

Modélisation de l'impact de projectiles sur des installations voisines : couplages mécano-probabiliste

Q.B. Nguyen, Ahmed Mebarki, Ramdane Ami Saada, Florian Mercier, M. Reimeringer

► **To cite this version:**

Q.B. Nguyen, Ahmed Mebarki, Ramdane Ami Saada, Florian Mercier, M. Reimeringer. Modélisation de l'impact de projectiles sur des installations voisines : couplages mécano-probabiliste. 18ème Congrès Français de Mécanique (CFM'07), Aug 2007, Grenoble, France. pp.66-71. hal-00720559

HAL Id: hal-00720559

<https://hal-upec-upem.archives-ouvertes.fr/hal-00720559>

Submitted on 10 Apr 2014

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.

Modélisation de l'impact de projectiles sur des installations voisines : Couplage Mécano-Probabiliste

Q. B. Nguyen^{1,2}, A. Mébarki¹, R. Ami Saada¹, F. Mercier², M. Reimeringer²

¹ Université de Marne La Vallée, Laboratoire de Mécanique (LaM) (EA2545),
5, Boulevard Descartes cité Descartes, F-77454 Marne la Vallée Cedex 2, France

² Institut National de l'Environnement Industriel et du Risque (INERIS),
10, Boulevard Lahitolle, F-18000 Bourges, France

Résumé :

Les projectiles engendrés lors d'une explosion d'un réservoir sont des menaces pour d'autres équipements environnants et peuvent entraîner des explosions successives. L'analyse du risque considère trois étapes principales suivantes :

- *Menaces : les auteurs ont collecté des accidents existants dans la littérature et ont postulé des lois de probabilité pour les termes sources. Ces derniers sont : le nombre, la forme, la masse, la vitesse de départ et les angles de départ ;*
- *Analyse d'impacts : les projectiles envoyés dans l'espace ont la capacité d'impacter d'autres équipements ;*
- *Dommages après impacts : l'impact d'un projectile sur un équipement peut entraîner des endommagements de ce dernier.*

Dans cet article, les auteurs proposent une méthodologie globale d'analyse du risque. Quelques simulations numériques ont été alors réalisées afin d'évaluer ce risque.

Abstract:

Generated projectiles after a reservoir explosion are the threats for other equipments environments and can induce successive explosions. The risk analysis considers three following principal steps:

- *Threaten: the authors collected existing accidents in the literature and postulated the source terms probability laws. The source terms are number, form, mass, departure velocity, and departure angles;*
- *Impact analysis: the projectiles sent in the space have the capacity to impact the other equipments;*
- *Damages after impacts: an impact of a projectile on equipment can induce equipment damage.*

In this article, the authors propose a global methodology of risk analysis. Some numerical simulations are established in order to evaluate this risk.

Mots-clefs : explosion, probabilité, risque.

1 Introduction

Un site industriel abrite plusieurs réservoirs cylindriques sous pression contenant du gaz ou des liquides. La surpression d'un réservoir ou l'agression d'un fragment, etc. sont des raisons quelconques pouvant faire exploser des réservoirs. Après l'explosion, certains réservoirs ont la capacité de générer des projectiles, cela correspond à la probabilité de génération, P_{gen} , supposée égale à 1 dans une première approche. Le nombre de projectiles générés, la forme, les angles de départ, la vitesse de départ, la masse du projectile (dénommé « termes sources ») sont considérés comme aléatoires. La possibilité d'impacts entre des projectiles et des équipements environnants représente la probabilité d'impact, P_{imp} . Les projectiles peuvent pénétrer les équipements partiellement ou les perforer entièrement, ce qui peut entraîner une nouvelle

explosion. Cette possibilité correspond à la probabilité de ruine, P_{rup} .

Une nouvelle explosion engendre une nouvelle série de projectiles. Ils sont exactement les termes sources pour le prochain cycle et ainsi de suite, le processus se succède et la conséquence augmente, ceci est dénommé « l'effet Domino », qui inclut un ensemble de cycles (Figure 1). Afin d'évaluer le risque de cet effet, un seul cycle est considéré dans un premier temps. Le risque pour un cycle est exprimé dans (Nguyen, 2006) :

