

RAPPORT D'ETUDE
N° DRA-18-171603-02573A

14/03/2018

**Résistance des structures industrielles à
l'impact de projectiles d'origine accidentelle
OMEGA 23**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

**Résistance des structures industrielles à l'impact de
projectiles d'origine accidentelle
OMEGA 23**

**Verneuil-en-Halatte
Direction des Risques Accidentels**

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Benjamin LE-ROUX

PRÉAMBULE

Les rapports Oméga sont la propriété de l'INERIS. Il n'est accordé aux utilisateurs qu'un droit d'utilisation n'impliquant aucun transfert de propriété.

Le rapport Oméga est établi sur la base des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur, ainsi que des pratiques et méthodologies développées par l'INERIS. Bien que l'INERIS s'efforce de fournir un contenu fiable, il ne garantit pas l'absence d'erreurs ou d'omissions dans ces documents.

Ce rapport est destiné à des utilisateurs disposant de compétences professionnelles spécifiques dans le domaine des risques accidentels. Les informations qu'il contient n'ont aucune valeur légale ou réglementaire. Ce sont des informations générales et ne peuvent, en aucun cas, répondre aux besoins spécifiques de chaque utilisateur. Ces derniers seront donc seuls responsables de l'utilisation et de l'interprétation qu'ils feront des rapports. De même, toute modification et tout transfert de ces documents se fera sous leur seule responsabilité.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra, en aucun cas, être engagée à ce titre. En toute hypothèse, la responsabilité de l'INERIS ne pourra être retenue que sur la base de la version française de ces rapports.

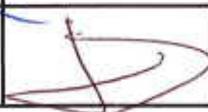
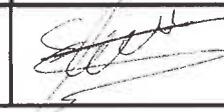
	Rédacteur	Relecture	Vérification		Approbation
NOM	Benjamin LEROUX	Franck PRATS	Stéphane DUPLANTIER	Frédéric MERLIER	Stéphane DUPLANTIER
Qualité	Responsable de l'unité Résistance des Structures Direction des Risques Accidentels	Référent technique du pôle Analyse et Gestion intégrées des Risques (AGIR) Direction des Risques Accidentels	Responsable du pôle Phénomènes Dangereux et Résistance des Structures (PHDS) Direction des Risques Accidentels	Délégué Appui à l'administration Direction des Risques Accidentels	Responsable du pôle Phénomènes Dangereux et Résistance des Structures (PHDS) Direction des Risques Accidentels
Visa					

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	5
1.1 Les référentiels OMEGA	5
1.2 Domaine d'application	5
1.3 Contexte réglementaire	6
1.4 Structure du document	9
2. LE PHÉNOMÈNE D'IMPACT : DESCRIPTION ET CARACTÉRISATION	11
2.1 Retour d'expérience	11
2.2 Définition générale	16
2.3 Classification proposée par eibl : choc mou / choc dur	16
2.4 Caractérisation unifiée des chocs proposée par Kœchlin	17
2.5 Synthèse	20
2.6 Comportement d'une structure face à l'impact de projectile	21
2.7 Comportement d'une cible en béton face à un impact de projectile	21
2.8 Comportement d'une cible en acier face à un impact de projectile	23
3. MÉTHODES DE CALCUL DE LA RÉSISTANCE DES STRUCTURES AUX IMPACTS DE PROJECTILES	25
3.1 Corrélations Empiriques	26
3.1.1 Formules génériques (Béton/ acier) pour impact localise	26
3.1.2 Cible en beton et impact dur localise	31
3.1.3 Cible en acier et impact dur localisé	44
3.1.4 Limite des modèles empiriques	56
3.2 Méthodes analytiques	57
3.2.1 Généralités	57
3.2.2 Modèles de réponse globale de la cible.....	57
3.2.3 Modèle de réponse traduisant un impact dur localisé.....	59
3.3 Méthodes numériques.....	63
3.3.1 Les méthodes « continues »	63
3.3.2 Les méthodes « discrètes »	64
3.3.3 Une alternative : les approches multi-domaines	65
3.3.4 Principaux logiciels de calcul	67
3.3.5 Conclusions	67

4. MOYENS DE PROTECTION	69
4.1 Enceinte de protection.....	69
4.2 Modification des propriétés mécaniques de la cible	70
5. CONCLUSION.....	71
6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.	73

1. INTRODUCTION

1.1 LES RÉFÉRENTIELS OMEGA

Les référentiels OMEGA (Ω) constituent un recueil global formalisant l'expertise de l'INERIS dans le domaine des risques accidentels. Ce recueil concerne les thèmes suivants :

- l'analyse des risques ;
- les phénomènes physiques impliqués en situation accidentelle (incendie, explosion, BLEVE, ...)
- la maîtrise des risques d'accident ;
- les aspects méthodologiques pour la réalisation de prestations réglementaires (étude de dangers, analyse critique, ...).

Ces rapports ont vocation à présenter les connaissances considérées comme consolidées au moment de leur rédaction. Ces rapports sont mis à disposition des acteurs de la maîtrise des risques d'accidents qui en feront bon usage sous leur responsabilité. Certains de ces rapports sont traduits en anglais en vue d'en favoriser leur diffusion. Les concepts exposés dans ces rapports n'ont pas vocation à se substituer aux dispositions réglementaires.

1.2 DOMAINE D'APPLICATION

Le présent rapport Ω -23 présente une synthèse de l'état des connaissances scientifiques recensées par l'INERIS afin de déterminer les effets d'impact de projectiles sur les structures béton ou métalliques rencontrées sur site industriel (enceinte sous pression, réservoirs métalliques, canalisations, réserves d'incendie dont la destruction peut perturber les moyens d'intervention, stockage de produits dangereux ou encore salles de contrôle, dont la destruction peut également conduire à une aggravation des conséquences).

En effet, lors d'un accident industriel, l'explosion d'un équipement peut produire des fragments dont la projection peut impacter voire perforer des équipements proches, et générer ainsi un ensemble de processus catastrophiques appelés effets dominos. L'accidentologie montre que ce phénomène peut être à l'origine d'accidents catastrophiques et causer de nombreuses victimes.

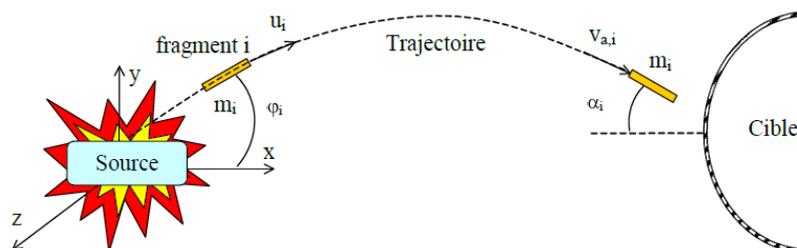


Figure 1 : Schéma de l'effet domino [IMFRA 2008]

Le risque de ruine des équipements suite à l'impact par un projectile dépend de nombreux paramètres tels que :

- la masse et la vitesse du fragment ;
- les caractéristiques géométriques du fragment et matériaux (capacité de déformation du projectile lors de l'impact sur la cible) ;
- la surface de contact sur la cible ;
- l'épaisseur de la cible, ses propriétés mécaniques et le niveau de précontrainte de la paroi du réservoir ou de la canalisation consécutifs aux conditions de stockage du produit ;
- l'angle que forme la cible avec le projectile lors de l'impact.

L'objectif du présent référentiel Oméga est de décrire les phénomènes et les outils de modélisation utilisables pour prévoir le comportement des structures lors d'une agression par un projectile.

Il peut notamment permettre de répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les mécanismes de rupture mis en jeu lors de l'impact d'un projectile sur une structure ?
- Le projectile est-il capable de pénétrer la paroi d'une structure, d'une installation ou d'un équipement et de la perforer ? La structure sera-t-elle endommagée ou au contraire préservée ?
- Les conséquences de projections sur une structure, une enceinte pressurisée par exemple, spécialement en termes d'effets domino, sont des problématiques aux enjeux forts. Une fois la structure impactée, son affaiblissement peut-il être suffisant pour générer un suraccident ?

Il constitue la première version de ce référentiel.

1.3 CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

La problématique des effets de projection est principalement abordée dans la réglementation française au travers :

- De la réglementation dans le secteur de la Pyrotechnie : circulaire interministérielle du 20 avril 2007 [2007-04] « *relative à l'application de l'arrêté du 20 avril 2007 fixant les règles relatives à l'évaluation des risques et à la prévention des accidents dans les établissements pyrotechnique* » ;
- Des Plans de Prévention des Risques Technologiques : circulaire du 10 mai 2010 [2010-12] « *récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003* ».

Nous prenons ici le parti de présenter par la suite les extraits de ces circulaires traitant spécifiquement des effets de projections.

Il est à noter que cette problématique est plus particulièrement abordée au travers :

- de la détermination de zones d'effets. En ce sens, la réglementation « pyrotechnique » décrit une méthode afin de calculer les distances de projections en fonction de la masse de matières explosibles.
- de la prise en compte des « effets dominos générés par les fragments sur des installations et équipements proches ». En effet d'après le retour d'expérience plus d'un tiers d'entre eux surviennent suite à l'impact de « fragments ».

Pour ce faire, la réglementation invite à citer dans les études de dangers les retours d'expérience connus en la matière. Cependant, il n'est pas explicitement fait mention, à l'exception du « secteur de la pyrotechnie », de méthode unanimement reconnue par les professions de l'industrie permettant d'évaluer les effets de projections sur des équipements industriels.

Le présent rapport se propose d'apporter des éléments de réponse en présentant une synthèse de l'état des connaissances scientifiques en la matière.

Extrait de la circulaire du 10 mai 2010 :

« Les textes réglementaires ont toujours traité de façon plus spécifique ces derniers effets [ndlr effets de projection sur une installation classée]. Un accident récent (explosion de citernes routières contenant du GPL avec des projections à longue distance d'éléments de citernes) est l'occasion de rappeler les modalités de prise en compte de ces effets dans la maîtrise du risque technologique.

Lors des phénomènes violents menant à la rupture d'une capacité (explosion d'une citerne de gaz, d'un silo...) ou à la fragmentation des produits stockés (explosion d'un dépôt de munitions par exemple), des fragments peuvent se retrouver projetés (généralement par l'effet de souffle).

Les connaissances scientifiques relatives à ces effets restent cependant extrêmement faibles. A ce titre, seuls les effets dominos générés par les fragments sur des installations et équipements proches ont vocation à être pris en compte dans les études de dangers (une telle instruction est valable également pour les installations soumises à seule autorisation). Pour les effets de projection à une distance plus lointaine, l'état des connaissances scientifiques ne permet pas de disposer de prédictions suffisamment précises et crédibles de la description des phénomènes pour déterminer l'action publique.

Vous pourrez alors inviter les exploitants, dans les études de dangers qu'ils vous remettent, à seulement citer les retours d'expérience connus en matière de projections sur des accidents similaires à ceux décrits dans l'étude de dangers. Néanmoins, si cet effort de recueil d'informations sur des accidents ayant affecté des installations comparables est nécessaire afin d'assurer une réelle transparence de l'exploitant dans l'étude de dangers et de l'Etat dans l'analyse de celle-ci, les informations recueillies n'ont pas pour autant à être prises en compte dans les démarches prévues aux paragraphes 2 et 3 de cette première partie de circulaire.

Je vous demande cependant d'apporter une exception à cette règle, pour le secteur de la pyrotechnie, qui, pour des raisons historiques, dispose de données suffisamment fiables sur les éclats générés par certains produits pyrotechniques civils ou militaires¹³.

Pour ce type de produits existent notamment des formules de calcul qui permettent de définir des zones d'effet de projection¹⁴, qui peuvent dans certains cas dépasser les zones générées par d'autres types d'effets. Des modalités de prise en compte de ces effets dans l'instruction des études de dangers sont d'ailleurs indiquées plus précisément dans le sous-paragraphe « 1.2.7 Secteur de la Pyrotechnie » ci-dessous.

¹⁴ Formules de la circulaire interministérielle du 20 avril 2007. »

Extrait de la circulaire interministérielle du 20 avril 2007 :

« Les zones d'effets en pyrotechnie sont calculées historiquement à partir de formules de calcul établies notamment à partir d'essais (réels ou sur maquette). Ces zones d'effets, qui correspondent en pratique aux zones délimitées par les seuils d'effets mentionnés à l'article 11 de l'arrêté du 20 avril 2007, sont confortées par un retour d'expérience solide.

Ainsi, des zones déterminées à partir des formules de calcul reprises ci-après [...], qui figuraient dans l'arrêté du 26 septembre 1980 fixant les règles de détermination des distances d'isolement relatives aux installations pyrotechniques, correspondent aux zones exigées dans l'arrêté du 20 avril 2007 et ne sont pas à remettre en cause.

Le tableau suivant permet de déterminer l'étendue des zones d'effet en terrain nu (et en fonction de Q, masse nette des matières explosives, à l'exclusion des enveloppes qui les contiennent) pour des objets destinés à projeter des éclats multiples. Ces valeurs peuvent être utilisées par défaut dans d'autres configurations, mais d'autres approches au cas par cas peuvent être utilisées. Les zones d'effet sont délimitées à partir des bords de la charge.

a) Si $Q > 100$ kg

DÉSIGNATIO N de la zone	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
Distance R (en mètres) à la charge de masse Q (en kg)	1° Dans le cas d'objets contenant unitairement moins de 750 grammes de matière active				
	$0 < R1 \leq 15$	$< R2 \leq 90$	$< R3 \leq 200$	$< R4 \leq 60 Q^{1/6}$ ou 300 si $300 \geq 60 Q^{1/6}$	$< R5 \leq 120 Q^{1/6}$ ou 600 si $600 \geq 120 Q^{1/6}$
	2° Dans le cas d'objets contenant unitairement plus de 750 grammes de matière active				
	$0 < R1 \leq 25$	$< R2 \leq 135$	$< R3 \leq 300$	$< R4 \leq 75 Q^{1/6}$ ou 400 si $400 \geq 75 Q^{1/6}$	$< R5 \leq 150 Q^{1/6}$ ou 800 si $800 \geq 150 Q^{1/6}$

b) Si $10 \text{ kg} \leq Q < 100 \text{ kg}$: les distances figurant dans le tableau précédent peuvent être réduites d'un tiers ;

c) Si $Q < 10$ kg: les limites des zones d'effet sont à définir par une étude particulière.

Si des matières ou objets présentent à la fois un danger d'explosion en masse et un risque important de projections (de plus de 150 grammes à plus de 15 mètres), les zones d'effet à retenir sont les plus étendues de celles du produit ou de son enveloppe qui ont été déterminées pour ces matières ou objets considérés comme appartenant d'une part, à la division 1.1, d'autre part, à la division 1.2. »

1.4 STRUCTURE DU DOCUMENT

Le document présente successivement les éléments suivants :

- le phénomène physique d'impact (chapitre 2) ;
- les modèles (empiriques, analytiques, numériques) généralement utilisés pour prédire le comportement d'une structure soumise à un impact (chapitre 3) ;
- les moyens de protection possibles en cas de défaillance avérée (chapitre 4).

2. LE PHÉNOMÈNE D'IMPACT : DESCRIPTION ET CARACTÉRISATION

2.1 RETOUR D'EXPÉRIENCE

Les projectiles mis en jeu lors d'accidents industriels peuvent être très divers. Il est complexe de définir précisément quels seront les projectiles (formes, dimensions, nature) et leurs caractéristiques balistiques (vitesse, angle d'envol ...). Ceci est dû principalement à la diversité des équipements et bâtiments ainsi qu'à la complexité de la mécanique de rupture de ceux-ci.

À titre d'exemple, une enceinte métallique peut éclater et projeter des fragments dans son environnement. Si celle-ci contient un gaz sous pression, leur nombre varie généralement de 1 à 4 et leur distance ne dépasse pas les 200 m ; Les principaux types de fragments sont le réservoir tout entier, la robe du réservoir, un fond de réservoir resté attaché à la robe, un fond de réservoir seul. Dans le cas d'un gaz liquéfié, le projectile (fonds de réservoir, des fonds oblongs de réservoir et des fragments aplatis de type plaque pour les principaux) 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 2).



Figure 2 : Élément de chaudière projeté par effet fusée

Année	Lieu	Produits	Description du réservoir	Effets de l'éclatement	Cause
2006	Géorgie	O ₂	Bonbonne d'O ₂ de station de gaz	Projection de fragment à une distance de 100 à 150 m	-
2000	Etat Unis	Acétylène O ₂	Bouteille	Un morceau de réservoir est découvert à 1,8 km du lieu du sinistre	-
1999	Saint Denis	GNV	Réservoir de H ₂ pour voiture	Projection du réservoir à 50 m	Remplissage au GNV à 200 bar au lieu du GNA à 20 bar, réservoir éprouvé pour résister, en principe, à une pression de 80 bars
1998	Transport urbain et routier (St Martin-d'Herès)	O ₂	Bouteille de 5 L	Projection de fragments à plus de 200 m	Incendie
1998	St Laurent du Var	H ₂	Gazomètre d'oxygène	Projection du dôme du gazomètre (1060 kg) à 135 m	Entrée d'hydrogène dans un gazomètre
				Projection de la virole supérieure (1150 kg) à 33 m	
1988	Saint Fons	H ₂	Réservoir de 3000 l (L=14 m, diam.=570 mm)	Projection d'un fragment de 183 kg à 22 m et d'un autre fragment de 33 kg à 145 m	Rupture différée (fatigue statique) du réservoir par fragilisation de l'acier sous l'effet de l'hydrogène.
1975	Etat Unis	Chlore	Wagon-citernes contenant 30 t de chlore	Projection d'une partie du réservoir à 150 m	-

Figure 3 : Accidents d'éclatement de réservoirs contenant du gaz sous pression – Formation de fragment [IMFRA 2008]

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 des vitesses supérieures à la centaine de mètres par seconde dans les cas extrêmes (effet fusée).

Un examen plus général des projectiles retrouvés lors d'accidents sur des sites industriels conduit [MICADO 2002] à considérer quatre grands types de projectiles type (plutôt associés à des accidents sur sphères de stockages) auxquels sont associés des vitesses d'impact types ;

- **une vanne de 35 kg (projectile massif)** : Il s'agit d'un élément ayant un rapport (maître couple / masse) faible. Offrant peu de surface au souffle d'une explosion, sa vitesse de projection sera plutôt faible ; Pour fixer les ordres de grandeurs, lors d'une déflagration de 300 mbar d'une durée de 300 ms, la vitesse de projection est de l'ordre de 15 m/s.
- **un tube de 6 pouces (projectiles élancés)** (masse de 25 kg environ pour 1 mètre de long) : Ce type d'élément a un rapport (maître couple / masse) plus élevé qu'une vanne. Sa vitesse initiale est donc plus élevée que celle d'une vanne pour un même événement initial. Ainsi, une vitesse deux fois plus importante que celle de la vanne est retenue.
- **un fond bombé** (masse de 1 tonne environ) : Ce type d'élément est issu de l'éclatement d'une capacité (avec ou sans explosion interne). Un certain nombre de travaux, notamment ceux de Holden, amènent à prévoir une vitesse maximale élevée (de l'ordre de plusieurs centaines de m/s) en tant que vitesse initiale. Cependant, pour de telles pièces, le freinage aérodynamique est très rapide, notamment pour de grandes vitesses, ce qui fait que les vitesses d'impact sont notablement inférieures aux vitesses initiales.
- **des pièces de 0,1 kg et 1 kg** : Il s'agit de pièces issues de machines tournantes dont la vitesse de rotation des parties en rotation peut atteindre plusieurs milliers de tours par minute.

Projectile type	Surface apparente (m ²)	Vitesse d'impact type (m/s) ⁽¹⁾		
		V ₁	V ₂	V ₃
Vanne de 35 kg	0.06	15	50	150
Tube de 6 pouces (masse de 25 kg environ pour 1 mètre de long)	0.09	30	100	200
Fond bombé (masse de 1 tonne environ)	0.5	50	150	250
Pièces de 0,1 kg et 1 kg	0.01	100	300	-

⁽¹⁾ Pour chacun de ces projectiles 3 vitesses d'impact types sont retenues : une vitesse basse, une vitesse haute et une vitesse médiane. Ces vitesses types couvrant le domaine subsonique sont celles retenues dans l'étude [SNPE INGENIERIE 1995] et pouvant être utilisées afin d'évaluer la vulnérabilité d'équipements industriels soumis à l'impact de projectiles et susceptibles de générer des effets dominos.

Figure 4 : Caractéristiques de projectiles-types susceptibles d'être rencontrés en milieu industriel [MICADO 2002], [SNPE INGENIERIE 1995]

L'analyse d'accidents passés (Figure 5) montre par ailleurs que les conséquences de la projection de ce type de fragments peuvent être diverses : blessures ou pertes humaines, endommagement de structures bâtementaires (effondrement), perte d'intégrité d'équipements industriels (rupture de capacité, rupture de canalisation) pouvant à son tour générer d'autres accidents par effets dominos.

