



**HAL**  
open science

## Impacts de fragments et vulnérabilité des installations industrielles

Frédéric Mercier

► **To cite this version:**

Frédéric Mercier. Impacts de fragments et vulnérabilité des installations industrielles. Rapport Scientifique INERIS, 2010, 2009-2010, pp.84-86. ineris-01869284

**HAL Id: ineris-01869284**

**<https://ineris.hal.science/ineris-01869284>**

Submitted on 6 Sep 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Impacts de fragments et vulnérabilité des installations industrielles



F. Mercier

Un site industriel peut abriter plusieurs réservoirs cylindriques sous pression contenant du gaz ou des liquides. Une surpression, une agression mécanique, thermique ou autre peuvent conduire à l'éclatement d'un de ces réservoirs. Cette explosion peut générer des fragments (figure 4) qui peuvent impacter d'autres équipements, voire pénétrer partiellement ou perforer complètement ces derniers [1]. Un nouvel accident peut alors se produire et générer de nouveaux projectiles, eux-mêmes initiant d'autres accidents. Cet enchaînement catastrophique constitue un effet domino qui peut faire de nombreuses victimes : plus de 650 morts à Mexico en 1984, par exemple. Une méthode globale de traitement

de ce phénomène a été développée. À son stade initial, elle a fait l'objet d'une présentation dans le rapport scientifique 2006-2007 de l'INERIS. Depuis, les différentes étapes de ce modèle stochastique ont été affinées.

## ANALYSE DE FIABILITÉ ET PROBABILITÉ DE RUINE

Chaque cycle élémentaire de l'effet domino peut être décrit comme suit (figure 1).

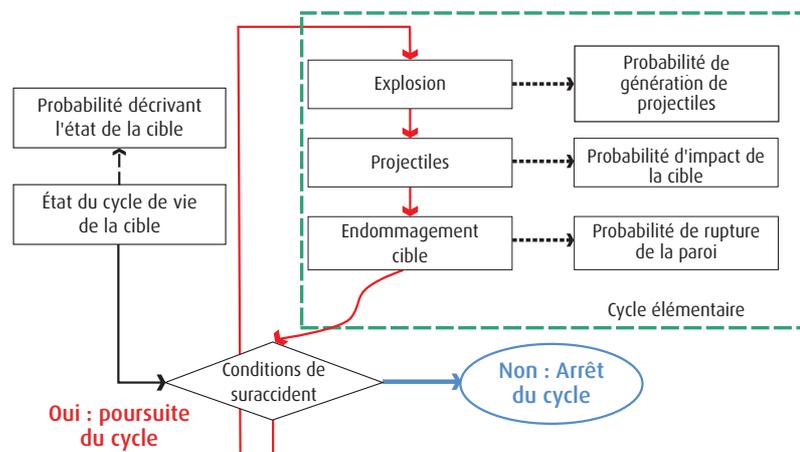
- Génération de projectiles par un accident initial. L'accident initiateur considéré ici est celui de l'explosion d'un réservoir sous pression. À cet événement est associée la probabilité de génération de fragments,  $P_{gen}$ .
- Impact d'autres équipements par les projectiles. À cette possibilité d'impact

est associée la probabilité d'impact,  $P_{imp}$ .

• Endommagement partiel ou perforation complète des cibles impactées. La nature de l'endommagement est dictée par différents paramètres telles que la taille du (des) projectile(s), de la cible, la masse... La probabilité de rupture de la cible à l'impact,  $P_{rup}$ , lui est associée.

La poursuite de l'effet domino est alors déterminée par l'endommagement subi ainsi que par l'état de la cible (réservoir vide ou plein par exemple) au moment de l'impact. Un endommagement de la cible n'induit pas toujours une explosion. Chacune de ces probabilités va maintenant être explicitée. L'impact considéré dans cette étude est celui d'un projectile métallique rigide sur une plaque métallique, mais les modèles développés permettent de traiter d'autres cas, notamment pour des cibles en béton.