$$P_f = P_{gen} \times P_{imp} \times P_{rup}$$

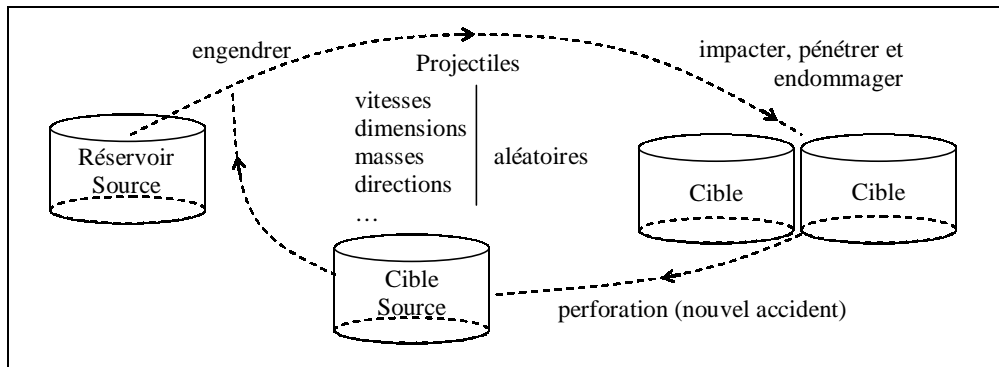


FIG. 1 – Schéma de l'effet Domino.

2 Menaces

Comme il est décrit précédemment, l'explosion d'un réservoir engendre un ensemble de projectiles dont les termes sources sont :

- Le nombre de projectiles : d'après l'analyse des essais réalisés par Baum (1999, 2001) sur des réservoirs cylindriques, une fissure s'initie à une soudure circonférentielle et détache un des fonds de réservoir, puis se propage axialement pour déplier la virole. Parfois, un fond de réservoir est attaché à la virole complète ou partielle. D'autre part la fissure peut s'initier au milieu de la virole et la déplie, puis se propage vers chaque bout du réservoir et suivant la circonférence elle détache un ou deux fonds de réservoir. De plus, la virole est soit dépliée toute seule, soit elle génère un ou deux (rarement trois ou quatre) fragments (Ineris, 2005). En se basant sur le rapport de Holden (1988) relatif aux accidents, nous avons postulé une loi discrète pour le nombre de projectiles dans l'intervalle [1 ; 4].
- La forme du projectile : d'après l'analyse de la propagation de fissure décrite précédemment, les principaux types de projectiles sont le fond de réservoir, éventuellement solidaires de tout ou partie de la virole (fond oblong de réservoir), et des parties de virole aplatie (plaque) (Ineris, 2006 et Baum, 1999). De plus, selon le retour d'accidents de Holden (1988), le plus grand nombre de projectiles retrouvés après explosion sont des fonds de réservoir (44 pièces, $\approx 25\%$), des plaques (57 pièces, $\approx 30\%$), et des fonds oblongs (86 pièces, $\approx 45\%$).
- La masse du projectile : une fois la forme, la taille et le matériau constitutif du projectile connus, sa masse est alors déterminée en fonction de ces derniers.
- L'angle vertical de départ : la fissure peut s'initier n'importe où dans le réservoir, donc l'angle vertical de départ peut avoir n'importe quelle valeur dans l'intervalle $[-90^\circ ; 90^\circ]$. Cela permet de décrire l'angle vertical de départ par une distribution uniforme dans l'intervalle $[-90^\circ ; 90^\circ]$.
- L'angle horizontal de départ : selon l'analyse statistique, Holden (1988) présente une approximation de la distribution des projectiles par rapport à l'axe principal du réservoir: 20 % de projectiles se retrouvent dans l'intervalle $[30^\circ ; 150^\circ]$; 30 % de projectiles dans $[150^\circ ; 210^\circ]$; 20 % de projectiles dans $[210^\circ ; 330^\circ]$; et 30 % de projectiles dans $[330^\circ ; 30^\circ]$.
- La vitesse de départ : elle est déterminée en connaissant l'énergie cinétique (E_c), ainsi que

la masse du projectile. E_c est une fraction de l'énergie totale E avec un facteur multiplicatif situé dans l'intervalle $[0,2 ; 0,5]$ (0,2 étant la valeur conseillée). L'analyse des résultats d'essais de Baum (1998, 1999, 2001) nous a ainsi permis de postuler une distribution log-normale pour la vitesse de départ des projectiles.