Année	Lieu	Événement initiateur	Fragments formés	Conséquences sur l'environnement
1947	Brest	Transport maritimes et côtiers : Explosion sur un navire contenant du nitrate	Nombreux projectiles formés	« La ville bombardée subit d'importants dommages (usine à gaz, dépôts de pétrole en feu ...)
1969	Hongrie- Repcelak	Industrie chimique de base : BLEVE d'un cigare verticaux de CO2 liquide => BLEVE d'un second cigare par effet domino et	<ul style="list-style-type: none"> - Projection d'un troisième cigare par effet domino - Des fragments – des 2 BLEVES – de grandes tailles sont projetés jusqu'à 400 m ; - Deux de 2.8 t sont retrouvés à 150 m et 250 m 	<ul style="list-style-type: none"> - Un Réservoir est propulsé dans le laboratoire situé à 30 m - Les projections –des 2 BLEVES- tuent 4 personnes
1969	Douai	Industrie de boisson : Explosion d'un réservoir de NH3 dans un local	Fond de réservoir projeté à 15 m	Formation d'un trou de 2 m ² sur un mur (25 cm)
1970	Etats-Unis - Crescent	Transports ferroviaires : Déraillement de 9 wagons de propane, BLEVE de plusieurs wagons	<ul style="list-style-type: none"> - Un fragment du wagon percute le toit d'une station service - D'autres fragments sont propulsés à 180 m (1^{er} BLEVE) et à 500 m (2nd BLEVE) 	<ul style="list-style-type: none"> - Effondrement de la station service - Les projections de fragments (BLEVE d'autres wagons) provoquent l'explosion des deux derniers wagons
1981	Villeurbanne	Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles : Feu et Explosions	<ul style="list-style-type: none"> - Poutrelles en métal projetées entre 5 et 200 m - Projection d'autres missiles (boîtes métalliques de 5kg, bombes aérosols) 	La projection des poutrelles fait 1 mort et 5 blessés graves
1982	Venezuela - Tacoa	Production et distribution d'électricité : Explosion d'un bac de 40 000 m ³ rempli à 40% de FO	Projection du toit frangible dans la cuvette de 33 000 m ³	Rupture d'une ligne de FO => Feu de cuvette
1988	Norvège- Porsgrunn/ Bamble	Industrie chimique de base : Explosion d'un nuage de MVC	Projection de missiles sur une canalisation majeure d'éthylène	Non rupture de la canalisation : « l'aggravation [par effet domino] est évitée de justesse »
1989	Lithuanie - Jonova	Industrie chimique de base : Usine d'engrais : rupture d'une cuve de NH3	Projection de la cuve sur le mur de rétention	Endommagement du mur de rétention
1991	Berre l'Etang	Industrie chimique de base : Rupture d'une conduite d'éthylène de 6" prise dans un feu torche	Projection d'un tronçon près d'une autre conduite sur lequel a lieu le feu torche	Explosion de la seconde conduite
1992	Verdun	Service de prérogative publique :	Projection du 1 ^{er} bac.	Le 1 ^{er} bac retombe sur la chaufferie

		Explosion du ciel gazeux de deux bacs de 100 m ³ de FOD	Projection du 2 nd réservoir (effet fusée) à 50 m de haut. Celui-ci retombe à l'extérieur du site	
1993	La Voulte	Transports ferroviaires : Déraillement de 20 wagons d'essence. Explosion de 3 citernes- Infiltration d'essence dans les égouts	Projection de couvercles de bouches d'égout à plusieurs mètres	Destruction d'un bâtiment abritant une station de relevage
1994	Etats-Unis – Belpre	Industrie chimique de base : Explosion d'un réacteur de polymérisation (fabrication de caoutchouc)	Projection de débris en direction d'un parc de stockages et de réservoirs	Perçage des réservoirs => Incendie => Propagation de l'incendie sur des réservoirs de styrènes et de FOD
1994	Etats-Unis – Sergeant Bluff	Industrie chimique de base : Explosion dans une unité de production de nitrate d'ammonium	Projection d'un missile sur un stockage d'ammoniac de 3800 m ³	Perçage du réservoir de stockage par la formation d'une brèche de 15 cm => fuite de 30kg/s formation d'un nuage de NH3
1998	Mauguio	Autres commerces de détail en magasin spécialisé : Explosion de 5 bouteilles de gaz de 13 kg	Projection d'éclats à plusieurs dizaines de mètres Projection d'un morceau de casier de stockage vers un bâtiment distant de 200 m	Encastrement du morceau de casier de stockage dans le bardage du bâtiment
1999	Turquie - Dortyol	Commerce de gros de produits intermédiaires non agricoles : Rupture d'une vanne d'un réservoir sous épreuve	Projection de la vanne sur une canalisation raccordée à un réservoir	Brèche sur la canalisation => fuite de gaz liquéfié s'enflamme => BLEVE du réservoir => Projection d'1/3 du cigare contre le pied d'une sphère sur un terrain voisin en bousculant les 3 ^{ème} et 4 ^{ème} réservoirs
2000	Maroc - Casablanca	Transports urbains et routiers : Explosion d'un camion citerne ravitaillant 2 réservoirs de butane	Formation en particulier de 3 gros fragments : fond arrière projeté dans l'axe de la citerne à 100 m, une virole totalement déroulée à quelques dizaines de mètres et le fond avant projeté vers l'avant du camion à 40 m	Arrachement d'une canalisation reliant les deux réservoirs en cours de ravitaillement

Figure 5 : Exemple d'accidents générant des fragments – Conséquences des fragments projetés sur les entités environnantes [BARPI]

2.2 DÉFINITION GÉNÉRALE

Dans le langage courant, un choc caractérise « une interaction violente entre deux entités distinctes, qui provoque des variations brutales dans leur comportement ». Il s'agit d'un contact violent entre deux corps.

Dans le domaine de la mécanique, on parle indifféremment de chocs ou d'impact dès qu'un solide vient en frapper un autre. Ce phénomène est un phénomène dynamique complexe à étudier. Il génère dans chacune des structures mises en jeu des actions mécaniques de forte amplitude et d'une durée très brève ainsi qu'une variation brutale de leur vitesse.

2.3 CLASSIFICATION PROPOSÉE PAR EIBL : CHOC MOU / CHOC DUR

[Eibl 1987] et le Comité Euro-international du Béton [CEB 1988] ont proposé une classification où l'impact d'un projectile sur une cible peut être représenté par un système masse-ressort équivalent. Le comportement de l'ensemble est régi par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1 [x_1(t) - x_2(t)] = 0 \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k_1 [x_1(t) - x_2(t)] + k_2 x_2(t) = F(t) \end{cases}$$

avec m_1 : masse du projectile, k_1 rigidité du ressort associé

m_2 : masse de la cible, k_2 rigidité du ressort associé

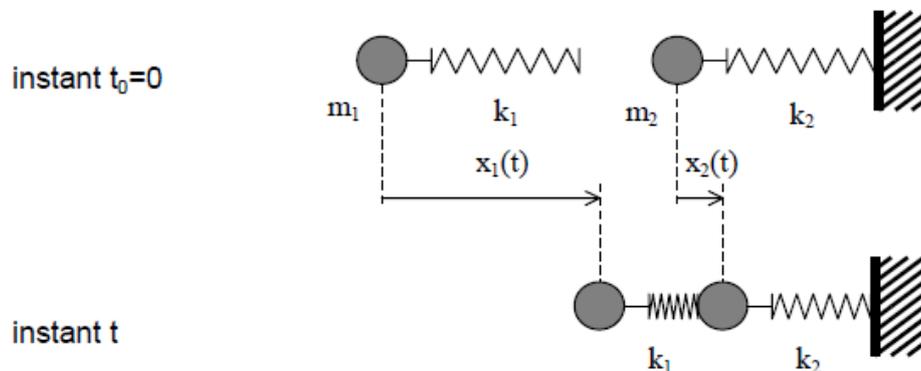


Figure 6 : Système masse-ressort associé à la modélisation de l'impact d'un projectile [Kœchlin 2007]

Si le déplacement de la cible est faible par rapport au projectile, alors $x_1(t) \gg x_2(t)$ les équations du mouvement deviennent :

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k x_1(t) = 0 \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k_2 x_2(t) = F(t) \end{cases}$$

Le problème est alors découplé. Il est possible de résoudre d'abord la première équation, puis en posant par exemple $F(t) = k_1 x_1(t)$, d'en déduire $F(t)$ et enfin de calculer la réponse de la cible à partir de la seconde équation [Kœchlin 2007].

Lorsque le comportement du projectile peut être découplé de celui de la cible le choc est qualifié par [Eibl 1987] de choc mou. Dans le cas où les équations ne peuvent être découplées, le choc est alors qualifié de choc dur ou d'impact dur.

Cette classification est relativement intéressante car elle donne une méthode de résolution afin de traiter les chocs mous définis intuitivement comme un projectile mou qui s'écrase sur une cible rigide. Elle est par exemple classiquement utilisée pour traduire l'impact d'un avion sur une structure en béton armé. En effet des essais en grandeur réelle ont montré que lors de ce type d'impact, le projectile s'écrase complètement et les déplacements et déformations de la cible sont faibles comparés à ceux de l'avion [Sugano 1993]. Par contre elle ne permet pas de bien prendre en compte les chocs durs où un projectile rigide traverse une cible moins rigide, ou encore où le projectile s'écrase contre une cible souple mais résistante.

2.4 CARACTÉRISATION UNIFIÉE DES CHOCs PROPOSÉE PAR KÖECHLIN

[Kœchlin 2007] propose une autre classification à partir d'un critère basé sur les propriétés des matériaux et plus particulièrement sur leurs seuils de rupture. Celle-ci permet de caractériser tout type de chocs, quelque soit la géométrie de la cible (épaisseur).

Le seuil de rupture de la cible σ_c est comparé avec celui du projectile σ_p . Il s'agit alors de vérifier si la cible va résister à l'impact. **Si la cible résiste et que le projectile s'écrase, alors le choc est qualifié de choc mou ; lorsque le projectile pénètre la cible, le choc est dit dur.**

Selon la formule de Riera écrite en contrainte à l'instant initial du choc, la cible soumise à l'impact d'un projectile s'écrasant à une vitesse V_0 , est soumise à une contrainte qui a deux composantes, l'une venant du matériau, l'autre de la vitesse égale à :

$$\sigma = \sigma_p + \rho_p V_0^2$$

avec σ_p la contrainte de rupture du projectile, ρ_p la masse volumique du projectile
 V_0 la vitesse du projectile.

La limite entre choc dur et choc mou est supposée atteinte lorsque σ_c , la contrainte de rupture du matériau qui constitue la cible, est égale à la contrainte de Riera, soit :

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_c} + \frac{\rho_p V_0^2}{\sigma_c^2} = 1$$

La formule de Riera et donc l'équation ci-dessus n'a de sens que si le projectile s'écrase (au sens où il n'y a pas de rebond).

Lorsque le projectile rebondit contre la cible, le problème nécessite une nouvelle analyse. La condition d'écrasement (et donc la condition d'application de la formule de Riera) revient à dire que la contrainte maximale dans le projectile est supérieure à sa contrainte de rupture. La condition d'écrasement (ou de non rebond) s'écrit donc :

$$V_0 \sqrt{E_p \rho_p} > \sigma_p \text{ avec } E_p : \text{ module de Young du projectile}$$

Ou encore

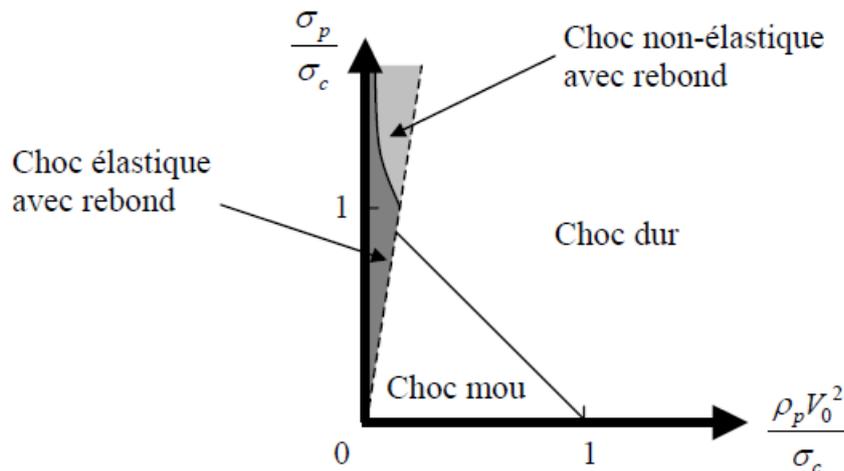
$$\frac{E_p \rho_p V_0^2}{\sigma_p \sigma_c} > \frac{\sigma_p}{\sigma_c}$$

Parmi les chocs avec rebond il est possible de distinguer les chocs élastiques avec rebond et les chocs non élastiques avec rebond. La limite entre ces deux domaines se traduit par le fait que la contrainte maximale dans le projectile appliquée à la cible n'atteint pas le seuil de rupture dans la cible :

$$\frac{E_p \rho_p V_0^2}{\sigma_p \sigma_c} > \frac{\sigma_c}{\sigma_p}$$

Cette « caractérisation unifiée des chocs » définit ainsi 4 domaines :

- le domaine des chocs mous c'est-à-dire de choc sans rebond avec projectile déformable ;
- le domaine des chocs durs : c'est-à-dire de choc sans rebond avec projectile rigide et pénétration ;
- le domaine des chocs élastiques avec rebond ;
- le domaine des chocs non-élastiques avec rebond.



ρ : masse volumique (en Kg/m^3) ; σ : contrainte de rupture (en Pa) ; E : module de Young (en Pa)

les indices c et p : respectivement l'indice de la cible et du projectile.

V_0 : la vitesse d'impact du projectile (en m/s)

Figure 7 : Classification des chocs [Kœchlin 2007]

La distinction entre choc mou et choc dur est bien plus couramment rencontrée que la caractérisation des chocs avec rebond. La zone de choc avec rebond est en réalité difficile à définir. Il pourra être considéré de manière simple qu'il existe un domaine où le projectile rebondit pour des vitesses d'impact faible. Il est par ailleurs à noter que lorsque la vitesse est élevée, les chocs sont en général des chocs durs.

Bien que cette classification ne tienne pas compte de la géométrie du projectile, et semble en première approche fondée sur une analyse très locale, elle est capable de traiter le choc des structures.

Enfin la géométrie de la cible n'a aucune influence dans la classification proposée. Celle-ci établit simplement la frontière entre ruine locale et ruine globale.

La problématique de la résistance des structures ou autres équipements a été et reste très étudiée dans le domaine militaire où les vitesses d'impacts sont très largement supersoniques. C'est pourquoi comme le montre la Figure 8, la majorité des essais à échelle réelle ou en laboratoire à petite échelle se situe dans le domaine des chocs durs. Meppen est le seul à avoir mené des essais d'impacts mous. Un essai d'impact d'un avion taille réelle (PHANTOM F-4) sur un mur a également été réalisé.

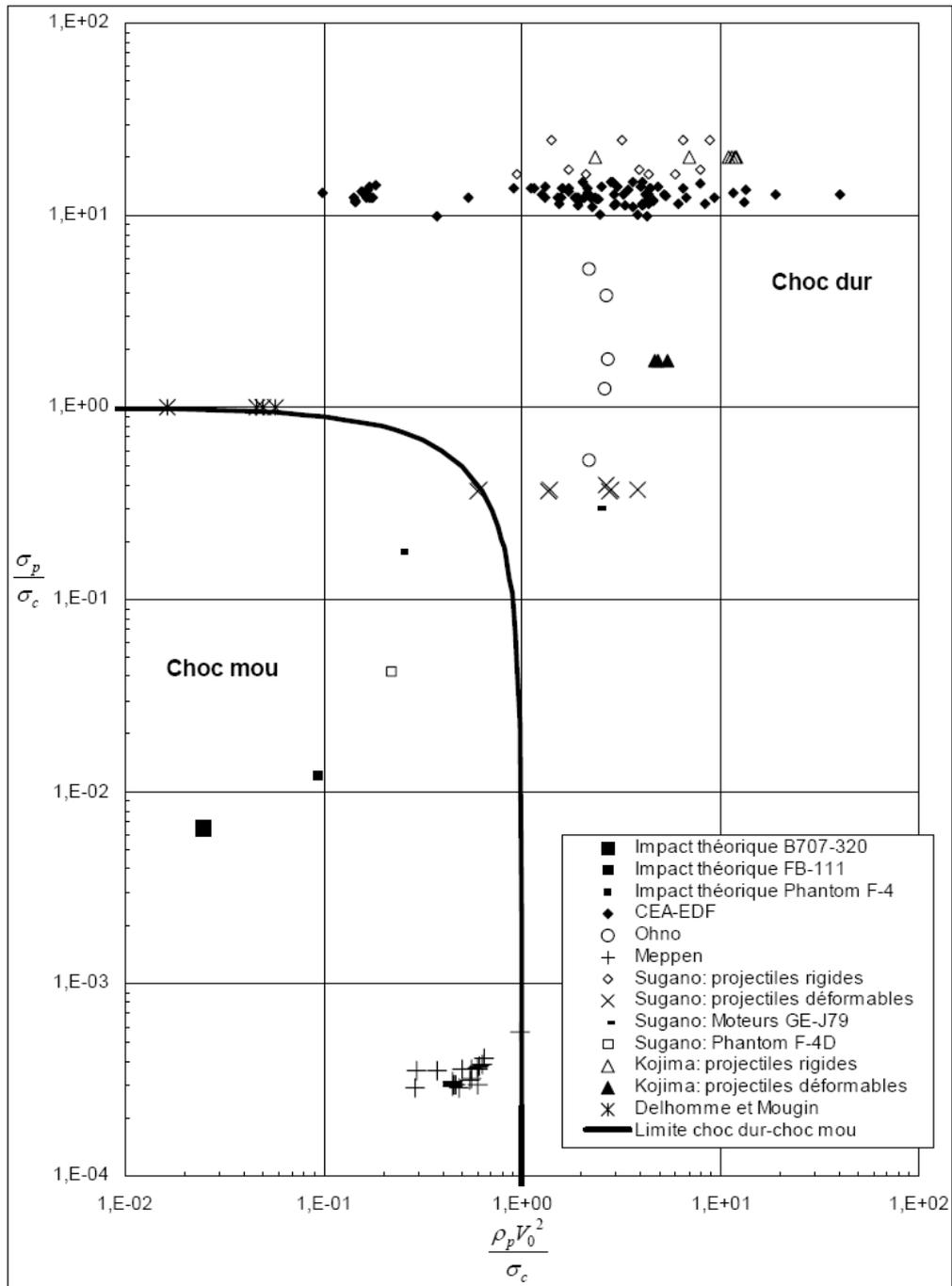


Figure 8 : Domaine des chocs mous/ chocs durs [Kœchlin 2007]

2.5 SYNTHÈSE

L'INERIS préconise de garder les définitions et les notions de la caractérisation des chocs unifiées proposées par Kœchlin dont les grands principes sont présentés au paragraphe 2.4.

2.6 COMPORTEMENT D'UNE STRUCTURE FACE À L'IMPACT DE PROJECTILE

La réponse d'une structure à un impact de projectile peut être « globale » ou « locale ».

- La réponse globale est principalement due à la vibration de l'ensemble de la structure. L'endommagement apparaît alors lorsque l'énergie transmise par l'impact est supérieure à la capacité d'énergie potentielle en déformation.
- La réponse locale se traduit plutôt par un endommagement se localisant près de la zone d'impact.

Plus la durée de l'impact est courte - cas en général des chocs durs- par rapport au temps de réponse de la cible, et plus les phénomènes locaux et globaux seront découplés ; le comportement au voisinage de l'impact ne résulte pas du comportement de l'ensemble de la structure et réciproquement. Les phénomènes d'endommagement sont indépendants. Ainsi par exemple, l'étude du choc d'un moteur d'avion avec une analyse purement locale semble tout à fait pertinente. En revanche, plus le temps de l'impact est important - c'est le cas des chocs mou – plus les phénomènes sont couplés. Des ondes de vibration sont générées et se propagent dans l'ouvrage. Il convient alors en général d'étudier à la fois le comportement local – le processus de ruine locale en perforation- et les conséquences que peuvent avoir la propagation des ondes dans la structure toute entière, c'est-à-dire le comportement global.

La réponse de la structure dépend de nombreux facteurs parmi lesquels peuvent être cités :

- Les caractéristiques géométriques du projectile : diamètre, longueur, forme de la tête du projectile (plat, sphérique, hémisphérique, conique, etc ...) ;
- La vitesse d'impact du projectile ;
- Les caractéristiques géométriques de la cible : épaisseur et dimensions ;
- Les caractéristiques matériaux de la cible et du projectile, et plus particulièrement celles du projectile comparativement à celles de la cible ;

2.7 COMPORTEMENT D'UNE CIBLE EN BÉTON FACE À UN IMPACT DE PROJECTILE

Certaines structures en béton sont conçues pour résister à des impacts de fortes énergies cinétiques, comme par exemple les enceintes de centrales nucléaires.

Lorsqu'un projectile rigide impacte une cible en béton, une onde se propage dans la structure (voir Figure 9 a), b) et c)). Suit une phase de pénétration où le projectile est précédé d'une zone de fortes pressions ayant pour effet de comprimer le matériau mais également de tendre à l'éjecter. Une zone de cratérisation tend à se former dans la zone d'impact au niveau de l'interface projectile/cible. La pénétration se poursuit jusqu'à arrêt du projectile dans la cible si l'énergie nécessaire à la perforation n'est pas disponible, phénomène qui peut être facilité par l'écaillage éventuellement produit par les réflexions en face arrière de la cible.

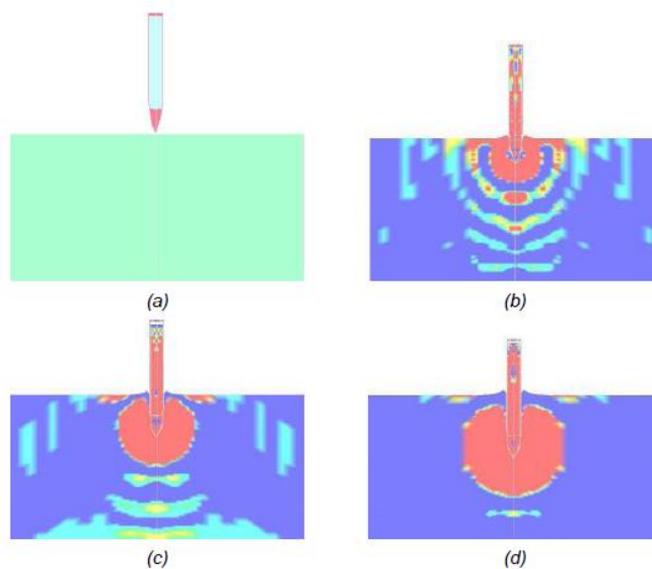


Figure 9 : Exemple d'impact d'un projectile sur une cible en béton

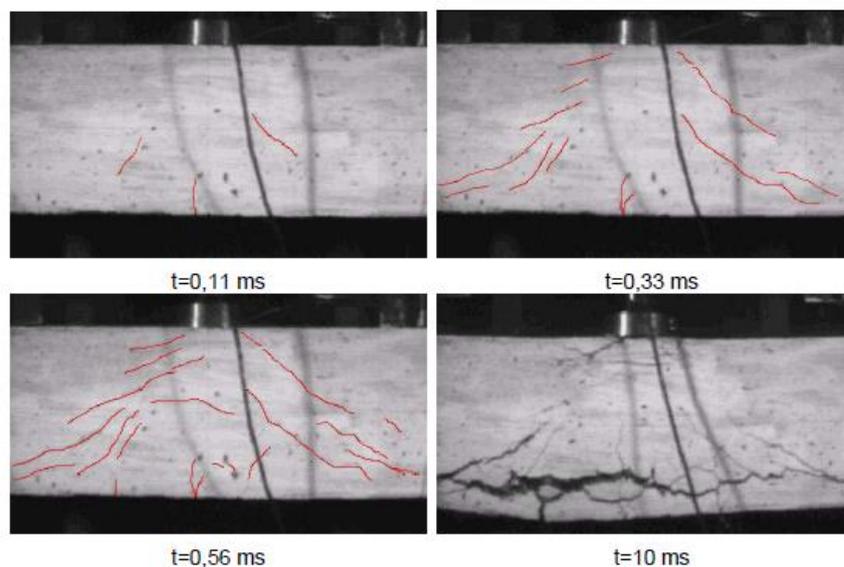


Figure 10 : Evolution de la fissuration et formation du cône de cisaillement [May et al. 2005]

Les effets d'endommagement suite à l'impact d'un projectile sur une cible en béton peuvent ainsi se traduire suivant 7 grands phénomènes :

- **Pénétration** : perçage d'un « tunnel » dans la cible par le projectile, la longueur de ce tunnel est nommée « profondeur de pénétration » ;
- **Fissuration en cône et « plugging »** : formation d'un cône lié au cisaillement dans la cible ;
- **Cratérisation** : éjection de petits morceaux de matériau en face avant de la cible ;
- **Fissuration**: des fissures radiales apparaissent sur l'une ou les deux faces de la cible et se propagent dans l'épaisseur de la cible ;
- **Ecaillage** : éjection des morceaux de matériau en face arrière ;

- **Perforation** : passage complet du projectile le à travers la cible avec ou sans vitesse résiduelle ;
- **Réponse globale de la structure** : la vibration globale d'une structure peut parfois induire des endommagements en cisaillement sur toute la cible.