**FIGURE 1**  
SÉQUENCES DE L'EFFET DOMINO RÉSULTANT DE L'ÉCLATEMENT D'ENCEINTES SOUS PRESSION



## CARACTÉRISATION DE L'AGRESSION

### Terme source

Les multiples fragments projetés ont différentes formes, tailles et vitesses initiales ainsi que différents angles initiaux de départ. Il est alors nécessaire de définir convenablement les lois de distribution des termes sources : nombre de fragments, formes et tailles des fragments, leurs masses, leurs angles initiaux de départ (angles horizontal et vertical), leurs vitesses initiales de départ ainsi que leurs coefficients aérodynamiques (coefficients de portance et de traînée).

### Nombre et forme de fragments

La formation de fragments lors de l'explosion d'un réservoir dépend de la pression, de la propagation des fissures, ainsi que du matériau constitutif. Le retour d'expérience montre que le changement de phase explosif (BLEVE) de réservoirs cylindriques génère un nombre limité de fragments : généralement deux ou trois, tout au plus quatre ou cinq. La taille des réservoirs n'a pas d'influence sur le nombre de fragments. Pour des réservoirs cylindriques, Hauptmanns [6] estime que le nombre de fragments suit une distribution log-normale. Cependant, dans la présente étude, un traitement des données accidentelles de Holden [8] à l'aide du principe du maximum d'entropie montre que le nombre de fragments suit une distribution exponentielle.

La forme des fragments dépend principalement du type de rupture ainsi que de la propagation de fissures dans la paroi du réservoir. Sur la base d'une analyse de Holden [8], dans la présente étude, les fragments sont supposés constitués de fonds de réservoir dans 23,5 % des cas, de plaques dans 30,5 % et de fonds oblongs de réservoir dans 46 % des cas.

### Masse et vitesse initiale du fragment

Suivant les cas, la masse du fragment est obtenue à partir de la masse totale :

- soit en considérant une loi de distribution Bêta [6] ;
- soit à partir de son volume et de sa masse volumique.

La vitesse initiale des fragments est estimée à partir de la masse et des conditions thermodynamiques dans le réservoir avant l'éclatement. En effet, elle se calcule à partir de l'énergie cinétique, elle-même estimée à partir de l'énergie totale disponible avant l'explosion. Ici, l'énergie cinétique est obtenue à partir de l'énergie totale  $E$ , à partir des méthodes proposées par Baker et Baum [2], [3].

### Angles de départ

Dans le cas d'un réservoir sphérique, le manque de données amène à postuler qu'il n'y a pas d'aire élémentaire préférentielle sur la surface de la sphère pour les angles de départ. Ainsi, pour un réservoir sphérique de rayon  $R$ ,

les angles de départ horizontal  $\theta$  et vertical  $\varphi$  sont tels que la probabilité élémentaire reste constante. Pour les réservoirs cylindriques, cette distribution reste valide pour les seuls angles verticaux de départ ( $\varphi$ ) des fragments. La distribution des angles de départ horizontaux ( $\theta$ ) des projectiles est spécifique aux réservoirs cylindriques. Les fragments sont projetés de manière préférentielle suivant dans les secteurs angulaires autour du grand axe [7].

### Coefficients de portance et de traînée

La portance résulte de la dissymétrie entre l'extérieur et l'intérieur des fragments. Le coefficient de portance,  $C_L$ , s'exprime en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$ . Le coefficient de traînée dépend de plusieurs paramètres, tel que la géométrie, la rugosité de la surface et l'orientation au regard de la direction de la vitesse. Une distribution uniforme du coefficient de traînée,  $C_D$ , peut être considérée sur certains intervalles [6]. Ici, les hypothèses suivantes sont adoptées :

- pour les fragments de type fond de réservoirs, le coefficient de portance suit une distribution uniforme à l'intérieur de l'intervalle  $[0,351 ; 0,468]$  et le coefficient de traînée suit une loi de distribution uniforme à l'intérieur de l'intervalle  $[0,8 ; 1,1]$  ;
- pour la virole, l'effet de portance peut être négligé. Le coefficient de traînée suit une loi de distribution uniforme dans l'intervalle  $[1,1 ; 1,8]$ .

### TRAJECTOIRE DES FRAGMENTS ET CARACTÉRISTIQUES D'IMPACT

La trajectoire des fragments est décrite en employant la trajectoire du barycentre des fragments. La rotation du fragment pendant le vol est négligée.

