



**HAL**  
open science

# Analyse stochastique de l'enchaînement catastrophique conduisant des fragments issus d'un accident industriel à impacter et à perforer des installations voisines

Frédéric Mercier

► **To cite this version:**

Frédéric Mercier. Analyse stochastique de l'enchaînement catastrophique conduisant des fragments issus d'un accident industriel à impacter et à perforer des installations voisines. Rapport Scientifique INERIS, 2007, 2006-2007, pp.60-63. ineris-01869091

**HAL Id: ineris-01869091**

**<https://ineris.hal.science/ineris-01869091>**

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.

# Analyse stochastique de l'enchaînement catastrophique conduisant des fragments issus d'un accident industriel à impacter et à perforer des installations voisines

Frédéric Mercier

1



Élément de chaudière propulsé par effet fusée.

## RÉFÉRENCES

- [1] 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, pp. 199-203.
- [2] Baum M.R., (1999). "The velocity of end-cap and rocket missiles generated by failure of a gas pressurised vessel containing particulate material", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12, pp. 259-268.
- [3] Gubinelli G., Zanelli S., Cozzani V., (2004). "A simplified model for the assessment of the impact probability of fragments", *Journal of Hazardous Materials*, A116, pp. 175-187.
- [4] Hauptmanns U., (2001). "A procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14, pp. 395-402.

## CONTEXTE

La problématique des impacts de fragments issus d'une explosion accidentelle s'inscrit dans le prolongement des recherches entreprises par l'INERIS dans le domaine des effets dominos. Elle fait l'objet du programme IMFRA qui intègre une importante collaboration avec NEXTER, le Centre National des Risques Industriels (CNRI), et le Laboratoire de Mécanique (LaM) de l'Université de Marne-la-Vallée [9].

Les projectiles mis en jeu lors d'accidents industriels peuvent être très divers, tant en termes de dimensions que de nature. À titre d'exemple, une enceinte métallique peut éclater et projeter des fragments dans son environnement. Si elle abrite un gaz liquéfié ou de l'eau surchauffée, le projectile peut également subir un effet fusée, c'est-à-dire être propulsé au cours de son vol par le changement de phase du fluide (figure 1). Le projectile peut aussi être constitué d'éléments de structures bâtementaires (briques, moellons, fermes...) mis en mouvement par une explosion interne. La gamme des vitesses à l'impact peut aller de quelques mètres par seconde jusqu'à plus de 100 mètres par seconde dans les cas extrêmes (effet fusée).

Les conséquences de ces projections sur une structure, un réacteur par exemple sont relativement méconnues. Or, dans le cadre de la prévision des suraccidents et de leurs effets potentiels sur l'environnement, il peut être crucial de

connaître les probabilités associées à la transformation d'un simple accident initiateur en une succession catastrophique de cycles conduisant *in fine* à un accident majeur. À titre d'exemple, un événement accidentel initiateur dans un parc d'enceintes sous pression va conduire à la projection d'éléments dans son environnement (figure 2). Certaines des enceintes voisines vont être endommagées et, parmi elles, quelques-unes vont conduire à un nouveau cycle accidentel. Le présent article vise à exposer l'enchaînement probabiliste conduisant un accident initiateur à endommager une cible métallique. Ce type d'approche a été initiée dans le domaine du risque industriel par Hauptmanns [4, 5] et Gubinelli et al. [3]

## MODÉLISATION MÉCANO-PROBABILISTE DE L'IMPACT DE PROJECTILES SUR DES INSTALLATIONS VOISINES

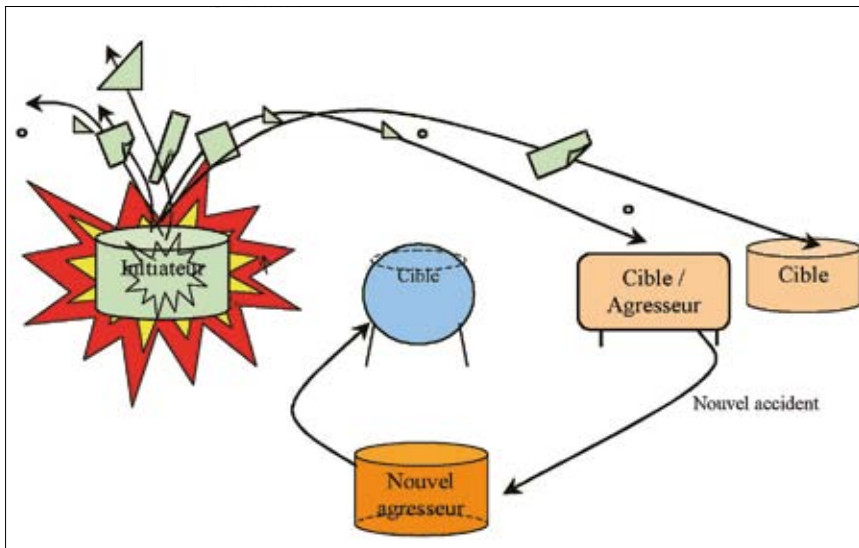
La probabilité de ruine d'une cible  $P_r$  par l'impact d'un agresseur peut s'écrire comme :