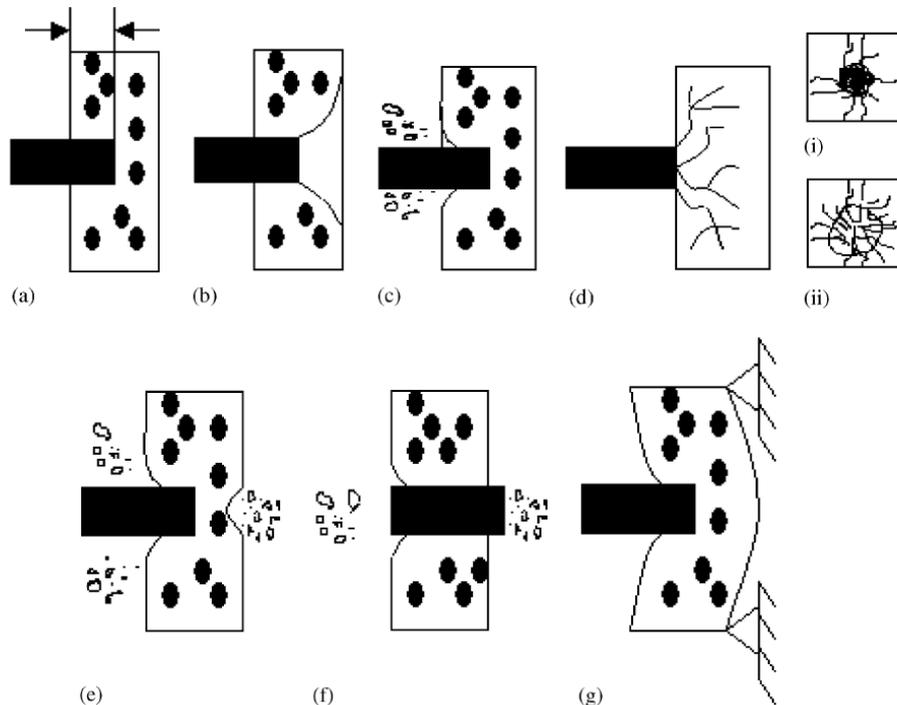


Figure 11. Différents effets résultant d'un impact sur dalle en béton, (a) pénétration, (b) formation d'un cône, (c) cratérisation, (d) fissurations sur (i) la face avant et (ii) la face arrière, (e) écaillage, (f) perforation, et (g) réponse de la structure entière [Li 2005].

2.8 COMPORTEMENT D'UNE CIBLE EN ACIER FACE À UN IMPACT DE PROJECTILE

Pour ce qui de la réponse locale d'une cible en acier suite à l'impact d'un projectile (normale à la cible), l'endommagement dépend d'une part du comportement ductile ou fragile de la cible et, d'autre part, de la limite d'élasticité du perforant.

Pour des cibles en acier de faible ductilité, les modes d'endommagement ou de rupture sont généralement de type fragile, similaire au béton. L'écaillage, concernant principalement les aciers de qualité inférieure, en est un exemple.

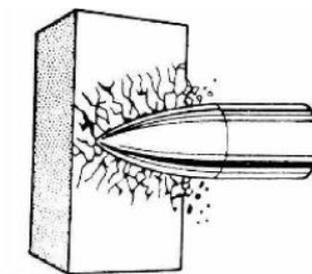


Figure 12 : Exemple de rupture fragile d'une cible en acier

Pour des cibles métalliques ductiles, les mécanismes mis en jeu sont différents selon l'épaisseur de la cible. **Le premier mécanisme associé à de faibles épaisseurs est celui qui sera rencontré le plus souvent en risques accidentelles.**

- Pour des plaques minces, des **perforations de type « plugging »** peuvent être également rencontrés. Le poinçonnement apparaît par exemple pour des vitesses inférieures à 1000 m/s. Le projectile vient cisailer la plaque exactement à la manière d'un poinçon. Le cratère a juste le diamètre du projectile. Un endommagement par **pétalisation** sous l'effet de l'effort de flexion qui s'exerce sur la face arrière de la cible est également possible. Le projectile pénètre dans la cible, et déforme la cible plastiquement. La rupture part de l'axe de pénétration et s'étend dans plusieurs directions pour former des pétales à la fois sur la face avant et la face arrière de ladite cible. Aucune formation de fragments secondaires n'est générée.

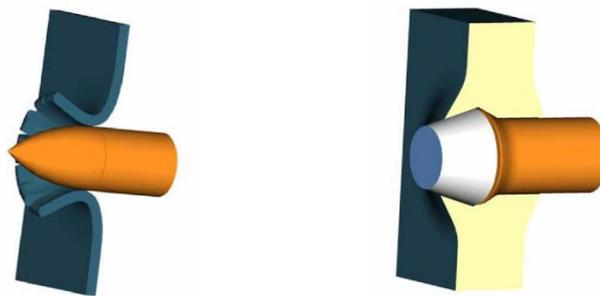


Figure 13 : Pétalisation (à gauche), Poinçonnement (à droite) [IMFRA 2008]

- Pour des plaques épaisses, peuvent être rencontrés un **phénomène de pénétration et de perforation** ou encore la **formation d'un cône de fissuration** par cisaillement (« **plugging** ») pouvant être éjecté de la face arrière de la cible.

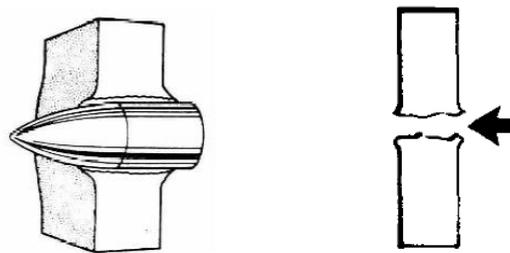


Figure 14 : Pénétration et perforation [IMFRA 2008]

3. MÉTHODES DE CALCUL DE LA RÉSISTANCE DES STRUCTURES AUX IMPACTS DE PROJECTILES

Un site industriel abrite diverses installations. Si une installation vient à exploser, les fragments générés et projetés aux alentours peuvent impacter des installations voisines tels que des canalisations, des réservoirs atmosphériques ou sous pression ou encore des structures porteuses. Ils peuvent les pénétrer partiellement ou les perforer entièrement. Ce faisant, ces derniers peuvent, à leur tour, constituer des menaces pour les installations voisines conduisant à un enchaînement de processus catastrophiques successifs appelé effets dominos. L'accidentologie montre que ce phénomène peut être à l'origine de la rupture d'un grand nombre d'installations et causer de nombreuses victimes.

Comme évoqué au paragraphe 2.6, le risque de ruine de tels équipements ou l'endommagement d'éléments de structures suite à un impact de projectile n'est pas seulement fonction de la vitesse d'impact du projectile, mais également de sa masse, de ses caractéristiques matériaux comparativement à celles de la cible.

De nombreuses recherches ont été entreprises pour développer des formules destinées à décrire simplement les effets cités au chapitre précédent. La plupart se concentrent principalement sur l'établissement de formules déterminant les performances en pénétration, en perforation ou encore en écaillage. Ces notions sont en effet des facteurs clés en termes de dimensionnement de protection par exemple. Les lois dites de prédiction de ces différents phénomènes se répartissent en trois catégories :

- les corrélations empiriques qui sont les plus fréquemment utilisées pour l'évaluation des effets. Elles exploitent des bases de données expérimentales pour établir des relations entre la profondeur de pénétration / l'épaisseur limite de perforation et les principaux paramètres du calcul (vitesse d'impact, géométrie/dimensions du projectile, caractéristique du projectile, ...);
- les méthodes analytiques fondées généralement sur une résolution plus ou moins simplifiée de l'équation différentielle décrivant le système ;
- les méthodes numériques qui permettent de coupler un code Eléments Finis (EF) ou CFD (pour les cas où il y a une composante importante de pénétration lors de l'impact) donnant la force équivalente appliquée à la structure à un code éléments finis permettant d'avoir la répartition de contraintes dans la structure.

3.1 CORRÉLATIONS EMPIRIQUES

De nombreux modèles empiriques ont été développés par traduire les effets locaux d'un impact de projectiles non déformables (durs) sur une cible que celle-ci soit en béton, en béton armé ou en acier. Ces modèles permettent d'évaluer les phénomènes **d'endommagement** de **pénétration**, de **perforation** ou encore d'**écaillage** (dans le cas d'une cible en béton) au travers de différentes grandeurs géométriques :

- la profondeur de pénétration x_p : distance de pénétration du projectile dans la cible sans passer à travers celle-ci ;
- l'épaisseur limite de perforation ou épaisseur de « juste » perforation e_p : épaisseur minimale nécessaire à la cible pour éviter la perforation ; Cette quantité est parfois caractérisée par :
 - La vitesse critique de perforation ou la « vitesse de juste perforation » V_p qui exprime la vitesse minimale nécessaire permettant de perforer la cible ; Plusieurs définitions existent. Backman et Goldsmith (1978) la définissent comme étant la moyenne entre la vitesse la plus haute engendrant une pénétration partielle et la plus basse vitesse engendrant une pénétration complète (perforation).

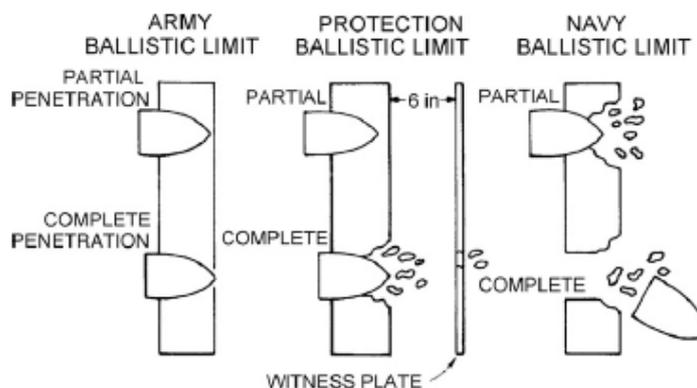


Figure 15 : Différentes définitions de la vitesse critique de perforation [Li 2008]

- ou encore l'énergie cinétique critique de perforation : énergie cinétique du projectile nécessaire afin de perforer la cible.
- l'épaisseur limite d'écaillage e_s : épaisseur minimale de la cible pour éviter la formation de l'écaillage sur la face arrière.

3.1.1 FORMULES GÉNÉRIQUES (BETON/ ACIER) POUR IMPACT LOCALISE

3.1.1.1 EQUATION DE THOR : IMPACT À VITESSE SUPERSONIQUE

Thor [Thor 1961] propose des équations empiriques issues d'un très grand nombre d'essais de perforation de cibles métalliques et non métalliques par des projectiles en acier. Ces équations permettent notamment d'estimer la vitesse de juste perforation, la vitesse résiduelle du projectile en cas de perforation.

$$V_p = 0.3 \cdot 10^{C_1} (6.1 \cdot 10^4 H_o A)^{C_2} (1.55 \cdot 10^4 M_f)^{C_3} (\sec(\alpha_i))^{C_4}$$

$$V_r = V_0 \left(1 - 10^{C_5} (6.1 \cdot 10^4 H_o A)^{C_6} (1.55 \cdot 10^4 M_f)^{C_7} (\sec(\alpha_i))^{C_8} (3.3 V_0)^{C_9 - 1} \right)$$

L'épaisseur de juste perforation e_p (en m) d'une cible en acier par un projectile en acier massif est quant à elle donnée par [TNO 2003] :

$$e_p = k (\cos(\alpha_i))^{1.420} \frac{m^{1.063} V_0^{1.103}}{A} \text{ avec } k = 1,091 \cdot 10^{-7} \text{ kg}^{-1.063} \cdot \text{m}^{1.897} \cdot \text{s}^{1.103}$$

avec V_0 = vitesse d'impact (m/s)

V_r = vitesse résiduelle (m/s)

V_p = vitesse limite de perforation (m/s)

H_o = épaisseur de l'écran cible (m)

m = masse du projectile (kg)

A = surface d'impact moyenne ou surface exposée du projectile lors de l'impact (m^2).

Lorsque la surface exposée du projectile lors de l'impact n'est pas connu, le [TNO 2003] propose de retenir pour A la valeur suivante correspondant à la surface d'un fragment standard résultant de la fragmentation d'une bombe.

$$A = \frac{\pi}{4} \left(\frac{m}{0.645 \rho_{\text{acier}}} \right)^{2/3} \text{ avec } \rho_{\text{acier}} : \text{ la masse volumique de l'acier}$$

α_i = angle de pénétration (par rapport à la normale de l'écran) (degré)

$\text{Sec}(\alpha_i)$ = sécante de l'angle $\alpha_i = 1/\cos(\alpha_i)$

C_1 à C_9 = coefficients fonction de la nature de la cible donnée dans le tableau en Figure 16.

Ces expressions ne sont valables que pour des impacts à vitesse supersonique. Leur domaine de validité est donné en Figure 17 ; il dépend de la nature du matériau constituant la cible, de son épaisseur, de la masse et la vitesse du projectile ainsi que de l'angle d'impact du projectile sur la cible.

Matériaux (écrans)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Alliages de magnésium	6,349	1,004	- 1,076	0,966	6,904	1,092	- 1,170	1,050	- 0,007
Aluminium (2024T-3)	6,185	0,903	- 0,941	1,098	7,047	1,029	- 1,072	1,251	- 0,139
Fonte	10,153	2,186	- 2,204	2,156	4,840	1,042	- 1,051	1,028	- 0,523
Alliages de titane	7,532	1,325	- 1,314	1,643	6,292	1,103	- 1,095	1,369	- 0,167
Acier traité	7,694	1,191	- 1,397	1,747	4,356	0,674	- 0,791	0,989	- 0,434
Acier doux	6,523	0,906	- 0,963	1,286	6,399	0,889	- 0,945	1,262	- 0,019
Acier dur	6,601	0,906	- 0,962	1,286	6,475	0,889	- 0,945	1,262	- 0,019
Cuivre	14,065	3,476	- 3,687	4,270	2,785	0,678	- 0,730	0,840	- 0,802
Plomb	10,955	2,735	- 2,753	3,590	1,999	0,499	- 0,502	0,655	- 0,818
Tuballoy	14,773	3,393	- 3,510	5,037	2,537	0,583	- 0,603	0,865	- 0,828
Nylon non chargé	5,006	0,719	- 0,563	-0,852	5,816	0,835	- 0,654	0,990	- 0,162
Nylon chargé	7,689	1,883	- 1,593	1,222	4,672	1,144	- 0,968	0,743	- 0,392
Lexan	7,329	1,814	- 1,652	1,948	2,908	0,720	- 0,657	0,773	- 0,603
Plexiglass moulé	6,913	1,377	- 1,364	1,415	5,243	1,044	- 1,035	1,073	- 0,242
Plexiglass étiré	11,460	3,537	- 2,871	2,274	3,605	1,112	- 0,903	0,715	- 0,686
Doron	5,581	0,750	- 0,745	0,673	7,600	1,021	- 1,014	0,917	- 0,362
Verre blindé	6,991	1,116	- 1,351	1,289	3,743	0,705	- 0,723	0,690	- 0,465

Figure 16 : Coefficient C_i fonction de la nature de la cible impactée [Thor 1961]

Matériaux (écrans) h (cm)	Epaisseur de l'écran m (kg)	Masse de la projection U_0 (m/s)	Vitesse d'impact ∞_i (degré)	Angle d'impact
Alliages de magnésium	0,13 - 7,62	$0,9710^{-3}$ - $15,610^{-3}$	150-3150	0-80
Aluminium (2024T-3)	0,05 - 5,08	$0,3210^{-3}$ - $15,610^{-3}$	360-3300	0-80
Alliages de titane	0,10 - 3,05	$1,9410^{-3}$ - $15,610^{-3}$	210-3120	0 - 45
Fonte	0,48 - 1,42	$0,9710^{-3}$ - $15,610^{-3}$	330-1830	0-70
Acier traité	0,35 - 1,27	$0,9710^{-3}$ - $15,610^{-3}$	750-2940	0-70
Acier homogène	0,07 - 2,54	$0,3210^{-3}$ - $53,510^{-3}$	180-3600	0-70
Cuivre	0,15 - 2,54	$0,9710^{-3}$ - $15,610^{-3}$	330-3420	0-70
Plomb	0,18 - 2,54	$0,9710^{-3}$ - $15,610^{-3}$	150-3120	0-70
Tuballoy	0,25 - 0,50	$1,9410^{-3}$ - $30,810^{-3}$	1350-3030	0-60
Nylon non chargé	0,05 - 7,62	3.10^{-4} - $0,013$	90-3000	0-70
Nylon chargé	1,10 - 5,08	3.10^{-4} - $0,053$	300-3600	0-70
Lexan	0,32 - 2,54	3.10^{-4} - $0,015$	300-3450	0-70
Plexiglass coulé	2,50-2,80	3.10^{-4} - $0,03$	60-2850	0-70
Plexiglass étiré	0,13-2,54	3.10^{-4} - $0,03$	150-3300	0-70
Doron	0,13-3,81	$1,6.10^{-4}$ - $0,04$	150-3300	0-70
Verre blindé	0,50-4,20	$9,7.10^{-3}$ - $0,03$	60-3000	0-70

Figure 17 : Domaine de validité des équations de Thor [Thor 1961]

3.1.1.2 MODÈLE DU « HIGH PRESSURE CODE », EQUATIONS DE COX ET SAVILLE : IMPACT À VITESSE SUBSONIQUE

Le « High Pressure Safety code » (1985, B.G. COX et G. SAVILLE) [Micado 2002] propose une formule empirique permettant de calculer un ordre de grandeur des épaisseurs de pénétration dans l'acier allié et le béton armé pour des gammes de vitesse inférieure à 1000 m/s.

Pour des fragments de masse supérieure à 1 kg et dont le rapport longueur/diamètre est supérieur à 1, l'épaisseur de pénétration x_p (en m) est donnée par :

$$x_p = \frac{CM}{A} \log(1 + 5.10^{-5} V_0^2)$$

avec M : masse du projectile (en kg)

V_0 : vitesse du projectile (en m/s)

A : section apparente du projectile lors de l'impact (en m²)

C : paramètre donné dans le tableau suivant :

Nature du matériau	C
Pierre calcaire	7.10^{-4}
Béton non armé - charge de rupture à la compression 15 MN/m ²	10.10^{-4}
Béton armé – charge de rupture à la compression 22 MN/m ²	6.10^{-4}
Béton armé – charge de rupture à la compression 40 MN/m ²	$3,5.10^{-4}$
Mur de pierres maçonnées	14.10^{-4}
Briquetage	25.10^{-4}
Acier doux	$0,5.10^{-4}$
Acier allié	$0,3.10^{-4}$

Figure 18 : Paramètre de perforation selon la nature du matériau

Le tableau ci-dessous relie différents types de projectiles, satisfaisant aux conditions précédentes, à des épaisseurs de perforation.

Dénomination	M (kg)	V (m/s)	A (m ²)	Ratio K	e acier (mm)	e béton ¹ (mm)
Vanne	35	35	0,06	$20,5 \cdot 10^3$	0,45	5,3
Vanne	35	100	0,06	$58,3 \cdot 10^3$	3,1	36
Fragment de réacteur	50	150	0,02	$375 \cdot 10^3$	25	290
Couvercle de clapet	40	230	0,02	$460 \cdot 10^3$	34	390
Couvercle de cylindre	90	150	0,02	$675 \cdot 10^3$	44	500

Figure 19 : Epaisseurs de perforation en fonction des caractéristiques des projectiles [Micado 2002]

De la lecture-du tableau, on peut retenir qu'il existe un facteur multiplicatif de l'ordre de 10 entre le béton et l'acier, en ce qui concerne l'épaisseur du matériau pour laquelle on observerait une perforation.

Pour de petits fragments ($m < 1\text{ kg}$ et $L/D \cong 1$), la profondeur de pénétration p (en m) peut être calculée par la formule :

$$x_p = KM^{n_1}V_0^{n_2}$$

avec M = masse du fragment (en kg)

V_0 = vitesse du fragment (en m/s)

K , n_1 et n_2 : constantes données ci-dessous

Matériaux	K	n1	n2
Béton à 35MN/m ²	18.10 ⁻⁶	0,4	1,5
Mur de briques	23.10 ⁻⁶	0,4	1,5
Acier doux	6.10 ⁻⁵	0,33	1,0

Figure 20 : Paramètre de perforation selon la nature du matériau

Ces relations ont été établies dans le cadre du dimensionnement de protections d'équipements et sont corrélées à diverses approches parmi lesquelles figure celle de Petry. Contrairement aux équations de Thor, elles sont généralement utilisées pour des vitesses d'impact subsonique. **Elles sont de fait plus adaptées aux problématiques industrielles.**

3.1.1.3 AUTRE FORMULE : CORRÉLATION DE VAN DE BERG

VAN DE BERG (1985) [MICADO 2002] propose une **formule, également adaptée aux problématiques industrielles**, et permettant d'estimer le pouvoir de perforation d'un projectile dans une cible donnée.

La profondeur de pénétration x_p (en m) est estimée comme une fonction :

- de la vitesse d'impact ;
- de la taille et de la masse des fragments ;
- de la nature de la cible.

$$x_p = \frac{2}{\rho_c a_c + \rho_p a_p} V_n \Sigma_s \text{ (en m)}$$

avec V_n : composante normale de la vitesse d'impact (m/s)

Σ_s : masse par unité de surface du projectile (kg/m²)

ρ : densité (kg/m³) et a : vitesse du son affecté des indices c et p désignant respectivement la cible impactée et le projectile

3.1.2 CIBLE EN BETON ET IMPACT DUR LOCALISE

Lors de l'impact d'un projectile non déformable (dur) sur une cible en béton ou en béton armé, la durée du processus de pénétration est en général plus courte que le temps de réponse de la structure globale de la cible. Les effets générés par l'impact sont alors localisés et peuvent se traduire par des phénomènes de **pénétration**, de **perforation** ou encore d'**écaillage**.

