l'environnement.

Les conséquences premières d'une explosion sont une augmentation de pression à l'intérieur d'un équipement et la propagation d'une flamme, suite à l'amorçage de la combustion d'un nuage de poussières inflammables. Si l'équipement considéré n'est pas dimensionné correctement alors il se fracture, des fragments sont formés puis projetés dans l'environnement souvent à grande vitesse. La surpression et la flamme, jusqu'alors confinées à l'intérieur de l'équipement, sont libérées et peuvent aussi produire des effets dommageables. Il s'agit des conséquences dites « secondaires ».

Lorsque l'installation où se produisent ces phénomènes est de grandes dimensions, les effets sur l'environnement peuvent être très significatifs comme l'attestent des accidents récents qui ont marqué les mémoires: l'explosion de la malterie de Metz en 1982, l'explosion de la sucrerie de Boiry Ste Rictrude en 1982 puis dernièrement celle de Blaye en Août 1997 (Masson, 1998).

Au début des années 1990 est apparu dans l'industrie et sous la pression des autorités parfois, le besoin de pouvoir estimer les conséquences possibles d'une explosion de poussières se développant à l'intérieur d'installations de ce type (silos). Devant la complexité du sujet, qui fait intervenir tout à la fois la résistance des structures soumises à des sollicitations dynamiques, la propagation des flammes, la thermodynamique, la mécanique des fluides, la balistique,... le besoin de concevoir un logiciel, appelé EFFEX, s'est imposé à l'INERIS.

Dans sa version d'origine, en 1991-92, EFFEX ne comportait que les modules de balistique (MISSILE) et de propagation d'une flamme dans une enceinte (XPBAT). Ces modules, qui semblent donner satisfaction, n'ont subi depuis que des modifications minimales. En 1993-1995, ont été adjoints des modules de prédiction de la résistance des structures (en régimes de sollicitation statique et dynamique), un module de prévision de l'aérodynamique dans les enceintes (turbulence) et un module de prédiction du taux de combustion. Depuis, la version du programme n'a guère évolué mais les procédures d'utilisation ont été affinées en fonction des demandes provenant de l'industrie. Un organigramme global est présenté sur la figure 1.

Dans ce document, nous tentons de décrire en premier lieu (section 3) les phénomènes qu'il convient de prendre en compte pour espérer représenter correctement l'événement à prédire. Un aperçu des méthodes « classiques disponibles » est également fourni. En second lieu (section 4), la modélisation retenue pour chaque phénomène est présentée en relation avec les connaissances disponibles dont une part importante provient des travaux de l'INERIS. Le troisième volet (section 5) est consacré à une confrontation entre les simulations d'EFFEX et des accidents caractéristiques suffisamment documentés.

Enfin, on rappelle qu'EFFEX a certes bénéficié de « retombées » de projets de recherche de l'INERIS mais n'a pas fait l'objet d'un programme spécifique pour son développement. Il a été élaboré en marge des programmes d'études publics et des prestations pour l'industrie. De ce fait, les limitations actuelles de cet outil qu'il conviendrait de lever pour répondre aux demandes émergentes justifierait certainement un effort spécifique dans plusieurs directions. Ces éléments sont exposés dans la conclusion.

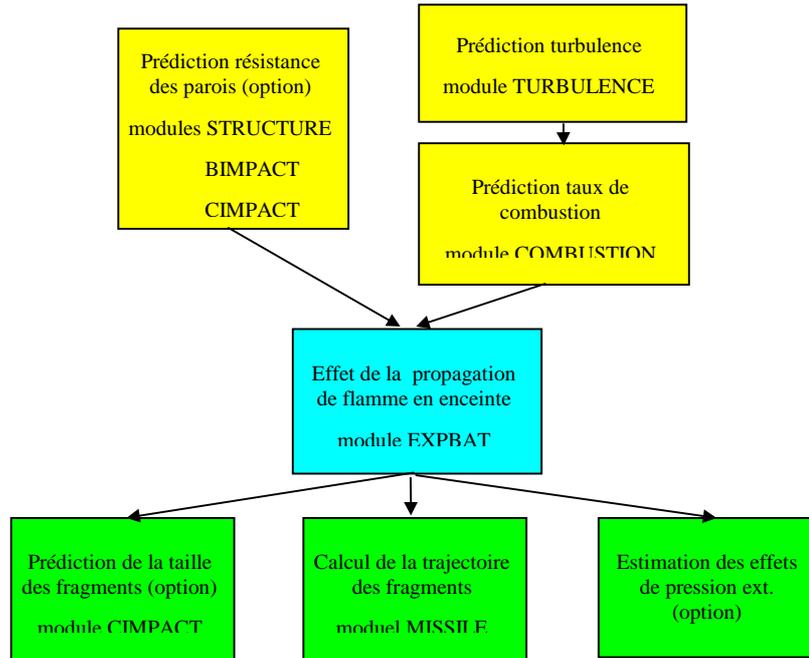


Figure 1 : organigramme global de EFFEX

3. LES PHENOMENES

3.1 LES CONDITIONS D'APPARITION

Nous pouvons décrire les principaux aspects du développement d'une explosion de poussières sur un exemple (Proust, 1997). Une installation de manutention et de stockage de céréales est constituée de plusieurs cellules remplies au moyen d'un distributeur à bandes. Pendant le remplissage d'une cellule, un épais nuage constitué de fines particules inflammables se forme et remplit en partie la cellule. L'un des tambours d'entraînement de la bande, défectueux, chauffe intensément jusqu'au point où les particules du nuage au contact du tambour s'enflamment et brûlent en libérant une grande quantité d'énergie (12 kJ/g).

Ces particules en combustion (température de 1000 à 2000 °C) servent à leur tour de « source d'inflammation » pour les particules proches si bien qu'une « zone de combustion » (la « flamme ») se propage d'elle-même à travers le nuage. Sur son passage, la flamme transforme le milieu réactif "froid" (20 °C) en produits de combustion « chauds » (1000 à 2000 °C) si bien qu'un fragment du nuage de 1 cm³ traversé par la flamme subit une expansion thermique très importante (le volume après combustion devient 5 à 10 cm³). Cette « production de volume » est à l'origine de l'augmentation de la pression dans l'équipement où se produit l'explosion.

Il a été rappelé à plusieurs reprises (ex: Roux, 1999) que six conditions doivent être réunies simultanément pour que l'explosion se développe. Il nous paraît nécessaire d'insister sur trois d'entre elles compte tenu du débat qu'elles suscitent parfois.

3.1.1 Quantité de poussières

En premier lieu, la quantité de particules en suspension doit être suffisante. Les théories et les expériences les plus précises (Proust, 1988, 1993) montrent clairement que la quantité minimale est de l'ordre de 60 g/m^3 pour des poussières de type agroalimentaires. La quantité maximale n'est pas connue à ce jour mais devrait être plus grande que 2 kg/m^3 . Ces valeurs sembleraient peu dépendantes de la taille des particules (Field, 1982). D'autres expériences ont montré que la propagation d'une flamme dans un mélange air-poussières se produit facilement dès lors que la quantité de poussière disponible correspond à une concentration de 100 g/m^3 ou plus c'est-à-dire très proche de la limite basse (Tamanini, 1983). Pour une installation de diamètre caractéristique 5 m cela correspond typiquement à une épaisseur de dépôt de particules sur les parois (si uniformément réparti) de l'ordre de 1/10e de mm (100 g par m^2 de surface). Cela correspond à une quantité de poussières d'autant plus faible qu'il n'est pas nécessaire que l'ensemble des volumes qui constituent l'installation (où se développe l'explosion) aient les parois recouvertes de poussières pour que la flamme se propage d'un endroit à l'autre. L'expérience minière par exemple (Cybulski, 1973) montre clairement que la flamme d'une explosion de poussières peut se propager (en se renforçant) sur une distance qui peut dépasser d'un facteur 5 la longueur de la zone initialement empoussiérée (le reste de l'installation étant propre lors de l'amorçage). Ainsi, même si une fraction seulement de l'installation concernée est empoussiérée, la flamme peut, malgré tout, sortir de cette zone poussiéreuse et se propager bien au delà. On peut, à l'aide de ces éléments, montrer que, pour une installation industrielle du type silo de stockage de céréales (longueur = 50 m; hauteur = 40 m; diamètre caractéristique des volumes = 5 m), une quantité de poussières de l'ordre de 100 kg déposée dans une zone d'extension relativement limitée (40 m par exemple) suffirait à permettre le développement d'une explosion de poussières dont les conséquences pourraient être celles des accidents cités plus haut.

3.1.2 Formation d'un nuage explosif

Le second point concerne le phénomène de dispersion des particules. L'expérience minière a clairement montré qu'il n'est pas nécessaire que toute la poussière disponible soit mise en suspension préalablement à la mise à feu pour que l'explosion se produise (Cybulski, 1973; Cocu, 1969). Dans un espace confiné ou plutôt semi-confiné comme dans l'industrie, l'expansion des produits de combustion « pousse » la flamme et les réactifs vers l'avant en créant un « souffle » (Proust, 1997). Les expériences (Proust, 1991; Cybulski, 1973; Cocu, 1969; Ural, 1992) et la théorie (Cocu, 1969; Proust, 1999) montrent que la « vitesse de frottement » du souffle sur la paroi est un élément-clé de la mise en suspension et que l'ordre de grandeur typique de l'intensité du souffle capable de mettre en suspension les particules est 10 m/s. En pratique, dans les conditions industrielles, cette limite est susceptible d'être atteinte lorsque la dimension de la flamme qui se développe à partir du point d'inflammation atteint le diamètre du volume où elle se propage. Si on retient 5 m comme ordre de grandeur pour ce diamètre et si on tient compte du taux d'expansion des produits de combustion, on trouve que la dimension caractéristique du volume initial de poussières présoulevées¹, correspondant à cette limite, est de l'ordre de 2 m. Lorsque la flamme a consommé le nuage initial, créé par un mécanisme extérieur, le souffle de

¹ nuage formé par un phénomène antérieur au développement de l'explosion, par exemple les courants de convection induit par le remplissage d'une cellule de stockage de céréales

l'explosion devient suffisant pour mettre en suspension les particules déposées et l'explosion se développe d'elle-même.

3.1.3 Sources d'inflammation potentielles

En dernier lieu, le nuage doit se trouver en contact avec une source d'inflammation adéquate. Pour le type d'installation considéré (grandes dimensions) la composante convoyage mécanique est souvent essentielle et omniprésente (Roux, 1999). Les statistiques d'accident (Proust, 1989) montrent que les sources d'inflammation d'origine mécanique sont la cause principale des explosions. Ainsi le lieu de démarrage de l'explosion ne peut être précisé a priori et peut se trouver à de nombreux endroits de l'installation.

En résumé et compte tenu de l'état actuel des connaissances, ces éléments incitent à simuler le déroulement de l'explosion en recherchant le point de démarrage de l'explosion qui, tout en restant plausible, permettrait de conduire aux effets maximum dans la mesure où, très souvent, l'état d'entretien et la conception des installations ne permet pas d'être certain que les dépôts de poussières seraient tels que la propagation de la flamme peut rester circonscrite à une zone définie.

3.2 LE DEROULEMENT POSSIBLE DES EVENEMENTS

La situation de référence est celle décrite sur la figure 2. Un nuage de poussière est formé à l'intérieur d'une enceinte pas trop allongée (notion précisée ultérieurement) et une source d'inflammation apparaît au sein de cette atmosphère supposée explosive.

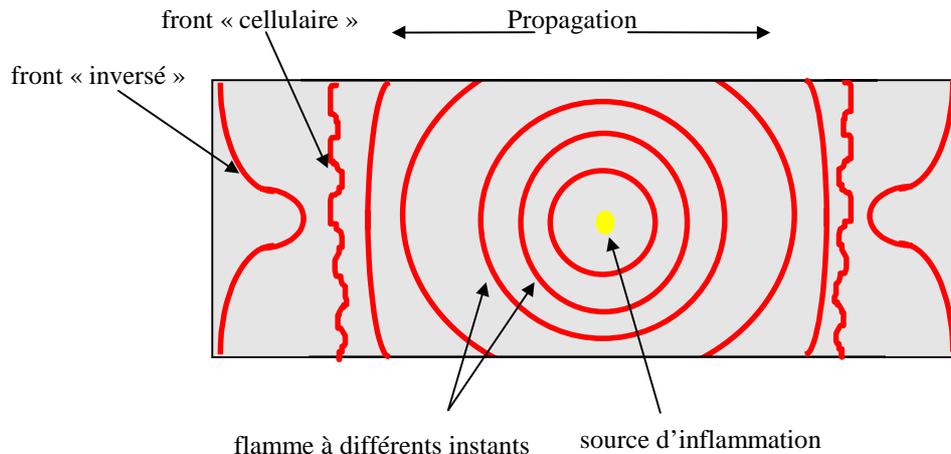


Figure 2 : évolution du front de flamme en fonction du temps

Une flamme se développe sphériquement autour de cette source et se propage d'elle-même à travers le nuage. Sur son passage, les particules fluides subissent une forte expansion thermique. L'excédent de volume produit par unité de temps est proportionnel:

- à la surface de la flamme,

- au taux de combustion exprimé en m^3/s de réactif consommé par unité de surface de flamme²,
- au rapport d'expansion volumique [produits de combustion/réactifs].

Compte tenu du comportement habituel des gaz et suspensions diluées, on imagine aisément que ce processus est directement responsable de l'augmentation de pression dans l'enceinte et que la vitesse d'augmentation de la surpression est d'autant plus grande que les trois paramètres précédents sont importants. Il convient donc, dans une perspective de modélisation d'en tenir compte.

3.2.1 Combustion et propagation de la flamme

On peut en général considérer le rapport d'expansion comme une propriété du mélange bien qu'il ne soit pas totalement prédictible pour les mélanges air-particules combustibles (Proust, 1989) contrairement aux prémélanges gazeux. Le taux de combustion, ou « vitesse de combustion » serait à la fois fonction de la nature du mélange (vitesse à laquelle les particules brûlent, par exemple Nettleton, 1988) mais également de la vitesse de transmission de la chaleur entre les réactifs et les produits de combustion, puisque ce mécanisme d'échange est responsable de la transmission de l'inflammation. Les mécanismes de la turbulence, toujours présente en réalité, ont une incidence généralement positive sur cela et favorisent la propagation de la flamme. Enfin la surface de la flamme subit de profondes modifications au cours de la propagation. Dans l'exemple de la figure 2, où l'enceinte est un cylindre ou un parallélépipède allongé, la flamme se développe approximativement de façon sphérique jusqu'à ce le front atteigne les parois les plus proches. A leur contact, les portions de la flamme concernées disparaissent et ne subsistent que deux calottes qui se propagent dans des directions opposées. Même pendant cette phase, la surface du front peut évoluer par exemple en devenant cellulaire (couverte de bosses: figure 2) ou en s'incurvant vers les produits de combustion (figure 2) sous l'effet vraisemblable d'instabilités de Landau-Darrieus (Gonzalez et al., 1992). L'allongement relatif de l'enceinte aurait une incidence sur ce type de comportement (Markstein, 1964). Dans tous les cas, la surface maximale du front est reliée aux dimensions du volume et en particulier à sa section droite. La phénoménologie décrite est également valable si le point d'inflammation, au lieu d'être central, est situé près d'une paroi.

3.2.2 Incidence de la géométrie

Nous limitons notre propos à ce type de phénoménologie pour laquelle l'augmentation de pression dans le volume est homogène et uniquement due à l'expansion des produits de combustion. A mesure que l'allongement augmente (rapport longueur/diamètre caractéristique) apparaissent d'autres phénomènes (Proust, 1996) qui induisent une « auto-accelération » de la flamme. Lorsque cela se produit, l'augmentation de la pression est moins reliée à l'expansion thermique qu'à la dynamique propre de la flamme (vitesse et accélération). Cette situation est à rapprocher du déroulement des explosions dans les tubes et galeries. En pratique et pour des produits relativement peu réactifs, comme les poussières agroalimentaires, l'expérience suggère (Pineau, 1986) que la phénoménologie

² ce paramètre a la dimension d'une vitesse et est souvent appelé « Vitesse de combustion »

décrite dans les paragraphes précédents reste applicable tant que le rapport [Longueur de l'enceinte/ Diamètre hydraulique] est plus petit que 20.

Un élément géométrique supplémentaire doit être souligné. Il est très fréquent que plusieurs enceintes communiquent entre elles, éventuellement à travers une canalisation ou un orifice, de telle manière que l'explosion peut se transmettre d'un équipement à l'autre: on parle alors d'enceintes « interconnectées ». Même dans le cas le plus « simple » de deux enceintes reliées par une seule canalisation, le schéma de propagation de l'explosion devient très complexe (Phylaktou et al., 1996). 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 peut s'accélérer 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 transite dans la canalisation puis pénètre violemment dans la seconde enceinte. Une explosion très puissante peut y avoir lieu, caractérisée par une forte et très rapide augmentation de la pression si bien que le sens de 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 encore achevée et induire une nouvelle et brusque augmentation de la pression. On éprouve encore de grandes difficultés à prédire les effets de ce type d'explosion tant l'incidence des détails de la géométrie est grande. EFFEX permet dans une certaine mesure de tenir compte de ce cas de figure pourtant fréquent en mettant en oeuvre une procédure spécifique d'enchaînement des modules. L'explosion dans la première enceinte produit un jet de produits d'explosion dans la seconde qui sert à la fois de générateur de turbulence, éventuellement de pression, et de source d'inflammation. Le « retour de flamme » est simulé en inversant les rôles respectifs des enceintes. Le point final de ces allers et retours est l'éclatement des enceintes, qui, souvent, se produit rapidement.