3 Impacts

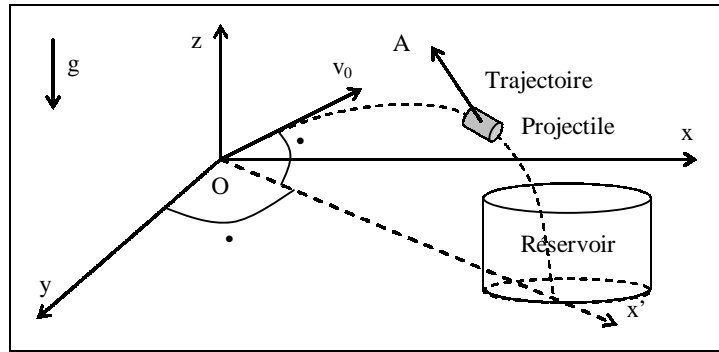


FIG. 2 – Trajectoire du projectile – Système de coordonnées.

Un projectile en vol (sans rotation) est sous l'influence du poids $\vec{G} = m \cdot \vec{g}$ et de la force aérodynamique \vec{A} , décomposée en deux : la force de traînée \vec{D} (qui est la combinaison des forces de frottement provoquées par l'écoulement de l'air sur le projectile, parallèle, opposée à la trajectoire) et la force de portance \vec{L} (créée par l'aspiration dans une zone de dépression, perpendiculaire au déplacement du projectile). Afin de déterminer le point d'impact entre le projectile et la cible, nous écrivons les équations du mouvement du centre de projectile en 3D incluant l'angle horizontal du projectile, θ , soient :

$$\begin{cases} \left(-k_D \cdot \cos \alpha - (-1)^n \cdot k_L \cdot \sin \alpha \right) \left(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \right) - \frac{\ddot{x}}{\sin(\theta)} = 0 \\ \left(-k_D \cdot \cos \alpha - (-1)^n \cdot k_L \cdot \sin \alpha \right) \left(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \right) - \frac{\ddot{y}}{\cos(\theta)} = 0 \\ \left(-(-1)^n \cdot k_D \cdot \sin \alpha + k_L \cdot \cos \alpha \right) \left(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \right) - \ddot{z} - g = 0 \end{cases} \quad \text{Et}$$

$$k_D = \frac{1}{2} \frac{\rho_{\text{air}} \cdot C_D \cdot A_D}{m}$$

$$k_L = \frac{1}{2} \frac{\rho_{\text{air}} \cdot C_L \cdot A_L}{m}$$

Où $n = 1$ pour la partie descendante ; $n = 2$ pour la partie montée ; m , la masse du projectile; C_D , le coefficient de traînée; A_D , la surface frontale; C_L , le coefficient de portance; A_L , la surface projetée au sol; ρ , la densité de l'air; g , la gravité.

Après avoir décrit la trajectoire du centre du projectile, nous écrivons les équations du mouvement de l'enveloppe du projectile, ainsi que les équations de l'enveloppe de l'équipement. La résolution de ces diverses équations permet d'obtenir le point d'impact, ainsi que la vitesse d'arrivée du projectile.

4 Endommagement

Suite à l'impact d'un projectile métallique sur une plaque métallique modélisant la paroi du réservoir, notre préoccupation se tourne vers l'analyse et la recherche des pénétrations du projectile dans la plaque, ainsi que la détermination de la résistance de cette dernière.

Le projectile pénètre la plaque, selon le niveau de la profondeur de pénétration, h_p , le réservoir peut être endommagé ou non. Diverses données expérimentales et modèles mécaniques relatifs à l'impact sont collectés et considérés (Bless *et al.*, 1978, Bukharev *et al.*, 1995, Neilson, 1985, Lepareux *et al.*, 1989 et Mébarki *et al.*, 2007). Concrètement, Bless *et al.* (1978) présentent un modèle simplifié de h_p avec une vitesse $v_p \sim 2.15 \text{ km/s}$. Notons toutefois que ce modèle n'est appliqué que dans une gamme étroite de matériaux. Dans le même but, Neilson (1985) aborde quelques modèles de l'énergie de rupture et dès lors parvient à déterminer h_p . Néanmoins ces modèles comportent des paramètres expérimentaux qui ne tiennent pas compte des propriétés mécaniques des matériaux constitutifs du projectile et de la plaque sauf dans le cas du modèle SRI. Dans une première approche, le modèle mécanique de la profondeur de pénétration, h_p , proposé dans Mébarki *et al.* (2007) a été alors adopté :

$$- \text{ Pour } \alpha \neq 0 : h_p = \frac{-d_p \cdot \cos \alpha + \sqrt{(d_p \cdot \cos \alpha)^2 + 4 \cdot \tan \alpha \left(\frac{E_c}{f_u \cdot \varepsilon_u} \right)^2}}{2 \cdot \tan \alpha} \cdot \frac{1}{\pi}$$

$$- \text{ Pour } \alpha = 0 : h_p = \left(\frac{E_c}{f_u \cdot \varepsilon_u} \right)^{2/3} \cdot \frac{1}{\pi \cdot d_p} \quad \text{où } E_c = \frac{m_p \cdot v_p^2}{2}$$