De nombreux modèles empiriques ont été développés afin de traduire ces phénomènes locaux. Ce chapitre présente dans un premier temps la formulation généralement adoptée pour décrire ces phénomènes puis dans un second temps un certain nombre de ces corrélations :

- Un modèle développé dans le [TM5-1300 1990] et très utilisé dans le domaine militaire pour des projectiles ayant des vitesses d'impact supersoniques ;
- Des modèles davantage développés pour des vitesses d'impact subsonique (voir Figure 21) et **de ce fait mieux adaptés aux problématiques des effets dominos d'un site industriel.**

Références des modèles empiriques	Nature de la cible	Domaine des vitesses d'impacts du projectile ⁽¹⁾
Formules de Petry et Petry modifiées I et II	Béton / Béton armé	NR ⁽²⁾
Formules de l'ACE « Army corps of engineers » (1943)	Béton	150 <V _o < 900 m/s
Corrélations du NDRC « National Defense Research Committee » adaptées par Kennedy (1946-1976) et Degen	Béton	150 <V _o < 900 m/s (Kennedy)
		25 <V _o < 310 m/s (Degen)
Corrélation de l'UKAEA (United Kingdom Atomic Energy Authority) (Barr)	Béton / Béton armé	25<V _o <300 m/s
Corrélations du CEA-EDF (Berriaud) (1974)	Béton armé	20 <V _o < 200 m/s
Critères du R3 Impact Assessment Procedure	Béton / Béton armé	3<V _o <66 m/s

⁽¹⁾ : Domaine de validité des formules de pénétration pour ce qui est de la vitesse d'impact du projectile

⁽²⁾ : NR : Non renseigné

Figure 21 : Modèles empiriques davantage adaptés aux problématiques industriels

L'ensemble de ces modèles suit une même formulation générale développée ci-dessous.

3.1.2.1 FORMULATION GÉNÉRALE

En règle générale, les lois de prédiction de la profondeur de pénétration s'écrivent $x_p = f(M, V_0, d, N^*; \rho_c, f_c)$ ou sous forme adimensionnelle comme suit :

$$\frac{x_p}{d} = f\left(\frac{MV_0^2}{d^3 f_c}, \frac{M}{\rho_c d^3}, N^*\right)$$

avec

M : masse du projectile

V_0 : vitesse d'impact du projectile

d : diamètre du projectile,

ρ_c : densité du béton de la cible

f_c : contrainte de rupture de compression du béton de la cible

N^* : paramètre sans dimension : facteur de forme de la tête du projectile

Le premier terme $I = \frac{MV_0^2}{d^3 f_c}$ est appelé facteur d'impact (introduit par Haldar et al. (1984)).

Le second terme $\lambda = \frac{M}{\rho_c d^3}$ correspond au rapport $\frac{M}{d^2}$ sur la densité aréolaire $\rho_c d$.

Les deux nombres adimensionnels I et λ définissent le nombre d'endommagement de Johnson couramment utilisé pour déterminer la sévérité d'un impact :

$$\phi_J = \frac{I}{\lambda} = \frac{\rho V_0^2}{f_c}$$

La loi de prédiction de la profondeur de pénétration étant donnée, les épaisseurs limites de perforation et d'écaillage sont alors généralement déterminées au travers d'une relation linéaire ou quadratique fonction de x_p .

Ce faisant, l'endommagement d'une cible donnée en béton ou en béton armé d'épaisseur H_0 peut être alors caractérisé de la façon suivante :

- si $H_0 > e_s$ le projectile restera à l'intérieur de la cible avec une profondeur de pénétration x_p . Le béton sur la face arrière se maintient alors dans le régime élastique.
- si $e_p < H_0 < e_s$ le projectile pénètre la cible et il apparaît un phénomène d'écaillage.
- Enfin si $H_0 < e_p$ le missile peut perforer la cible.

3.1.2.2 MODÈLES DU TM5-1300 : PROJECTILES AYANT UNE VITESSE D'IMPACT SUPERSONIQUE

Le [TM5-1300 1990] propose des formules empiriques permettant de calculer l'épaisseur de pénétration d'un projectile en métal impactant normalement une **plaque en béton** pour des **vitesse supersoniques**.

- Pour un **projectile en acier dit « perforant »** (dont l'indice de dureté est élevé) l'épaisseur de pénétration du projectile dans une plaque supposée d'épaisseur infinie est donnée par :

$$x_p = 4.0 \cdot 10^{-3} (KND)^{0.5} d^{1.1} V_0^{0.9} \text{ si } x_p \leq 2d$$

$$x_p = 4.0 \cdot 10^{-6} KND d^{1.2} V_0^{1.8} + d \text{ si } x_p > 2d \text{ (US)}$$

Avec K : constante de pénétrabilité $K = \frac{12.91}{f_c}$

$$N = 0.72 + 0.25\sqrt{n - 0.25}$$

f_c en psi, d en inch et V_0 en fps

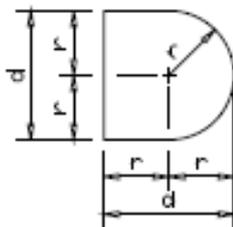
$n = \frac{r}{d}$ avec r : rayon de la tête hémisphérique et d : diamètre du projectile

D : densité : $D = \frac{M_f}{d^3}$; M_f : masse du fragment (en oz.)

Dans le cas où le projectile dit « perforant » est de forme standard semblable à celle décrite en Figure 22, l'épaisseur de pénétration est donnée par :

$$x_p = \sqrt{\frac{4000}{f_c}} 2.86 \cdot 10^{-3} d^{1.1} V_0^{0.9} \text{ si } x_p \leq 2d$$

$$x_p = \sqrt{\frac{4000}{f_c}} 2.04 \cdot 10^{-6} d^{1.2} V_0^{1.8} + d \text{ si } x_p > 2d \text{ (US)}$$



d : diamètre de la partie cylindrique du projectile

r : rayon de la tête hémisphérique du projectile

$r = d/2$, $n = 2$, $N = 0.845$, $D = 2976 \text{ oz/in}^3$

Figure 22 : Forme du projectile de référence

- Pour **les autres types de projectiles en acier**, l'épaisseur de pénétration est donnée par :

$$x'_p = kx_p \text{ (US)}$$

Avec x'_p : épaisseur de pénétration du projectile autre que « perforant »

x_p : épaisseur de pénétration du projectile dit « perforant »

k : paramètre dépendant de la nature du métal constituant le projectile

Nature de l'acier	Acier perforant	Acier doux	Plomb	Aluminium
k	1.00	0.70	0.50	0.15

L'épaisseur de pénétration d'un projectile perforant peut également être obtenue par lecture graphique (Figure 23) pour une cible en béton standard caractérisée par une contrainte de rupture en compression égale à 4000 psi (28 MPa). L'épaisseur de pénétration pour une cible en béton dont la contrainte de compression serait différente est quant à elle donnée par :

$$x'_p = \sqrt{\frac{4000}{f_c}} x_p \text{ (US)}$$

avec x_p : épaisseur de pénétration déterminée par lecture graphique pour une cible en béton de 28 MPa

f_c : contrainte de rupture en compression du béton constituant la cible

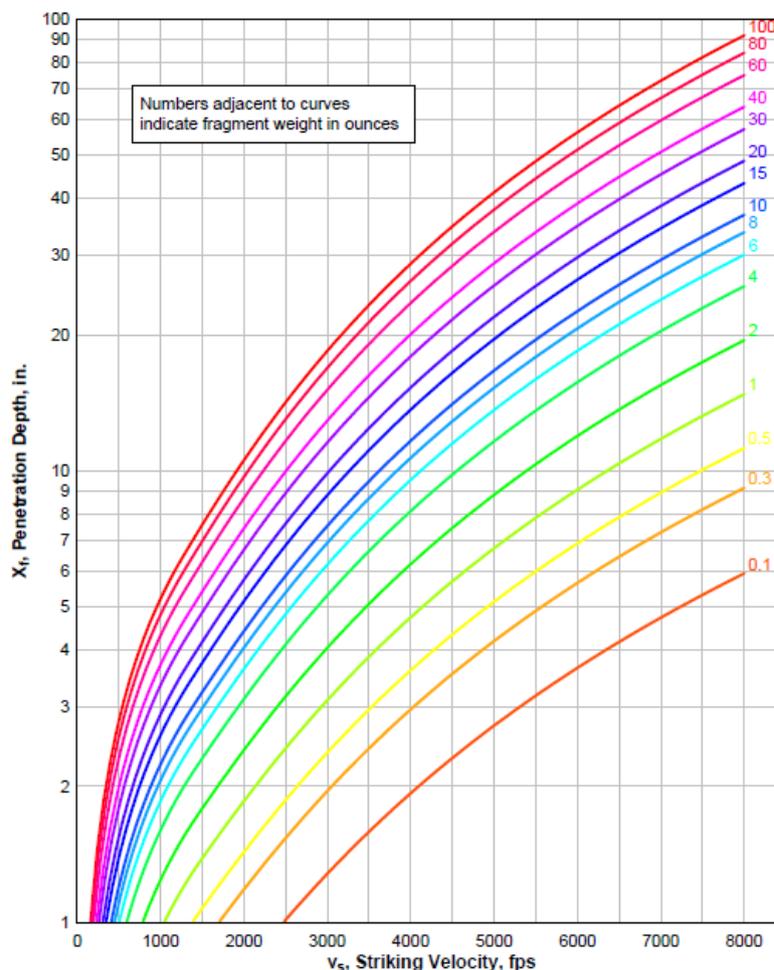


Figure 23 : Epaisseur de pénétration en fonction de la vitesse d'impact et de la masse du projectile en acier « perforant »

- **Pour tout type de projectile en acier**

Le TM5-1300 propose également une formule permettant d'estimer l'épaisseur de « juste » perforation c'est-à-dire l'épaisseur minimale afin d'éviter la perforation de la cible :

$$\frac{e_p}{d} = 1.13 \frac{x_p}{d^{0.9}} + 1.311 \quad (\text{US})$$

La vitesse résiduelle V_r après perforation d'une plaque en béton d'épaisseur H_o suite à un impact normal d'un projectile en acier est alors donnée par :

$$\frac{V_r}{V_0} = \left(1 - \left(\frac{H_o}{e_p} \right)^2 \right)^{0.555} \quad (\text{US})$$

L'épaisseur limite d'écaillage e_s est quand à elle donnée par :

$$\frac{e_s}{d} = 1.215 \frac{x_p}{d^{0.9}} + 2.12 \quad (\text{US})$$

3.1.2.3 FORMULES DE PETRY ET PETRY MODIFIÉES (1910)

Les formules de Petry « modifiées » sont parmi les formules les souvent rencontrées dans la littérature anglo-saxonne. Elles sont basées sur la loi de prédiction empirique la plus ancienne disponible dans la littérature et originellement développées en 1910. Elles permettent de prédire l'épaisseur de pénétration d'un projectile dans une cible en béton ou en béton armé d'épaisseur infini.

$$\frac{x_p}{d} = k \frac{M}{d^3} \log_{10} \left(1 + \frac{V_0^2}{19.974} \right) \quad (\text{SI})$$

avec $k = 0.0795 K_p$

K_p : coefficient de pénétrabilité. Il s'intègre de deux façons différentes dans la formule de Petry pour donner les formules de Petry modifiées I et II.

- Formule de Petry modifiée I : le coefficient K_p est une constante (fonction du pourcentage d'armature de l'ouvrage concerné) ;

	Béton non armé	Béton armé : taux d'armature normal	Béton armé : taux d'armature élevé
K_p	0.00799	0.00426	0.00284

Figure 24 : Coefficient de pénétrabilité

- Formule de Petry modifiée II : le coefficient K_p est une fonction de la résistance en compression du béton (courbe de référence : K_p est une fonction exponentielle décroissante de la résistance en compression).

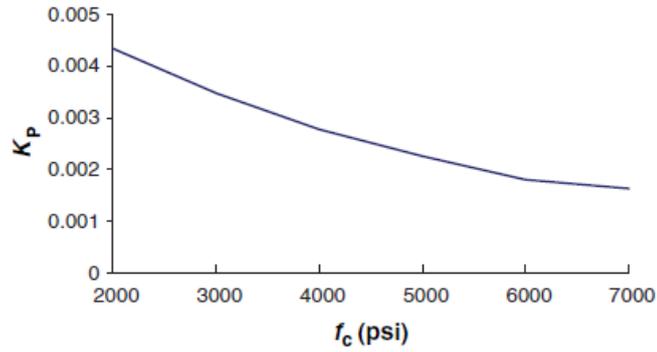


Figure 25 : Evolution de K_p en fonction de la résistance en compression f_c du béton (Li [2005])

A partir des formules précédentes, Amirikian [Li 2005] a proposé les formules suivantes afin de prédire les épaisseurs de perforation et d'écaillage.

- Epaisseur de pénétration : $\frac{e_p}{d} = 2 \frac{x_p}{d}$
- Epaisseur de juste perforation : $\frac{e_s}{d} = 2.2 \frac{x_p}{d}$

3.1.2.4 FORMULES DE L'ACE « ARMY CORPS OF ENGINEERS » (1943)

Ces formules sont basées sur les résultats expérimentaux réalisés en 1943 par l'armée américaine. Elles sont plutôt orientées pour du **béton non armé** et sont valables pour des **vitesses variant de 150 m/s à 900 m/s** et des **masses de projectiles** relativement **importantes** (supérieure à 180 kg). Par ailleurs, elles ne prennent pas en compte la forme du projectile.

		Domaines de validité
Epaisseur de pénétration	$\frac{x_p}{d} = \frac{3.5 \cdot 10^{-4} M}{\sqrt{f_c} d^3} d^{0.215} V_0^{1.5} + 0.5$ (SI)	150 < Vo < 900 m/s 10.5 < f_c < 56 MPa 2.5 < D < 40 cm 180 < M < 1120 kg
Epaisseur de juste perforation	$\frac{e_p}{d} = 1.23 + 1.07 \frac{x_p}{d}$ si $1.35 < \frac{x_p}{d} < 13.5$ ou $3 < \frac{e_p}{d} < 18$	
Epaisseur limite d'écaillage	$\frac{e_s}{d} = 2.28 + 1.13 \frac{x_p}{d}$ si $0.65 < \frac{x_p}{d} < 11.75$ ou $3 < \frac{e_s}{d} < 18$	

3.1.2.5 CORRÉLATIONS DU NDRC « NATIONAL DEFENSE RESEARCH COMMITTEE » ADAPTÉES PAR KENNEDY [] (1946, 1966) ET DEGEN

S'inspirant des formules développées par l'ACE et d'autres données expérimentales, le NDRC a développé en 1946 une autre loi permettant de prédire la profondeur de pénétration dans une cible en béton (plutôt non armé).

Kennedy propose en 1966 une adaptation de cette formulation ainsi des formulations proposées par l'ACE afin de prédire la limite de perforation et d'écaillage [Li 2005]. Comme pour le modèle de l'ACE, elles sont plutôt orientées **béton non armé** et sont valables pour des **vitesse d'impact de l'ordre de 150 m/s à 900 m/s**. Elles **prennent cependant en compte la forme du nez du projectile**.

Forme de la partie impactante du projectile (nez du projectile)	Plate	Hémisphérique	Emoussée	Très pointue
N° Facteur de forme associé	0.72	0.84	1.0	1.14

Figure 26 : Facteur de forme associé à la partie impactante du projectile

		Domaines de validité
Epaisseur de pénétration	$G = 3.8 \cdot 10^{-5} \frac{N^* M}{d \sqrt{f_c}} \left(\frac{V_0}{d} \right)^{1.8} \text{ (SI)}$ $\frac{x_p}{d} = 2G^{0.5} \text{ si } G \geq 1, \quad \frac{x_p}{d} = G + 1 \text{ si } G < 1,$	150 < V ₀ < 900 m/s 10.5 < f _c < 56 MPa 2.5 < D < 40 cm 180 < M < 1120 kg
Epaisseur de juste perforation	$\frac{e_p}{d} = 3.19 \frac{x_p}{d} - 0.718 \left(\frac{x_p}{d} \right)^2 \text{ si } \frac{x_p}{d} \leq 1.35 \text{ ou } \frac{e_p}{d} \leq 3$ $\frac{e_p}{d} = 1.32 + 1.24 \frac{x_p}{d} \text{ si } 1.35 < \frac{x_p}{d} < 13.5 \text{ ou } 3 < \frac{e_p}{d} < 18$	
Epaisseur limite d'écaillage	$\frac{e_s}{d} = 7.91 \frac{x_p}{d} - 5.06 \left(\frac{x_p}{d} \right)^2 \text{ si } \frac{x_p}{d} \leq 0.65 \text{ ou } \frac{e_s}{d} \leq 3$ $\frac{e_s}{d} = 2.12 + 1.36 \frac{x_p}{d} \text{ si } 0.65 < \frac{x_p}{d} < 11.75 \text{ ou } 3 < \frac{e_s}{d} < 18$	

Degen [Li 2005] propose, à partir d'analyses statiques et de données expérimentales, une autre formulation de l'épaisseur de juste perforation et d'écaillage pour des vitesses d'impact subsonique.

		Domaines de validité
Epaisseur de juste perforation	$\frac{e_p}{d} = 2.2 \frac{x_p}{d} - 0.3 \left(\frac{x_p}{d} \right)^2 \text{ si } \frac{x_p}{d} \leq 1.52 \text{ ou } \frac{e_p}{d} \leq 2.65$	25.0 < V ₀ < 311.8 m/s 28.4 < f _c < 43.1 MPa
Epaisseur limite d'écaillage	$\frac{e_p}{d} = 0.69 + 1.29 \frac{x_p}{d} \text{ si } 1.52 < \frac{x_p}{d} < 13.42 \text{ ou } 2.65 < \frac{e_p}{d} < 18$	0,10 < d < 0,31 m 0,15 < H ₀ < 0,61 m

3.1.2.6 CORRÉLATION DE L'UKAEA (UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY)

Barr [Li 2005] propose une adaptation des formules développées par le NDRC pour de plus faibles **vitesse d'impact variant de 25 à 300 m/s** relevant plus du **domaine de l'accident industriel** que du domaine militaire.

		Domaines de validité
Épaisseur de pénétration	$G = 3.8 \cdot 10^{-5} \frac{N^* M}{d \sqrt{f_c}} \left(\frac{V_0}{d} \right)^{1.8} \quad (\text{SI})$ $\frac{x_p}{d} = 0.275 - (0.07656 - G)^{0.5} \quad \text{si } G \leq 0.0726,$ $\frac{x_p}{d} = (4G - 0.242)^{0.5} \quad \text{si } 0.0726 \leq G \leq 1.0605,$ $\frac{x_p}{d} = G + 0.9395 \quad \text{si } G \geq 1.0605$	<p>25 < V₀ < 300 m/s</p> <p>22 < f_c < 44 MPa</p> <p>5000 < $\frac{M}{d^3}$ < 200000 kg/m³</p>
Vitesse de juste perforation	<p>$V_p = V_a$ si $V_a \leq 70$ m/s</p> <p>$V_p = V_a \left(1 + \left(\frac{V_a}{500} \right)^2 \right)$ si $V_a > 70$ m/s</p> <p>avec</p> $V_a = 1.3 \rho_c^{\frac{1}{6}} k_c^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p H_0^2}{\pi M} \right)^{\frac{2}{3}} (r + 0.3)^{\frac{1}{2}} \left(1.2 - 0.6 \left(\frac{c_r}{H_0} \right) \right) \quad \text{si } 0.12 < \frac{c_r}{H_0} < 0.49$ $V_a = 1.3 \rho_c^{\frac{1}{6}} k_c^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p H_0^2}{\pi M} \right)^{\frac{2}{3}} (r + 0.3)^{\frac{1}{2}} \quad \text{si } \frac{c_r}{H_0} > 0.49$ <p>k_c : k_c=f_c si f_c<37 MPa k_c=37 MPa si f_c≥ 37 MPa H₀ : épaisseur de la cible p : périmètre de la section du projectile r : pourcentage d'armatures en acier c_r : espacement entre les armatures</p>	<p>Projectile à tête plate</p> <p>11 < V₀ < 300 m/s</p> <p>22 < f_c < 52 MPa</p> <p>150 < $\frac{M}{p^2 H_0^3}$ < 10⁴ kg/m³</p> <p>0.33 < $\frac{H_0}{p/\pi}$ < 5.0</p> <p>0 < r < 0.75 %</p>
Épaisseur limite d'écaillage	$\frac{e_s}{d} = 5.3 \left(0.55 \frac{x_p}{d} - \left(\frac{x_p}{d} \right)^2 \right)^{0.33} \quad \text{si } \frac{x_p}{d} \leq 0.22$ $\frac{e_s}{d} = 5.3 \left(\left(\frac{x_p}{2d} \right)^2 + 0.0605 \right)^{0.33} \quad \text{si } 0.22 \leq \frac{x_p}{d} \leq 2.0$ $\frac{e_s}{d} = 5.3 \left(\frac{x_p}{d} + 0.9395 \right) \quad \text{si } \frac{x_p}{d} \geq 2.0$	<p>29 < V₀ < 238 m/s</p> <p>26 < f_c < 44 MPa</p> <p>3000 < $\frac{M}{d^3}$ < 222200 kg/m³</p>

Les formules ci-dessus tiennent compte de la forme du nez du projectile au travers d'un facteur N* dont les valeurs sont à trouver dans le tableau ci-dessous.

Forme de la partie impactante du projectile	Plate	Hémisphérique	Arrondie	Très pointue
N° Facteur de forme associé	0.72	0.84	1.0	1.14

Figure 27 : Facteur de forme associé au projectile

L'estimation de la vitesse limite de perforation n'est valable que pour un projectile à tête plate. Pour d'autres types de projectile, Barr [Li 2005] estime toutefois que la formule permet de donner une estimation conservatrice de la pénétration. Pour des projectiles à tête hémisphérique ayant un diamètre approximativement égal à l'épaisseur de la cible ou de forme plus pointue, la vitesse de juste perforation est supérieure d'environ 30 % comparée à celle d'un projectile à tête plate de même masse et de mêmes dimensions.

3.1.2.7 CORRÉLATIONS DU COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE (CEA) ET ÉLECTRICITÉ DE FRANCE (EDF) (1974)

Le CEA-EDF a réalisé dans le cadre d'un programme de recherche, débuté en 1974, des essais expérimentaux où masses, dimensions et vitesses d'impact des projectiles variaient ainsi que la résistance en compression et la nature du renforcement dans les cibles. À partir de ces essais, Berriaud [Li 2005] a développé une corrélation permettant d'estimer la vitesse limite de perforation ainsi que l'épaisseur de juste perforation d'une **plaque en béton armé** d'épaisseur H_0 dont la **densité d'armatures** est comprise entre **100 et 250 kg/m³** pour des vitesses de projectile.