$$P_r = P(E \leq 0) = \int_{E=0}^{\infty} f_e(e) de = \iint_{R-S \leq 0} f_r(r) f_s(s) dr ds$$

$$E = R - S$$

Avec :

- $R$  : la résistance aléatoire (dont les variables sont  $r$ ) ;
- $S$  : la demande mécanique aléatoire (dont les variables sont  $s$ ) ;
- $E$  : fonction d'état limite ( $E < 0$  définit le domaine de ruine ;  $E = 0$  est la surface



Enchaînement catastrophique donnant lieu à un suraccident.

2

Projectiles  
Variables aléatoires :

- vitesse
- masse
- forme
- direction

d'état limite;  $E > 0$  définit le domaine de sécurité).

-  $f_i(.)$  et  $f_s(.)$  sont des fonctions de densité de probabilité.

En pratique, le risque de suraccident peut être représenté comme une suite de cycles pouvant être traduite sous la forme d'un produit de probabilités comme :

$$P_{\text{cycle}} = P_{\text{gen}} \cdot \underbrace{P_{\text{imp}} \cdot P_{\text{rup}}}_{P_f} \cdot P_{\text{propa}}$$

Expression dans laquelle :

-  $P_{\text{gen}}$  est la probabilité de génération de projectiles lors de l'accident initiateur.

Dans ce qui suit, la génération de projectiles est considérée comme certaine ( $P_{\text{gen}} = 1$ ).

-  $P_{\text{imp}}$  est la probabilité d'impact d'une cible par un projectile. Comme cela va être montré plus loin, la probabilité d'impact dépend des variables aléatoires qui gouvernent le vol du projectile.

-  $P_{\text{rup}}$  est la probabilité de rupture de la cible lors de l'impact. Celle-ci nécessite de modéliser l'interaction mécanique entre la cible et le projectile lors du choc.

-  $P_{\text{propa}}$  est la probabilité de propagation du cycle. Cette dernière probabilité dépend de divers facteurs, et notamment du cycle de vie de la cible : à titre d'exemple, la perforation d'un réservoir vide ne conduira pas à un suraccident, tandis que, à l'inverse, celle d'un réservoir plein d'un gaz liquéfié peut conduire à un BLEVE. Cette probabilité ne sera pas discutée ici.

## PROBABILITÉ D'IMPACT

### Caractéristiques du projectile

La probabilité d'impact dépend tout d'abord du nombre de projectiles et de leurs caractéristiques. Le retour d'expérience permet de disposer des lois de répartition associées à la forme et à la masse des projectiles. Ainsi, pour des réservoirs cylindriques, Baum<sup>[1,2]</sup> a montré l'existence de plusieurs modes de rupture possibles en fonction de l'initiation de la fissure et de sa propagation. Le nombre de projectiles associés va être directement fonction du mode de rupture. Sur la base d'une analyse d'accidents<sup>[6]</sup>, il est possible de postuler une loi exponentielle discrète pour le nombre de projectiles.

La forme du projectile dépend en grande partie du type de rupture et de la propagation des fissures sur un réservoir. Pour des réservoirs cylindriques, les principaux types de projectiles sont des fonds de réservoir, éventuellement solidaires de tout ou partie de la virole (fonds oblongs de réservoir) et des parties de virole aplaties (plaques).

La masse du projectile dépend de sa forme et de sa densité. Dans le cas d'un réservoir cylindrique, l'initiation de la fissure se fait soit à la soudure circonférentielle, soit au milieu de la virole. Cela permet de postuler, en première approche, que la longueur (pour le fond oblong) et la dimension (pour la plaque) suivent une loi uniforme. Une fois la forme, la taille et le matériau constitutif connus, la masse du projectile peut être déterminée.