Avec d_p , le diamètre du projectile, f_u , la contrainte ultime de la plaque, ε_u , la déformation ultime de la plaque, m_p , la masse du projectile, α , l'angle entre l'axe et la vitesse du projectile.

5 Applications et simulations numériques

En utilisant la méthode de Monte-Carlo, nous avons réalisé des simulations numériques en considérant deux réservoirs cylindriques horizontaux A et B ayant pour volumes : 200 m^3 et 1600 m^3 , respectivement. Ces deux réservoirs sont distants de 50 m l'un par rapport à l'autre. Les données utilisées pour effectuer ces simulations sont reportées dans le tableau 1 et les résultats ainsi obtenus sont présentés dans le tableau 2 et sur les figures 3 et 4.

Nous remarquons (Figure 3) qu'après explosion du réservoir A (placé à l'origine) les projectiles générés sont envoyés sur une zone circulaire ayant un diamètre de l'ordre de 1 km. La majorité de ces projectiles est répartie dans un secteur angulaire de $60^\circ (\pm 30^\circ)$ par rapport à l'axe x qui est l'axe des réservoirs A et B). La probabilité d'arrivée des projectiles, ainsi que leurs énergies sont reportées en figure 4. Nous constatons que ces deux quantités (Figure 4) diminuent en fonction de la distance à l'origine. La moyenne des énergies de deux projectiles à l'arrivée est de 30,41 MJ, l'énergie perdue durant le mouvement est de 56,04 MJ. La probabilité de ruine est de $P_{rup} = 76,7 \%$. La probabilité pour qu'un des projectiles impacte le réservoir B est de $P_{imp} = 0,043 \%$. Enfin, le risque pour ce réservoir est estimé à 0,033 %.

Réservoir (A)		Réservoir (B)	
Rayons	$r_x = 2,5 \text{ m}$ $r_y = 2,5 \text{ m}$ $r_z = 2,5 \text{ m}$	Rayons	$r_x = 5,2 \text{ m}$ $r_y = 5,2 \text{ m}$ $r_z = 5,2 \text{ m}$
Longueur	7 m	Longueur	12 m
Epaisseur	0,07 m	Epaisseur	0,05 m
		Centre	0 x 50 x 10 m

TAB. 1 – Données utilisées pour les simulations numériques.

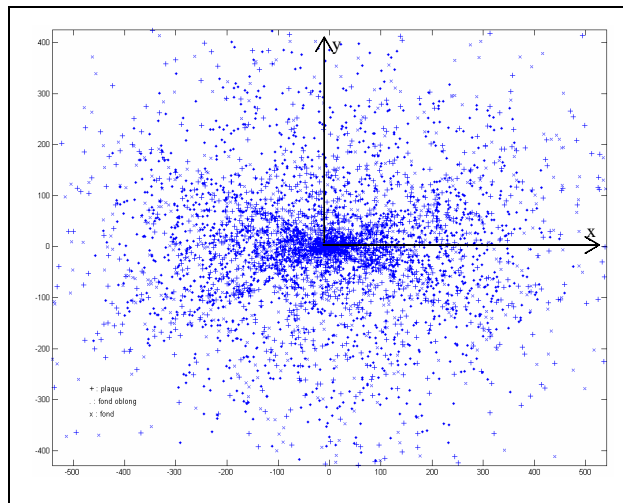


FIG. 3 – Distribution des projectiles projetés.