		Domaines de validité
Vitesse limite de perforation	$V_p = 1.3 \rho_c^{\frac{1}{6}} f_c^{\frac{1}{2}} \left(\frac{dH_0^2}{M} \right)^{\frac{2}{3}}$ (SI)	20 < Vo < 200 m/s 30 < f_c < 45 MPa
Épaisseur de juste perforation	$\frac{e_p}{d} = 0.82 \frac{M^{\frac{1}{2}} V_0^{\frac{3}{4}}}{\rho_c^{\frac{1}{8}} f_c^{\frac{3}{8}} d^{\frac{3}{2}}}$ (SI)	100 kg/m ³ < densité d'armatures < 250 kg/m ³ 0,5 < $\frac{D}{H_0}$ < 1,5

Sliter [Sliter 1980] a examiné la fiabilité de cette loi de prédiction à travers un nombre relativement important d'essais révélant alors une **bonne adéquation entre la prédiction des vitesses balistiques et les données expérimentales**.

Fullard [Fullard 1991] a par la suite modifié cette loi en prenant en compte l'influence du taux d'armature r_d :

$$V_p = 1.3 \rho_c^{\frac{1}{6}} f_c^{\frac{1}{2}} \left(\frac{pH_0^2}{\pi M} \right)^{\frac{2}{3}} (r_d + 0.3)^{\frac{1}{2}} \text{ (SI)}$$

avec p le périmètre de la section du missile.

3.1.2.8 CRITÈRES DU R3 IMPACT ASSESSMENT PROCEDURE

Les formules précédentes sont en général valables pour des vitesses d'impact subsoniques relativement importantes voir supersoniques. [Reid et Wen 2001] et le [BNFL 2003] proposent des formules afin de traduire les **effets locaux de pénétration, perforation et d'écaillage d'un impact « dur » sur une cible en béton ou en béton armé pour une gamme de vitesses inférieures à 60 m/s.**

Ces formulations sont particulièrement développées puisqu'elles prennent en compte la forme du projectile, le caractère armé ou non du béton avec la présence éventuelle d'armature (pourcentage et espacement).

- Epaisseur de pénétration :

$$\frac{x_p}{d} = \frac{2}{\pi} \frac{N^*}{0.72} \frac{MV_0}{\sigma_t d^3} \quad (\text{SI})$$

$$\text{avec } \sigma_t = 4.2f_c + 135 \cdot 10^6 + (0.014f_c + 0.45 \cdot 10^6) V_0 \quad (\text{SI})$$

Forme de la partie impactante du projectile	Plate	Hémisphérique	Arrondie	Très pointue
N° Facteur de forme associée	0.72	0.84	1.0	1.13

Cette formule est valable à condition de respecter les hypothèses suivantes :

- $3 < V_0 < 66.2$ m/s
- $50 < d < 600$ mm
- $35 < M < 2500$ kg
- $0 < \frac{x_p}{d} < 2.5$

Par la suite, elles sont exprimées en termes d'énergie cinétique seuil ou critique du projectile.

		Domaines de validité
Energie cinétique critique de perforation	$\frac{E_p}{\eta \sigma_t d^3} = -0.00506 \left(\frac{H_0}{d} \right) + 0.01506 \left(\frac{H_0}{d} \right)^2 \quad \text{si } 0 < \frac{H_0}{d} \leq 1$ $\frac{E_p}{\eta \sigma_t d^3} = -0.01 \left(\frac{H_0}{d} \right) + 0.02 \left(\frac{H_0}{d} \right)^3 \quad \text{si } 1 \leq \frac{H_0}{d} < 5$ $\frac{E_p}{\sigma_t d^3} = \frac{\pi}{4} \left(\left(\frac{H_0}{d} \right) - 3.0 \right) \quad \text{si } \frac{H_0}{d} \geq 5$	$0 < V_0 < 427$ m/s $22 < d < 600$ mm $1 < M < 2622$ kg $19.9 < f_c < 78.5$ MPa $0 < r < 4$ % $50.8 < H_0 < 640$ mm $0 < \frac{x_p}{d} < 2.5$
Energie cinétique critique d'écaillage	$\frac{E_s}{\eta \sigma_t d^3} \frac{N^*}{0.72} = -0.005441 \left(\frac{H_0}{d} \right) + 0.01386 \left(\frac{H_0}{d} \right)^2 \quad \text{si } 0.5 \leq \frac{H_0}{d} < 5$ $\frac{E_s}{\sigma_t d^3} \frac{N^*}{0.72} = \frac{\pi}{4} \left(\left(\frac{H_0}{d} \right) - 4.3 \right) \quad \text{si } \frac{H_0}{d} \geq 5$	
Energie cinétique critique du	$\frac{E_c}{\eta \sigma_t d^3} = -0.00031 \left(\frac{H_0}{d} \right) + 0.00113 \left(\frac{H_0}{d} \right)^2 \quad \text{si } 0 < \frac{H_0}{d} \leq 2$	-

projectile
causant une
fissuration
en cône

$$\frac{E_c}{\eta \sigma_t d^3} = -0.00325 \left(\frac{H_0}{d} \right) + 0.00130 \left(\frac{H_0}{d} \right)^3 \text{ si } 2 \leq \frac{H_0}{d} < 5$$

$$\frac{E_c}{\sigma_t d^3} = \frac{\pi}{4} \left(\left(\frac{H_0}{d} \right) - 4.7 \right) \text{ si } \frac{H_0}{d} \geq 5$$

Dans l'ensemble des 3 dernières formules, le paramètre η est déterminé par :

$$\eta = \begin{cases} \frac{3}{8} \left(\frac{d}{C_r} \right) r_t + 0.5 & \text{si } \left(\frac{d}{C_r} < \sqrt{\frac{d}{d_r}} \right) \\ \frac{3}{8} \left(\sqrt{\frac{d}{d_r}} \right) r_t + 0.5 & \text{si } \left(\frac{d}{C_r} \geq \sqrt{\frac{d}{d_r}} \right) \end{cases}$$

avec $\begin{cases} d_r : \text{diamètre des armatures en acier de la cible} \\ C_r : \text{espacement entre les armatures} \\ r_t = 4r \text{ avec } r \text{ le pourcentage d'armature dans la cible : } r = \frac{\pi d_r^2}{4 H_0 C_r} \end{cases}$

Il est à noter que le mode de rupture par fissuration par cône est un mode de rupture local important dans le cas d'une enceinte en béton armé contenant du gaz ou un liquide pressurisé.

3.1.2.9 COMPARAISON DES CORRÉLATIONS EMPIRIQUES

Des modèles pour des vitesses d'impact supersonique, d'autres pour des vitesses subsoniques

Les modèles empiriques proposées ci-dessus sont parmi les modèles les plus couramment utilisées. Les modèles développés par le TM5-1300 permettent d'étudier des impacts pour des vitesses supersoniques. Les autres sont valables pour des vitesses d'impact subsoniques. Parmi elles, les formulations de Petry, de l'ACE ou encore du NDRC sont largement reconnues pour le dimensionnement de structures de type protection.

Influence du facteur de forme

La plupart de ces formulations (à l'exception des formules de Petry) tiennent compte de l'influence du facteur de forme du nez du projectile dans la détermination de l'épaisseur de pénétration. Cependant, il n'y a pas d'unicité dans la façon de le définir et il faut être vigilant sur les différents coefficients adoptés. Li et Chen [Li et Chen 2003] suggèrent d'ailleurs la nécessité de définir un unique facteur de forme. Cet aspect, associé au fait que les formules peuvent parfois être dépendantes des unités dans lesquelles elles sont établies, pose des difficultés pour mener des analyses paramétriques ou encore permettre de comparer les modèles entre eux ou à des résultats expérimentaux.

Prise en compte du taux d'armatures

Par ailleurs, dans la plupart des corrélations étudiées, le taux de renforcement de la cible est rarement considéré. Les formulations de Petry modifié I et II proposent toutefois une approche forfaitaire. Celles proposées par Fullard, extension de la formule du CEA-EDF, par l'UKAKEA ou encore par « R3 Impact Assessment Procedure », permettent également de prendre en compte ce paramètre de manière plus fine notamment pour prédire le phénomène de perforation.

Un domaine de validité limité

Les modèles proposés sont issus de données expérimentales. De ce fait, ils ne sont valables que sur un domaine précis correspondant à celui des essais. Cependant, diverses comparaisons de formules empiriques où les paramètres du projectile sont fixés (par exemple Kennedy : projectile de 45.45 kg, de 15.24 cm de diamètre, à nez arrondi ou encore Berriaud : projectile de 30 et 50 kg [Yankelevsky 1997] et [Li 2005]) montrent que **le modèle du NDRC modifié peut être considéré comme une formule représentative des formules empiriques afin de prédire l'épaisseur de pénétration d'un projectile rigide pour des vitesses inférieures à 300 m/s.** Il a en effet tendance à moyenniser les résultats issus des modèles empiriques. Il en est également de même pour le phénomène de perforation (voir Figure 28 et Figure 29).

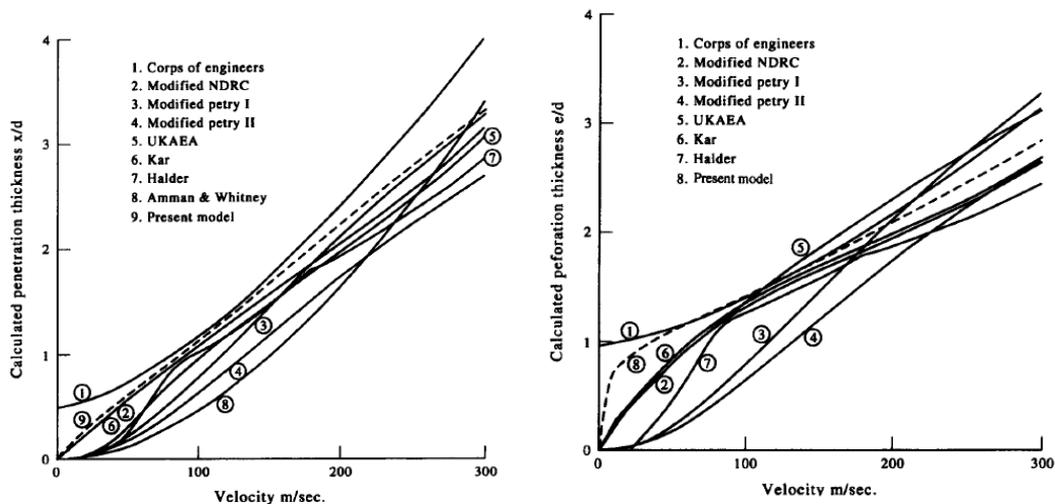


Figure 28 : Comparaison entre différents modèles empiriques [Yankelevsky 1997]

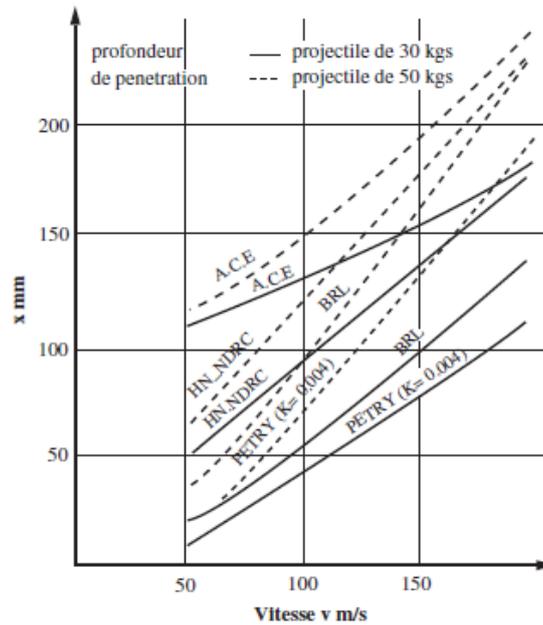


Figure 29 : Comparaison de différents modèles empirique [Li 2005]

Le manuel ARLCD-SP-84001, de « US Department of Defense Explosive Safety Board », recommande d'ailleurs l'utilisation des **formules modifiées du NDRC pour les phénomènes de pénétration et de perforation mais aussi pour traduire l'écaillage.**

Le manuel ESL-TR-87-57 de l'« US Air Force » favorise quant à lui **l'approche modifiée développée par le NDRC pour la pénétration et les formules de l'ACE pour le calcul des phénomènes de perforation et d'écaillage.**

Le plus récent, à savoir le manuel de la « British Army » recommande plutôt les **formules de l'UKAEA pour calculer la pénétration et l'écaillage, et celles développées par le CEA et EDF pour la perforation.**

La plupart de ces formulations sont plutôt utilisées dans la partie supérieure du domaine des vitesses subsoniques pour lesquelles elles donnent des résultats cohérents.

Par contre **pour des vitesses plus basses**, des différences importantes apparaissent (Figure 28 et Figure 29). C'est pourquoi, **on préférera l'utilisation d'autres formules comme celles proposées dans le « R3 Impact Assessment Procedure »** basées sur le travail de l'UMIST afin de prédire l'ensemble des phénomènes. Ces formules sont en effet valables pour des vitesses d'impact basses à intermédiaires (60 m/s). Pour de faibles vitesses, l'épaisseur de pénétration peut aussi être calculée à partir de modèles semi-analytiques développés par Li and Chen [Li and Chen 2003] et détaillés au chapitre 3.2.3.1.

3.1.3 CIBLE EN ACIER ET IMPACT DUR LOCALISÉ

De nombreux modèles empiriques ont été développés pour traduire les effets locaux d'un impact de projectile non déformable (dur) sur une cible en acier. L'impact est dans la majorité des cas considérés comme normal à la cible.

Comme pour les cibles en béton, ce chapitre a pour vocation de présenter des modèles empiriques couramment utilisés afin d'évaluer les phénomènes de pénétration et de perforation :

- Un modèle très utilisé dans le domaine militaire (formules du TM5-1300) pour des projectiles ayant des vitesses d'impact supersoniques ;
- Des modèles davantage développés pour des impacts à vitesses d'impact subsonique de plaque en acier ;
- Des modèles particulièrement adaptés aux impacts à vitesse subsonique de parois de réservoirs atmosphériques ou pressurisés ou encore de canalisation.

Les deux dernières catégories sont les mieux adaptées aux problématiques des effets dominos d'un site industriel.

3.1.3.1 IMPACT DE PAROIS : PROJECTILE AYANT UNE VITESSE D'IMPACT SUPERSONIQUE

Le [TM5-1300 1990] propose des formules empiriques permettant de calculer **l'épaisseur de pénétration d'un projectile en métal impactant une plaque en acier doux pour des vitesses supersoniques**. Ces formules sont données pour un impact normal et dépendent de la dureté relative du projectile par rapport à la plaque.

- **Pour un projectile en acier dit « perforant »** (dont l'indice de dureté est élevé) l'épaisseur de pénétration est donnée par :

$$x_p = 2.35 \cdot 10^{-5} M_f^{0.33} V_o^{1.22} \text{ (SI)}$$

Avec M_f : masse du projectile (en kg)

V_o : vitesse d'impact du projectile (en m/s) (SI)

- **Pour les autres types de projectiles**, l'épaisseur de pénétration est donnée par :

$$x'_p = kx_p \text{ (SI)}$$

Avec k : paramètre dépendant de la nature du métal constituant le projectile

Nature de l'acier	Acier perforant	Acier doux	Plomb	Aluminium
K	1.00	0.70	0.50	0.15

L'épaisseur de pénétration peut également être obtenue par lecture graphique pour deux configurations parmi celles proposées pour les formules :

- Projectile en acier perforant ;
- Projectile en acier doux.

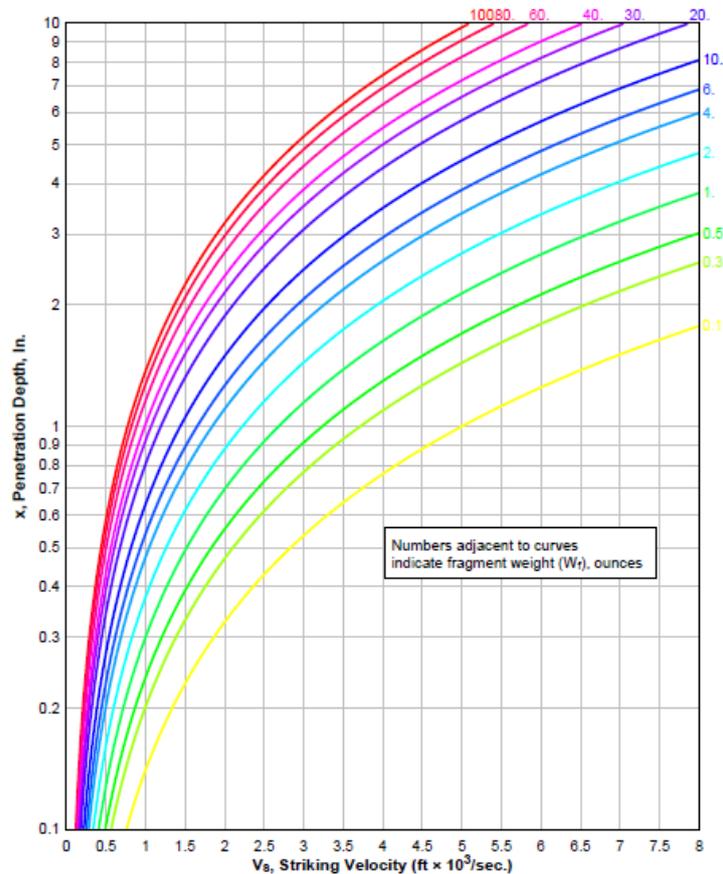


Figure 30 : Epaisseur de pénétration en fonction de la vitesse d'impact et de la masse du projectile en acier « perforant »

Le TM5-1300 propose également le calcul de la vitesse résiduelle V_r après perforation d'une plaque en acier d'épaisseur H_0 suite à un impact normal d'un projectile également en acier.

$$\frac{V_r}{V_0} = \frac{\left(1 - \left(\frac{V_c}{V_0}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(1 + \frac{H_0}{d}\right)}$$

Avec V_0 : vitesse d'impact du projectile

d : diamètre de la partie cylindrique du projectile

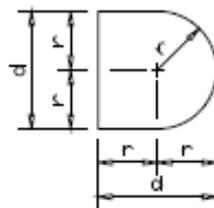


Figure 31 : Forme du projectile de référence

La vitesse peut être calculée à partir des équations précédentes en substituant l'épaisseur de pénétration par l'épaisseur H_0 de la plaque considérée.

3.1.3.2 IMPACT DE PAROIS : PROJECTILE AYANT UNE VITESSE D'IMPACT SUBSONIQUE

Par la suite, sont présentées les formules empiriques les plus couramment utilisées traduisant la perforation de plaques métalliques suite à un impact subsonique. **Ce domaine de vitesse est typiquement celui des fragments engendrés lors d'une explosion industrielle.**

Le critère est donné par la détermination d'une énergie cinétique critique de perforation du projectile définie par :

$$E_{cr} = f(d, H_0, w, L, \sigma_u, \beta)$$

avec

d : diamètre du projectile,

L : longueur du projectile,

H_0 : épaisseur de la plaque cible

w : longueur de la plaque cible

σ_u : contrainte de rupture de traction de l'acier de la plaque cible

β : facteur de forme de la tête du projectile

Si l'énergie cinétique du projectile E_c lors de l'impact est supérieure à l'énergie cinétique critique de perforation E_{cr} alors il y a perforation de la cible.

Il est en général exprimé de manière adimensionnelle :

$$\frac{E_{cr}}{\sigma_u d^3} = g\left(\frac{H_0}{d}, \frac{w}{d}, \frac{L}{d}, \beta\right)$$

ou encore

$$\frac{E_{cr}}{\sigma_u d^3} = g\left(\frac{H_0}{d}, \frac{w}{d}, \frac{L}{d}\right) \text{ pour une forme de la tête du projectile donnée.}$$

De manière pratique, le rapport $\frac{L}{d}$ n'apparaît pas explicitement dans les formulations mais permet de définir le domaine d'application. Ainsi l'énergie critique de perforation dépend essentiellement de deux paramètres adimensionnels $\frac{H_0}{d}$ (paramètre le plus influent) et $\frac{w}{d}$.

Les formules peuvent être classées en 2 catégories selon la forme de la tête du projectile :

- projectiles à tête conique ou hémisphérique,
- projectiles à tête plate.