### MODÈLE DE PÉNÉTRATION ET PERFORATION

Le modèle d'impact du fragment sur la plaque (figure 2) a pour paramètres  $e_t$  l'épaisseur totale de la plaque,  $h_p$  la profondeur de pénétration,  $d_p$  le diamètre du fragment,  $l_p$  la longueur du fragment,  $v_p$  la vitesse du fragment,  $\alpha$  l'angle d'inclinaison du fragment et  $e_{cr}$  l'épaisseur critique de la plaque. À l'impact avec la cible, le fragment

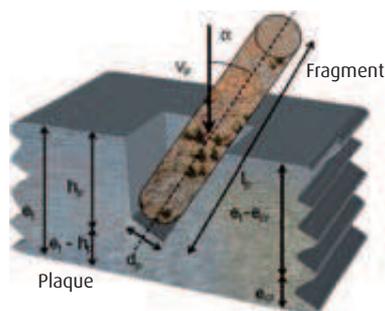


FIGURE 2  
PLAQUE MÉTALLIQUE IMPACTÉE PAR UN PROJECTILE CYLINDRIQUE

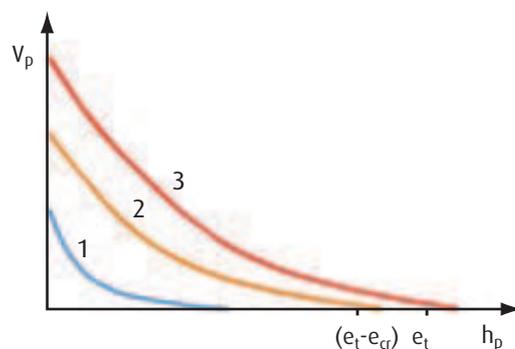


FIGURE 3  
RELATION ENTRE VITESSE DU PROJECTILE ET PROFONDEUR DE PÉNÉTRATION  
1 : Pénétration partielle en deçà du domaine critique  
2 : Pénétration partielle dans domaine critique  
3 : Perforation complète



FIGURE 4  
PROJECTIONS PRODUITES PAR L'EXPLOSION D'UNE CITERNE DE GPL (accident de Dagneux, mai 2007)

## RÉFÉRENCES

- [1] Nguyen Q. B., Mebarki A., Ami Saada R., Mercier F., Reimeringer M. A. Monte-Carlo method used to study the fragment impact effect on the industrial facilities, Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim. 2 (2) 119-122 (2008), DOI: 10.1051/smdo:2008016.
- [2] Baker Q. A., Baker W. E. (1991). Pros and cons of TNT equivalence for industrial explosion accidents. Proc. of the Int. Conf. and Workshop on Modelling and Mitigating the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, 585-597.
- [3] Baum M. R. (1998). Rocket missiles generated by failure of a high pressure liquid storage vessel. J. of Loss Prevention in the Process Industries, 11, 11-24.
- [4] Bless S. J., Barber J. P., Bertke R. S., Swift H. F. (1978). Penetration mechanics of yawed rods. Int. J. Eng. Sci., 16 (11), 829-834.
- [5] Bukharev Y. I., Zhukov V. I. (1995). Model of the penetration of a metal barrier by a rod projectile with an angle of attack. Combustion, Explosion and Shock Waves, 31 (3), 104-109.
- [6] Hauptmanns U. (2001-a). A procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels. J. of Loss Prevention in the Process Industries, 14, 395-402.
- [7] Holden P. L., Reeves A. B. (1985). Fragment hazards from failures of pressurised liquefied gas vessels. Inst. of Chem. Engin. Symposium Series, 93, 205-220.
- [8] Holden P. L. (1988). Assessment of Missile Hazards: Review of Incident Experience Relevant to Major Hazard Plant. Safety and Reliability Directorate, Health & Safety Directorate.
- [9] Lepareux M., Jamet P. H., Matheron P. H., Lieutenant J. L., Couilleaux J., Duboelle D., Aguilar J. (1989). Experimental and numerical studies of impacts on stainless steel plates subjected to rigid missiles at low velocity. Nuclear Engineering and Design, 115, 105-112.
- [10] Neilson A. J. (1985). Empirical equations for the perforation of mild steel plates. Int. J. of Impact Engineering 3 (2), 137-142.
- [11] Mebarki A., Mercier F., Nguyen Q. B., Ami Saada R. Structural fragments and explosions in industrial facilities. Part I: Probabilistic description of the source terms, J. of Loss Prevention in the Process Ind., Volume 22, Issue 4, July 2009, Pages 408-416, ISSN 0950-4230, DOI: 10.1016/j.jlp.2009.02.006.
- [12] Mebarki A., Nguyen Q. B., Mercier F. Structural fragments and explosions in industrial facilities: Part II - Projectile trajectory and probability of impact, J. of Loss Prevention in the Process Ind., Volume 22, Issue 4, July 2009, Pages 417-425, ISSN 0950-4230, DOI: 10.1016/j.jlp.2009.02.005.