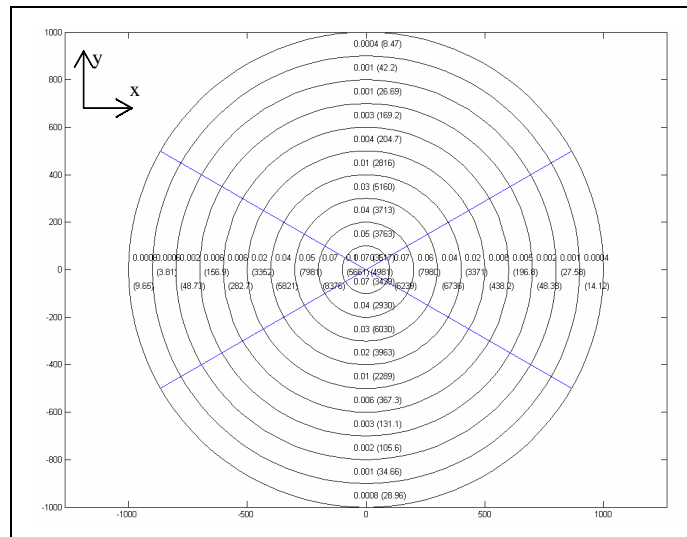


FIG. 4 – Probabilités d'arrivées des projectiles, ainsi que leurs énergies correspondantes par secteur (Les chiffres entre parenthèses représentent les énergies d'arrivée en [MJ], les autres chiffres correspondent aux probabilités d'arrivées des projectiles).

Probabilité de génération	100 % (supposée)
Probabilité d'impact	0,043 % (sur 10000 simulations)
Probabilité de ruine	76,7 % (sur 43 simulations d'impact)
Risque	0,033 %

TAB. 2 – Résultats.

6 Conclusions

Cet article présente une méthodologie globale d'évaluation du risque industriel. Les caractéristiques des projectiles sont considérées comme étant des variables aléatoires. Les auteurs proposent un modèle permettant de décrire le mouvement de projectile. La résolution des diverses équations, renseigne sur la possibilité d'impact ou non entre projectile et cible. Enfin, un modèle mécanique a été adopté afin d'estimer la profondeur de pénétration de la cible

impactée, puis parvenir à l'estimation du risque global. Cette méthodologie permet de dégager une vue globale de l'effet Domino. Les résultats obtenus soulignent l'importance de prédire cet effet dans le domaine industriel.

Références

- Baum M.R. (1998) Rocket missiles generated by failure of a high pressure liquid storage vessel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 11, 11-24
- Baum M.R. (1999) Failure of a horizontal pressure vessel containing a high temperature liquid: the velocity of end-cap and rocket missiles. *J. Loss Pre. Pro. Industries*, 12, 137-145
- Baum M.R. (2001) The velocity of large missiles resulting from axial rupture of gas pressurised cylindrical vessels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14, 199-203
- Bless S. J., Barber J. P., Bertke R. S. and H. F. Swift (1978) Penetration mechanics of yawed rods. *Int. J. Eng. Sci.*, 16 (11), 829-834
- Bukharev Y. I. and 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
- Hauptmanns U. (2001) A Monte-Carlo based procedure for treating the flight of missiles from tank explosions. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 16, 307-312
- Holden P.L. (1988) Assessment of Missile Hazards: Review of Incident Experience Relevant to Major Hazard Plant. *Safety and Reliability Directorate, Health & Safety Directorate*
- Ineris (2005) Calculs des effets mécaniques d'un BLEVE de citerne ferroviaire. Rapport d'étude, No Ineris-DRA-72293
- Ineris (2006) Etude de la tenue mécanique d'un talus à une onde de souffle et un impact. Rapport d'étude, No Ineris-DRA/REST-72677
- Lepareux M., Jamet Ph., Matheron Ph., Lieutenant J. L., Couilleaux J., Duboelle D. and 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
- Mébariki A., Ami Saada R., Nguyen Q.B., Mercier F., Meftah F., Reimeringer M. (2005) Mechanical behavior of metallic plates under metallic rods impact and industrial risks, **keynote lecture**, *ICCES'05*, Chennai, India
- Mébariki A., Ami Saada R., Nguyen Q.B., Mercier F., Reimeringer M. (2007) Mechanical study and integrated probabilistic approaches used to analyze the industrial risks, *ICCES'07*, 03-08 January 2007, Miami, USA
- Mébariki A., Nguyen Q.B., Mercier F., Ami Saada R., Meftah F., Reimeringer M. (2007) A probabilistic model for the vulnerability of metal plates under the impact of cylindrical projectiles, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (in Press)
- Neilson A. J. (1985) Empirical equations for the perforation of mild steel plates. *International Journal of Impact Engineering* 3 (2), 137-142
- Nguyen Q.B., Mébariki A., Mercier F., Ami Saada R., Reimeringer M. (2006) Domino effect and integrated probabilistic approach : risk analysis, *CST'06*, CST.31, 12-15 September 2006 Las Palmas de Gran Canaria, Spain