3.1.3.2.1 PROJECTILES À TÊTE HÉMISPHERIQUE

Référence	Formules	Domaine de validité	
		Projectiles	Cibles
Othe et al. (1982)	$\frac{E_{cr}}{\sigma_u d^3} = \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_u} \right) \left(\frac{H_0}{d} \right)^3 \left(1 + 2.9 \left(\tan \left(\frac{\beta}{2} \right) \right)^{2.1} \right)^{1.5}$ <p style="text-align: center;">pour</p> $\frac{H_0}{d} > d_e = \left(1 + 2.9 \left(\tan \left(\frac{\beta}{2} \right) \right)^{2.1} \right)^{-1}$ $\frac{E_{cr}}{\sigma_u d^3} = \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_u} \right) \left(\frac{H_0}{d} \right)^{1.5}$ <p style="text-align: center;">pour $\frac{H_0}{d} \leq d_e = \left(1 + 2.9 \left(\tan \left(\frac{\beta}{2} \right) \right)^{2.1} \right)^{-1}$</p> $\sigma_r = 3 \cdot 10^8 \text{ kgf/m}^2$	<p style="text-align: center;">Projectiles coniques</p> <p style="text-align: center;">$25 < V_0 < 180 \text{ m/s}$</p> <p style="text-align: center;">$d_e > d$</p>	<p style="text-align: center;">$H_0 = 7-38 \text{ mm}, 0.08 < \frac{H_0}{d} < 0.45,$</p> <p style="text-align: center;">$\frac{w}{H_0} > 39, 4.7 < \frac{w}{d} < 11.4$</p> <p style="text-align: center;">$\sigma_u = 490 \text{ MPa}$</p>
SRI modifié par Corbett et Reid (1993)	$\frac{E_{cr}}{\sigma_u d^3} = 3.285 \left(\frac{H_0}{d} \right)^2 + 0.0077 \left(\frac{H_0}{d} \right) \left(\frac{w}{d} \right)$	<p style="text-align: center;">Projectiles hémisphériques</p> <p style="text-align: center;">$100 < V_0 < 250 \text{ m/s}$</p>	<p style="text-align: center;">$0.2 < \frac{H_0}{d} < 0.6, 31 < \frac{w}{H_0} < 83$</p>
Neilson modifié par Corbett et Reid(1993)	$\frac{E_{cr}}{\sigma_u d^3} = 0.9 \left(\frac{H_0}{d} \right)^{1.7} \left(\frac{w}{d} \right)^{0.6}$	<p style="text-align: center;">Projectiles hémisphériques</p> <p style="text-align: center;">$100 < V_0 < 250 \text{ m/s}$</p>	<p style="text-align: center;">$1 < H_0 < 25 \text{ mm}, 0.2 < \frac{H_0}{d} < 0.6,$</p> <p style="text-align: center;">$31 < \frac{w}{H_0} < 83$</p>

3.1.3.2.2 PROJECTILES À TÊTE PLATE

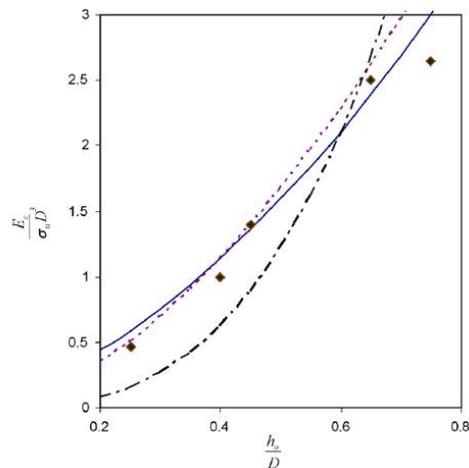
Référence	Formules	Domaine de validité	
		Projectiles	Cibles
Wen et Jones (1992)	$\frac{E_{cr}}{\sigma_u d^3} = 2 \left(\left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u} \right) \left(\frac{H_0}{d} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_u} \right) \left(\frac{w}{d} \right)^{0.21} \left(\frac{H_0}{d} \right)^{1.27} \right)$	<p>Vo < 20 m/s Tête plate ou arrondie</p>	<p>$0.4 < \frac{H_0}{d} < 1.6, 25 < \frac{w}{H_0} < 100$ $\frac{w}{d} < 40, 340 < \sigma_u < 440$ MPa</p>
SRI (1963)	$\frac{E_{cr}}{\sigma_u d^3} = 4.150 \left(\frac{H_0}{d} \right)^2 + 0.097 \left(\frac{H_0}{d} \right) \left(\frac{w}{d} \right)$	<p>21 < Vo < 122 m/s $10 < \frac{L}{d} < 50$</p>	<p>$0.1 < \frac{H_0}{d} < 0.6, 0.002 < \frac{H_0}{L} < 0.05$ $3 < \frac{w}{d} < 8$</p>
Neilson (1993)	$\frac{E_{cr}}{\sigma_u d^3} = 1.38 \left(\frac{H_0}{d} \right)^{1.68} \left(\frac{w}{d} \right)^{0.61} \text{ si } 4 < \frac{w}{d} < 22.0$ $\frac{E_{cr}}{\sigma_u d^3} = 9.09 \left(\frac{H_0}{d} \right)^{1.68} \text{ si } \frac{w}{d} \geq 22.0$	<p>10 < Vo < 100 m/s $\frac{L}{d} > 13$ (projectiles longs), 32 < d < 85 mm 1 < M < 20 kg</p>	<p>$0.14 < \frac{H_0}{d} < 0.64,$ $4 < \frac{w}{d} < 22$ (sinon $\frac{w}{d} = 22.0$) 1 < H₀ < 25 mm</p>
BRL (1968)	$\frac{E_{cr}}{\sigma_u d^3} = \frac{1.44 \cdot 10^9}{\sigma_u} \left(\frac{H_0}{d} \right)^{1.5}$	<p>57 < Vo < 270 m/s $1.25 < \frac{L}{d} < 8$</p>	<p>$0.1 < \frac{H_0}{d} < 1.0, 8 < \frac{w}{d} < 35$ 315 < σ_u < 500 MPa</p>

3.1.3.2.3 COMPARAISON DES MODÈLES EMPIRIQUES ET MODÈLE INERIS

Quelque soit la forme du projectile, le **domaine de validité de chacune des formules proposées est relativement spécifique** correspondant au domaine pour lesquels les données expérimentales ont été obtenues.

Projectiles à tête hémisphérique :

Peu de formules empiriques existent afin de prédire l'énergie critique de perforation d'une plaque en acier par un projectile à tête conique ou hémisphérique. **Les adaptations des modèles du SRI ou de Neilson proposée par Corbett et Reid (1993) ou encore la formule d'Othe [Li 2008] sont les plus couramment utilisées dans le domaine des vitesses subsoniques.** En comparant ces formules avec les données expérimentales obtenues par Corbett et Reid (1993), la formule d'Othe semble cependant être la plus conservatrice pour des valeurs de $\frac{H_0}{d} < 0.6$.



{curve designation is: (----) modified SRI (Corbett and Reid, 1993), (---) modified Neilson (Corbett and Reid, 1993), (-.-.-) Othe ($\beta = 65^\circ$) (Othe et al., 1982), (◆) experimental data (Corbett and Reid, 1993)}

Figure 32 : Comparaison des prédictions des modèles empiriques et des données expérimentales de Corbett et Reid (1993) un projectile à tête hémisphérique

Projectiles à tête plate :

Ce modèle type de projectile est davantage adapté à la problématique des impacts de projectiles suite à des effets dominos sur un site industriel.

Selon le « R3 Impact Assessment Procedure » **les formules du BRL sont plutôt recommandées pour des projectiles compacts ($L/d < 10$)**, alors que **les formules du SRI ou de Neilson sont mieux adaptées à des projectiles plus allongés ($L/d > 10$)**. Par ailleurs pour des impacts à basses vitesses (< 20 m/s) et de masses importantes, les études menées par [Corbett et Reid 1996] montrent que la formule de Wen et Jones donnent de bonnes prédictions.

Il est cependant à noter que chacun des modèles développés n'est valable que sur un domaine d'application restreint. Par ailleurs le modèle du BRL comporte des paramètres expérimentaux qui ne tiennent pas compte des propriétés mécaniques des matériaux constitutifs du projectile et de la plaque. Les modèles

de SRI et de Neilson, bien que fonction de la contrainte limite à rupture de la cible, semble quant à eux surestimer l'énergie de perforation requise et donc sous-estimer, de manière importante pour certains cas, l'épaisseur de pénétration pour une énergie cinétique donnée du projectile [Mebarki et al. 2007].

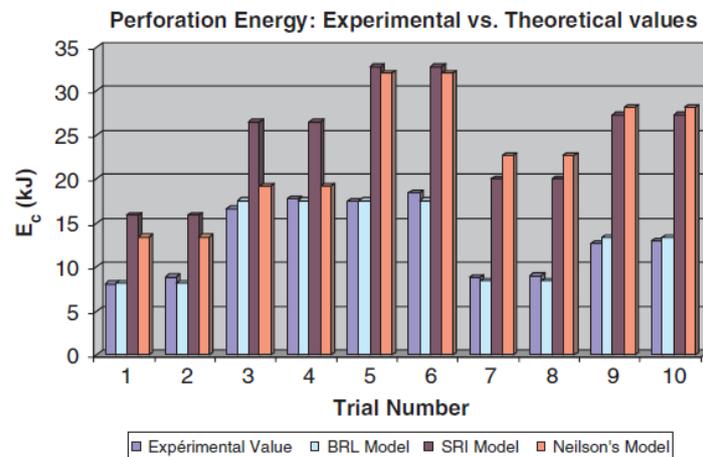


Figure 33 : Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux sur la série d'essais de Lepareux (1989) [Mebarki et al. 2007]

Modèle INERIS

L'INERIS et le laboratoire de Mécanique de l'Université de Marne la Vallée proposent un **modèle de pénétration alternatif** [Mebarki et al. 2007]. Ce modèle simplifié, **particulièrement adapté à l'évaluation des risques en milieu industriel, permet d'estimer l'épaisseur de pénétration suite à l'impact d'un projectile de forme cylindrique sur une plaque en acier**. Il prend en compte les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs du projectile et de la cible ainsi que les propriétés géométriques et cinématiques du projectile. Par ailleurs il **permet d'estimer l'épaisseur de pénétration quelque soit l'angle que forme le projectile avec la cible**.

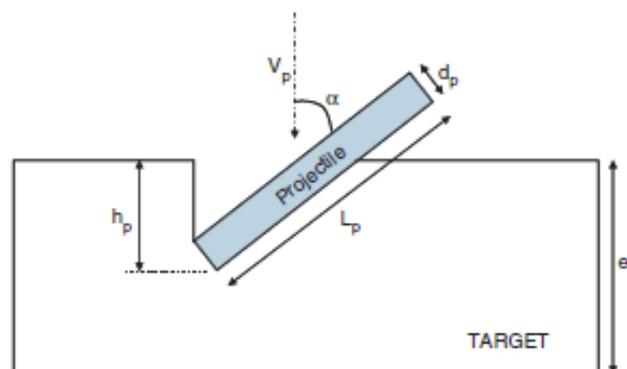


Figure 34 : Pénétration d'un projectile cylindrique dans une cible en acier [Mebarki et al. 2007]

Il repose sur les hypothèses et principes suivants :

- le projectile est supposé rigide ; il ne se déforme pas lors de l'impact. Cette hypothèse est valable si la cible est constituée d'un matériau moins rigide que le projectile ;

- le matériau constituant la cible est supposé avoir un comportement plastique ;
- lors de l'impact, la pénétration du projectile d'une épaisseur x_p entraîne une plastification d'un volume effectif V_{eff} de la cible autour de la zone de contact. L'énergie dissipée E_{pl} alors définie comme étant égale à l'énergie cinétique E_c du projectile lors de l'impact.

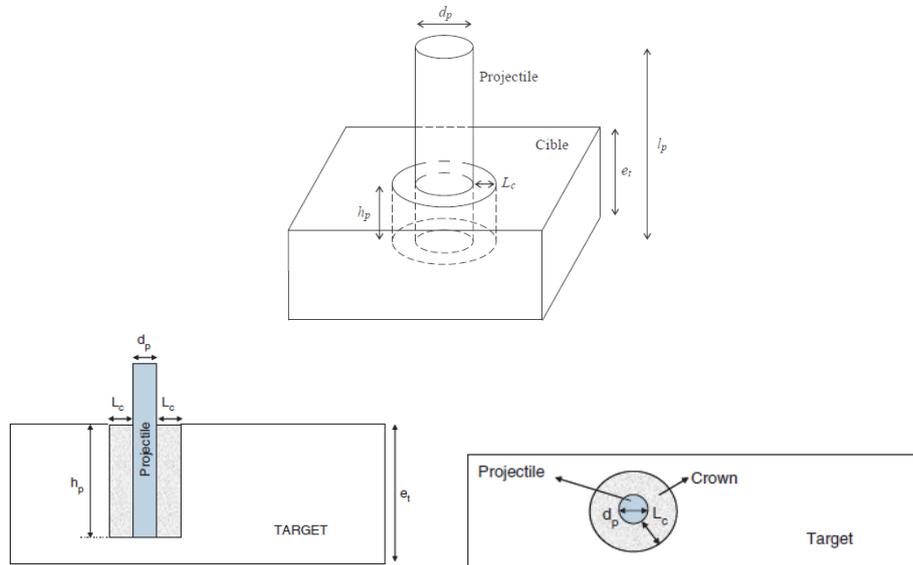


Figure 35 : Impact normal (angle d'inclinaison égale à 0) d'un projectile de forme cylindrique sur une cible en acier : volume effective plastifié autour de la zone de contact [Mebarki et al. 2007]

Ainsi l'épaisseur de pénétration d'un projectile arrivant avec un angle d'inclinaison α sur une plaque en acier est donnée par :

Si $\alpha = 0$	$x_p = \frac{1}{\pi d_p} \left(\frac{E_c}{f_u \varepsilon_u} \right)^{\frac{2}{3}} \text{ avec } E_c = \frac{1}{2} m_p v_p^2 \quad (\text{SI})$
Si $\alpha \neq 0$	$x_p = \frac{-d_p \cos \alpha + \sqrt{(d_p \cos \alpha)^2 + 4 \tan \alpha \left(\frac{E_c}{f_u \varepsilon_u} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{1}{\pi}}}{2 \tan \alpha} \quad (\text{SI})$

Avec f_u : contrainte de rupture du matériau constituant la cible

ε_u : déformation limite du matériau constituant la cible

d_p : diamètre du projectile

m_p = masse du projectile

v_p = vitesse du projectile

x_p : épaisseur de pénétration du projectile

A ce modèle est par ailleurs associé un modèle d'erreur afin de tenir compte des simplifications mécaniques ainsi que des hétérogénéités et incertitudes intrinsèques des différents paramètres d'entrée du modèle (paramètres matériaux et géométriques, vitesse et masse du projectile).

La comparaison avec plusieurs séries d'essais ([Lepareux, 1989], [Neilson, 1985] et [Borvik, 2003] ou encore [Bless et al. 1978] et [Bukharev et al., 1995] pour un

angle d'inclinaison non nul) révèle que **dans la plupart des cas le modèle proposé donne des résultats théoriques en adéquation avec les résultats expérimentaux**. Il s'avère très performant pour la série de Lepareux où les profondeurs de pénétration prédites sont proches de celles observées (voir Figure 36) (l'erreur relative est inférieure à 6.3%). Il concorde également assez bien avec les observations pour les essais de Borvik (2003) (voir Figure 37) [Mebarki et al. 2007].

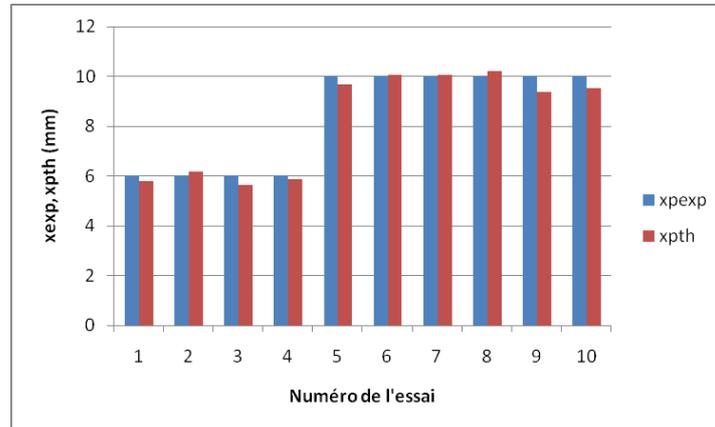


Figure 36 : Comparaison entre les profondeurs de pénétration expérimentales de Lepareux (1989) et du modèle INERIS

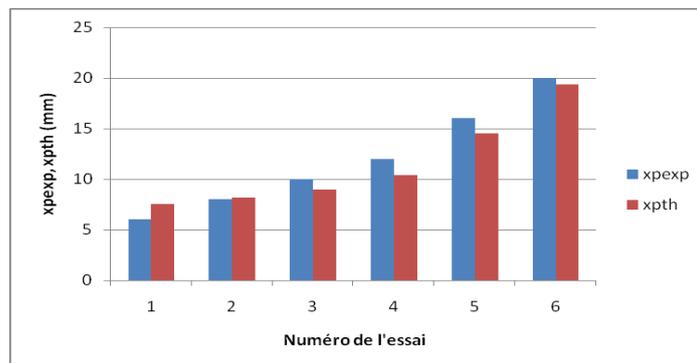


Figure 37 : Comparaison entre les profondeurs de pénétration expérimentales de Borvik (2003) et du modèle théorique INERIS

3.1.3.3 IMPACT DE PAROIS DE RÉSERVOIRS OU DE SPHÈRES DE GAZ LIQUÉFIÉ

Les formules présentées ci-dessus permettent de traduire la pénétration et/ou la perforation de cibles telles que des plaques métalliques. **Afin d'étudier le comportement des parois de réservoirs de stockage atmosphérique ou sous pression en acier, le HSE [HSE 1998] propose des critères de perforation plus spécifiques et particulièrement adaptés à la problématique des effets dominos générés par les fragments sur des sites industriels.**

Les modèles sont basés sur la détermination d'une énergie cinétique seuil ou critique du projectile entraînant la perforation de la cible sont résumés dans le tableau ci-dessous.

2 cas sont considérés :

- cas 1 : la face du projectile de plus grande largeur impacte la cible normalement ; ce faisant la surface d'impact est relativement importante. De manière conservative, le fragment est assimilé à un objet contondant.
- cas 2 : la face du projectile de plus petite largeur impacte normalement la cible ; la surface d'impact est très localisée, les concentrations de contraintes engendrées sont beaucoup plus importantes que celles causées par un objet contondant.

Réservoir atmosphérique		
Cas	Formules	Domaine de validité
1	Modèle du High Pressure Safety Code (1975) : $E_p = \frac{1}{2} M_f V_p^2 = 1.5 \cdot 10^9 D^3 \left(\frac{H_0}{D} \right)^{1.41}$	$M_f < 50 \text{ kg}$
	Pour une tôle en acier doux épaisseur 15 mm, $E_p = A M_f + B \text{ avec } A = 1,564 \cdot 10^3 \text{ et } B = 3,06 \cdot 10^5$	$50 < M_f < 1000 \text{ kg}$ $0.384 < E_p < 1.87 \text{ MJ}$
2	Modèle du High Pressure Safety avec $D=5H_0$ (Diamètre de la surface d'impact égal à 5 fois l'épaisseur de tôle du réservoir atmosphérique (hypothèse de Pietersen)) : $E_p = 1.5 \cdot 10^9 \cdot 5^{1.59} (H_0)^3$	$M_f < 50 \text{ kg}$
	Pour une tôle en acier doux d'épaisseur de 15 mm, la vitesse limite de perforation est alors donnée par : $V_p = \sqrt{\frac{130000}{M_f}}$	$50 < M_f < 1000 \text{ kg}$

Réservoir sous pression		
Cas	Formules	Domaine de validité
1	Modèle de Miyamoto $E_p = \frac{1}{2} M_f V_p^2 = 2.9 \cdot 10^9 H_0^{1.5} D^{1.5}$	3 < M _f < 50 kg, 7 < H ₀ < 38 mm, 25 < V ₀ < 170 m/s, 66 < D < 160 mm
	Pour une tôle en acier trempé d'épaisseur 15 mm, $E_p = AM_f + B$ avec A= 2,148.10 ³ et B=4,80.10 ⁵	50 < M _f < 1000 kg 0.587 < E _p < 2.628 MJ
2	Modèle de Miyamoto avec D=5H ₀ (Diamètre de la surface d'impact égal à 5 fois l'épaisseur de tôle du réservoir atmosphérique : $E_p = 32.4 \cdot 10^9 H_0^3$	3 < M _f < 50 kg, 7 < H ₀ < 38 mm, 25 < V ₀ < 170 m/s
	Pour une tôle en acier trempé d'épaisseur de 15 mm, La vitesse limite de perforation correspondante est alors donnée par : $V_p = \sqrt{\frac{218 \cdot 10^3}{M_f}}$	50 < M _f < 1000 kg

Avec M_f : masse de la sphère de volumétrie équivalente (en kg)

D : diamètre de la surface projetée de la sphère (en m)

H₀ : épaisseur de la cible (en m)

E_p : énergie cinétique critique de perforation (en J)

V_p : vitesse de juste perforation (en m/s)

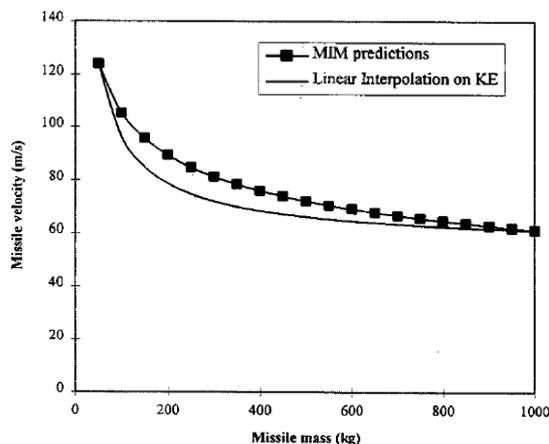


Figure 38 : Vitesse limite de perforation d'une tôle en acier doux de 15 mm d'épaisseur (Cas 1)

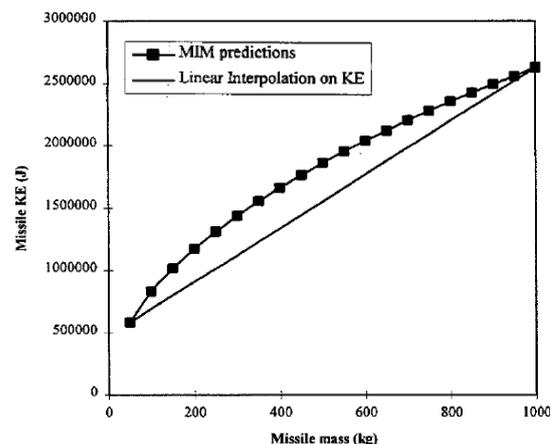


Figure 39 : Energie cinétique critique de perforation d'une tôle en acier trempé de 15 mm d'épaisseur (Cas 1)

3.1.3.4 IMPACT DE CANALISATIONS

Afin de déterminer la **perforation** ou non d'une canalisation en acier suite à l'**impact de projectiles ayant une vitesse subsonique de masse inférieure à 50 kg**, le HSE [HSE 1998] préconise le modèle du SCI (Steel Construction Institute) (1992). L'énergie cinétique critique de perforation est alors donnée par :

$$\frac{E_p}{D^3} = A_u \left(\frac{H_0}{D} \right)^{1.7} \left(\frac{D}{D_r} \right)^{0.5} \quad (\text{SI})$$

avec M_f : masse du projectile (en kg)
 D : diamètre du projectile (en m)
 H_0 : épaisseur de la cible (en m)
 D_p : diamètre de la canalisation (en m)
 A_u : constante empirique $8 \cdot 10^9$ (J/m³)
 E_p : énergie cinétique critique de perforation (en J)

Cette relation n'est valable que sous les considérations suivantes :

- $7 < H_0 < 18$ mm
- $4 < M_f < 50$ kg
- $25 < D < 170$ mm
- $D_p = 150$ mm

Cette formule est semblable à celle proposée par Neilson [Corbett et Reid 1996] valable pour une vitesse d'impact V_0 comprise entre 80 m/s et 170 m/s.