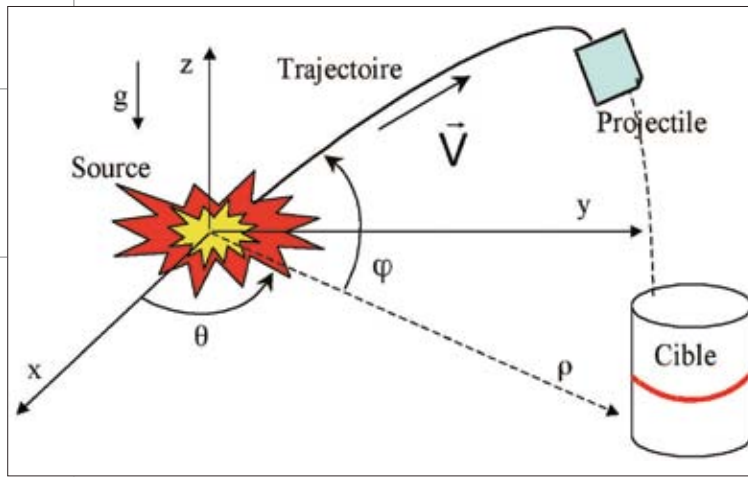
### Caractéristiques du vol

La probabilité d'impact dépend également des angles horizontaux et verticaux de départ du projectile ainsi que de la vitesse initiale.

Pour un réservoir cylindrique, aucune information n'existe sur l'angle vertical. La fissure pouvant commencer n'importe où sur la virole, l'angle vertical de départ  $\phi$  (voir figure 3) peut donc être n'importe quel angle vertical de  $-90^\circ$  à  $90^\circ$  avec la même probabilité. L'angle vertical de départ peut donc être représenté par une distribution uniforme de  $-90^\circ$  à  $90^\circ$ .

L'angle horizontal (direction de vol) de départ  $\theta$  résulte fortement de la nature du réservoir. Pour les réservoirs cylindriques, une analyse statistique réalisée par Holden<sup>[6]</sup> sur 17 BLEVE montre qu'environ 60% des fragments sont projetés dans un secteur angulaire de  $60^\circ$  autour de l'axe du réservoir, et le restant ( $\approx 40\%$ ) est plutôt projeté de manière perpendiculaire. Holden a également proposé une approximation de la distribution des projectiles envoyés par rapport à l'axe principal du réservoir : 20% des fragments dans l'intervalle  $[30^\circ-150^\circ]$  ; 30% des fragments dans l'intervalle  $[150^\circ-210^\circ]$  ; 20% des fragments dans l'intervalle  $[210^\circ-330^\circ]$  ; et 30% des fragments dans l'intervalle  $[330^\circ-30^\circ]$ .

La vitesse initiale se détermine de façon classique à l'aide de l'énergie cinétique du projectile. Mais cette énergie cinétique représente une fraction de l'énergie totale disponible au moment de l'accident.



Caractéristiques du vol.

Dans le travail présenté, une distribution log-normale pour la vitesse de départ est postulée sur la base des résultats des essais de Baum <sup>[1,2]</sup>.

Le vol est ensuite décrit au moyen des équations classiques appliquées sur le centre de masse du projectile <sup>[11]</sup> :

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

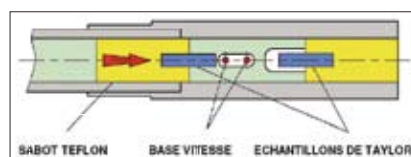
- avec n=1 pour la partie ascendante de la trajectoire et n=2 pour sa partie descendante;

$$\begin{cases} k_D = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \cdot C_D \cdot A_D \\ k_L = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \cdot C_L \cdot A_L \end{cases}$$

Dans la présente étude présentée, la rotation du projectile n'est pas prise en compte.

#### Impact

L'impact du projectile et de la cible est analysé sous la forme de l'intersection de deux ellipsoïdes. L'algorithme employé fait appel à des conditions algébriques dans un espace euclidien en trois dimensions <sup>[12]</sup>.



4

Essai de Taylor symétrique (NEXTER).