3.2.3 Critères de ruine des équipements

L'évaluation de la résistance ultime est un élément important des effets sur l'environnement. Les parois les plus fragiles se rompent lorsque la surpression devient suffisante et forment des fragments susceptibles d'être propulsés sous l'effet du différentiel de pression entre l'intérieur et l'extérieur. Les différentes techniques de dimensionnement (ex: EUROCODES) des structures permettent d'estimer la surpression de ruine d'une paroi lorsque la sollicitation est appliquée de manière lente, typiquement lorsque la vitesse de chargement est plus petite que 0,01 b/s. Lorsque la vitesse de chargement est plus rapide, les effets d'inertie des parois (accélération) se superposent à ceux induits par la sollicitation de pression (Baker, 19831). Il en résulte que les déformations et donc les contraintes peuvent être amplifiées ou réduites par rapport à un chargement quasi-statique (c'est-à-dire appliqué à une vitesse plus petite que 0,01 b/s) qui s'achève par une surpression finale identique. En régime de chargement dynamique, tant que la durée caractéristique du chargement reste comparable (ou plus grande) en ordre de grandeur à celle de la déformation de la structure considérée, on peut admettre que les fragments susceptibles d'être formés devraient avoir des dimensions identiques à celles consécutives à la rupture sous chargement statique. Dans la situation inverse, les régimes de vibrations sont

susceptibles de devenir plus complexes (multimodaux ou même chaotiques) et la taille des fragments ne peut plus être prédite simplement.

3.2.4 Evolution de la surpression interne

En admettant connue la taille des fragments, la surpression interne propulse les morceaux vers l'extérieur si bien que des brèches se forment entre eux, à travers lesquelles les produits de l'explosion peuvent s'échapper (en supplément de la décharge par les ouvertures naturelles). Ce phénomène se traduit par une décompression relative, d'autant plus importante que la distance parcourue par chaque fragment est grande. Au delà d'un certain point, le débit à travers ces orifices devient égal ou plus grand que l'excédent de volume (par unité de temps) créé par la flamme. La surpression interne atteint alors son maximum puis diminue. Pour les réactifs gazeux au moins, cette décharge peut s'accompagner d'oscillations de pression dans l'enceinte et éventuellement d'un accroissement local de la turbulence surtout dans l'hypothèse d'une enceinte très allongée avec l'inflammation à une extrémité et un orifice unique à l'autre (Laustaki, 1997).

C'est à ce stade de développement de l'explosion que les effets externes à estimer se manifestent.

3.2.5 Onde de pression externe

La rupture du confinement permet la libération de la pression contenue qui se traduit par la propagation externe d'une onde de pression aérienne. L'amplitude de cette onde à une distance donnée devrait logiquement être fonction de la surpression interne maximale et d'une dimension caractéristique de l'enceinte. On sait également qu'un nuage de particules peut être éjecté à l'extérieur et être mis à feu par la flamme issue de l'explosion interne (Eckhoff, 1991). Il peut en résulter une explosion secondaire externe éventuellement violente si le nuage est turbulent et suffisamment réactif. Ni les conditions d'apparition de ce phénomène, ni sa phénoménologie précise ne sont clairement connues. Des données expérimentales fragmentaires sont cependant disponibles (Wirkner-Bott et al, 1992; Crowhurst et al., 1994).

3.2.6 Projection de fragments

Les fragments sont propulsés sous l'effet de la surpression interne et, soumis à cette impulsion suivent une trajectoire déterminée, outre par les conditions initiales, par les effets du freinage aérodynamique, de la portance éventuelle et de la pesanteur (Baker, 1983). Notons que l'impulsion reçue de l'explosion est communiquée par le jet de fluide issu des brèches et que par conséquent l'effort de poussée doit se réduire à mesure que le fragment s'éloigne de son point de départ et qu'il dévie de l'axe du jet sous l'effet de la gravité terrestre.

3.3 QUELQUES EXEMPLES DE MODELES " SIMPLIS " UTILISES

Il s'agit de modèles que l'on peut trouver assez classiquement dans des études des dangers par exemple.

Les plus courants sont basés sur une estimation de l'énergie disponible, E_d , pour la pressurisation de l'enceinte jusqu'à sa rupture puis sur une répartition forfaitaire de cette énergie entre l'onde de pression aérienne d'une part et la projection des fragments d'autre part. Une présentation et une comparaison de ces méthodes issues des travaux de Baker (Baker et al., 1983) et du TNO (Mavrothalassitis, 1989) a été effectuée par l'INERIS (Duplantier, 1996). Elles ignorent totalement (entre autres) la contribution de la combustion interne à l'impulsion communiquée aux fragments et les éventuelles explosions secondaires. La démarche habituellement retenue consiste à estimer E_d sur la base de l'énergie de combustion disponible E_c en appliquant un rendement à la manière de « l'équivalent TNT », souvent 10%. Puis, E_d est répartie entre l'énergie disponible pour l'onde de pression aérienne (souvent 60%), pour la projection des fragments (20% par exemple) puis les pertes (20%). On applique enfin l'abaque de « l'équivalent TNT » pour les effets de l'onde aérienne et on détermine la vitesse initiale des fragments à partir du théorème de l'énergie cinétique appliqué aux fragments. La trajectoire peut alors être déterminée assez simplement par simplification de l'équation de la dynamique des projectiles en négligeant le freinage aérodynamique pour obtenir une solution analytique simple (Duplantier, 1996). En résumé, on peut trouver un ensemble d'équations du type :

$$\begin{aligned}
 E_c &= M \cdot E_r \\
 E_r &= 12\,000\,000 \text{ J/kg} \\
 E_d &= 0,1 \cdot E_c \\
 E_{TNT} &= 0,6 \cdot E_d \\
 E_{debris} &= 0,2 \cdot E_d = \frac{1}{2} \cdot M_{debris} \cdot V_o^2 \\
 D_{proj} &= V_o^2 / g \cdot \{ 1 + [1 + (4 \cdot H_o \cdot g) / V_o^2]^{1/2} \}
 \end{aligned}$$

où:

M est la masse de poussières supposée participer à l'explosion,

M_{debris} la masse totale des débris,

E_r l'énergie de combustion délivrée par kg de poussières,

E_{debris} l'énergie communiquée aux fragments,

E_{TNT} l'énergie disponible pour les effets de pression externes (à rapprocher de l'abaque TNT),

V_o la vitesse initiale des fragments,

H_o la hauteur initiale,

g l'accélération de la pesanteur,

D_{proj} la distance de projection.

Les défauts majeurs de cette approche sont les suivants :

- la quantité de poussières offerte à la combustion est extrêmement difficile à définir dans l'état actuel de nos connaissances ;

- le choix d'un rendement est arbitraire et cache des réalités bien diverses comme la quantité de combustible ayant effectivement participé à l'explosion, le degré de conversion de l'énergie de l'explosion en pression, les différences entre les ondes de choc issues de la détonation d'un explosif de type TNT et celles produites par d'autres régimes de combustion, etc. Pour les explosions de poussières, ce degré de subjectivité est beaucoup plus grand encore puisque, par exemple, ces différents régimes de combustion, assez bien connus pour les prémélanges gazeux explosifs, restent peu étudiés pour les nuages de poussières ;
- le rendement de conversion de E_d en énergie de projection des fragments est également arbitraire et on montre facilement qu'il peut varier de manière considérable d'une situation à l'autre. La raison à cela est que la projection des fragments n'a pas pour origine l'énergie de l'explosion mais son impulsion, dont la valeur est significativement déterminée par l'inertie et la taille des débris. Pour s'en convaincre, il suffit de considérer une forme simplifiée de l'équation de la dynamique appliquée aux fragments (trainée et portance négligées) pour déterminer l'ordre de grandeur de V_o :

$$M_{\text{debris}} \cdot dV_o/dt = \Delta P(t) \cdot S_{\text{debris}}$$

$$E_{\text{debris}} = \frac{1}{2} \cdot M_{\text{debris}} \cdot V_o^2 = \frac{1}{2} \cdot I_{\text{exp}}^2 \cdot S_{\text{debris}}^2 / M_{\text{debris}}$$

où I_{exp} (ΔP_{exp}) est l'impulsion (ΔP_{exp} est la surpression maximale) communiquée aux fragments. Sachant que I_{exp} (ΔP_{exp}) est l'intégrale dans le temps de $\Delta P(t)$, on peut par intégration de la première équation, écrire V_o en fonction de l'impulsion. S_{debris} la surface des débris offerte à la poussée. L'impulsion peut être estimée dans le cas très spécifique où la vitesse de la dépressurisation est limitée par la vitesse du son a_o si bien que $I_{\text{exp}} = \Delta P_{\text{exp}} \cdot V^{1/3}/a_o$ (V est la volume de l'enceinte considérée). En assimilant l'énergie disponible pour la projection des fragments à l'énergie de pression de Brode (Brode, 1957), on trouve respectivement pour E_d et la fraction d'énergie communiquée aux fragments (η) :

$$E_d = \Delta P_{\text{exp}} \cdot V / (\gamma-1)$$

$$\eta = E_c / E_d = (\gamma-1) / 2 \cdot \Delta P_{\text{exp}} / V^{1/3} \cdot S_{\text{debris}}^2 / M_{\text{debris}} / a_o^2$$

où γ est le rapport des chaleurs spécifiques de l'atmosphère (externe). On constate effectivement que η dépend étroitement des conditions de l'explosion (V , ΔP_{exp} , S_{debris} ..) extrêmement variables d'une situation à l'autre. Dès lors, ce rendement ne peut être considéré comme une constante. Deux exemples extrêmes peuvent illustrer cela. On peut assez légitimement supposer que la valeur forfaitaire (20%) pour η a été établie par référence à des éclatements de réacteur, probablement en acier, dont la dimension devait être de l'ordre de quelques m^3 . En considérant un réacteur d'acier cylindrique de $10 m^3$ aussi haut que large, éclatant à 10 bar (le fond supérieur de $5 m^2$ se déchire, épaisseur de la paroi = 5 mm, masse = 150 kg), on trouve $\eta = 14 \%$, en bon accord avec la valeur forfaitaire de 20%. Si, en revanche, on considère un bâtiment industriel de $10\,000 m^3$, (20 x 70 x 7 m) dont les parois, en bardage d'amiante-ciment d'une masse de 70 000 kg pour une surface développée de $2700 m^2$, éclatent à 20 hPa (Proust, 1997), on trouve $\eta = 2 \%$!! En répétant ce calcul pour diverses situations, on peut facilement montrer que η peut varier de 1% à 80%...

L'espoir de voir apparaître une méthode analytique exempte de ces défauts n'est cependant pas vain à condition de disposer des données de base nécessaire pour la « caler ». Cet aspect est repris dans les conclusions.

Il existe également des méthodes fondées sur la résolution numérique de l'équation de la dynamique des fragments comme STS conçue par FSA en Allemagne (Lorentz, 1999) et DENSECLATS conçue par SNPE Environnement (Environnement & Technique, 1999). La résolution de cette équation est la plus complète possible puisque les effets de portance et de giration des fragments sont en principe pris en compte. Cependant, il faut fournir au logiciel la donnée d'entrée V_o . Pour cela, il peut être fait appel à la loi de Gurney, selon laquelle l'énergie cinétique des fragments est approximativement égale à l'énergie de Brode multipliée par une sorte de rendement η qui est le rapport entre la surpression maximale atteinte lors de l'explosion et la surpression maximale potentielle que pourrait induire l'explosion dans l'hypothèse d'un confinement très résistant (typiquement 5 à 10 bar). Cette définition spécifique d'un rendement de projection n'est pas plus justifiée que la valeur forfaitaire de 20% pour les mêmes raisons que précédemment.

4. LE TYPE DE MODELES UTILISES DANS EFFEX

4.1 TURBULENCE

La connaissance du taux de turbulence dans l'enceinte avant la mise à feu et de la vitesse de combustion associée est un élément dont dépend très largement la valeur des prédictions réalisées avec un logiciel comme EFFEX

Dans le contexte de la combustion turbulente, il semble que deux paramètres essentiels de la turbulence soient l'intensité des fluctuations de vitesse, u' , et la taille des grandes structures de la turbulence, L . Pour prédire ces paramètres, a été développée en 1993-95 à l'INERIS, une approche qui repose sur la phénoménologie de la production de la turbulence (module « TURBULENCE » d'EFFEX).

Dans la plupart des situations, le mouvement turbulent est produit par des jets à l'intérieur des équipements considérés. Or le comportement des jets est relativement bien connu (Hinze, 1972; Ruffin, 1994). Nous avons mis en oeuvre la théorie des jets pour constituer un outil de prédiction. Les équations sont analytiques et permettent de déterminer u' et L .

Pour vérifier le bien fondé de cette méthode, des données expérimentales publiées récemment (Hauert et al., 1994) ainsi que d'autres obtenues à l'INERIS (Roux et Proust, 1999) ont été utilisées. On constate sur la figure 3 que l'accord entre l'expérience et les prédictions est satisfaisant. Cette constatation corrobore le modèle mais ne constitue sans doute pas une validation complète, notamment pour les installations de grandes dimensions et les forts niveaux de turbulence. Une métrologie spécifique a été conçue récemment à l'INERIS qui pourrait permettre d'examiner ces situations pratiques (Roux et Proust, 1999).

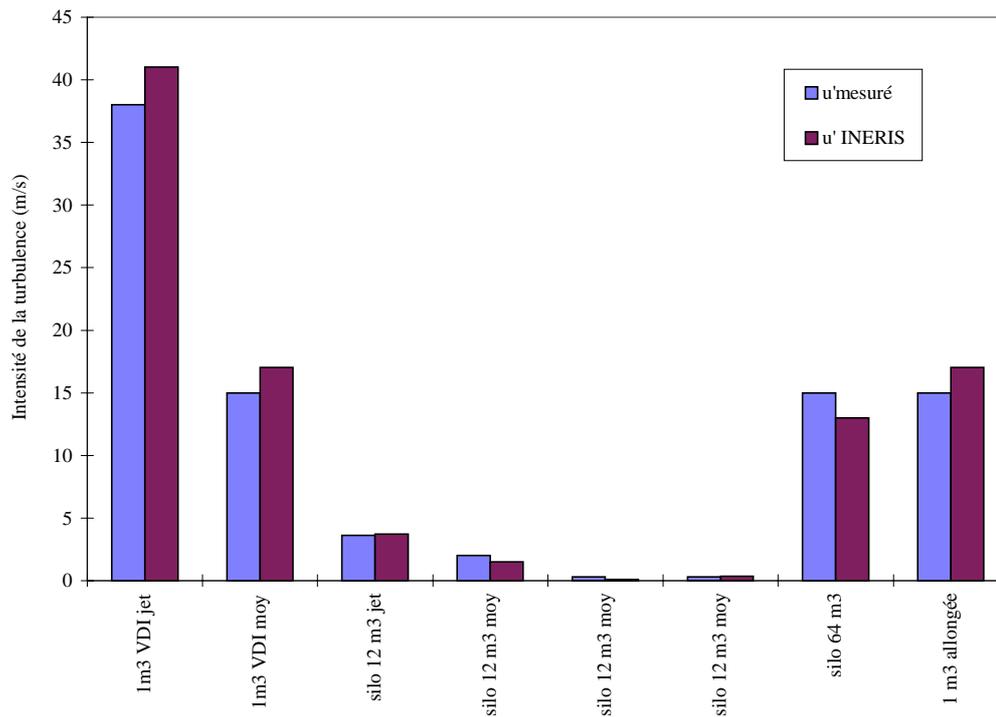


Figure 3 : comparaison prédictions-mesures de la turbulence dans diverses situations

4.2 VITESSE DE COMBUSTION ET TAUX D'EXPANSION

Le produit de ces deux paramètres fournit la vitesse spatiale de la flamme. Le module d'EFFEX qui permet leur estimation s'appelle « COMBUSTION ».

On admet assez généralement que le taux d'expansion, E_{exp} , dépend presque exclusivement de la nature du mélange réactif (Lewis et von Elbe, 1987). Une mesure indirecte de ce paramètre est la surpression maximale d'explosion, ΔP_{max} , mesurée dans une enceinte close dans des conditions adiabatiques. On constate que, même pour des nuages de poussières, la surpression maximale d'explosion dépend effectivement assez peu des conditions d'essai (Bartknecht, 1993; Amyotte, 1985) si la dispersion des particules est correctement réalisée. Des valeurs fiables de E_{exp} peuvent être déduites des mesures de température maximale de flamme se propageant dans des mélanges faiblement turbulents de particules d'amidon dans l'air (Proust, 1988; Rzal et al., 1991).

On observe (figure 4) en premier lieu que ces valeurs dépendent assez peu de la concentration de particules ($E_{exp}=5$) et en second lieu qu'elles sont très éloignées de la valeur maximale théorique que l'on déduirait sur la base de l'énergie de combustion disponible ($E_{exp}=7,5$). Bien que quelques autres résultats similaires aient été trouvés (Smoot et al.,1984), on s'est longuement interrogé sur le crédit à apporter à ces mesures, réalisées avec des thermocouples, jusqu'à ce que des techniques non intrusives soient venues les confirmer (Veysière et al., 1992). De surcroît, nous sommes récemment parvenus à prouver que la relation théorique entre ΔP_{max} et E_{exp} , vérifiée pour les prémélanges gazeux explosifs, est également valable pour les nuages de poussières (Roux et Proust, 1999). Appliquées aux mesures de ΔP_{max} , cette expression confirme que E_{exp} est de l'ordre de 5.