Pour des **projectiles dont la masse M_f est comprise entre 50 kg et 1000 kg**, le HSE [HSE 1998] propose une autre formulation basée sur l'interpolation linéaire de la courbe de l'énergie cinétique critique de perforation en fonction de la masse entre les 2 couples suivants (50 kg ; 90 m/s) et (1000 kg ; 50 m/s).

$$E_p = AM_f + B \quad (\text{SI}) \quad \text{avec } A = 1.102 \cdot 10^3 \text{ et } B = 1.474 \cdot 10^5$$

$$50 < M_f < 1000 \text{ kg}$$

$$0.202 < E_p < 1.250 \text{ MJ}$$

La vitesse d'impact correspondante appelée vitesse limite de perforation est donnée par :

$$V_p = \sqrt{2A + \frac{B}{M_f}} \quad (\text{SI}) \quad \text{avec } 50 < M_f < 1000 \text{ kg}$$

$$50 \text{ m/s} < V_p < 90 \text{ m/s}$$

3.1.4 LIMITE DES MODÈLES EMPIRIQUES

L'impact d'un projectile sur une cible et les effets locaux qui en découlent sont des phénomènes mécaniques complexes. C'est pourquoi, les modèles empiriques, fondés sur l'exploitation de données expérimentales par des méthodes dites « d'ajustement de courbe », s'avèrent très utilisés. De nombreux codes de conception les utilisent notamment afin de déterminer des barrières de protection.

Cependant, ces modèles présentent quelques inconvénients :

- la forme non homogène dimensionnelle des formules pose des difficultés pour mener des analyses paramétriques ou encore permettre de comparer des résultats expérimentaux à des prédictions analytiques ainsi que différents résultats expérimentaux entre eux ;
- le domaine de validité des formules est limité ; en effet, par manque de compréhension des mécanismes régissant les phénomènes mis en jeu, ces formules sont uniquement valables dans le domaine d'étude pour lequel les données expérimentales ont été obtenues ;
- les définitions des facteurs de forme du projectile et en particulier de leur tête données dans la plupart des formules notamment pour les cibles en béton restent ambiguës, introduisant des incertitudes dans l'estimation des effets locaux causés par l'impact.

3.2 MÉTHODES ANALYTIQUES

3.2.1 GÉNÉRALITÉS

Schématiquement, la théorie de l'impact de solides peut être représentée par quatre modèles principaux [Faik 2000] :

- la mécanique classique, qui met en application la conservation de la quantité de mouvement et celle de l'énergie cinétique pour prédire les vitesses après impact. Elle fait l'hypothèse du choc de corps rigides (contact instantané). La dissipation d'énergie au moment du choc dépend de la nature de l'impact, lui-même fonction du coefficient de restitution. Ce coefficient peut varier entre 0 (impact complètement plastique) et 1 (impact complètement élastique). Les modèles construits sur ce principe ne permettent pas de décrire la force de contact ou les contraintes générées par le choc entre deux corps.
- la propagation d'une onde élastique, qui dissipe l'énergie du choc loin de la zone d'impact. Si l'énergie qui est ainsi transformée en vibrations représente une part importante de l'énergie mise en jeu, elle doit être prise en compte dans un modèle. En général, cet effet est faible lorsque la durée du contact est grande par rapport à la plus faible des fréquences naturelles de chacun des corps.
- la mécanique du contact qui permet de déterminer les contraintes résultant de l'impact des corps. Elle constitue une extension des travaux développés par Hertz sur les contacts statiques. A la différence des modèles précédents, elle prend en compte l'indentation relative qui est produite sur les corps au voisinage du point d'impact, et donc la durée du contact qui est non nulle.
- la déformation plastique qui doit être prise en compte lorsqu'elle va au delà de l'échelle de la déformation contenue. Ce phénomène est généralement associé aux grandes vitesses d'impact. Parmi les théories qui le décrivent, se trouvent celle de la propagation d'une onde plastique, et celle de la théorie hydrodynamique du comportement des corps solides.

3.2.2 MODÈLES DE RÉPONSE GLOBALE DE LA CIBLE

Ces modèles considèrent l'impact d'un projectile sur une structure sous l'angle d'une force d'application pendant un certain temps.

Dans le cas des chocs mous (projectile déformable sur une cible rigide), [Eibl, 1987] suggère que le comportement du projectile peut être découplé de celui de la cible. Ainsi le problème peut être traité en commençant par **estimer la force d'impact $F(t)$** à l'aide par exemple de **l'approche de [Riera, 1968]**, puis en déterminant la réponse de la cible soumise à cette force d'impact. Selon Riera, la force d'impact $F(t)$ d'un projectile, s'écrasant perpendiculairement sur une cible rigide, peut se décomposer en deux termes : l'un correspondant au flambement du projectile, l'autre venant de l'effet inertiel de la masse :

$$F = P_f(x(t)) + \mu(x(t)) V^2(t)$$

Avec P_f : force de flambage du projectile

μ : masse linéique du projectile

V : vitesse du projectile pendant l'impact

$x(t)$ la distance écrasée (en partant du nez du projectile)

D'autres expressions plus complètes de la force d'impact ont été proposées [Abbas 1993]. Par exemple, [Sugano 1993] suggère la formulation suivante :

$$F = P_f(x(t)) + \alpha\mu(x(t)) V^2(t)$$

avec α un coefficient dit de « masse effective sur l'impact » (coefficient of effective mass on impact) compris entre 0,5 et 1.

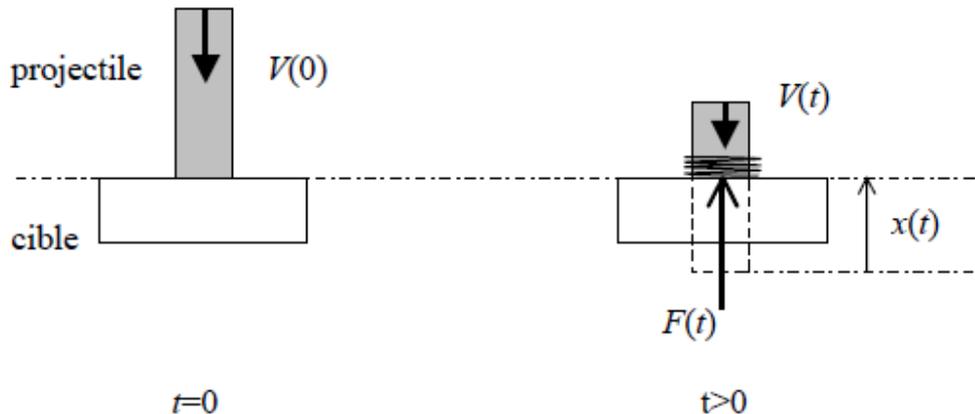


Figure 40 : Modélisation d'un impact mou : détermination de la force d'impact [Riera 1968]

Dans le cas des chocs mous, l'Eurocode NF EN 1991-1-7 de février 2007 fournit quant à lui un critère de résistance à l'impact lorsque la condition suivante est remplie :

$$\frac{1}{2} M_f V_0^2 \leq F_0 y_0$$

Avec :

- F_0 est la résistance plastique de la structure, c'est à dire la valeur limite de la force statique d'impact ;
- y_0 la capacité de déformation de la structure, c'est à dire le déplacement du point d'impact que la structure peut subir.

La vitesse maximum que la cible peut endurer doit donc vérifier :

$$V_0 \leq \sqrt{\frac{2F_0 y_0}{M_f}}$$

Dans ce cas, l'énergie cinétique est totalement transformée en déformation plastique.

Une approche similaire est employée depuis 1980 pour ce qui est de la résistance de structures en béton, centrales nucléaires notamment, à des impacts d'aéronefs [Meder 1982] et [USAEC 1974] en prenant en compte un facteur d'amplification dynamique (DLF).

Dans le cas d'un choc dur, l'Eurocode NF EN 1991-1-7 de février 2007 propose les équations suivantes :

$$F = V_0 \sqrt{kM_f}$$

avec

V_0 : vitesse de l'objet au moment du choc

K : rigidité équivalente de l'objet

M_f : masse de l'objet impactant.

Avec :

$$F\Delta t = M_f V_0 \text{ et } \Delta t = \sqrt{\frac{M_f}{k}}$$

et :

$$k = \frac{EA}{L} \text{ et } M_f = \rho_c EA$$

L étant la longueur de l'objet impactant, ρ_c sa masse volumique, A l'aire de la section transversale et E le module d'élasticité. Δt représente la durée de l'impact.

3.2.3 MODÈLE DE RÉPONSE TRADUISANT UN IMPACT DUR LOCALISÉ

3.2.3.1 MODÈLE BASÉ SUR LA FORCE DE RÉSISTANCE À LA PÉNÉTRATION

La démarche adoptée consiste en la résolution de l'équation de mouvement d'un projectile rigide alors gouvernée par la seconde loi de Newton :

$$M_f \frac{dV}{dt} = -F_R \text{ avec les conditions initiales suivantes :}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V = V_0 \\ X = 0 \end{array} \right. \text{ à } t=0$$

$$\text{où } V = \frac{dx_p}{dt}$$

x_p et V sont respectivement l'épaisseur de pénétration et V la vitesse du projectile.

M_f : masse du projectile

F_R : la force de résistance à la pénétration encore appelée force due à l'interaction projectile/matériau cible durant l'impact

Elle est en général donnée sous la forme d'un polynôme du second ordre fonction de la vitesse du projectile : $F_R = F_R(V) = \alpha + \beta V + \gamma V^2$.

Elle peut aussi s'exprimer comme une fonction polynomiale à deux variables :

$$F_R = F_R(x_p; V) = g\left(\frac{x_p}{d}\right) f(V)$$

Le mouvement dynamique du projectile rigide pendant le phénomène d'impact et de pénétration peut alors être déterminé analytiquement permettant d'estimer l'épaisseur de pénétration du projectile. Ces modèles peuvent également inclure la forme de la tête du projectile.

Poncelet ou encore Wen (2001) [Li 2008] ont par exemple proposé les expressions suivantes :

$$F_R = A(a + bV^2) \text{ (Poncelet)}$$

$$F_R = A(\alpha f_c + \beta \sqrt{\rho f_c V}) \text{ (Wen)}$$

Dans ces formules, A représente la section du projectile, les coefficients (a , b , α , β) sont des constantes à déterminer liées d'une part à la géométrie du projectile et, d'autre part, aux propriétés mécaniques de la cible. Ces constantes sont, la plupart du temps, déterminées expérimentalement.

Un des modèles analytiques force/pénétration les plus utilisés pour des cibles en béton est basé sur les modèles de [Forrestal 1994] amélioré par la suite par [Li et Chen 2003] pour des projectiles de formes diverses. Ce modèle force-pénétration est basé sur la théorie d'expansion des cavités et décompose le phénomène de pénétration en deux temps.

Dans un premier temps, il considère une phase de pénétration de type cratère où F_R s'exprime comme :

$$F_R = c \cdot x_p \text{ pour } \frac{x_p}{d} < k \text{ avec } c = \frac{\pi d}{4k} \frac{(N^* \rho_c V_0 + S f_c)}{\left(1 + \left(\frac{\pi k d^3}{3M_f}\right) N^* \rho_c\right)}$$

Dans un second temps, il considère une zone de tunnel où :

$$F_R = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 (S \cdot f_c + N^* \cdot \rho_c \cdot V_0) \text{ pour } \frac{x_p}{d} \geq k$$

x_p : profondeur de pénétration

S : facteur de pénétrabilité de la cible $S = 72.0 f_c^{-0.5}$

d : diamètre du projectile

M_f : masse du projectile

f_c : résistance à la compression du béton

N^* : facteur de forme du missile : $0 \leq N^* \leq 1$:

Facteur de forme	Conditions
$N^* = \frac{1}{3\psi} - \frac{1}{24\psi^2}$	Projectile à tête ogivale, $\psi = \frac{R}{d}$ R : rayon de l'ogive ; $0 < N^* < 0.5$
$N^* = \frac{1}{1 + 4\psi^2}$	Projectile à tête conique, $\psi = \frac{h}{d}$, h : longueur du nez du projectile ; $0 < N^* < 1$
$N^* = 1 - \frac{1}{8\psi^2}$	Projectile à tête sphérique, $\psi = \frac{R_s}{d}$, R_s : Rayon de tête sphérique ; $0.5 < N^* < 1$
$N^* = 0.5$	Projectile à tête hémisphérique
$N^* = 1$	Projectile à tête plate

$$k = 0.707 + \left(\frac{l}{d}\right) \text{ avec } l = \text{longueur du projectile pour } \frac{x_p}{d} < 5, k = 2 \text{ pour } \frac{x_p}{d} \geq 5$$

La résolution de l'équation de mouvement conduit alors à une épaisseur donnée par :

Pour $\frac{x_p}{d} \geq 0.5$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x_p}{d} = \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{k\pi}{4N}\right) 4k}{1 + \frac{I}{N}}} I \text{ pour } \frac{x_p}{d} < k \\ \frac{x_p}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left(1 + \frac{1 + \frac{I}{N}}{1 + \frac{k\pi}{4N}} \right) + k \text{ pour } \frac{x_p}{d} \geq k \end{array} \right.$$

Pour $\frac{x_p}{d} \leq 0.5$:

$$\frac{x_p}{d} = 1.628 \left(\frac{\frac{4k}{\pi} I}{1 + \frac{I}{N}} \right)^{1.395}$$

avec $I = \frac{1}{S} \left(\frac{M_f V_0^2}{d^3 f_c} \right)$ et $N = \frac{1}{N^*} \left(\frac{M_f}{\rho_c d^3} \right)$

L'ensemble de ces formules a été validé par un large panel d'essais expérimentaux pour des projectiles de formes diverses et différentes vitesses d'impact.

3.2.3.2 MODÈLES MULTI-ÉTAPES

La plupart des modèles présentés font l'hypothèse d'un mécanisme de rupture prédominant sur les autres : par exemple la pénétration. Or le phénomène d'impact est un phénomène complexe mettant en jeu une combinaison de divers mécanismes de rupture (cratérisation, formation d'un cône de fissure, écaillage, fragmentation, ...). Cela est particulièrement observé pour des cibles d'épaisseur médiane où le processus de perforation prédominant évolue avec la pénétration du projectile à travers la cible Woodward (1984).

La démarche consiste à résoudre l'équation de mouvement du projectile pour chaque étape i du processus d'impact.

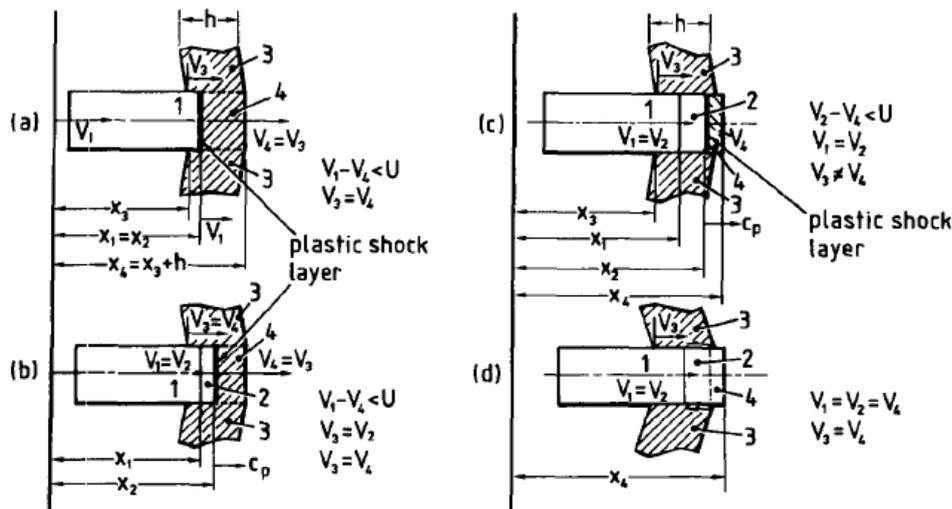
$$\frac{d(m_e V_i)}{dt} = -(F_i)$$

A chaque étape, la connaissance des diverses forces de résistance F_i mises en jeu permet ainsi de déterminer l'expression de la vitesse de pénétration V_i du projectile en fonction du temps et ainsi d'en déduire l'épaisseur finale de pénétration ou conclure à la perforation.

Liss (1983) [Corbett et Reid 1996] a ainsi proposé un modèle analytique multi-étapes permettant de décrire l'effet local d'un impact d'un projectile rigide sur une cible en acier. Le processus, basé sur la théorie de propagation des ondes plastiques, est décomposé en cinq étapes :

- a) phase de pénétration (indentation) ;

- b) formation d'un cône de fissuration ;
- c) rupture par cisaillement et désolidarisation du cône ;
- d) déplacement du cône ;
- e) déformation post-perforation.



1. projectile rigide, 2. partie déformée du cône, 3. proximité de la zone d'impact déformée par rotation plastique, 4. partie non déformée du cône.

Figure 41 : Processus de pénétration du projectile dans la cible lors de l'impact [Corbett et Reid 1996]

[Yankelevsky 1997] a quant à lui proposé un modèle analytique en 2 étapes pour décrire l'impact à faible vitesse sur une cible en béton.

- Etape 1 : phase de pénétration dynamique où le projectile pénètre dans un milieu semi-infini. Le phénomène d'écaillage en face arrière n'est donc pas pris en compte.
- Etape 2 : formation d'un cône de fissuration suivi d'une désolidarisation de celui-ci. Lors de l'impact une onde plastique se forme devant le projectile et se propage dans la cible engendrant la formation progressive d'un cône de fissuration par cisaillement. Celui-ci est alors poussé par le projectile qui continue sa progression jusqu'à passer complètement à travers la cible.

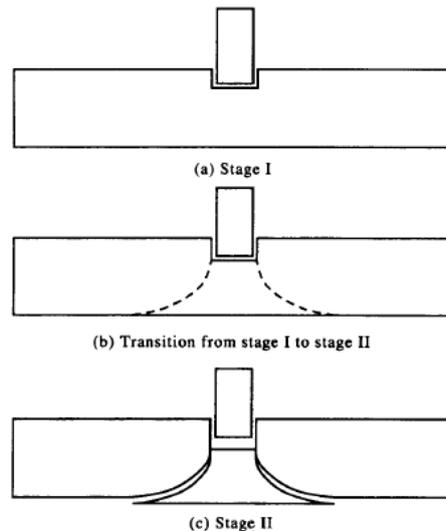


Figure 42 : Modèle pénétration à deux étapes [Yankelevsky 1997]

3.3 MÉTHODES NUMÉRIQUES

L'étude de la vulnérabilité d'un ouvrage ou partie d'ouvrage soumis à un impact demande la prise en compte de phénomènes physiques complexes, que les modèles empiriques ou analytiques, bien que très utilisés, ne peuvent prendre en compte.

La performance des outils de simulation et le développement des lois constitutives permettant de représenter le comportement du matériau sont telles que les méthodes de simulation numérique deviennent progressivement de plus en plus adaptées pour analyser les phénomènes d'impact. Outre les résultats plus précis, le gain économique par rapport à la réalisation d'essais à échelle réelle est également un avantage.

Parmi les méthodes numériques, peuvent être distinguées les méthodes « continues » et les méthodes « discrètes ».

3.3.1 LES MÉTHODES « CONTINUES »

Les méthodes continues les plus répandues sont les méthodes basées sur la Méthode des Eléments Finis (MEF) avec une loi de comportement adaptée à la physique du problème. Les systèmes physiques à étudier (structures) sont alors discrétisés en 2 ou 3 dimensions à l'aide d'un maillage par Eléments Finis de différents types (volumiques, coques, poutres, barres).

Cependant le phénomène d'impact génère la formation et l'évolution de nombreuses et fortes discontinuités comme des processus de multi-fissuration, de propagation des fissures que les méthodes Eléments Finis classiques peuvent difficilement modéliser.

Afin de prendre en compte et de traiter cette question des discontinuités, d'autres approches continues ont été développées. Une première catégorie consiste en une adaptation de la Méthode Elément Finis classiques et se base donc sur un maillage.

Peuvent être citées :

- des approches hydrodynamiques en représentation Eulérienne qui ne sont vraiment adaptées qu'aux très hautes vitesses d'impact : la matière est alors dissociée de la maille ;
- des approches basées sur le principe de l'érosion. Celui-ci consiste à retirer un élément fini du modèle lorsqu'un critère est atteint ; en général le critère employé est un seuil de déformation plastique ;
- des approches basées sur l'introduction d'une discontinuité sur l'interface reliant deux éléments finis. Ces méthodes sont très dépendantes du maillage ;
- des approches basées sur l'introduction d'une discontinuité directement à l'intérieur de la maille. Citons par exemple la SDA (Strong Discontinuity Approach) ou la X-FEM.

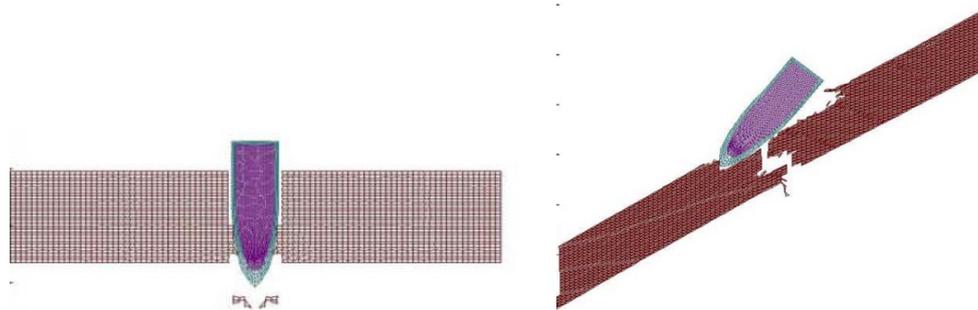


Figure 43 : Illustration de l'impact d'une dalle en béton par un projectile [Teng 2004]

Une autre catégorie de modélisation rassemble les méthodes continues dites « sans maillage ». Dans ce type de représentation, les nœuds ne sont pas liés à la structure. Ils permettent de mieux représenter l'apparition des discontinuités tout en conservant les mêmes lois de comportement et en ne nécessitant pas des techniques de maillage adaptatif. [Fries et Matthies 2004] propose une classification de ces méthodes dont les plus connues sont probablement :

- SPH (Smooth Particles Hydrodynamics) : il s'agit d'une méthode issue de la mécanique des fluides en référentiel Lagrangien ;
- EFG (Element-Free Galerkin) : Méthodes développées pour stabiliser les méthodes SPH.

3.3.2 LES MÉTHODES « DISCRÈTES »

Les méthodes « discontinues » ou « discrètes ». Elles consistent en des assemblages d'éléments distincts, déformables ou non, reliés entre eux par des lois très simples qui permettent de représenter le comportement du matériau. Contrairement aux approches continues, le comportement n'est pas imposé par une loi constitutive mais résulte de l'interaction des différents éléments entre eux. Les méthodes discrètes ne sont pas fondées sur la mécanique des milieux continus mais se résolvent directement par l'application du principe fondamental de la dynamique à tous les éléments et à chaque pas de temps.

Ces méthodes sont une alternative pour analyser le problème de l'impact. Elles apportent en effet des outils adaptés afin de simuler de manière plus réaliste

l'endommagement, la fracturation et la propagation des fissures ou encore la fragmentation. Elles permettent de prendre en compte les très fortes non-linéarités et discontinuités mises en jeu.