peut créer un cratère, réduisant ainsi l'épaisseur résiduelle de la cible dans la zone impactée. Trois scénarios principaux peuvent être distingués :

- *pénétration partielle dans le domaine critique* : l'épaisseur résiduelle de la plaque dans la zone d'impact reste inférieure à l'épaisseur critique,  $e_{cr}$  (figure 3, courbe 2) ;
- *pénétration partielle au-delà du domaine critique* : l'épaisseur résiduelle de la plaque a des valeurs situées dans l'intervalle  $[0, e_{cr}]$  (figure 3, courbe 1). Dans le cas de systèmes sous pression (réservoirs, réacteurs...), cet affaiblissement peut être suffisant pour que la cible cède sous l'effet de sa pression de service ;
- *perforation complète* (figure 3, courbe 3). Ces deux derniers cas sont ceux le plus souvent rencontrés lors d'accidents industriels. À cet effet, des modèles mécaniques ont été développés en vue de calculer la profondeur de pénétration et pouvoir ainsi la comparer à l'épaisseur critique à partir de données expérimentales disponibles dans la littérature existante [4], [5], [9], [10]. Le modèle mécanique actuel permet de calculer la profondeur de pénétration pour diverses vitesses de projectiles

calées sur les résultats de Bless [4], Neilson [10]. Un modèle mécanique simplifié proposé permet d'estimer la profondeur de pénétration ( $h_p$ ), dans le cas où la cible et le projectile sont métalliques.

La profondeur de pénétration dépend de l'angle d'incidence du projectile à l'impact, de son énergie cinétique, ainsi que des contraintes et déformations ultimes des matériaux constitutifs.

Nexter, partenaire de l'INERIS sur ce programme, a développé d'autres modèles, soit sur la base d'études numériques, soit au travers d'expériences.

## RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Le modèle stochastique développé permet, en tablant sur un éclatement initial, de :

- qualifier les probabilités d'atteinte de cibles, par exemple en produisant des distributions de probabilités en fonction de la distance et du secteur angulaire ;
- qualifier leur endommagement à l'impact. Les perspectives de développement du modèle stochastique passent par l'intégration de l'état de la cible au moment de l'impact et par l'élargissement des modèles d'impact aux structures non métalliques.

## ABSTRACT

The explosion of industrial facilities such as pressure vessels or reactors can produce many fragments. These fragments can originate a so-called domino effect if they impact other storage tanks or pressurized enclosures, which, in turn, can burst. This paper depicts the stochastic approach of an elementary cycle of the phenomenon. It has been implemented since 2005. It is based on the principle of entropy maximum. To do so, the main features of the projectiles (number, shape, mass, departure velocity and departure angles) have been developed with probability density functions (p.d.f.). These p.d.f. are the data injected in a further step of the study in order to appreciate the industrial risk. Then the trajectories of the fragments and their impact with targets have been modeled on the base of geometric relationships. The impact probabilities are estimated from the results of a Monte-Carlo simulation. In addition, interaction models between the projectiles and the target have been implemented, partly from the existing literature and to a certain extent from experiments driven by NEXTER, a partner in the project. These models are used to estimate the damage produced by the fragment on the target. Crossed with the life cycle state of the target (e.g. full or empty for a storage tank), the result can help to predict the continuation of the domino effect cycle.