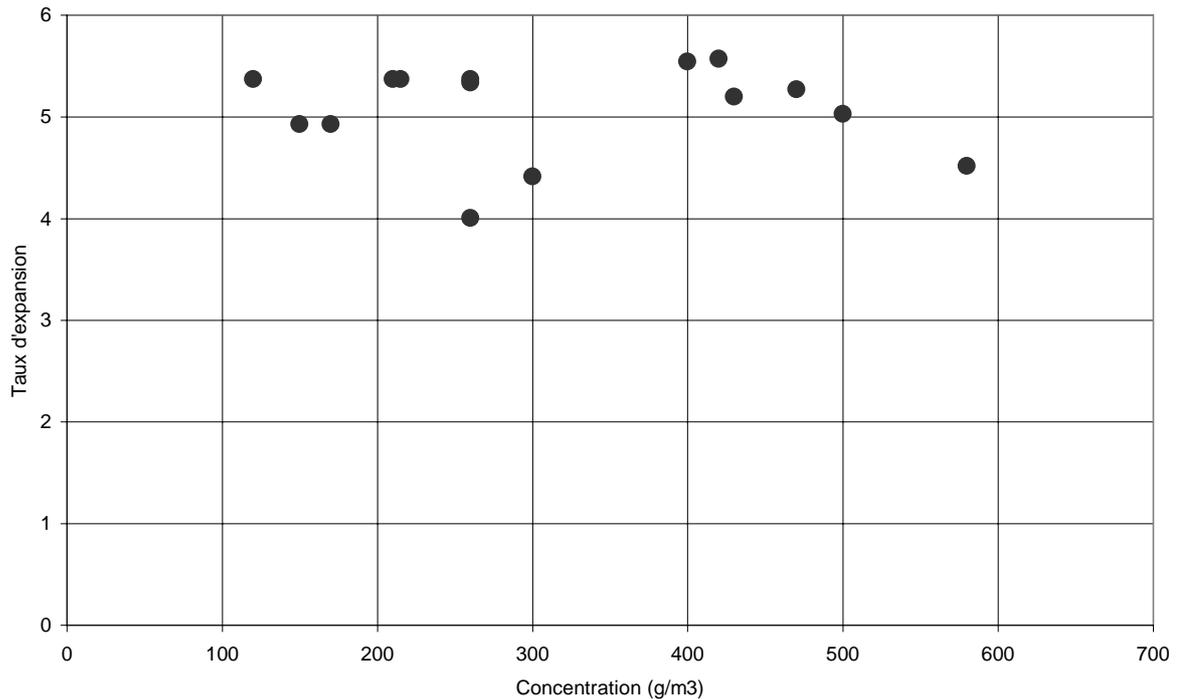


Figure 4: taux d'expansion des produits de combustion (mélanges air-particules d'amidon)

Cette découverte signifie que tout le potentiel chimique de la combustion n'est pas libéré dans la flamme. Les raisons ne sont à ce jour pas clairement connues ce qui très certainement constitue un obstacle majeur dans l'analyse des processus de propagation de la flamme, notamment en présence de turbulence. De ce fait, les quelques études consacrées à la structure de ces flammes turbulentes (Proust, 1988, Rzal et al. 1991) restent relativement descriptives. Elles montrent notamment la présence dans le front de flamme de « trous » de dimensions identiques à celles des grandes structures de l'écoulement (figure 5). De plus, pour une dimension de « trou » donnée, les données expérimentales disponibles (Proust, 1989) suggèrent nettement un accroissement de la vitesse de combustion en fonction de u' . Ces éléments indiqueraient donc que u' et L sont des paramètres potentiellement importants.



Figure 5: exemple de flamme turbulente se propageant dans un tube vertical (mélanges air-particules de soufre)

Par ailleurs, les similitudes que semblent présenter les flammes de poussières et de prémélanges gazeux (Proust, 1988, 1996) indiquent, qu'à défaut de mieux, il est légitime d'utiliser comme méthode de prédiction de l'incidence de la turbulence sur la vitesse de combustion, un modèle générique employé pour les flammes de prémélanges gazeux du type :

$$S_t/S_l = K_1 \cdot (u'/S_l)^\alpha \cdot (L/e_f)^\beta + K_2$$

où K_1 et K_2 sont des constantes qui notamment tiennent compte des instabilités de combustion (fonction du mélange)

S_t et S_l les vitesses de combustion turbulentes et "laminaires" (sans turbulence)

e_f l'épaisseur de flamme

α et β des exposants fonction du mélange

Pour choisir parmi les différents modèles disponibles (Mouilleau, 1998), on peut rappeler que les flammes de poussières s'éteignent facilement lorsqu'elles sont soumises à un étirement ou à une courbure du front (Rzal, 1992; Rzal et al., 1991) et que, par conséquent, elles ne devraient avoir qu'une faible propension à agir sur l'écoulement. Il en résulte que la surface du front de flamme serait largement déterminée par l'effet de la convection de la turbulence. Dans ce contexte, nous avons constitué un modèle sur la base des travaux de Gouldin et Peters (Gouldin, 1987; Peters, 1986).

Des valeurs de S_f ont été déterminées expérimentalement et vérifiées à plusieurs reprises (Proust, 1993). Des valeurs de S_f ont été extraites de la littérature³ (Proust, 1988; Rzal et al., 1991; Tezok et al., 1985; Pineau et al., 1976; Eckhoff et al., 1984 et 1986; Roux et Proust, 1999) et comparées aux prédictions du modèle retenu (figure 6).

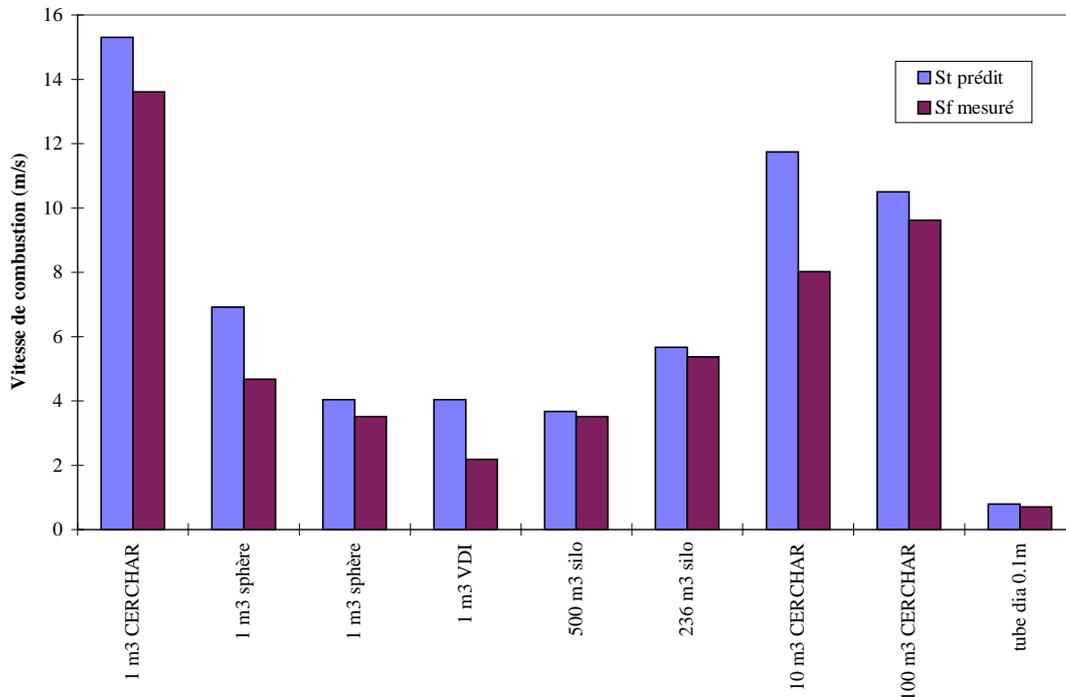


Figure 6: comparaison entre les prédictions de vitesse de propagation de flamme et les mesure (mélanges air-particules d'amidon)

On constate un assez bon accord entre les données disponibles et les prédictions. Mais cela ne suffit pas pour affirmer que le modèle de combustion retenu est validé. Il faudrait vérifier la physique sous-jacente.

4.3 PROPAGATION DE LA FLAMME DANS UNE ENCEINTE

Le module de simulation consacré à ce point s'appelle « EXPBAT » et comporte les équations qui permettent de décrire la propagation des flammes dans une enceinte close. Elles sont connues et ont été discutées de longue date (Bradley et Mitcheson, 1976; Kansa et Perlee, 1978, Lewis et von Elbe, 1987). Ces théories reposent notamment sur l'hypothèse de l'existence d'une flamme mince par rapport aux dimensions de l'enceinte. Cette flamme transforme sur son passage les réactifs en produits de combustion. Il est également supposé que les deux milieux évoluent de manière isentropique. Dans le cas le plus simple de gaz parfaits, les principales équations peuvent s'écrire comme suit.

³ Souvent ce sont les vitesse spaciales de flamme qui ont été déterminées. Pour extraire S_f , il faut diviser ce paramètre par un taux d'expansion moyen qui tient compte d'éventuelles augmentations de pression pendant l'expérience

$$d/dt[\Delta P(t)] / \Delta P(t) = \gamma \cdot Q_{fl}(t) / V$$

$$Q_{fl}(t) = S_f \cdot A_f(t) \cdot (\text{Exp}^{-1}) \cdot T_o / T$$

où $\Delta P(t)$ est la surpression interne à l'instant t

S_f la vitesse de combustion turbulente

$Q_{fl}(t)$ le débit de volume excédentaire induit par la combustion des réactifs dans le front de flamme

V et T_o le volume de l'enceinte et la température initiale des réactifs

T la température des réactifs à l'instant t

$A_f(t)$ la surface de flamme à l'instant t

γ le rapport des chaleurs spécifiques

De récents travaux (Proust et Roux, 1999) nous ont confirmé que cette théorie serait tout à fait applicable aux explosions de poussières. A titre d'illustration, nous avons représenté sur la figure 7, l'évolution mesurée de la surpression en fonction du temps dans la chambre de « 1 m³ cubique » (cylindre long de 1,2 m, diamètre 0,9 m et procédure ISO 6184/4) lors d'une explosion de poussières d'amidon de maïs. Lors de cette l'expérience, la vitesse de flamme a également été enregistrée. A partir de cette donnée et sous l'hypothèse très vraisemblable d'un développement sphérique de la flamme autour du point d'inflammation jusqu'au contact de la flamme avec les parois les plus proches (puis conservation de la surface des deux "calottes" restantes jusqu'à l'extinction), nous avons recalculé l'évolution de la pression avec les expressions précédentes. On constate un bon accord entre le calcul et l'expérience, sachant que la décroissance de la pression après le maximum ne peut être prédite par le modèle (l'hypothèse de comportement isentropique n'est plus valide). D'autres comparaisons ont été faites avec d'autres produits et d'autres géométries qui ont confirmé cet accord. On en déduit que cette formulation, initialement établie pour des prémélanges gazeux, paraît également acceptable pour les explosions de poussières dans des enceintes (d'au moins 1 m³).

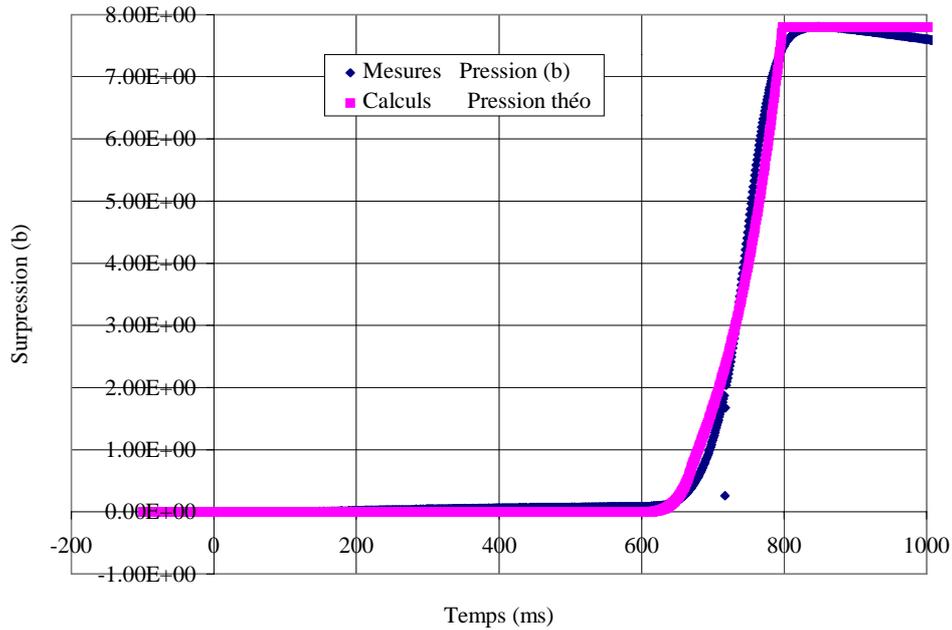


Figure 7: comparaison entre les prédictions et les mesures d'évolution de la pression d'explosion en fonction du temps pour une explosion d'amidon de maïs dans la chambre ISO 7184/4

Lorsque l'enceinte est munie d'un orifice, il convient de modifier les expressions précédentes pour y introduire un terme de fuite sous la forme :

$$Q_{fuite}(t) = - C_d \cdot A_s \cdot f[\Delta P(t)]$$

où $Q_{fuite}(t)$ est le débit de fuite par les orifices

C_d le coefficient de débit

A_s la surface des orifices

$f[\Delta P(t)]$ une fonction de la différence de pression avec l'extérieur qui exprime les effets de compressibilité de l'air (pour de petits ΔP , $f[\Delta P(t)] = \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho}$)

Dans EFFEX, on suppose que la fragmentation peut concerner une large fraction des parois de l'enceinte où se déroule l'explosion et on considère que les réactifs et les produits de combustion peuvent s'échapper simultanément par les orifices.

L'évolution de la surface de la flamme en fonction du temps est un aspect important de cette phase de calcul. Elle dépend en partie de la position du point d'amorçage. Compte tenu des phénomènes qu'on souhaite représenter, l'amorçage de l'explosion par un jet provenant d'une autre enceinte est la situation la plus critique. Dans ce cas, les expériences montrent (Carnasciali et al., 1991; Lunn, 1998) que l'inflammation se produit de manière très préférentielle au droit des parois. A partir de ce point la flamme peut se développer "sphériquement" jusqu'à ce que les parois soient atteintes. Cette phase de développement initial, peu génératrice de pression, est ignorée dans EFFEX. Pour représenter la phase ultérieure, nous avons mis à profit des observations expérimentales des flammes de poussières (Proust, 1988; Rzal et al., 1991) qui suggèrent fortement que les flammes de poussières (type amidon) ne paraissent pas capables de prendre une allure très allongée contrairement aux prémélanges gazeux (figure 8 où on voit la forme du front de flamme dans un mélange méthane air et dans une suspension air-particules d'amidon pour les mêmes conditions d'essai). Ces données indiqueraient que la surface du front doit rester assez proche (dans un facteur deux environ) de la section droite de l'enceinte où elle se propage.

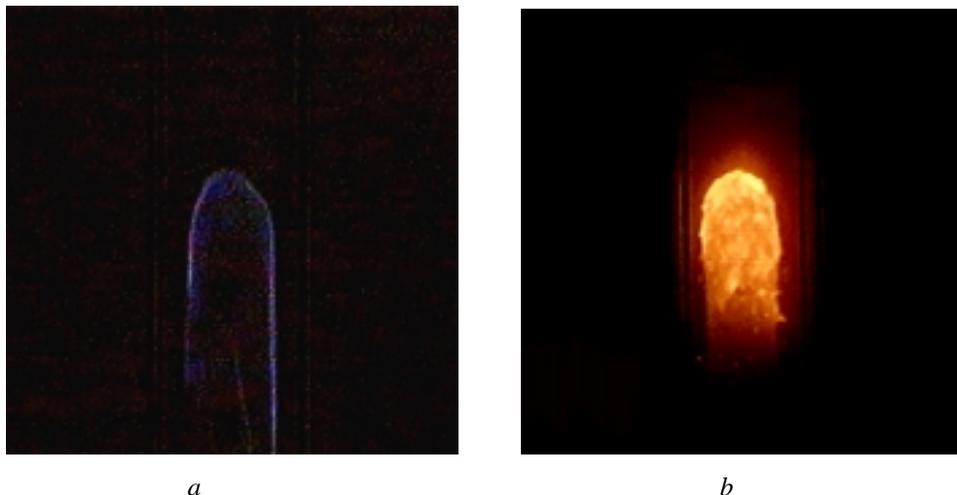


Figure 8: propagation ascendante d'une flamme dans un tube vertical de 10 cm de diamètre (a-CH₄-air 8% - b-air particules d'amidon 150 g/m³)

Nous avons comparé (figure 9) les résultats obtenus au moyen d'EFFEX et ceux de quelques expériences caractéristiques suffisamment bien documentées, tirées de la littérature (Eckhoff et al., 1986; Eckhoff et al., 1984; Pineau et al., 1976, Roux et Proust, 1999). Les calculs ont été faits sur la base des valeurs de S_t déduites des expériences et en tenant compte de la position du point d'inflammation (une inflammation centrale produit un débit de volume excédentaire deux fois plus grand en théorie que si la source d'inflammation est disposée sur une paroi). On constate un accord satisfaisant entre les mesures et les prédictions. Les prédictions paraissent surestimées pour les fortes surpressions mais cela pourrait provenir de la variation du coefficient de décharge avec la pression.

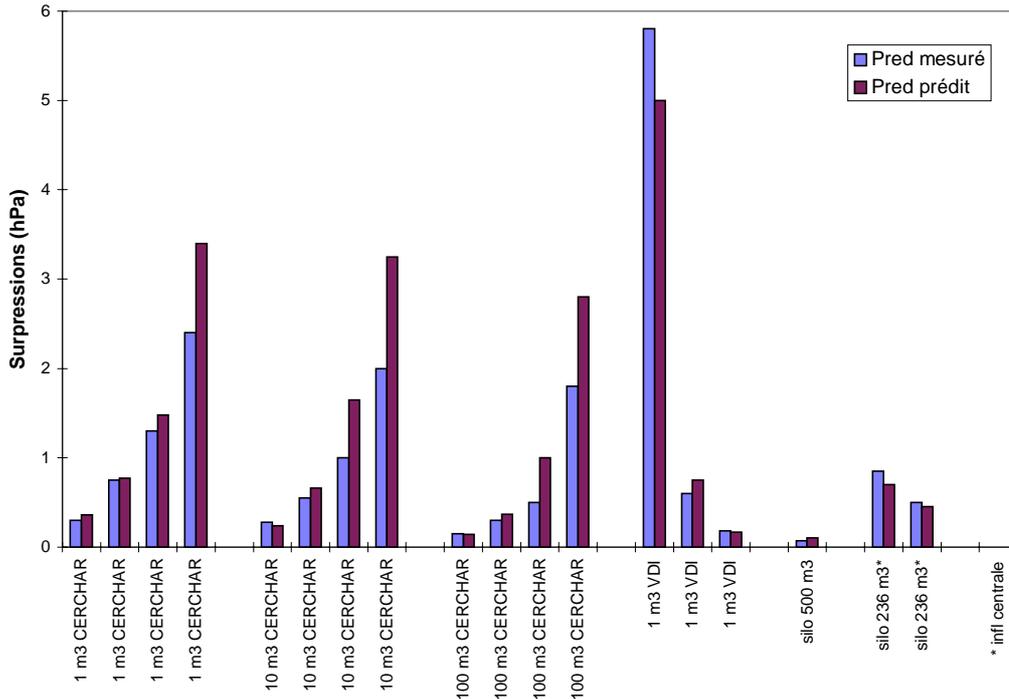


Figure 9: comparaison entre les résultats des calculs réalisés avec EFFEX et quelques essais caractéristiques (explosions en enceinte isolée: amidon de maïs, P_{red} désigne ici la surpression maximale atteinte)

Comme rappelé auparavant (section 4), dans la plupart des situations pratiques, la flamme est transmise d'une enceinte à l'autre à travers un orifice. Dans cette situation, le niveau de turbulence est susceptible d'être beaucoup plus grand que ceux rencontrés traditionnellement dans les enceintes isolées. Les résultats d'expériences utilisés jusqu'alors ne permettent pas d'aborder ce point important. De surcroît, nous ne disposons à l'heure actuelle que de données très fragmentaires concernant la transmission d'une explosion de poussières (ou même de gaz) d'une enceinte à une autre. A notre connaissance, les travaux les mieux documentés sur ce sujet sont ceux de l'équipe de Lunn du HSL (Lunn et al., 1996; Holbrow et al., 1996). Pourtant de nombreuses informations manquent comme des indications sur les vitesses de flamme et les lieux d'inflammation pour tenter une « validation » de EFFEX. Nous avons cependant utilisé quelques informations afin de tester la capacité du logiciel à simuler ce type de situation. Les configurations expérimentales que nous avons examinées sont celles où deux enceintes de 2 à 20 m³ sont reliées par des canalisations de 150 à 500 mm de diamètre (longueur 5 à 15 m). On constate (figure 10) que pour de la poussière de charbon et une canalisation de 500 mm, EFFEX semblerait fournir des tendances correctes.