## INTERACTION PROJECTILE/CIBLE

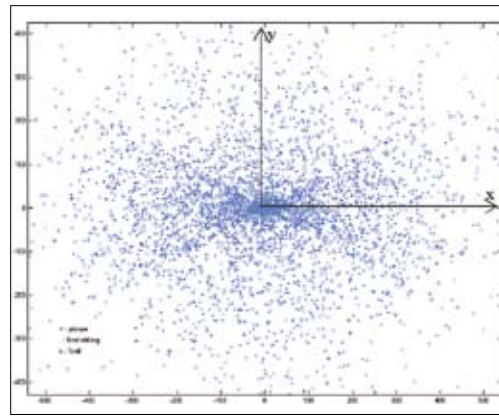
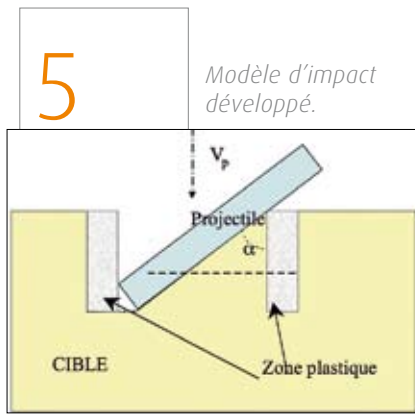
L'interaction projectile/cible peut avoir des conséquences diverses suivant la vitesse mise en jeu, le rapport des tailles entre le fragment et son objectif, la nature des matériaux qui les constituent. Les modèles d'impact proposés dans la littérature sont difficilement adaptables aux risques industriels. Le plus souvent issus du domaine militaire, les gammes de vitesse sont beaucoup plus élevées que celles rencontrées lors d'un accident industriel. Par ailleurs, les projectiles employés lors des expérimentations sont souvent des ogives, dont la forme peut être assez éloignée de celle des fragments. Les matériaux mis en jeu sont également très différents de ceux habituellement étudiés dans ces modèles. De ce fait, les modèles existants considèrent souvent des chocs durs, parfois des chocs mous, mais de façon rarement représentative d'un accident industriel.

Dans le cadre de cette recherche, des essais mécaniques sont réalisés par NEXTER en vue d'affiner les modèles existants. Il s'agit de :

- caractériser le comportement dynamique des matériaux : essais de Taylor symétriques sur les métaux industriels retenus, essais de compression quasi statique sur le béton ;
  - qualifier la pénétration de projectiles de tailles diverses à des vitesses dans des cibles d'épaisseur variables : projectiles métalliques divers sur des cibles métalliques de nature et d'épaisseur représentatives d'une enceinte sous pression, projectile métallique de diamètre important sur une cible en béton armé représentative d'une salle de contrôle.
- Dans l'étude présentée, l'endommagement de la cible par le projectile est analysé en termes de pénétration du projectile dans la cible. Des modèles simplifiés ont été spécialement développés par le LaM (figure 5) sur la base d'une analyse de publications d'essais d'impact de cibles par des projectiles métalliques divers, balayant un large domaine d'angles et de vitesses de pénétration.

#### RÉFÉRENCES

- [5] Hauptmanns U., (2001). "A Monte-Carlo based procedure for treating the flight of missiles from tank explosions", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 16, pp. 307-312.
- [6] Holden P.L. (1988). "Assessment of Missile Hazards: Review of Incident Experience Relevant to Major Hazard Plant". Safety and Reliability Directorate, Health & Safety Directorate. United Kingdom Atomic Energy Authority.
- [7] Mebarki A., Ami Saada R., Nguyen Q.B., Mercier F., Meftah F. and Reimeringer M. (2005). "Mechanical behavior of metallic plates under metallic rods impact and industrial risks", Keynote lecture, ICCES'05, 1-6 December 2005, Chennai, India.
- [8] Mebarki A., Ami Saada R., Nguyen Q.B., Mercier F. and Reimeringer M. (2007). "Mechanical study integrated probabilistic approaches used to analyze the industrial risks", ICCES'07, 3-8 January 2007, Miami, USA.
- [9] Mercier F., Boulanger R., Mebarki A., Brunet L., Reimeringer M. (2006). « Risques liés aux impacts de fragments lors des accidents industriels, » *La Lettre Techniques de l'Ingénieur - Risques Industriels*, n° 16, pp. 5-6.
- [10] Mebarki A., Nguyen Q.B., Mercier F., Ami Saada R., Meftah F., and 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*, 20 (2), pp. 113-186.
- [11] Nguyen Q.B., Mebarki A., Mercier F., Ami Saada R. and Reimeringer M. (2006). "Domino effect and integrated probabilistic approach for risk analysis", CST2006, CST.31, 12-15 September 2006, Gran Canaria, Spain
- [12] Wang W., Wang J., Kim M. (2001). "An algebraic condition for the separation of two ellipsoids". *Computer Aided Geometric Design*, 18, pp. 531-539.