Différentes méthodes discrètes existent et peuvent être utilisées parmi les quelles peuvent être citées les Méthodes par Eléments Discrets (MED). Les éléments distincts sont non déformables et en interaction par des lois de contacts ou de cohésion. La condition de contact s'exprime de manière « souple » avec une raideur équivalente et les éléments peuvent s'interpénétrer. Elles permettent notamment de reproduire quantitativement non seulement la force d'impact, la procédure de pénétration mais également la transformation de l'énergie cinétique pendant l'impact.

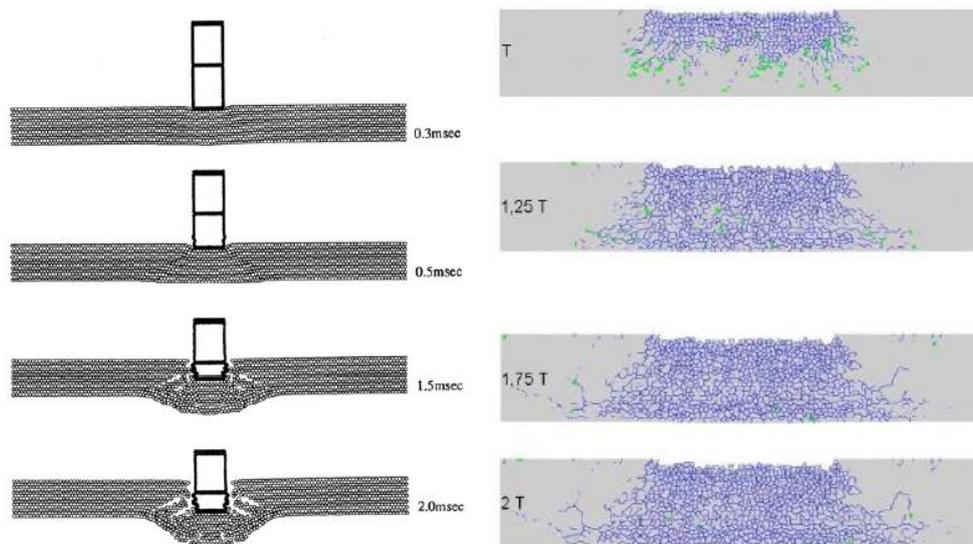


Figure 44 : Simulation de l'impact d'une dalle par un projectile déformable par la méthode des éléments discrets ([Sawamoto et al. 1998] à gauche, [Kœchlin 2007] à droite)

Cependant le coût de calcul (taille du modèle et temps de simulation) de telles méthodes peut s'avérer beaucoup plus élevé que les méthodes éléments finis. Bien que très performantes sur des modèles de petites dimensions, elles ne sont pas adaptées pour modéliser une structure dans son ensemble et rend l'étude d'ouvrage complet très difficile.

3.3.3 UNE ALTERNATIVE : LES APPROCHES MULTI-DOMAINES

L'utilisation d'une approche multi-domaines basée sur l'utilisation des méthodes couplées continues/discrètes, comme par exemple MEF/MED, peut être une alternative performante pour simuler le comportement d'ouvrage soumis à des impacts autant à l'échelle locale de l'impact qu'au niveau globale. Les zones proches de l'impact, étant susceptibles de présenter de fortes discontinuités, sont modélisées par Eléments Discrets, alors que le reste de la structure ou de l'élément étudié, plus faiblement sollicitées, est représenté par une modélisation éléments finis. Une zone de transition dans laquelle il y a recouvrement des deux domaines peut également être définie.

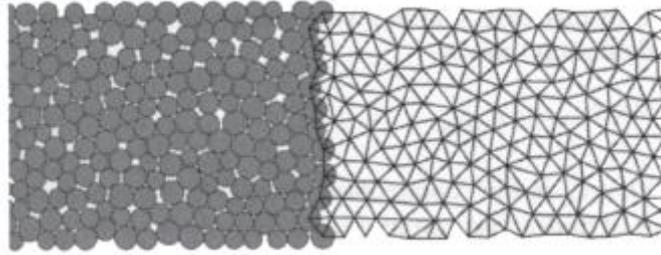


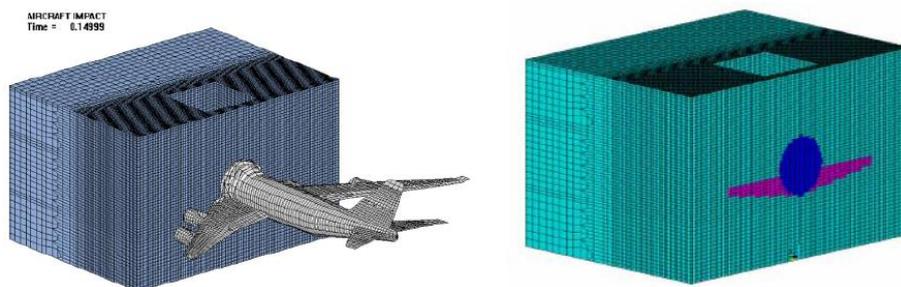
Figure 45 : Méthode combinée d'éléments finis et d'éléments discrets proposée par Cundall (2003) [Frangin 2008]

Une dalle en béton armé peut par exemple être modélisée en utilisant un maillage en éléments finis pour les armatures et des éléments discrets pour le béton. Une telle approche permet d'obtenir des résultats précis tout en réduisant le coût de calcul.



Figure 46 : Simulation de l'impact d'une dalle en béton armé par un projectile [Frangin 2008]

Les choix de modélisation (méthode numérique, modèle du matériau retenu, etc ...) doivent être adaptés au phénomène physique à simuler. Ils doivent permettre de représenter les principaux phénomènes observés expérimentalement. Par exemple, les processus de perforation suite à un impact sont différents selon que la cible est en béton ou en acier. Les phénomènes mis en jeu ne sont pas non plus les mêmes en fonction de la nature de l'impact (choc mou, choc dur). Si l'impact est un choc dur, la durée du processus de pénétration est en général plus courte que le temps de réponse de la structure globale de la cible. Dans ce cas une analyse purement locale semble tout à fait pertinente. Dans le cas de choc mou, la durée de l'impact est beaucoup plus importante. Des ondes de structures sont générées et se propagent dans l'ouvrage. Il convient alors en général d'étudier le comportement local – le processus de ruine locale en perforation- mais aussi les conséquences que peuvent avoir la propagation des ondes dans la structure toute entière, c'est-à-dire le comportement global.



(Arros et al., 2006)

Figure 47 : Approches couplées – Impact d'un corps déformable sur un ouvrage rigide [Riera 1968]

3.3.4 PRINCIPAUX LOGICIELS DE CALCUL

Il est souvent difficile de choisir un logiciel pour ce genre de calculs. Les principaux logiciels de dynamique rapide sont AUTODYN, LS DYNA, ABAQUS EXPLICIT. Ces logiciels commerciaux sont spécialisés dans la réponse des structures aux impacts. Développés principalement pour des applications militaires, leur domaine de validation est en général limité à des vitesses d'impact supersoniques. Des études sont menées afin de les adapter au domaine accidentel. Peuvent être également cités les logiciels EUROPLEXUS, CRASH et SAFER.

La démarche suivie dans ce type d'analyse peut être résumée de la manière suivante :

1. supposer un projectile (dimension, matériau, ...) et une structure cible (dimensions, ferrailage, épaisseur, conditions d'appuis, ...) ainsi que des conditions initiales d'impact (vitesse du projectile, lieu de l'impact, ...) ;
2. choisir une méthode représentation par éléments finis ou par éléments discrets ou couplée MEF/MED de la cible et du projectile ;
3. choisir les lois de comportements des matériaux utilisés (béton armé, acier...) à la fois pour la cible et le projectile (cas des MEF) ou les lois de contacts ou de cohésions régissant l'interaction entre les éléments discrets (cas des MED) ;
4. choisir les conditions types de liaisons entre les différents éléments constituant la cible ;
5. calculs (résolution du système d'équations) ;
6. analyse des résultats et comparaison avec les critères d'endommagement ;

3.3.5 CONCLUSIONS

Ces méthodes nécessitent généralement un matériel informatique assez puissant, des spécialistes dans ce genre de calculs et un coût en temps et en ressources informatiques rarement compatibles avec les contraintes de l'évaluation des risques dans un contexte réglementaire.

Par ailleurs, bien que de nombreux progrès ont été faits en ce sens, les logiciels de dynamique rapide restent très instables, très dépendants des maillages et il existe très peu de moyens de vérifier la validité des calculs réalisés.

Il est donc important que ces méthodes soient couplées à des calculs analytiques.

4. MOYENS DE PROTECTION

Afin de réduire la vulnérabilité d'une structure face aux effets d'un impact de projectile, et ainsi en améliorer la protection, des mesures de renforcement peuvent être mis en place, telles que la construction d'une enceinte de protection, ou la modification des propriétés mécaniques de la structure.

4.1 ENCEINTE DE PROTECTION

Dans le cas d'un équipement industriel, il peut par exemple être proposé la construction d'une enceinte de protection. Les parois de cette enceinte peuvent être métalliques, en béton ou encore en béton armé.

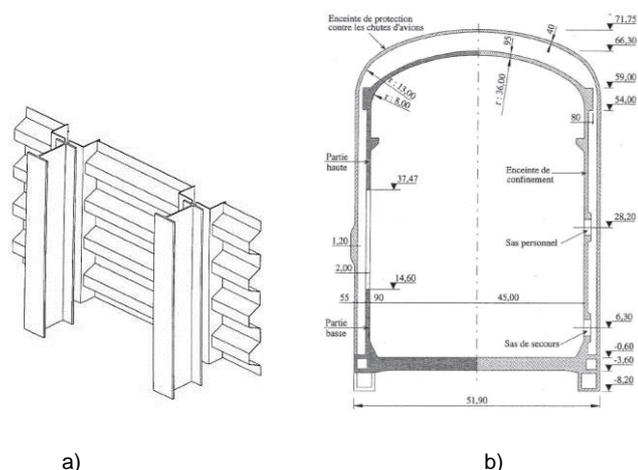


Figure 48 : Exemple de paroi de protection métallique et d'une enceinte de protection en béton armé d'un ERP

Pour de faibles vitesses d'impact, la mise en place d'un grillage de protection pare-éclats peut également être envisagée. Ce dernier peut être constitué comme sur la figure ci-dessous de mailles torsadées (et non soudées), qui se déforment sous l'effet de l'impact d'un fragment. Ainsi, l'énergie cinétique du fragment est dissipée en énergie d'élongation des fils d'acier, et dans les frottements entre les mailles.

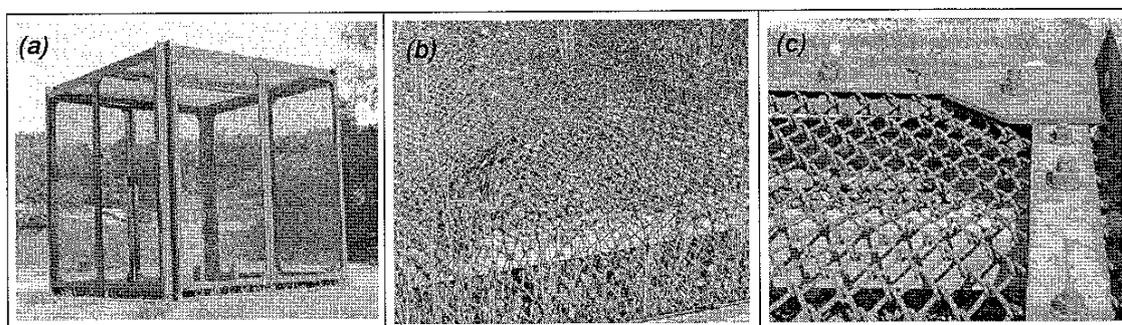


Figure 49 : Exemple de grillage pare-éclats, a) cage de l'INERIS en grillage pare-éclats (4 m x 4 m x 4 m) pour les essais d'éclatement, b) déformation du grillage sous l'effet d'un projectile, c) fixation sur un châssis métallique

Dans tous les cas, les différents éléments constituant cette enceinte devront être dimensionnés, notamment en terme d'épaisseur, afin de résister localement à l'impact et plus particulièrement à la perforation et de s'assurer le cas échéant de leur tenue globale sous l'effet des vibrations induites pas le choc.

4.2 MODIFICATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE LA CIBLE

Il s'agit de modifier les propriétés mécaniques de la cible par ajout de matière. Ceci a pour rôle principal :

- d'augmenter l'épaisseur de la cible. Ainsi la cible peut absorber une quantité d'énergie plus importante sans pour autant être perforée ou ruinée.
- d'augmenter la capacité de résistance de la cible, c'est-à-dire la contrainte de rupture du matériau. Cela permet de réduire l'épaisseur de pénétration du projectile dans la cible.

Les éléments de renfort peuvent être des éléments de maçonnerie, en général en béton ou en béton armé, ou des éléments métalliques. L'épaisseur de ces parois de protection peut être dimensionnée de façon à ce que le projectile ne pénètre pas ou pénètre seulement partiellement la paroi de la structure que l'on cherche à protéger sans engendrer sa ruine à l'échelle globale.

Il est ici rappeler que les éléments de renfort doivent bien évidemment être ajoutés dans le respect des codes de conception des équipements.

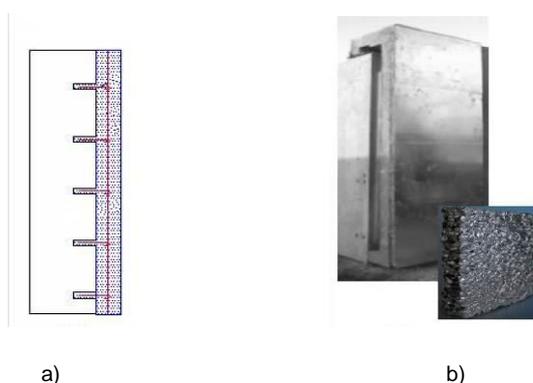


Figure 50 : Renfort en maçonnerie et métallique

5. CONCLUSION

Ce document aborde les principales questions relatives à la résistance des structures aux impacts.

Dans la pratique, cette discipline ne peut efficacement être mise en œuvre qu'en complément d'une analyse de risques sérieuse. Cela évite bien souvent d'avoir une approche trop conservatrice ou de ne pas considérer les bonnes hypothèses sur la sollicitation de départ.

Afin de déterminer les effets d'impact de projectiles sur des structures béton ou métalliques rencontrées sur site industriel, 3 méthodes de modélisation peuvent être envisagées :

- l'approche empirique ;
- l'approche analytique ;
- l'approche numérique.

Le retour d'expérience montre qu'une approche analytique permet souvent de faire des gains économiques par rapport à une approche empirique et permet de ne pas surdimensionner les moyens de protection mis en œuvre.

L'approche numérique doit être employée de manière prudente et ses résultats doivent être croisés avec une méthode analytique ou des essais expérimentaux.

La caractérisation expérimentale des matériaux, dans les bons intervalles de sollicitation, cohérents avec l'analyse menée, permet de diminuer l'incertitude sur les résultats obtenus.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

Les références bibliographiques, les plus utiles et les plus complètes pour le calcul de la résistance aux impacts sont :

[IMFRA 2008] F. MERCIER, Rapport scientifique DRA-08-64041-02123A, Impacts de Fragments BCRD Autorisation de programme 2004 – Convention n°04-00001, 2008

[Kœchlin 2007] P. KOECHLIN, Modèle de comportement membrane-flexion et critère de perforation pour l'analyse de structures minces en béton armé sous choc mou, thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, 2007.

[Li 2005] Li, Q.M., Reid, S.R., Wen, H.M., Telford, A.R., 2005. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. Int. J. Impact Eng. 32 (1–4), 224–284.

[Li 2008] S.Y. Aly, Q.M. Li, 2008, Critical impact energy for the perforation of metallic plates, Nuclear Engineering and Design 238, 2521–2528

[Nguyen 2009] Q.B. NGUYEN, Fiabilité des installations industrielles sous impact de fragments de structures – Effet domino, thèse de Doctorat de l'Université Paris-Est, 2009.

[TM5-1300 1990] TM 5-1300 (NAVFAC P-397, AFR 88-22), "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions," November 1990

[TNO 2003] Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from the releases of hazardous materials, CPR 16 E, (Green Book), Committee for the prevention of disasters caused by dangerous substances, the Hague : Directorate-General of Labour of the Ministry of Social Affairs and Employment, 1992 - 2003

[Yankelevsky 1997] Yankelevsky DZ. Local response of concrete slabs to low velocity missile impact. Int J Impact Eng 1997;19(4):331–43.

Les autres références citées dans cette partie sont listées ci-dessous :

[2010-12] Circulaire n° 2010-12 du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003

[2007- 04] Circulaire interministérielle du 20 avril 2007 relative à l'application de l'arrêté du 20 avril 2007 fixant les règles relatives à l'évaluation des risques et à la prévention des accidents dans les établissements pyrotechniques

[Abbas 1993] Abbas H., Paul D.K., Godbole P.N., Nayak G.C. – Reaction-time response of aircraft crash, Computers and Structures, Vol. 55, No. 5, 1995, pp. 809-817.

[Amirikian 1950] Amirikian A. Design of protective structures. Report NT-3726, Bureau of Yards and Docks, Department of the Navy, 1950.

[BNFL 2003] BNFL, 2003. Reinforced concrete slab local damage assessment. R3 Impact Assessment Procedure, Appendix H, vol. 3. Magnox Electric plc & Nuclear Electric Limited.

[CEB 1988], CEB-88, Concrete structures under impact and impulsive loading, 1988

[Corbett et Reid 1993] Corbett, G.G., Reid, S.R., 1993. Quasi-static and dynamic local loading of monolithic simply-supported steel plates. *Int. J. Impact Eng.* 13, 423–441.

[Corbett et Reid 1996] Corbett, G.G., Reid, S.R., Johnson, W., 1996. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review. *Int. J. Impact Eng.* 18 (2), 141–230.

[Cox et Saville 1985] Cox, B.G and Saville, G. (Eds). High Pressure Safety Code. High Pressure Association, 1975. Reprinted 1985

[Eibl 1987] Eibl J. – Soft and hard impact, Proc. FIP Congress, The Concrete Society, Concrete for hazard protection, Edinburgh, Scotland, sept. 1987, pp. 175-186.

[Faik 2000] Faik S., Witteman H., 2000, Modeling of impact dynamics: a literature survey, North American ADAMS User Conference 2000

[Frangin 2008] Frangin E., Adaptation de la méthode des éléments discrets à l'échelle de l'ouvrage en béton armé - Une approche couplée éléments discrets/éléments finis, thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier, 2008.

[Fries et Matthies 2004] Fries, T.-P. et Matthies, H.-G. Classification and overview of meshfree methods. Rapport technique, Institute of Scientific Computing, Technical University of Brunswick, Germany, 2004.

[Forrestal 1994] Forrestal MJ, Altman BS, Cargile JD, Hanchak SJ. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets. *Int J Impact Eng* 1994;15(4):395–405.

[Fullard 1991] Fullard K, Baum MR, Barr P. The assessment of impact on nuclear power plant structures in the United Kingdom. *Nucl Eng Des* 1991;130:113–20.

[HSE 1998] Health and Safety Executive (HSE), Development of methods to assess the significance of domino effect from major hazard sites, 1998

[Li et Chen 2003] Li QM, Chen XW. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a nondeformable projectile. *Int J Impact Eng* 2003;28(1):93–116.

[May et al. 2005] May I.M., Chen Y., Owen D.R.J., Feng Y.T., Bere A.T. – Behaviour of reinforced concrete beams and slabs under drop-weight impact loads, Proc. 6th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures, Perth, Australia, 2005.

[Mebarki et al. 2007] 1997. MEBARKI Ahmed, NGUYEN Quoc Bao, MERCIER Frédéric, AMI SAADA Ramdane, REIMERINGER Mathieu. A probabilistic model for the vulnerability of metal plates under the impact of cylindrical projectiles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industrial*, 20 (2), 113-186, 2007 (Impact factor in 2006: 0.419).

[Meder 1982] Meder G., 1982, Dynamic response of a SDOF elastic-plastic system subjected to aircraft impact pulses, Nuclear Engineering and Design, 74, pp 61-74.

[MICADO 2002] Méthode pour l'identification et la caractérisation des effets Dominos, mise en place de la directive SEVESO II, 2002.

[Reid et Wen 2001] Reid SR, Wen HM, 2001, Predicting penetration, cone cracking, scabbing and perforation of reinforced concrete targets struck by flat-faced projectiles. UMIST Report ME/AM/02.01/TE/G/018507/Z, 2001.

[Riera 1968] Riera J.D. – On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces, Nuclear Engineering and Design, Vol. 8, 1968, pp. 415-426.

[Sawamoto 1998] Sawamoto, Y., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshiha, N. et Morikawa, H. Analytical studies on local damage to reinforced concrete structures under impact loading by discrete element method. Nuclear Engineering and Design, 179:157–177, 1998.

[Sliter 1980] Sliter GE, 1980, Assessment of empirical concrete impact formulas. ASCE J Struct Div 1980;106(ST5):1023–45

[SNPE INGENIERIE 1995] Effets mécaniques de projections dans les sphères de gaz liquéfiés, Ref 931934.0/PCL/PCL rev.I - 07 avril 1995 (page 11/56)

[Sugano 1993] Sugano T., Tsubota H., Kasai Y., Koshika N., Orui S., von Risemann W.A., Bickel D.C., Parks M.B. – Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force, Nuclear Engineering and Design, Vol. 140, 1993, pp. 373-385.

[Teng 2004] Teng T.L., Chu Y.A., Chang F.A., Chin H.S. Simulation model of impact on reinforced concrete. Cement and Concrete Research. 34: 2067-2077, 2004

[Thor 1961] The resistance of various metallic materials to perforation by steel fragments; empirical relationships for fragment residual velocity and weight, Technical Report Project THOR TR No.47, 1961 and No.51, 1963, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Washington state, USA.

[USAEC 1974] Linderman R.B., Rotz J.V., Yeh G.C.K., 1974, Design of structures for missile impact, US Atomic Energy Commission, Topical report

[Young 1997] C.W. Young, 1997, Penetration Equations", Contractor report SAND97-2426

Les guides de référence publiés par l'INERIS relativement utiles en complément de celui-ci sont listés ci-dessous :

[Mouilleau 1999] Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à air libre (1999) - INERIS - disponible sur www.ineris.fr

[Heudier 2004] Omega 15 - Les éclatements de réservoirs / Phénoménologie et modélisation des effets (2004) - INERIS - disponible sur www.ineris.fr

[Reimeringer 2007] Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35) La résistance des structures aux actions accidentelles (2007) INERIS - disponible sur www.ineris.fr

[Vallée 2002] Méthode pour l'identification et la Caractérisation des effets Dominos (MICADO) (2002) – INERIS - disponible sur www.ineris.fr



INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Aïata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - Internet : <http://www.ineris.fr>