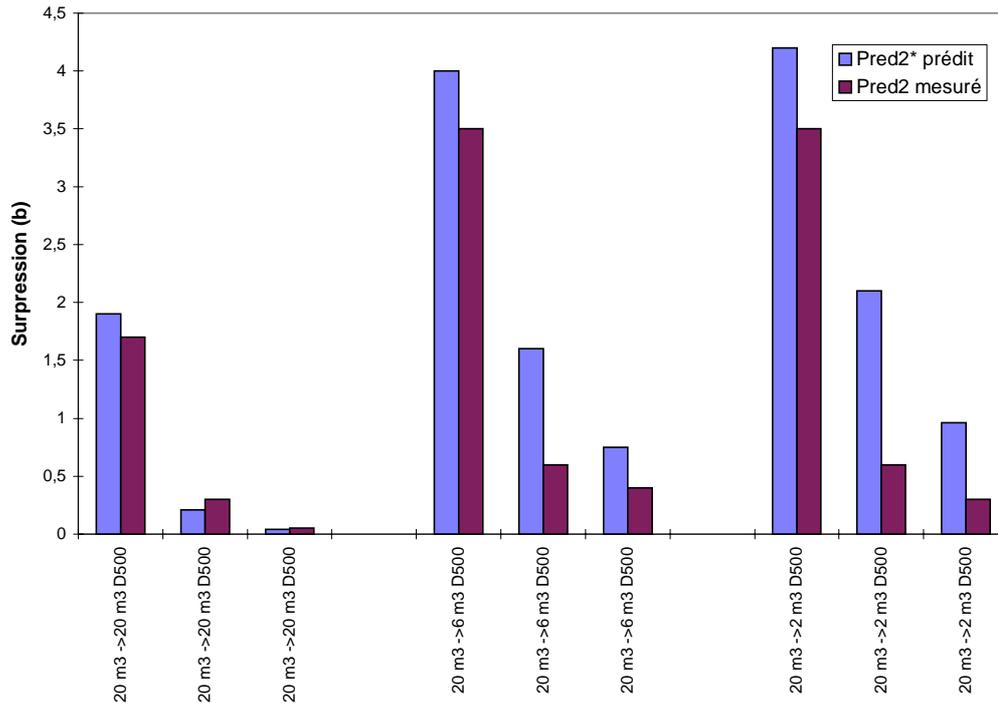


Figure 10: comparaison entre les résultats des calculs réalisés avec EFFEX et quelques essais caractéristiques (explosions dans des enceintes connectées: poussière de charbon; P_{red2} est la surpression maximale dans l'enceinte où se développe le jet et D_{xxx} donne le diamètre de la canalisation de liaison en mm)

Ce point spécifique mériterait d'être amélioré tout comme certains phénomènes non élucidés à ce jour. Ainsi, Eckhoff (Eckhoff et al., 1984) remarque que des explosions d'une violence inattendues se sont produites dans les cellules de stockage qu'il a utilisées pour ses essais sans que la vitesse de flamme, jusqu'à plus des 2/3 de la hauteur du volume, n'ait été significativement différente par rapport à d'autres essais dits « normaux ». Il attribue cela à un niveau de turbulence plus grand, provoqué par le maintien à plein régime du dispositif de remplissage pneumatique au moment de l'inflammation (ralenti pour les essais « normaux »). La relative insensibilité de la vitesse de flamme sur la majeure partie de la propagation contredirait plutôt cette hypothèse. Il n'est en revanche pas impossible que la flamme ait été « aspirée » dans le jet de produit près du sommet du silo, induisant localement une explosion plus violente à la manière des jets de gaz inflammables.

4.4 L'ECLATEMENT DE L'ENCEINTE

Il s'agit d'estimer la surpression pour laquelle le confinement est détruit, totalement ou partiellement, et d'évaluer le cas échéant la taille des fragments.

Il est généralement possible de déterminer la résistance d'une enceinte soumise à une surpression interne quasi-statique par le calcul. Nous avons acquis dans ce domaine une certaine expérience (Proust, 1997). EFFEX est équipé d'un module simple de calcul de résistance des structures (module « STRUCTURE »). Les enceintes sont considérées comme un assemblage de voiles plans ou bombés (cylindres). Les contraintes internes les plus fortes sont soit de la traction, soit de la flexion et parfois du cisaillement. Les formules classiques de résistance des matériaux sont mises en oeuvre et les résultats confirment pleinement ceux fournis par des bureaux d'étude spécialisés.

Cependant, il apparaît que la structure est susceptible de se comporter de manière différente lorsque la pression n'est plus appliquée de manière quasi-statique (typiquement 0,01 b/s) mais de manière dynamique (Norris et al., 1959). On s'aperçoit ainsi (Proust, 1997) que les effets dynamiques se manifestent pour des seuils de vitesses de chargement de l'ordre de 1 b/s ce qui correspond à la gamme des explosions de poussières. La prise en compte de ce phénomène est donc requise.

L'impact d'une onde de pression issue d'une explosion sur une structure peut induire plusieurs types de sollicitations selon le « spectre » fréquentiel de l'onde et la nature de la structure:

- **A** : une onde dont la fréquence maximum, F_m , est bien inférieure à tous les modes propres de la structure devrait agir comme un chargement statique. La structure se comporte comme un ressort ;
- **B** : si F_m est voisine du premier mode propre, alors l'inertie de l'ensemble de la structure commence à apparaître. La structure se comporte comme un système masse-ressort ;
- **C** : si F_m est dans le domaine des modes supérieurs alors la structure pourra se mettre à vibrer ;
- **D** : à l'extrême, lorsque F_m est suffisamment élevée pour que puissent se produire des interactions entre les efforts et la structure interne du matériaux, on peut observer des modifications dans le matériau se traduisant éventuellement par un durcissement.

Pour simplifier, nous considérerons 4 types d'explosions : les déflagrations lentes et rapides, les détonations d'atmosphères explosives et les détonations d'explosifs condensés. Les valeurs de F_m typiques en fonction du volume de matière réactive (enceinte) sont présentées sur la figure 11. Les ordres de grandeur de F_m pour ces catégories d'explosions sont respectivement de l'ordre de quelques dizaines de Hertz, de quelques centaines de Hz et de quelques dizaines de kHz.

Les conséquences de type D ne peuvent être éventuellement observées qu'avec des explosifs détonants. Encore faut-il que l'explosif et le matériau soient très rapprochés. En dehors de ce cas assez marginal, on peut estimer le type d'effet structurel possible en comparant les fréquences fondamentales de vibration de la structure considérée (grossièrement fonction de ses dimensions caractéristiques : figure 12) à celles de la figure 11.

On peut constater ainsi que les déflagrations d'atmosphères explosives, même relativement rapides, ne devraient avoir que des effets de type A et B tandis que les détonations ou les régimes assimilés (vitesses de flammes de plusieurs centaines de m/s) pourraient induire des effets de type C.

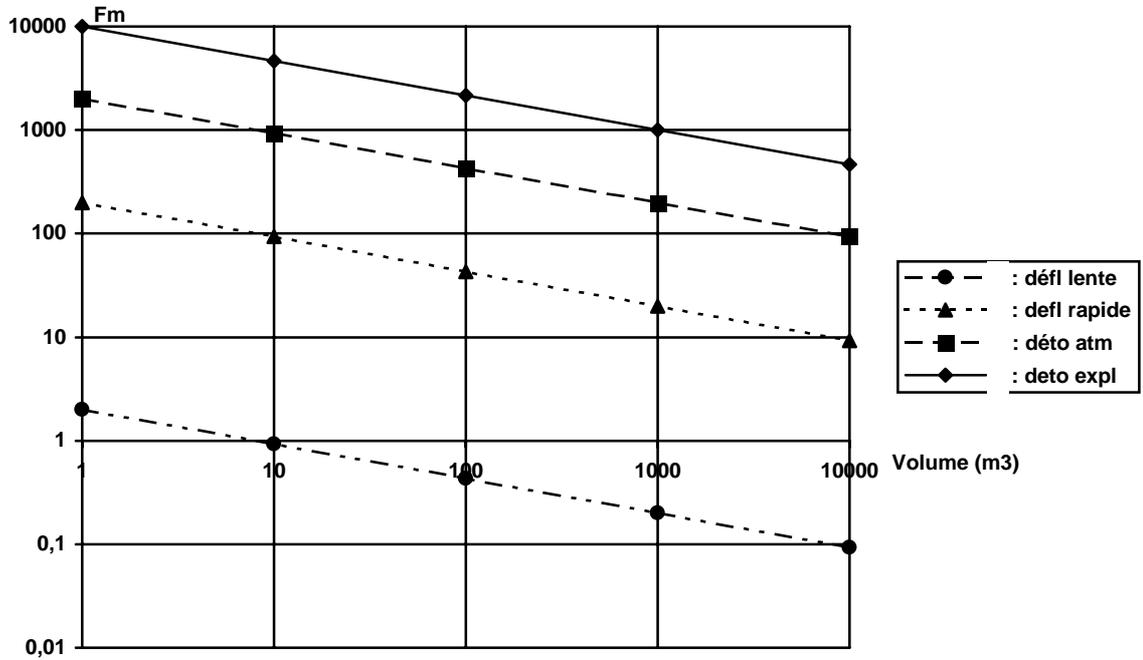


Figure 11 : ordre de grandeurs des fréquences caractéristiques des explosions dans des enceintes (déflagrations lentes à 2 m/s, rapides à 200 m/s, détonations à 2000 m/s et explosifs à 10000 m/s)

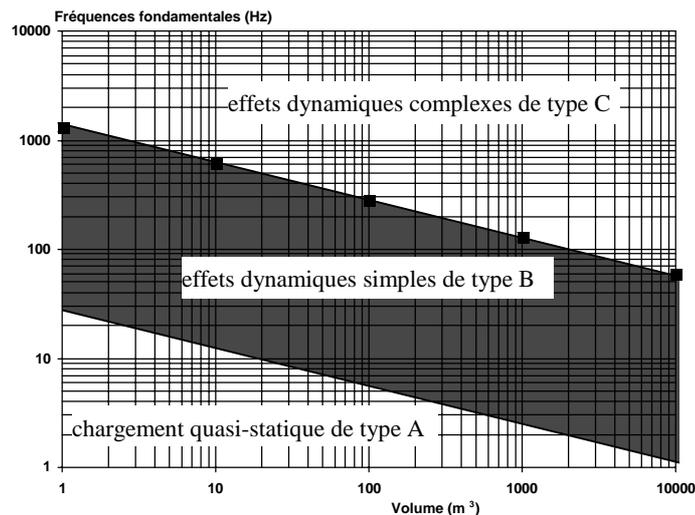


Figure 12 : typologie du comportement d'une structure soumise à une sollicitation dynamique

Ces graphes ne permettent pas d'évaluer l'amplitude de l'effet dynamique sur la résistance d'une structure. Pour les besoins propres de l'INERIS (sécurité et instrumentation), mais également pour des expertises, nous avons développé au cours de ces dernières années quelques outils d'analyse du comportement de structures sous les effets mécaniques dynamiques de l'explosion.

Actuellement, nous disposons d'outils (logiciels) et de connaissances pour traiter les conséquences de type A, B et C (respectivement modules « STRUCTURE », « BIMPACT » et « CIMPACT »). A ce stade, nous ne traitons que les aspects purement vibratoires, linéaires, ce qui est généralement suffisant compte tenu de la précision des informations disponibles. Cependant, introduire de la non-linéarité ou des phénomènes d'amortissement est tout-à-fait envisageable.

Les contraintes induites par des sollicitations de type B semblent correctement représentées en considérant que la structure se comporte comme un système masse, M , ressort, K (raideur), soumis à une sollicitation mécanique, F , variable dans le temps. L'équilibre dynamique de ce système s'écrit:

$$M \cdot x'' + K \cdot x = F$$

où x représente la déformation du ressort.

La déformation ultime, x_r , à la rupture, dépend des caractéristiques de la structure et est connue pour un chargement en statique, F_{str} :

$$x_r = F_{str} / K$$

Dans cette formulation, les paramètres sont la sollicitation de ruine en régime statique et la fréquence caractéristique de vibration (mode « fondamental ») de la structure $F_c = (K/M)^{1/2}$.

La résolution peut être faite analytiquement dans un certain nombre de situations mais la résolution numérique est préférable. Nous disposons pour cela d'un logiciel: BIMPACT. Ce dernier calcule la réponse de la structure en fonction du temps et la compare à celle que l'on obtiendrait en supposant que les effets dynamiques sont inexistantes ($M=0$) et qui constitue un chargement statique. Le rapport entre les efforts calculés dans les deux situations est connu sous la dénomination « Dynamic Load Factor » (DLF =dynamique/statique).

A titre d'illustration, nous avons simulé le comportement dynamique d'une paroi soumise à une augmentation de la pression sur l'une de ses faces en fonction du rapport F_m/F_c (F_m est la fréquence extrême du chargement). Le chargement est assimilé à une rampe de durée $1/F_m$ suivi d'un palier d'une durée indéfinie. Cela constitue une approximation d'une sollicitation par une explosion. On constate que les contraintes à l'intérieur de la paroi oscillent à la fréquence F_c autour d'une valeur moyenne correspondant au chargement statique et que l'amplitude de ces oscillations est fonction du rapport F_m/F_c (tableau 1). On constate qu'en théorie, l'effet dynamique de l'explosion sur une structure se traduit soit par un accroissement ou une réduction de la résistance de l'équipement considéré par rapport à un chargement statique d'amplitude équivalente.

F_m/F_c	DLF
1	entre 0 et 2
1/2	entre 0,3 et 1,7
1/5	entre 0,75 et 1,25
1/10	entre 0,8 et 1,2
1/20	entre 0,95 et 1,05
1/50	entre 0,99 et 1,01

Tableau 1 : comportement dynamique d'une structure

L'expérience semble bien confirmer ces estimations. A titre d'illustration, nous avons reproduit sur la figure 13, les variations de la résistance d'une membrane fine encadrée de dimension caractéristique 0,5 m, exposée aux effets d'explosion de violences variées (membrane installée sur une chambre de 10 m³ à l'intérieur de laquelle ont été amorcées des explosions de poussières). L'éventail des valeurs mesurées pour DLF correspond à celui prédit.

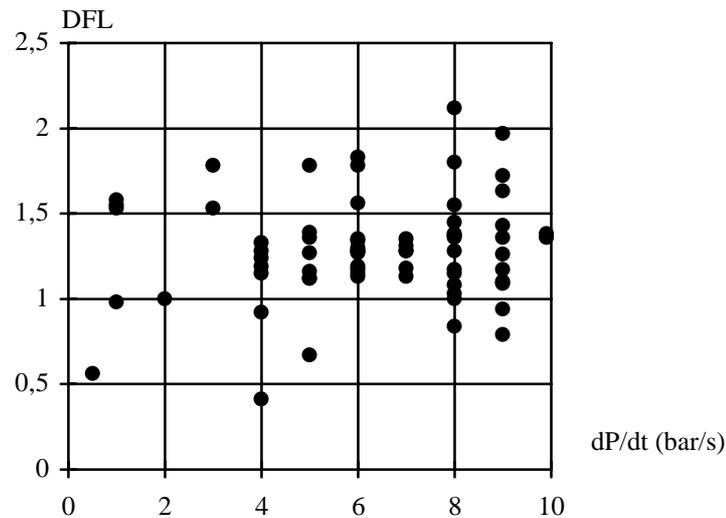


Figure 13 : DLF pour une membrane fine soumise à des explosions de poussières de violence variées

Pour les situations plus complexes où les fréquences harmoniques supérieures peuvent être sollicitées, les solutions “simples” sont plus difficiles à imaginer. On peut toutefois estimer la déformée (et les contraintes) en utilisant des méthodes de résolution spectrales. C'est le principe de « CIMPACT ». L'hypothèse centrale est que l'effort de déformation correspondant à la partie du spectre du signal de pression dans l'intervalle $[(n-1/2).F_c; (n-1/2).F_c]$ contribue exclusivement au mode de déformée d'harmonique n (fréquence $n.F_c$). La déformée réelle correspond à la composée de tous les harmoniques. Le calcul est réalisé des fréquences les plus basses vers les plus élevées (comme vraisemblablement lors d'une explosion réelle). Si la déformée globale excède les limites admise à un moment du calcul alors on estime que le confinement se rompt. L'utilisation de CIMPACT requiert l'introduction d'un spectre de fréquence du signal de pression et de ce fait est complexe. Il est rarement utilisé dans toute son intégralité. Il n'a par ailleurs pas reçu de validation spécifique (pas de données utilisables).

A propos de la taille des fragments, les sollicitations de type A et B conduisent à des schémas de rupture qui correspondent aux prédictions faites pour un chargement statique. Pour les sollicitations de type C, si on observe que la limite de déformation est atteinte à partir de l'harmonique N , alors on considère que la taille des fragments correspondra à celle de cet harmonique.