6

Distribution des projectiles.

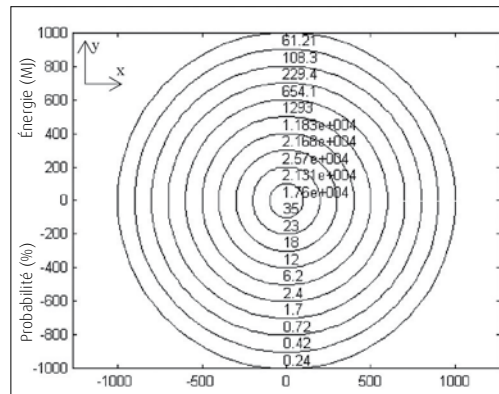
Dans le modèle présenté en figure 5, l'énergie cinétique est supposée être dissipée au travers de la zone plastique qui se forme dans le cratère [7].

### EXEMPLE D'APPLICATION

Des simulations numériques ont été réalisées en considérant un réservoir cylindrique A et un réservoir sphérique B, distants de 28 m, ayant des volumes respectifs de 200 m<sup>3</sup> et de 1 600 m<sup>3</sup>.

Le réservoir A est à l'origine de l'accident. Les projectiles produits sont expédiés dans une zone circulaire de diamètre approximatif d'un kilomètre, avec une répartition plus importante suivant un secteur angulaire de  $\pm 30^\circ$  autour du grand axe  $\vec{x}$  du cylindre (figure 6). [8, 10]

L'impact potentiel des projectiles en fonction de leur distance au réservoir accidenté peut alors être présenté sous la forme de leur énergie et probabilité moyennes (figure 7). La probabilité pour qu'un des projectiles impacte le réservoir B est de  $P_{imp} = 0,068\%$ .



7

Énergie et probabilité moyennes des projectiles autour du réservoir accidenté.

### PERSPECTIVES

L'étude va être poursuivie en portant l'effort sur plusieurs axes :

- le développement de lois de probabilité, à partir du retour d'expérience, permettant de disposer du nombre et des caractéristiques de projectiles issus de plusieurs types d'agresseurs (réservoirs, réacteurs, etc.) ;
- la prise en compte de la rotation du projectile au cours de son vol ;
- le développement d'autres modèles d'endommagement de cibles par des projectiles de matériaux divers ;
- l'étude de l'effet d'impacts multiples sur une cible ;
- une prise en compte du cycle de vie de la cible.



### SUMMARY

#### STOCHASTIC ANALYSIS OF THE CATASTROPHIC CYCLING THAT DRIVES FRAGMENTS RESULTING FROM A PRIMARY INDUSTRIAL ACCIDENT TO IMPACT AND PIERCE NEIGHBOURING FACILITIES

*Explosions and accidents in industrial plants may generate a series of projectiles that can impact other facilities and storage tanks in their neighbourhood.*

*The impacted targets may be seriously damaged, thereby giving rise to new explosions, as is the case for tanks with products under high pressure for instance.*

*These successive explosions are known as a domino effect.*

*The present paper deals with a form of industrial risks analysis within a probabilistic framework. This analysis requires various steps:*

- *Probabilistic modelling of the source term (industrial threat such as projectiles, metallic rods, etc.).*

- *Probabilistic modelling of the flight of the fragments and their intersection with the target.*

- *Mechanical behaviour of the impacted target.*

*Pressure vessels have been considered in this study as originators and as targets for simulating the phenomenon. On the basis of a literature review, probabilistic laws have been developed on:*

- *The number of fragments.*

- *The shape of fragments.*

- *Their departure angles and velocities.*

*A flying fragment model is then implemented with these parameters. An algebraic algorithm is applied to determine whether the fragment and the target intersect.*

*If this condition is fulfilled, a mechanical model of the impact is employed to evaluate the effect of the fragment on the target.*

*The results obtained prove that the impact probability of generated fragments on the facilities is not negligible.*