4.5 LA PROJECTION DES FRAGMENTS

Le module de balistique qui permet de calculer la trajectoire des fragments s'appelle « MISSILE ».

Les équations représentatives type sont tout à fait classiques :

$$M_p \cdot d/dt[V_o(t)] = - M_p \cdot g \cdot z + C_x S_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_o \cdot \|U - V_o\| \cdot (U - V_o)$$

où

U et V_o sont les vecteurs vitesse de l'écoulement issu de la brèche et du projectile dans un repère fixe

z est le vecteur unité de direction vertical (dirigé vers le haut)

$\|.\|$ désigne la norme d'un vecteur

g l'accélération de la pesanteur

M_p et S_p les masses et surfaces du projectile (surface projetée dans le plan perpendiculaire à l'écoulement)

C_x le coefficient de traînée (freinage aérodynamique) du fragment, typiquement de l'ordre de 1 pour une plaque mince (Duplantier, 1996)

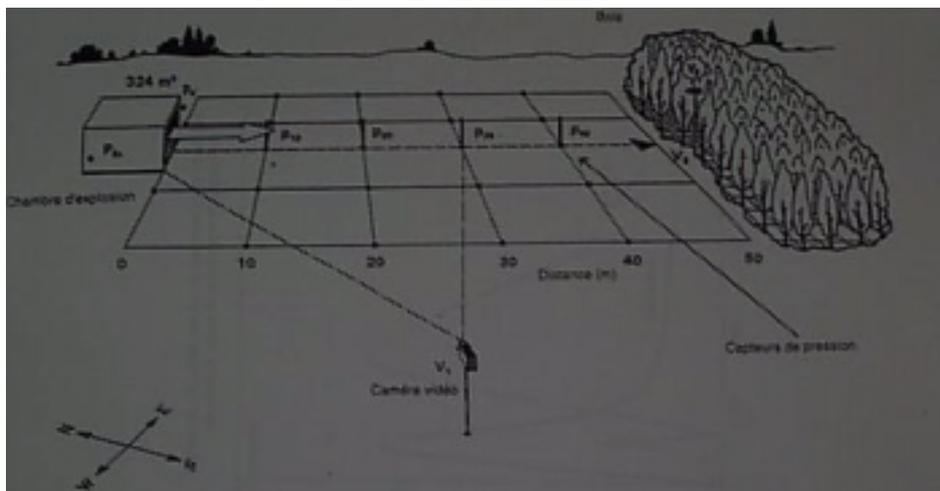
ρ_o la masse volumique de l'atmosphère

A l'heure actuelle, dans MISSILE, les effets de portance⁴ sont négligés. Par ailleurs, on considère que le fragment reste perpendiculaire à la direction de sa trajectoire. On optimise ainsi la poussée reçue mais ultérieurement le freinage est maximum. On estime de cette façon pouvoir représenter correctement les distances de projection par compensation mutuelle de ces effets antagonistes. Pour des objets massifs (cas fréquent), l'incidence est tout à fait négligeable.

Nous avons comparé les performances du logiciel à de rares résultats d'expériences. Nous disposons en particulier de résultats d'expériences réalisées en 1993 à l'Institut allemand IBExU. L'appareillage utilisé est représenté sur la figure 14. A l'extrémité d'une aire de tir longue de 55 m est disposée une chambre d'explosion cubique de 324 m³ dont l'une des faces est ouverte et peut être équipée d'une paroi soufflable (6m x 3m). Les particules sont déposées sur le sol puis mises en suspension à l'aide de 4 gros ventilateurs. L'inflammation est produite à l'aide d'inflammateurs pyrotechniques disposés dans des coins inférieurs à l'extrémité opposée à la paroi soufflable. IBExU a examiné le comportement d'une paroi en verre armé sous l'effet d'une explosion de poussière de lignite.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 15 pour ce qui concerne la surpression interne et sur la figure 16 pour la projection des fragments de verre. La surpression calculée à l'aide d'EFFEX est aussi représentée sur la figure 15 tandis que la répartition simulée des fragments de verre est représentée sur la figure 17 avec l'hypothèse d'une répartition gaussienne de l'angle de projection des fragments autour de l'angle initial de la paroi (35° correspond à l'angle pour lequel la distance de projection est la plus grande).

On constate sur cet exemple que l'accord entre l'expérience et les simulations est raisonnable. Ce bon accord semble également corroboré lorsque les résultats des simulations sont comparés aux informations provenant du « retour d'expérience » d'accidents et justifie qu'on utilise cet outil pour réaliser des prédictions.



⁴ à ne pas confondre avec la force de « traînée », essentiellement induite par la pression d'arrêt du fluide sur la face du projectile exposée à l'écoulement. La force de « portance » est essentiellement induite par une dépression sur l'une des faces du projectile. Elle est favorisée par des formes de projectiles plutôt « bombées » (qui défléchissent les filets fluides différemment sur les deux faces) et des « incidences rasant » par rapport à la direction de l'écoulement (Rieutord, 1985)

Figure 14 : installation d'essai utilisée par IBEu

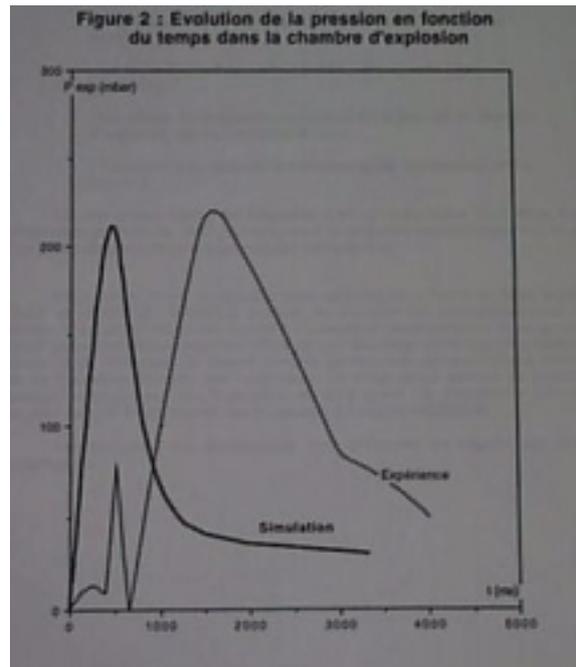


Figure 15: surpression dans l'enceinte (mesures et prédictions par EFFEX)

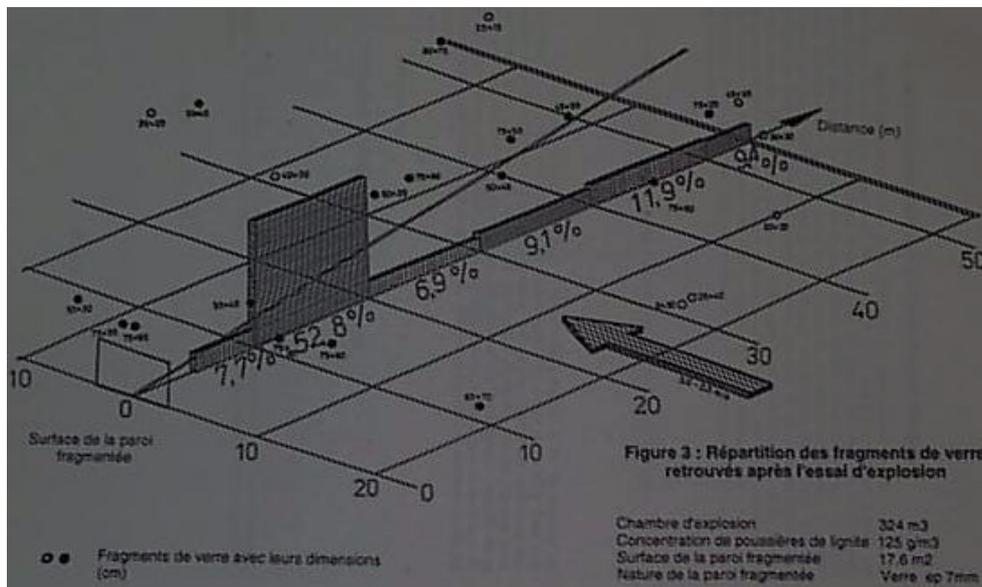


Figure 16: dispersion observée des fragments de la paroi de verre

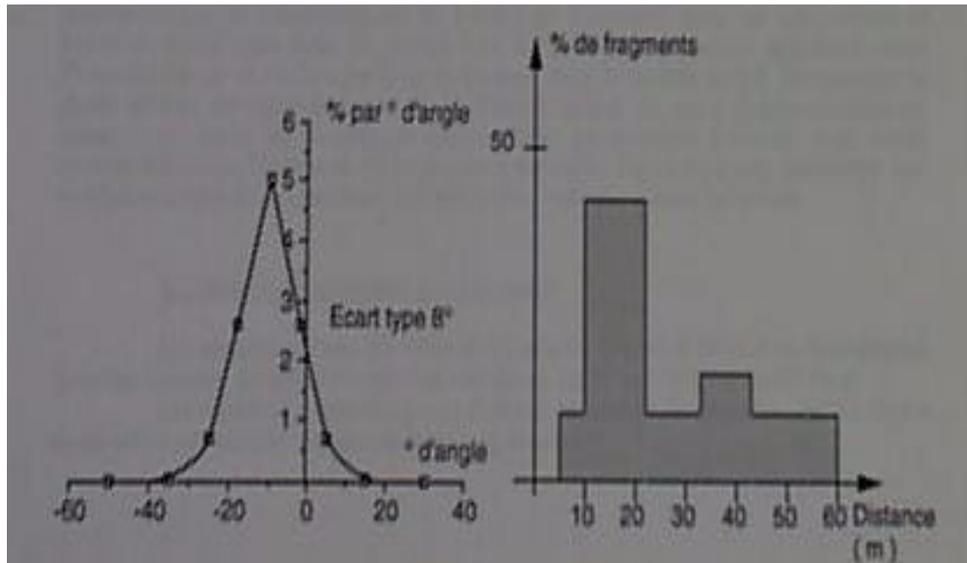


Figure 17: dispersion simulée des fragments de la paroi de verre

4.6 LES EFFETS DE PRESSION EXTERNES

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 sa propre onde de pression aérienne. EFFEX est équipé d'un module spécifique (« BRODE ») pour estimer l'amplitude de ces ondes.

Ce module permet de traiter plus spécifiquement le premier type d'onde (consécutive à l'éclatement) tant le second est encore mal connu (Van Wingerden, 1993). On considère en première approximation que l'onde de pression aérienne émise lors de l'éclatement d'un réservoir sous pression est équivalente à une onde émise par la détonation d'un explosif. Ce point semble assez bien établi (Baker,). On se place dans la situation assez réaliste, notamment lors d'explosions violentes, où le confinement est totalement détruit, et où toute l'énergie de pression est instantanément libérée. On admet le caractère conservatif de cette estimation pour certaines situations, notamment celles se traduisant par une rupture très partielle du confinement, mais il s'agit de tenir compte, faute de mieux, d'éventuelles explosions secondaires qui se produisent plus volontiers dans ces situations (Crowhurst et al., 1994).

L'énergie de pression à considérer est l'énergie dite de « Brode » définie auparavant comme:

$$E_d = \Delta P_{\text{exp}} \cdot V / (\gamma - 1)$$

Elle peut être utilisée directement avec l'abaque de prédiction de l'atténuation des ondes de pression proposée par Lannoy (Lannoy, 1984) du moins à distance du point d'éclatement (Proust, 1990; Duplantier, 1996). Dans la zone proche, l'onde de pression n'est pas totalement formée et la surpression maximale (ΔP_{ext}) peut être estimée au moyen, par exemple, de la théorie des Tubes à Choc (Thompson,). On aboutit alors, pour la zone proche :

$$\Delta P_{\text{ext}} = \Delta P_{\text{exp}} / 2$$

si la distance au point d'éclatement est plus petite que $1,7 \cdot V^{1/3}$

On constate sur la figure 18 que cette approche permet effectivement d'englober apparemment tous les types d'ondes aériennes issues d'expériences (van Wingerden, 1993; Wirkner-Bott et al., 1992; Crowhurst et al., 1994), y compris lorsque des explosions « secondaires » se produisent.

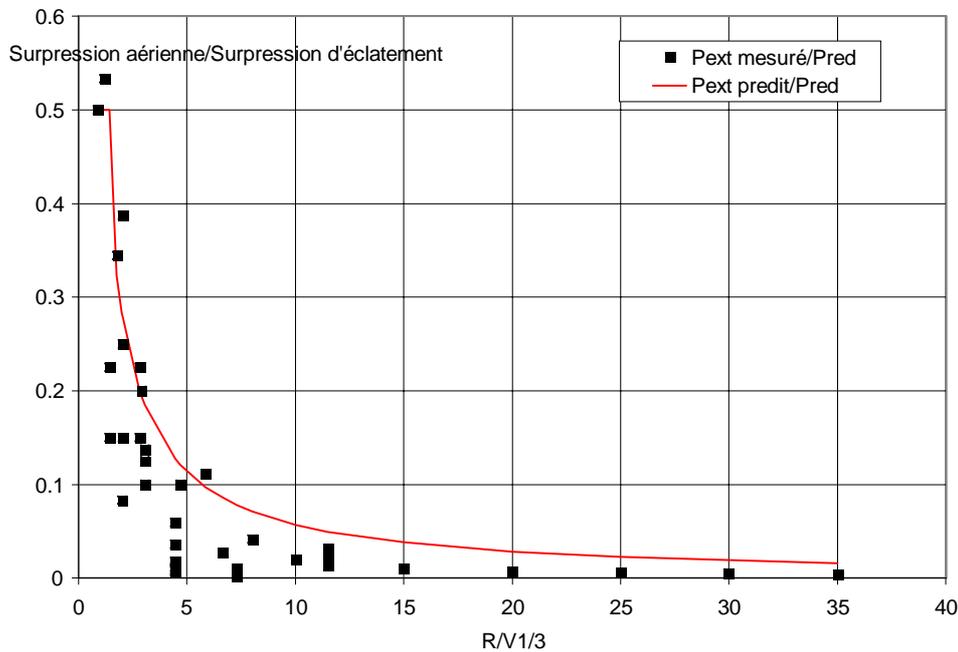


Figure 18: intensité des ondes aériennes suite à une ouverture partielle d'un récipient où se produit une explosion de poussières (mesures : carrés, théorie : courbe)

5. COMPARAISON PAR RAPPORT A DES ACCIDENTS REELS

Cette comparaison, indispensable, a surtout pour objectif de montrer la pertinence de l'enchaînement des modules pour simuler le développement de l'explosion. Nous décrivons sommairement cet enchaînement dans ce qui suit avant de comparer les résultats d'EFFEX à divers accidents caractéristiques bien étudiés : l'explosion de la sucrerie de Boiry Ste Rictude en 1982 et celle du silo de Blaye en 1997.

5.1 UTILISATION D'EFFEX

Selon leur degré de complexité, certains modules sont des exécutables, en langage compilé, d'autres sont programmés sur tableur (EXCEL). L'ensemble fonctionne sous un environnement WINDOWS.

MISSILE, CIMPACT et EXPBAT sont des exécutables. Ils se composent d'équations différentielles, non linéaires, résolues par différences finies, selon un schéma dit " explicite " au moyen d'un « pas de temps » calculé pour repérer les plus fines variations (pas de temps adaptatif).

On peut schématiquement représenter une installation de manutention de grain par exemple comme indiqué sur la figure 19.

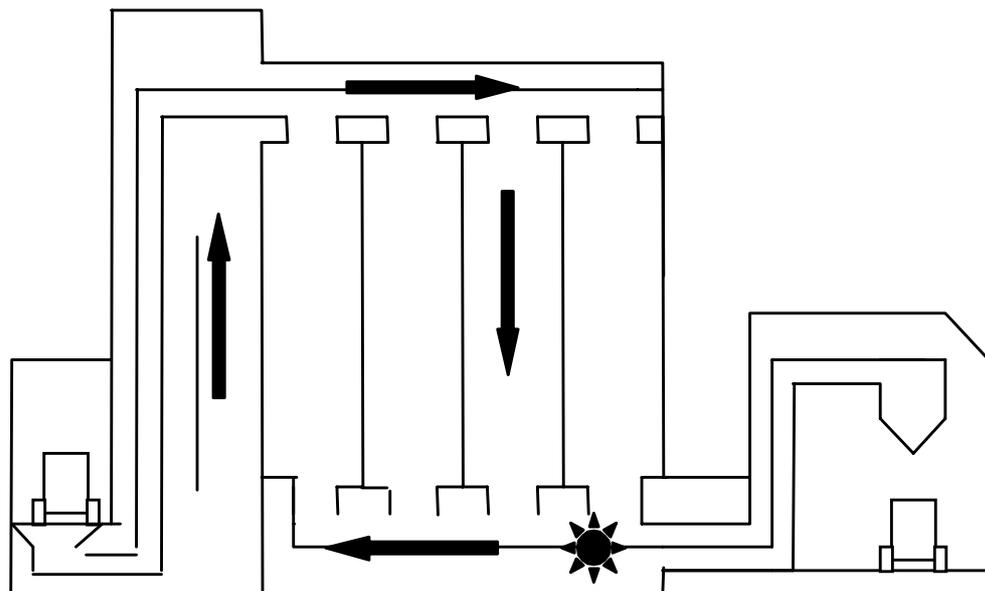


Figure 19: exemple typique d'installation de manutention de céréales

Elle comporte classiquement des cellules de stockage, une galerie de reprise sous les cellules, une fosse de réception reliée à une tour d'élévation qui permet de transporter le produit de la fosse ou de la galerie de reprise vers la galerie supérieure installée sur le sommet des cellules. Cette galerie permet de distribuer le grain vers une cellule ou une autre. Souvent, des installations de stockage de ce type ou de type différent communiquent par leurs galeries.

L'expérience a montré que des explosions très violentes peuvent s'y produire notamment lorsque la flamme se transmet d'un volume à l'autre. EFFEX est conçu pour représenter cela.

La première étape consiste à décrire les différents volumes de l'équipement (géométrie, orifices de décharge et de communication).

La seconde consiste, pour chacun d'eux, à estimer la résistance mécanique des différentes parties et la taille des fragments. STRUCTURE est alors un passage obligé, éventuellement « corrigé » pour les effets dynamiques par BIMPACT ou CIMPACT. Pour utiliser ces derniers modules cependant, une certaine connaissance de la puissance de l'explosion est requise et une première évaluation des effets de pression est nécessaire : l'approche est donc itérative. Mais, à moins que l'explosion ne soit extrêmement violente, il n'est en général pas nécessaire de recourir à CIMPACT pour prédire la taille des fragments (STRUCTURE suffit).

La troisième étape consiste à imaginer le ou les scénarios d'explosion susceptible(s) de conduire aux effets extrêmes. Si on imagine que l'installation de la figure 19 est une structure « lourde » (ex: en béton armé) alors il est vraisemblable que le scénario le plus défavorable sera celui d'une explosion débutant dans la galerie de reprise ou dans la tour et se transmettant, via la tour, à la galerie supérieure puis à une ou deux cellules. Si la galerie supérieure est suffisamment massive alors on peut penser qu'il s'y produira un « retour de flamme » provenant de ces premières cellules. Cette nouvelle explosion dans la galerie, d'une violence accrue, pourrait alors se transmettre aux cellules voisines. Ce scénario paraît très plausible pour les accidents de Blaye et de Metz (1982) notamment.

TURBULENCE et COMBUSTION sont ensuite mis en oeuvre dans la quatrième étape pour déterminer les caractéristiques de la turbulence et de la combustion dans la galerie de reprise où débute l'explosion. Le phénomène générateur de turbulence doit être prescrit: il peut s'agir du déversement de produit sur une bande transporteuse.

EXPBAT est utilisé dans la cinquième étape pour calculer la surpression maximale engendrée et l'impulsion communiquée aux fragments éventuels.

Cette première valeur de la surpression sert à nouveau de paramètre d'entrée pour réitérer les étapes 4 et 5 à propos de l'explosion dans la tour. Outre ce paramètre, la dimension des orifices de communication entre la galerie de reprise et la tour est une donnée très importante. On poursuit ainsi le calcul jusqu'au terme du scénario sauf si la propagation s'interrompt. Il peut en être ainsi lorsque par exemple l'un des volumes est totalement détruit par le souffle de l'explosion avant que la flamme n'y parvienne (on parle alors de « découplage »).

Au terme de ce processus, MISSILE et BRODE peuvent être mis en oeuvre pour évaluer les effets externes.

La figure 20 résume l'enchaînement des différentes étapes et **un exemple d'utilisation d'EFFEX sur un cas pratique est proposé dans l'annexe. Cependant, si la procédure utilisée est classique et relativement générale, les valeurs trouvées sont spécifiques du cas traité et ne peuvent être extrapolées à une autre situation tant les détails de construction peuvent avoir une grande incidence sur les résultats.**

Enchaînement des modules d'EFFEX

Etapes de l'étude

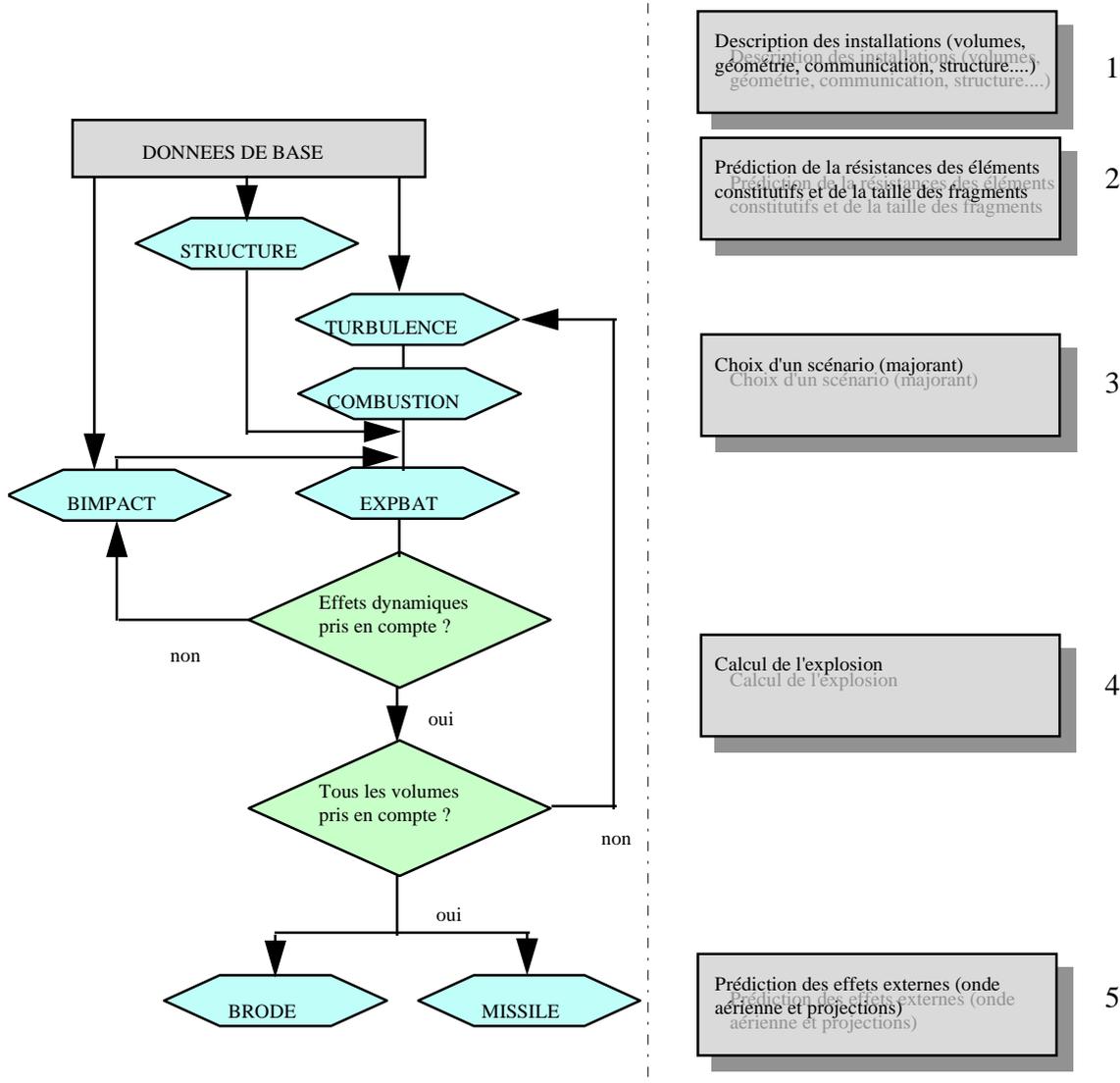


Figure 20 : enchaînement des différents modules pour une explosion dans l'installation de la figure19

5.2 ACCIDENT DE BOIRY STE RICTRUDE

Une violente explosion a gravement endommagé les cellules de stockage de la sucrerie de Boiry ste Rictrude le 11 mai 1982.

L'installation, représentée sur la figure 21 (schéma de principe), se compose de 3 cellules cylindriques en béton armé de stockage de capacité respectives 20 000 tonnes pour les deux plus petites (cellules 1 et 2, diamètre 30 m et hauteur 50 m) et de 60 000 tonnes pour la plus grande (cellule 3 diamètre 50 m et hauteur 50 m). Chaque cellule est fermée en partie supérieure par une dalle en béton armé. Cette dalle sert de plancher aux greniers. Ce sont des dômes hémisphériques de 30 m de diamètre pour les cellules 1 et 2 et de 50 m pour la cellule 3. La paroi de ces dômes est en béton (en béton léger sur armature métallique pour les cellules 1 et 2 et en béton armé de 10 cm pour la cellule 3). Les greniers sont reliés entre eux par des galeries aériennes en bardage métallique (section 2m x 2m), parcourues par des transporteurs mécaniques. Deux tours de manutention en béton armé (épaisseur de l'ordre de 10 cm) desservent l'installation, l'une attenante à la cellule 1 et l'autre à la cellule 3. Leur section à la base est de l'ordre de 5 m x 2 m tandis que leur hauteur est de 50 m environ (5 étages approximativement). La tour 1 communique par le haut avec les greniers et par la base avec l'espace sous cellules (constitué de galeries partiellement enterrées). La tour 3 dessert des installations annexes.

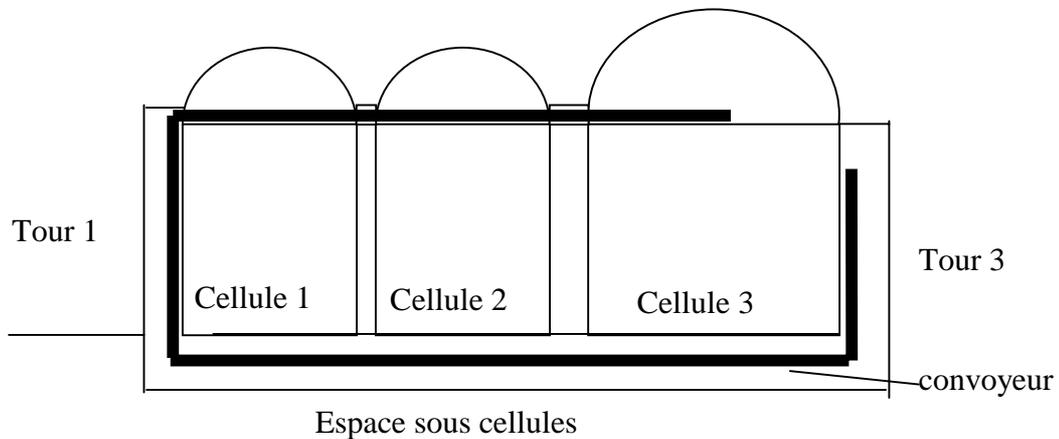


Figure 21 : schéma de principe de l'installation de stockage de la sucrerie de Boiry ste Rictrude

La tour 3 a été complètement détruite par l'explosion et la tour 1, partiellement. Les toitures des greniers des cellules 1 et 2 ont été détruites et les débris retrouvés jusqu'à une distance de 500 m environ. Le toit du grenier de la cellule 3 a été brisé mais s'est simplement affaissé sur place. La galerie aérienne entre les cellules 2 et 3 a été totalement détruite mais celle entre les cellules 1 et 2 partiellement.

D'après l'analyse (Ronchail et al., 1982) l'origine la plus probable serait un début d'incendie dans la partie supérieure de la tour 1 au point de jonction avec une petite galerie aérienne destinée à l'alimentation d'une autre installation. L'explosion se serait transmise aux étages supérieurs de la tour, puis à travers les greniers. La transmission à la tour 3 aurait été possible par la formation d'une brèche dans le plancher de la cellule 3 (ce plancher sert également de toit à la tour 3).

Les informations essentielles pour l'utilisation de EFFEX sont reportées dans le tableau 2 ainsi que les prévisions de résistances issues de STRUCTURE et BIMPACT.

Structure	Tour 1	Tour 3	Greniers 1 et 2	Grenier 3	Galeries de liaison
Section (m ²)	10	10	350	950	4
Longueur ou hauteur (m)	50	50	30	50	10
Surfaces ouvertes (m ²)	3 x 4 (convoyeurs)	3 x 4 (convoyeurs)	24 x 1 (fenêtres) et 2 x 4 (convoyeur)	24 x 1 (fenêtres) et 1 x 4 (convoyeur)	2 x 4 (convoyeurs)
Surpression de ruine* (hPa)	30	30	200	200	200

* limite supérieure en régime d'explosion

Tableau 2: éléments de résistance pour le silo de Boiry ste Rictrude

EFFEX (modules TURBULENCE, COMBUSTION et EXPBAT) prévoit que l'explosion débute très lentement avec un faible degré de turbulence (tableau 3), à mi-hauteur de la tour 1, et s'accompagne d'une augmentation modeste (15 hPa) de la pression dans cette tour en raison des ouvertures disponibles. A ce stade, la tour 1 pourrait résister aux effets de pression.

Sous l'effet du souffle issu de cette première phase de l'explosion, un nuage plus turbulent est produit dans le grenier de la cellule 1, puis le jet de flamme provenant de la tour, y amorce une explosion plus violente que dans la tour. On prédit ainsi une augmentation de pression jusqu'à 700 hPa environ (figure 22) ce qui se traduit par la rupture du dôme. On peut imaginer un retour de flamme ou de pression vers la tour 1 qui détruirait sans aucun doute, au moins la partie supérieure de cet édifice (30 hPa, tableau 3).

A propos de la galerie de liaison entre les greniers 1 et 2, on peut remarquer que la surpression dans le grenier 1 représente la pression génératrice de l'écoulement à travers la galerie. Par conséquent la pression statique qui s'exerce sur les parois de cette dernière est plus basse que 700 hPa: on peut l'estimer à un peu moins de 200 hPa et on peut supposer que la galerie de liaison entre les deux greniers est capable de supporter les effets de cette phase de l'explosion sans trop de dommages.

Un nuage extrêmement turbulent serait alors produit dans le grenier 2, capable, après la mise à feu par le jet de flamme provenant du grenier 1, d'induire une explosion de très grande puissance. On calcule ainsi, une surpression locale de près de 3000 hPa (figure 22). Cette explosion détruirait rapidement les galeries de liaison avec les autres greniers.

Les calculs montrent en effet que la galerie de liaison entre les greniers 2 et 3 serait détruite dès le début de la propagation de la flamme dans le grenier 2 si bien que le souffle de cette explosion dans le grenier 3 est considérablement réduit par ce découplage d'autant plus qu'il pourrait s'écouler environ 1 seconde entre l'amorçage de l'explosion dans le grenier 2 (et donc la destruction des galeries) et l'amorçage dans le grenier 3. La turbulence induite dans cet équipement est donc très transitoire ce qui rend une estimation précise difficile. La destruction de la galerie devrait empêcher la formation d'un nuage très turbulent dans le grenier 3 mais ne peut guère s'opposer à la transmission de la flamme en raison de la proximité des dômes.

On peut estimer que le degré de turbulence dans le grenier 3 au moment de l'amorçage de l'explosion à l'intérieur correspond approximativement à celui atteint au moment de la transmission de la flamme à travers la galerie de liaison entre les greniers 1 et 2 (à ce stade les galeries ne sont pas encore détruites) atténué par la diffusion turbulente pendant l'explosion dans le grenier 2. On calcule que la surpression maximale n'excède pas 400 hPa (figure 22). Par conséquent, le toit de ce grenier serait endommagé et se soulèverait légèrement, sans être toutefois pulvérisé, ni même projeté (éventuellement au pied de la cellule).

Enfin, la transmission à la tour 3 a été simulée en considérant que le nuage et la flamme ont pénétré par un orifice de 1 m² dans le toit. La surpression produite est très importante et la tour est détruite (figure 22).

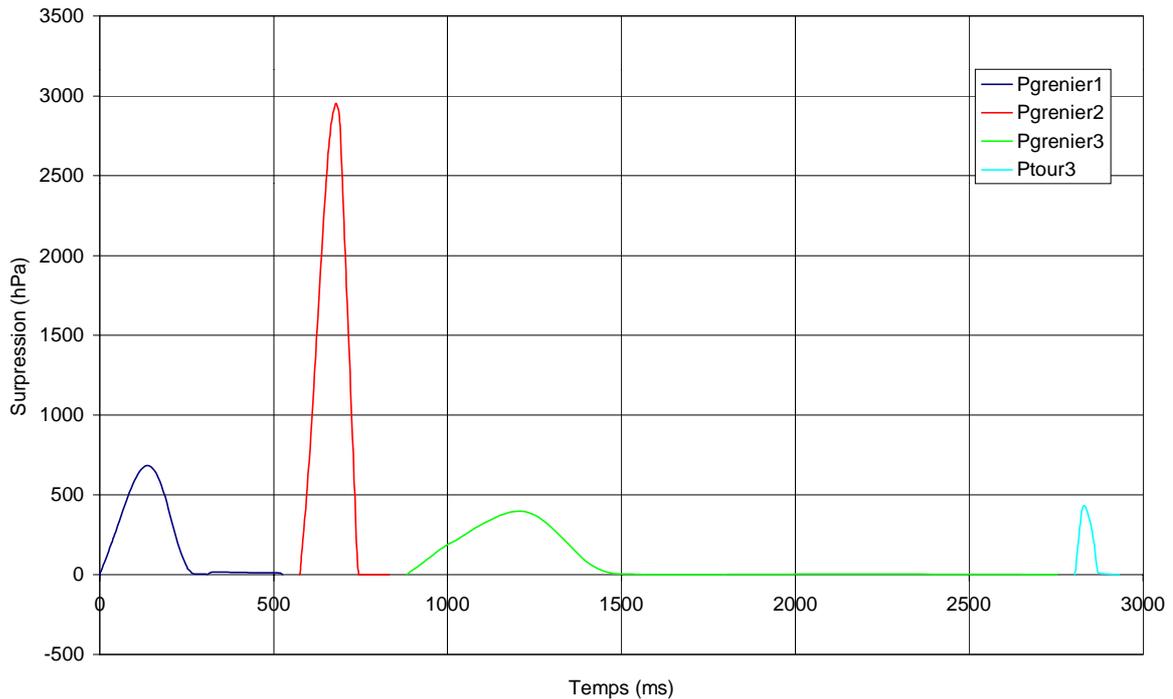


Figure 22: surpressions possibles en différents points de l'installation de Boiry ste Rictrude

Les débris seraient plutôt de grandes dimensions comme on peut le prédire sur la base de calculs classiques de résistance des structures. Le module MISSILE, permet de prédire des distances de projection de 450 mètres pour l'impact (figure 23). Il est entendu que le projectile peut s'arrêter un peu plus loin selon sa forme et la manière dont il touche le sol.

Ces distances paraissent parfaitement compatibles avec celles constatées suite à l'accident. Le déroulement de l'explosion est également conforme en termes d'effets de pression à ceux déduits de l'expertise.

Lieu	Tour 1	Grenier 1	Tour 1	Grenier 2	Grenier 3	Tour 3
Événement	incendie	jets venant de tour 1	jets venant de grenier 1	jets venant de grenier 1	jets venant de grenier 2	jets venant de grenier 3
u' (m/s)	0,3	3	1,3	20	0 à 2,5	80
S_t (m/s)	2,5	15	8	60	7 (moyenne)	100
ΔP_{exp} (hPa)	15	680	30	2900	400 (max)	480
Impulsion (Pa.s)	/	10 000	50	25 000	12000 (max)	1800
Distance de projection (m)	/	160	50	450	/	

Tableau 3: déroulement de l'explosion à Boiry ste Rictrude d'après EFFEX

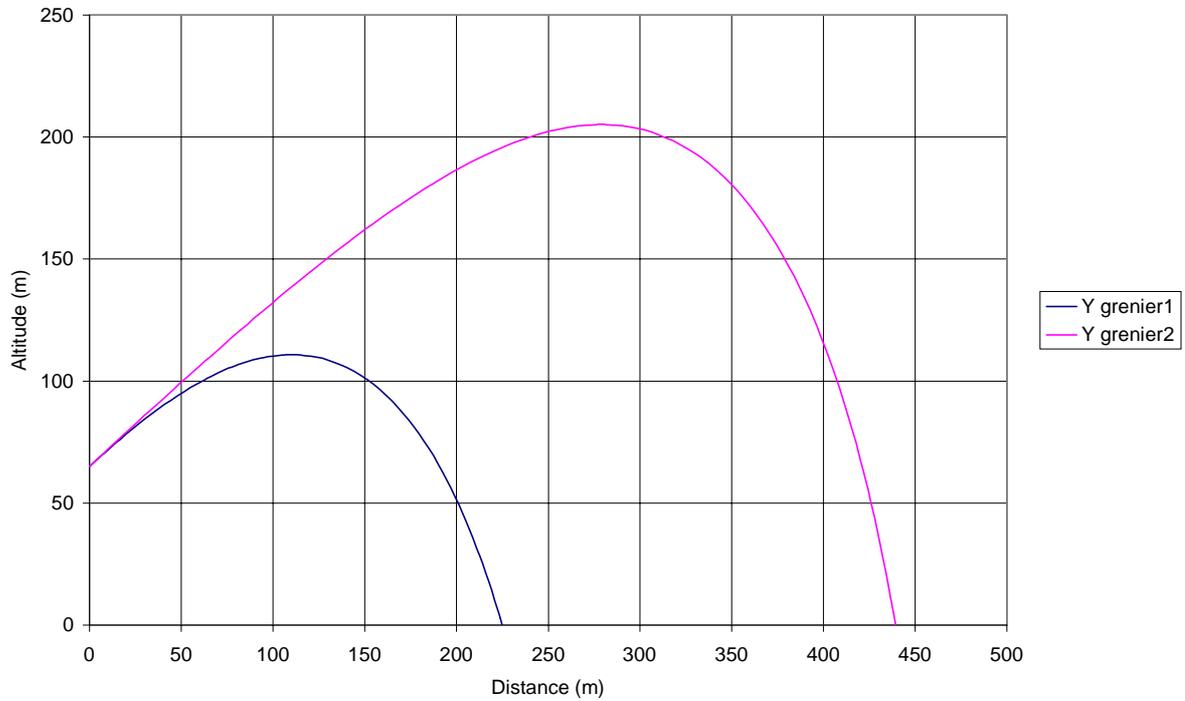


Figure 23: distances de projection en fonction des différents points de départ sur l'installation de Boiry ste Rictrude

5.3 ACCIDENT DE BLAYE

Une violente explosion de poussières a largement détruit une installation de stockage de céréales le 20 Août 1997 à Blaye.

Ce silo, de type « vertical » (figure 24), se compose de 3 rangées de cellules (44 au total) de section circulaire (diamètre 6,2 m et hauteur 33 m) en béton armé (épaisseur 15 cm). Une dalle en béton armé (15 cm d'épaisseur) les recouvre et sert de plancher à une galerie aérienne. Les produits à stocker sont introduits par des orifices de 60 cm x 60 cm pratiqués dans ce plancher. La galerie de manutention abrite des convoyeurs à bandes. Elle a une section de 12 x 3 m et une longueur de 90 m. L'épaisseur des parois est de 7 cm avec fort peu d'ouvertures. Elle communique à chaque extrémité avec des tours (que nous appellerons 1 et 2) également en béton armé (épaisseur des parois 7 cm, 6 à 7 étages, hauteur totale 50 m, section 12 x 6 m) relativement fermées (peu d'ouvertures). Ces tours communiquent en partie basse avec un espace sous cellules.



Figure 24 : vue de l'installation de stockage de Blaye avant l'accident

L'explosion a complètement détruit les cellules de la partie centrale, les tours, la galerie de manutention (figure 25) et les cellules attenantes à la tour 1. De gros morceaux (dimension métrique ou plus) du fût des cellules ont été retrouvés jusqu'à une distance de l'ordre de 50 m et des morceaux plus petits (ordre de 10 cm) jusqu'à 150 m. Des vitrages ont été brisés jusqu'à une distance de 500 m du lieu de l'explosion (soit un seuil de l'ordre de 30 à 50 hPa).



Figure 25 : vue de l'installation de stockage de Blaye après l'accident

L'analyse des causes possibles de l'accident (Masson, 1998) suggère que l'explosion a débuté dans l'installation de dépoussiérage, assez volumineuse, située dans la tour 1, se serait propagée dans la tour (éventuellement vers l'espace sous cellule) vers la galerie de manutention d'où elle aurait pénétré dans les cellules ouvertes à cet instant (au nombre de 3).

Une procédure de simulation semblable à celle détaillée précédemment a été utilisée. Les principaux éléments de résistance sont fournis dans le tableau 4 tandis que les effets de l'explosion sont résumés dans le tableau 5. Comme point de départ, nous avons imaginé, sur la base de l'analyse d'accident, une surpression de 300 hPa dans le filtre communiquant l'explosion par un orifice de dimension typique 1 m (les résultats sont peu sensibles aux détails de cette explosion initiale).

Structure	Tour 1	Galerie	Cellules
Section (m ²)	72	36	30
Longueur ou hauteur (m)	50	90	33
Surfaces ouvertes (m ²)	2 x 36 (accès haut et bas)	2 x 36 (extrémités)	0,36 (remplissage)
Surpression de ruine* (hPa)	20	20	90 (toit) et 1900 (fût)

* limite supérieure en régime d'explosion

Tableau 4: éléments de résistance pour le silo de Blaye

Lieu	Tour 1	Galerie	Cellules
Événement	explosion filtre	idem	jets venant la galerie
u' (m/s)	22	idem	27
S_t (m/s)	57	idem	50
ΔP_{exp} (hPa)	430	idem	2200
Impulsion (Pa.s)	3100	idem	13200 (toit) 8000 (fût)
Distance de projection (m)	50	/	150 (toit) 75 (fût)

Tableau 5: déroulement de l'explosion à Blaye d'après EFFEX

On constate de très fortes surpressions dans les cellules concernées qui pourraient très facilement détruire les cellules adjacentes, c'est à dire géographiquement une dizaine de cellules dans la partie médiane du silo. Le cheminement de l'explosion vers la tour 1 n'a pas été calculé (car les effets extrêmes correspondent à l'éclatement des cellules) mais on peut montrer, compte tenu de la pression dans la galerie au moment où la flamme s'y propage, qu'une explosion suffisamment violente s'y développe, capable de détruire complètement non seulement la tour mais également les cellules attenantes. Globalement les effets constatés sur le terrain en termes de dégâts et de projections correspondent assez bien au scénario simulé.

On peut tenter également de simuler les effets de pression externes en utilisant le module BRODE. Dans le scénario étudié, les trois cellules ouvertes peuvent exploser simultanément. Avec cette considération, on calcule que le seuil de surpression 30-50 hPa (destruction des vitrages) est atteint entre 300 et 600 m de l'installation, en bon accord avec les observations.

6. CONCLUSION

A la fin des années 1980, est apparue la nécessité d'être capable de prédire les effets sur l'environnement des explosions de poussières, surtout pour celles qui peuvent affecter les installations de grandes dimensions comme les silos de stockage de produits agroalimentaires.

Les effets redoutés sont en premier lieu, la projection de fragments, l'émission d'une onde de pression aérienne en second lieu et enfin l'éjection d'une flamme. Pour les évaluer, le recours à de nombreux éléments de mécanique des fluides, de combustion, de propagation des flammes, de thermodynamique, de résistance des structures, de balistique... est nécessaire. Compte tenu de ce degré de complexité, l'utilisation de l'informatique s'impose et un logiciel a été créé.

Dans sa version actuelle, EFFEX comporte 8 modules programmés sur PC qui permettent la résolution d'au moins 40 équations différentielles, non linéaires pour la plupart. Ces équations ont été élaborées sur la base des connaissances les plus précises concernant les explosions de poussières, notamment celles provenant des travaux de recherche conduits par l'INERIS.

Le logiciel est bâti sur un choix raisonné d'hypothèses et la formulation mathématique qui en découle exclut d'emblée tout paramètre « ajustable ». Les données existantes ont permis dans la mesure du possible de corroborer les modèles retenus comme nous le montrons dans ce document. Par ailleurs, les diverses simulations d'accidents réels que nous avons faites fournissent des résultats en bon accord avec les observations sur le terrain. Deux exemples type sont donnés dans ce document.

Dans une certaine mesure, on peut dire qu'EFFEX permet une estimation réaliste des effets extrêmes d'une explosion de poussières. Il serait probablement possible, sur la base de l'expérience acquise, de fournir des éléments simples pour évaluer rapidement les ordres de grandeurs des effets possibles en fonction de la structure de l'installation. Il faudrait pour cela synthétiser les conclusions des quelques dizaines de simulations effectuées. Cela est hors du champ du présent travail.

Enfin, si le niveau actuel de développement d'EFFEX permet en plus d'imaginer et de tester des solutions techniques propres à réduire les effets constatés sur une installation (découplage, orifices de décharge, remaniement des cloisonnements,...), le dimensionnement précis de ces moyens nécessiterait qu'une validation plus détaillée soit entreprise. Cela est également hors du champ du présent travail.

7. REFERENCES

MASSON F. (1998), « Explosion d'un silo de céréales », Rapport de synthèse, INERIS EMA-FMs-98-21FP30-07/07/98

PROUST Ch. (1997), « Le mécanisme des explosions de poussières », communication présentée au séminaire INERIS-EUROFORUM de Mars 1997 à Paris

ROUX P. (1999), Projet du rapport de synthèse « Guide SILOS », à paraître (publication INERIS)

PROUST Ch. VEYSSIERES B. (1988), « Fundamental properties of flames propagating in starch dust-air mixtures », Comb. Sci. Techn., vol. 62

PROUST Ch. (1993), « Experimental determination of the maximum flame temperatures and of the laminar burning velocities for some combustible dust-air mixtures », Archivum Combustionis, vol. 13

FIELD P. (1982), « Dust explosions », Handbook of Powder Technology, vol. 4, ISSN0167-3785

TAMANINI F. (1983), « Dust explosion propagation in simulated grain conveyor galleries », FMRC Technical report ref FMRC J.I. OF1R2.RK 070 (A), juillet 1983

CYBULSKI (1973), « Coal dust explosions and their suppression », traduction de l'ouvrage polonais ref TT 73-54001 réalisée par les services du département américain de l'intérieur en 1975

COCU J. (1969), « Mécanisme du coup de poussières », publication CERCHAR n°1900

PROUST Ch., POSTIC J. (1991), « Efficacité des arrêts-barrages déclenchés contre les explosions en cul-de-sac », Rapport final de la convention CECA n° 7258/03/152/03

URAL E. (1992), « Dust entrainability and its effect on explosion propagation in elongated structures », Plant/Operation Progress, vol. 11

PROUST Ch. (1999), « Système BVS : dispersion de l'agent extincteur après déclenchement dans le cas d'un aéragé secondaire soufflant », rapport interne INERIS DRA-CPr/CPr-20479-05/10/99

PROUST Ch. (1989), « Dust explosions : risks assessment », communication présentée au symposium organisé par EUROPEX à Anvers, Belgique, sept 1989

NETTLETON M.A. (1988), « The influence of turbulence of the flammability limits of dust-air clouds », Prog. Astronautics Aeronautics, vol. 113

GONZALEZ M., BORGHI R., SAOUAB A. (1992), « Interaction of a flame front with its self generated flow in an enclosure: the 'tulip' flame phenomenon », Comb. and Flame, vol. 88

MARKSTEIN G.H. (1964), « Non steady flame propagation », Pergamon Press, Oxford

PROUST Ch. (1996), « Dust explosions in pipes : a review », J. Loss Prev. Process Ind., vol. 9

PINEAU J.P., CHAINEAUX J., RONCHAIL G. (1986), « Influence on gas and dust explosion development, of lengthening and presence of obstacles in closed and vented vessels », communication présentée au 5ème Int. Symp. on Loss Prev. Process Ind., Cannes, sept 1986

PHYLAKTOU H., ANDREWS G.E. (1993), « Gas explosions in linked vessels », J. Loss Prev. Process Ind., vol 6

NORMALISATION EUROPEENNE, « Eurocode 1 : bases du calcul et actions sur les structures, partie 2-7 : actions sur les structures - actions accidentelles dues aux chocs et explosions », prénorme référencée ENV 1991-2-7, version d'août 1998

BAKER W.E., COX P.A., KULESCZ J.J., STREHLOW R.A. (1983), « Explosion hazards and evaluation », Elsevier, New-York, USA

LAUSTAKI R. (1997), « Venting of gaseous explosions », mémoire de thèse, VTT, Finlande

ECKHOFF R.K. (1991), « Dust explosions in the process industries », Butterworth-Heinemann, Oxford

WIRKNER-BOTT I., SCHUMANN S., STOCK M. (1992), « Dust explosion venting : investigation of the secondary explosion », communication présentée au 7ème Int Symp on Loss Prev. Process Ind., Taormina, mai 1992

CROWHURST D., COLWELL S.A., HOARE D.P. (1995), « The external explosion characteristics of vented dust explosions », IchemE Symp. series n°139

MAVROTHALASSITIS G. (1989), « Analyse critique du guide de l'USCIP pour l'élaboration des études de dangers », document INERIS ref EXP-GMv/AD F42k/4 bis, 19/04/1989

DUPLANTIER C. (1996), « Les phénomènes d'explosion résultant de la combustion de gaz de vapeurs et de brouillards dans des appareils clos », Rapport Scientifique et Technique de l'INERIS, publication INERIS, RST04, nov. 96

BRODE H.L. (1957), « Numerical solutions of spherical blast waves », J. of Appl. Physics, vol. 26

LORENTZ D. (1999), « ExProtect : a software response to important questions on safety in dust and gas explosions », communication présentée au 3rd World Wide Seminar organisé par EUROPEX à Gand, février 1999

ENVIRONNEMENT & TECHNIQUE, « Logiciel de détermination des zones de danger de projection des explosions de silos », ENVIRONNEMENT & TECHNIQUE/INFO-DECHET-COURANTS, avril 1999, n°185

PROUST Ch. (1997), « Résistance de structures de l'industrie agroalimentaire aux effets des explosions de poussières », communication présentée à la journée DRIRE organisée par le ministère de l'environnement à Paris, mars 1997

HINZE J.O. (1975), « Turbulence », 2nd edition, Mc Graw-Hill company, New-York, ISBN 0-07-029037-7

RUFFIN E. (1994), « Etude des jets turbulents à densité variable à l'aide de modèles de transport au second ordre », thèse de doctorat de l'université d'Aix-Marseille II, n° 207-94-59

HAUERT F., VOGL A., RADANDT S. (1994), « Measurement of turbulence and dust concentration in silos and vessels », communication présentée au 6th Int. Coll. on Dust Explosions, Shenyang, août 1994

ROUX P., PROUST Ch. (1999), « Méthode de protection contre les explosions-Events », rapport d'étapes, INERIS EXI-CPr-PRo/CPr-97-11AP10/évents2.doc

LEWIS B., Von ELBE G. (1987), « Combustion, flames and explosions of gases », 3rd edition, Academic Press, London, ISBN 0-12-446751-2

BARTKNECHT W. (1993), « Dust explosions, course, prevention, protection », Springer-Verlag, Berlin

AMYOTTE P.R. (1985), « A review of the effects of turbulence on gas phase, dust and hybrid mixture explosions », Technical report n°004, dept of Chem. Eng., technical University of Nova Scotia, Canada, juin 1985

RZAL F., VEYSSIERE B., MOUILLEAU Y., PROUST Ch. (1991), « Experiments on turbulent flame propagation in dust-air mixtures », Progress in Astronautics and aeronautics, vol 152

SMOOT D., HEDMAN P.O., SMITH P.J. (1984), « Pulverized coal combustion reserach at Brigham Young University », Prog. Energy Comb. Sci., vol. 10

VEYSSIERE B, BOURIANNES R., PROUST Ch. (1993), « Estimation of the temperature of starch particles-air flames », communication présentée au 14th ICDERS, Coïmbra, août 1993

MOUILLEAU Y., RUFFIN E. (1998), « EXPLOJET-version 4.0-code de calcul des explosions dans les jets turbulents de gaz inflammables : synthèse des travaux de recherches et de validations - volume 4 », rapport final de projet INERIS-YMo-ERu/YMo-98-16FA26, novembre 1998

RZAL F. (1992), « Etude expérimentale de l'interaction d'un anneau tourbillonnaire avec une flamme laminaire dans un mélange gaz-particules solides », thèse de doctorat de l'université de Poitiers, n° 509

GOULDIN F.C. (1987), « An application of fractals to modeling premixed turbulent flames », Comb. and Flame, vol. 68

PETERS N. (1986), « Laminar flamelet concepts in turbulent flames », Comptes-rendus du 21st Symp. (Int.) on Comb., The Combustion Institute

PINEAU J.P., GILTAIRE M., DANGREAUX J. (1976), « Efficacité des événements : étude expérimentale en récipients de 1, 10 et 100 m³ : influence de la nature de la poussière et de la présence d'une canalisation prolongeant l'événement », cahier de notes documentaires de l'INRS, vol. 83

ECKHOFF R.K., ALFERT F., FUHRE K., MILLS J.D., PERDERSEN G.H. (1986), « Maize starch explosions in a 236 m³ experimental silo with vents in the wall », rapport CMI ref CMI n° 863307-1, decembre 1986

ECKHOFF R.K., FUHRE K. (1984), « Dust explosion experiments in a 500 m³ silo cell », J. of Occupational Accidents, vol. 6

TEZOK F. KAUFFMAN C.W., SICHEL M., NICHOLLS J.A. (1985), « Turbulent burning velocity measurements for dust-air mixtures in a constant volume spherical bomb », communication présentée au 10th ICDERS, Berkeley, août 1985

BRADLEY D., MITCHESON A. (1976), « Mathematical solutions for explosions in spherical vessels », Comb. and Flame, vol. 26

KANSA E.J., PERLEE H.E. (1978), « Constant volume flame propagation : finite sound speed theory », US Bureau of Mines, RI 8163

NORME INTERNATIONALE ISO 6184/1, « Méthodes de protection contre les explosions de poussières - partie 1 », édition 1985-11-15

CARNASCIALI F., LEE J.H.S., KNYSTAUTAS R., FINESHI F. (1991), « Turbulent jet initiation of detonations », Comb. and Flame, vol. 84

LUNN G.A. (1998), communication privée

LUNN G.A., HOLBROW P., ANDREWS S., GUMMER J. (1996), « Dust explosions in totally enclosed interconnected vessels », J. Loss Prev. Process Ind, vol. 9

HOLBROW P., ANDREWS S., LUNN G.A. (1996), « Dust explosions in vented interconnected vessels », J. Loss Prev. Process Ind, vol. 9

NORRIS C.H., HANSEN R.J., HOLLEY M.J., BIGGS M., NAMYET S., MINAMI J.K. (1959), « Structural design for dynamic loads », Mc Graw-Hill company, New-York, 910 FGBP 776

Van WINGERDEN K. (1993), « Prediction of pressure and flame effects in the direct surroundings of installations protected by dust explosion venting », J. Loss Prev. Process Ind, vol. 6

RONCHAIL G., PINEAU J.P. (1982), « Explosion dans une installation de stockage et de manutention de sucre cristallisé », rapport CERCHAR ref F 42c/349 du 29 11 1982

RIEUTORD E. (1985), « Cours de mécanique des fluides : turbulence », 1ère année GEN, INSA de Villeurbanne

ANNEXE A :

APPLICATION D'EFFEX SUR UN CAS PRATIQUE

INTRODUCTION

Il s'agit d'un silo de stockage de blé dont on souhaite étudier le comportement à l'explosion.

Nous avons organisé cette étude comme suit :

- visites des installations pour prendre connaissance du site (photos) ;
- estimation de la violence des explosions en fonction des produits stockés et de la structure des équipements. Plusieurs scénarios d'explosion ont ainsi été étudiés ;
- recensement de la surface des éléments les plus fragiles et les plus légers, susceptibles de se comporter comme des événements ;
- évaluation de la résistance mécanique en régime d'explosion des principaux éléments constitutifs du silo ;
- prédiction au moyen d' EFFEX des effets de l'explosion en fonction des différents scénarios ;
- suggestion en vue de limiter les effets. Dans cet aspect de l'étude les cellules de stockage n'ont pas été considérées.

L'étude s'est appuyée sur :

- des renseignements recueillis lors de la visite ;
- des éléments fournis par l'exploitant.
-

DESCRIPTION DES INSTALLATIONS

Le silo reçoit le blé qui sera traité par les installations du moulin implanté sur le même site (le moulin jouxte le silo). Il comporte les installations suivantes, objet de cette étude :

- des cellules de stockage verticales ;
- une galerie de manutention supérieure ;
- un espace sous cellules et un sous-sol.

Nota : les élévateurs sont disposés dans le bâtiment abritant les installations du moulin.

Cellules de stockage

Le silo est muni de 40 cellules principales (capacité totale 16300 m³) et de 27 « as de carreau ».

Chaque cellule principale est constituée d'une virolle circulaire en béton armé. Leur diamètre est de 4,8 m et la hauteur de 24 m (dont 2 m de « musoir »). L'épaisseur de la virolle est de 18 cm pour les cellules construites les premières (28 cellules) et de 20 cm pour les autres.

La paroi verticale de chaque « as de carreau » est constituée de 4 quarts de virolle circulaires en béton armé. Leur diamètre équivalent est de 1,3 m et la hauteur de 24 m. L'épaisseur de la virolle est de 18 cm pour les « as de carreau » construits les premiers (28) et de 20 cm pour les autres.

Le toit des « cellules principales » et des « as de carreau » est une dalle en béton armé solidaire des parois d'épaisseur 10 cm pour les cellules construites en premier et de 20 cm pour les autres. Le toit est muni d'un orifice de remplissage de dimensions 0,35 m x 0,35 m, et d'une trappe de visite 0,6 m x 0,6 m.

Galerie supérieure

Le remplissage des cellules est assuré par des dispositifs de manutention fermés et disposés dans la galerie supérieure, au dessus du toit des cellules.

Cette galerie est longue de 53 m, a une hauteur de 3,85 m et une largeur de 15 m. Les parois latérales sont constituées d'un voile de béton armé épais de 26 cm (mur d'extrémité 18 cm) tandis que le toit est une dalle de béton armé d'épaisseur 19 cm (estimé), solidaire des parois latérales.

Elle est équipée de 20 baies vitrées dont 18 de dimensions 1,65 m x 1,9 m et 2 de dimensions 1,65 m x 0,5 m pour une surface totale de 58 m². La galerie supérieure communique avec le dernier étage du moulin par plusieurs ouvertures pratiquées dans le mur mitoyen pour une surface totale de 3,7 m². Nous supposons que ce mur est capable de résister à une forte surpression (0,2 b au moins).

Espace sous cellules/sous-sol

L'espace sous cellules est une salle dégagée construite au dessus d'un sous-sol.

La section droite de l'espace sous cellules est de 20 m x 5 m et la longueur est de 53 m. Les parois latérales sont en béton armé, d'épaisseur 40 cm. Elle est équipée de 20 baies vitrées de 2,8 m x 3,1 m pour une surface totale de 174 m². Elle est séparée du sous-sol par une dalle de béton armé (14 cm) reposant sur des piliers. Elle communique avec le sous-sol par 2 cages d'escalier d'une section totale de 10 m².

Les dimensions du sous-sol sont de 20 m x 2,8 m x 53 m.

Le sous-sol est en communication avec le premier niveau du moulin sur toute sa section

Moulin

Les caractéristiques du moulin nous intéressent parce qu'elles peuvent être le siège ou le relai d'une explosion qui concernerait le silo.

Le moulin est situé dans un grand bâtiment parallélépipédique séparé en deux parties distinctes par une cage d'escalier en saillie. La partie la plus éloignée des cellules est un grand espace vide non utilisé. Nous considérons qu'elle ne constitue pas un lieu critique pour une éventuelle propagation de l'explosion.

L'autre partie, entre les cellules et la cage d'escalier, abrite le moulin et les équipements de manutention du silo. Ses dimensions sont 35 m x 17 m x 35 m. Elle comporte 7 étages qui communiquent entre eux par les portes de la cage d'escalier (1 m x 2 m) et une ouverture pour la manutention de 2,5 m x 3 m. Les parois verticales comportent très peu d'ouvertures. L'étage inférieur est relié au sous-sol des cellules par une surface de 56 m². Le dernier étage est séparé de la galerie supérieur par un mur en béton armé avec une porte (1 m x 2 m) et des passages pour deux convoyeurs (0,7 m x 1,1 m chacun).

Les planchers sont des dalles en béton armé de 10 à 15 cm d'épaisseur. Les parois, en béton armé également, sont épaisses d'environ 25 cm. Le toit est constitué de tuiles.

CARACTERISTIQUES MECANQUES DES INSTALLATIONS

A l'aide des informations recueillies, la résistance mécanique des principaux éléments constitutifs a été évaluée (tableau 1).

Ces résistances ont été établies par l'INERIS avec l'hypothèse d'une application continue (« statique ») des efforts. Lors d'une explosion, les efforts sont appliqués sur un court laps de temps et il convient de tenir compte du comportement « dynamique » des structures. A l'aide de l'expérience acquise, on est capable à l'INERIS d'estimer les « déviations » induites par les effets dynamiques. Des gammes de résistances en régime dynamique peuvent ainsi être déduites pour chaque élément de structure. Dans ces calculs, il est tenu compte de cela.

On note que la résistance du toit des « as de carreau » est beaucoup plus forte que celui des cellules principales. Ce résultat se justifie pleinement en considérant d'une part que la largeur des « as de carreau » est beaucoup plus petite que celle des cellules (d'un rapport 3 à 4) et d'autre part que la résistance à la surpression varie comme l'inverse de cette largeur au carré.

	Cellule principale	As de carreau	Galerie supérieure	Espace ss cellules	Sous-sol	Moulin (étage)
Hauteur	24 m	24 m	3,85 m	5 m	2,8 m	4,5 m
Longueur	-	-	53 m	53 m	53 m	35 m
Largeur	4,8 m	1,3 m	15 m	20 m	20 m	17 m
Section	18 m ²	5 m ²	58 m ²	100 m ²	56 m ²	76 m ²
Volume	409 m ³	120 m ³	371 m ³	4790 m ³	2970 m ³	2650 m ³
Orifices	Remplissage : 0,1 m ² Visite : 0,36 m ²	Remplissage : 0,1 m ² Visite : 0,36 m ²	Baies : 58 m ² Ouverture sur moulin : 3,7 m ²	Baies : 174 m ² Ouverture sur ss-sol : 11 m ²	Escalier : 11 m ² Ouverture moulin : 60 m ²	Manutention et porte : 9 m ²
Résistance statique	Toit : 230 daN/m ² (Paroi : 15000 daN/m ²)	Toit : 3150 daN/m ² (Paroi : 15000 daN/m ²)	Toit : 50 daN/m ² (Paroi : 1220 daN/m ²)	Parois : 1720 daN/m ²	Plafond: 15 daN/m ²	Planchers: 20 daN/m ² Toit : 45 daN/m ² (Paroi : 670daN/m ²)
Poids spécifique	230 kg/m ²	230 kg/m ²	440 kg/m ²	920 kg/m ²	320 kg/m ²	320 kg/m ² (toit 45 kg/m ²)

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques des principaux éléments du silo

ETUDE DES SCENARIOS

Par expérience, la violence de l'explosion dépend considérablement de la manière dont l'explosion se développe et il est indispensable de s'interroger sur les scénarios possibles :

- **scénario A** : l'explosion débute dans le sous-sol puis se propage dans l'espace sous cellules et se transmet dans le moulin puis remonte éventuellement (si le moulin est assez résistant) les différents étages jusqu'à la galerie supérieure. La flamme se propage dans la galerie supérieure puis se communique à une cellule. (Pour que ce scénario soit plausible, il n'est pas indispensable de supposer que le nuage de poussière remplisse tout le volume [sous-sol-espace sous cellule-moulin-galerie supérieure]. Il suffit que le nuage soit initialement présent dans le sous-sol.) L'explosion se produit à l'intérieur d'une cellule, ressurgit violemment dans la galerie supérieure pour se réintroduire éventuellement avec une célérité accrue dans une seconde cellule. Il est très vraisemblable que la galerie supérieure sera complètement détruite au moment de la seconde explosion qui l'affecte. Dans ces conditions, on peut admettre que la propagation s'arrêtera avec l'explosion de la seconde cellule;
- **scénario B** : l'explosion débute dans le moulin puis se communique éventuellement vers l'espace sous cellules/sous-sol et la galerie supérieure. Pour ce qui concerne la galerie supérieure, la suite du scénario est identique à A;
- **scénario C** : l'explosion débute dans la galerie supérieure puis se communique éventuellement vers le moulin et l'espace sous cellules/sous-sol. Pour ce qui concerne la galerie supérieure, la suite du scénario est identique à A;

- scénario D : l'explosion débute dans une cellule, puis remonte dans la galerie supérieure. La flamme se communique à une seconde cellule et revient dans la galerie supérieure. Il est très vraisemblable que la galerie supérieure sera complètement détruite au moment de la seconde explosion qui l'affecte. Dans ces conditions, on peut admettre que la propagation s'arrêtera avec l'explosion de la seconde cellule.

Les simulations numériques ont été effectuées au moyen du logiciel EFFEX spécialement conçus pour cela. Les principaux résultats des calculs sont présentés ci-après. On rappelle qu'il ne s'agit que de simulations dont la valeur est directement liée aux données introduites et aux limites des connaissances actuelles notamment au sujet de la propagation des flammes dans les mélanges air-poussières turbulents. Cependant, par rapport à des accidents industriels typiques ou des essais, les résultats des simulations paraissent en bon accord avec les observations.

Nous avons utilisé les potentialités numériques pour envisager des modifications des installations susceptibles d'atténuer les effets de l'explosion (ruine et projection de débris).

Scénarios A et B

Installation	Cellules	As de carreau	Galerie	Espace/cellules	Sous-sol	Moulin
P_{max} (hPa ou mbar)	2000-4000	2000-3300	520	70-200	200	170
Éléments endommagés	parois, toit	parois, toit	parois, toit, vitrages	vitrages	plancher	vitrages, parois, toit, planchers
Ruine ?	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Dist. de projection (m)	> 100	> 100	25	35	/	35

Tableau 2 : résultats scénario A

Les simulations montrent que, malgré la présence des vitrages de l'espace sous cellules et la destruction des parois du moulin, la flamme, très rapide, parviendrait à se propager dans tous les étages du moulin avant que ses parois très massives aient eu le temps de s'éloigner significativement. Pour cette raison, les scénarios A et B doivent fournir des résultats similaires. L'explosion dans la galerie pourrait induire un très violent coup de poussières dans une ou plusieurs cellules. Elles seraient vraisemblablement détruites au moins en partie.

Scénario C

Installation	Cellules	As de carreau	Galerie	Espace/cellules	Sous-sol	Moulin
P_{max} (hPa ou mbar)	2000	1800	40	70-200	200	170
Eléments endommagés	parois, toit	parois, toit	toit, parois, vitrages	vitrages	plancher	vitrages, parois, toit, planchers
Ruine ?	oui	oui	possible	non	oui	oui
Dist. de projection (m)	> 100	> 100	10	--	--	35

Tableau 4 : résultats scénario C

Les simulations indiquent que l'explosion primaire serait capable de détruire ou d'endommager fortement la galerie supérieure. La flamme pénétrerait dans une ou plusieurs cellules sous l'effet de la pression dans la galerie. Le mélange très turbulent engendrerait une explosion très violente qui détruirait le toit des cellules concernées et éventuellement tout ou partie de la virole. Comme on retient que la galerie supérieure serait détruite dès le début, il n'y a pas lieu de considérer un nouveau passage de la flamme dans la galerie avec retransmission à une autre cellule. Le moulin serait fortement endommagé et, en raison de la perte de confinement qui s'ensuit, il paraît vraisemblable que la flamme ne parviendrait pas à se propager jusqu'à l'espace sous cellules.

Scénario D

Installation	Cellules	As de carreau	Galerie	Espace/cellules	Sous-sol	Moulin
P_{max} (hPa ou mbar)	420	870	100	70-200	200	170
Eléments endommagés	toit	toit	toit, parois, vitrages	vitrages	plancher	vitrages, parois, toit, planchers
Ruine ?	non	possible	oui	non	oui	oui
Dist. de projection (m)	60	80	10	--	--	35

Tableau 5 : résultats scénario D

L'explosion primaire serait capable de détruire le toit des cellules (éventuellement les virolles et les « as de carreau ») et donc partiellement la galerie supérieure. On peut éventuellement admettre que l'explosion pourrait se développer dans la galerie supérieure achevant ainsi la destruction de cet ouvrage et endommagerait la partie supérieure du moulin. Pour des raisons identiques à ce qui précède, il paraît vraisemblable que la flamme ne parviendrait pas à se propager jusqu'à l'espace sous cellules.

CONCLUSION

Nous avons étudié, pour un silo de stockage de blé, les risques d'éclatement (cellules-espace sous cellule-galerie supérieure) lors d'une explosion de poussières et les moyens éventuels permettant d'en limiter les effets sur les structures (ruine) et les projections de fragments dans l'environnement.

Il résulte des simulations que le scénario d'une explosion débutant dans le moulin, puis remontant dans la galerie supérieure avant de pénétrer dans cellule serait le plus pénalisant.

Ce scénario a une probabilité faible de se produire, mais conduira en cas d'occurrence à un niveau de gravité important.

Nous avons effectué des simulations numériques à partir de ce scénario (logiciel EFFEX) et étudié plusieurs possibilités de modifications éventuelles des installations du silo pour limiter les effets destructifs d'une éventuelle explosion. L'étude n'a pas considéré d'aménagement de la maçonnerie du toit des cellules. Les résultats sont donnés ci-après:

- espace sous cellules : il pourrait être laissé en l'état puisqu'il n'est pas susceptible d'être détruit et resterait peu affecté par l'explosion. En particulier, il n'y aurait pas de risque de « sape »;
- cellules « principales » et « as de carreau » : l'explosion dans la galerie pourrait induire un très violent coup de poussières dans une ou plusieurs cellules. Les cellules seraient vraisemblablement détruites en partie et des débris pourraient être projetés à plus de 100 mètres ;
- galerie supérieure: nous avons envisagé l'allègement de la structure de la galerie supérieure (panneaux légers à la place de voiles béton) mais ces modifications n'apporteraient pas d'améliorations significatives en termes de ruine des cellules et de projection de débris.

LISTE DE DIFFUSION

Nom	Adresse/Service	Nb
Ch. PROUST	Dossier maître	5
L. MOCHE	MATE	5
B. FAUCHER	DRA	1
D. GASTON	DRA	1
C. CWIKLINSKI	DRA	1
Y. MOUILLEAU	DRA	1
P. CASSINI	DRA	1
J. CHAINEAUX	DRA	1
G. MAVROT	DRA	1
P. FORNAGE	DRA	1
R. LÖDEL	DRA	1
J.P. PINEAU	DSE	1
F. MASSON	DRA	1
F. VARIN	DRA	1
J.P. HOUEIX	DRA	1
P. ROUX	DRA	1
P. KUKUSCHKA	DRA	1
B. GIOVANNINI	DRA	1
C. LOYER	DRA	1
D. CARSON	DRA	1
J. DENIS	DRA	1

TOTAL **29**

PERSONNES AYANT PARTICIPE A L'ETUDE

Travail	Nom	Qualité	Date	Visa
Rédacteur	Ch. Proust			
Responsable d'affaire	Ch. Proust			
Relecteur	D. Gaston/ B. Faucher			
Vérificateur	Y. Mouilleau			
Approbateur	C. Cwiklinski			

Fin du Complément non destiné au client