

Conséquences d'événements extrêmes sur la tenue de structures industrielles (CONSE2E)

Julien BAROTH¹, Mathieu REIMERINGER², Thierry YALAMAS³, Yves GUENGANT⁴,

Jean-Luc HANUS⁵, Ahmed MÉBARKI⁶, Nicolas DEVICTOR⁷, Bruno AUTRUSSON⁸

¹ Laboratoire Sols Solides Structures Risques, univ. Fourier/CNRS/INPG, Domaine universitaire, BP53, 38041 Grenoble Cedex 9

² INERIS, Parc Technologique Alatta, 60550 Verneuil en Halatte

³ Phimeca, 1 allée Alan Turing, 63170 Aubière

⁴ SNPE/SME Environnement, 9 rue Lavoisier, 91710 Vert-le-Petit

⁵ Laboratoire Énergétique Explosions Structures, univ. d'Orléans et ENSIB, 63 av. de Lattre de Tassigny, 18020 Bourges Cedex

⁶ Laboratoire de Mécanique, univ. de Marne-la-vallée, 5 bd Descartes, Cité Descartes, 77454 Marne-la-Vallée, Cedex 2

⁷ CEA/Cadarache, DER/SESI/LCFR, 13108 St-Paul-lez-Durance Cedex

⁸ Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), DEND/SATE, BP 17, 92262 Fontenay-aux-roses Cedex

julien.baroth@hmg.inpg.fr, mathieu.reimeringer@ineris.fr, yalamas@phimeca.com, y.guengant@snpe.com,

jean-luc.hanus@ensi-bourges.fr, Ahmed.Mebarki@univ-mlv.fr, nicolas.devictor@cea.fr, bruno.autrusson@irsn.fr

Résumé – Ce projet vise à proposer une méthode d'évaluation de la tenue de structures de type enceinte (stockage, protection) soumises à une explosion ou un impact de projectiles. L'enjeu est de produire des outils, permettant d'une part de modéliser le chargement induit, d'autre part de modéliser la réponse de l'enceinte (métallique ou en béton armé) afin d'évaluer son risque de défaillance (dysfonctionnement). Cela requiert la définition préalable des dommages et de leurs probabilités d'occurrence. À cet effet, un partenariat entre des acteurs industriels et universitaires est proposé. Leurs compétences complémentaires sont présentées, en vue d'un choix concerté d'études expérimentales et numériques, puis d'actions de prévention et de protection plus sûres et économiques.

Abstract – This project aims to assess the structural safety of industrial structures (silo, tank,...) that might be impacted by various projectiles. It is therefore expected to improve diagnostics, prevention or protection actions. The originality of this approach underlies in a partnership between well-known and complementary institutes and firms and universities. This study is divided into four main parts: (i) to gather and treat the data from useful studies or others containments (in reinforced concrete or metallic); (ii) to unify and develop adequate numerical and experimental studies for this field; (iii) to define a stochastic model in order to perform sensitivity and reliability studies; (iv) to propose methodological tools helpful for optimal design of containments.

1. Introduction

1.1 Contexte

De sévères sollicitations naturelles (séisme, avalanche, éboulement, glissement de terrain) ou accidentelles (incendie, explosion, collision) peuvent conduire à la ruine d'ouvrages industriels sensibles. En particulier, la quantification de la vulnérabilité d'une structure face à des sollicitations dynamiques sévères (explosions, chutes de blocs, accident d'avion sur ouvrage sensible, agression terroriste) reste insatisfaisante. Les méthodes de conception et les outils de calcul mis en œuvre restent simplifiés : les actions dynamiques sont souvent remplacées par des efforts statiques supposés équivalents et l'effet (de l'impact ou de l'explosion) est présumé localisé. Il en résulte que le dimensionnement de l'ouvrage et de ses protections repose souvent sur des formules empiriques.

Dans ce contexte, suite aux attentats de New-York et Madrid, l'objectif de la stratégie européenne de sécurité adoptée par le Conseil Européen en 2003 et réaffirmée en 2004, est d'assurer la sécurité des biens et des personnes.

En cohérence avec cet objectif, la plateforme française sur les risques industriels (www.ftpis.com), dans le cadre de la plateforme technologique européenne « Industrial safety », (cf. www.industrialsafety-tp.org), vise à favoriser les partenariats industries – universités, afin d'identifier et de préciser les besoins de recherche dans ces domaines. L'un des axes de travail de ces plateformes est la « sécurité et la sûreté des structures (structural safety) ». Ainsi, le groupe de travail du même nom, piloté par A. Lannoy, de l'Institut pour la maîtrise des risques (www.imdr-asso.fr), a ciblé trois thématiques principales, dont l'étude des conséquences de sollicitations extrêmes à la tenue des structures (CONSE2E). M. Reimeringer (INERIS) est le coordonnateur des actions à mener dans ce cadre.

1.2 Présentation des partenaires

1.2.1 CEA/Cadarache

Cadarache est un centre de recherche du Commissariat à l'énergie atomique, l'un des plus grands centres européens de R&D technologiques pour l'énergie en Europe.

Les activités du centre du CEA/Cadarache concernent essentiellement l'énergie nucléaire mais aussi, par exemple, les nouvelles technologies pour l'énergie.

En particulier, le Laboratoire de Conduite et Fiabilité des Réacteurs (LCFR) mène des recherches sur le traitement des incertitudes de divers processus (mesures, expériences, codes de calcul,...), par des techniques de fiabilité, de propagation d'incertitudes et d'analyses de sensibilité.

1.2.2 Laboratoire LEES

Le laboratoire Énergétique, Explosions, Structures (LEES) est commun à l'université d'Orléans et à l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Bourges (ENSIB), (équipe d'accueil EA 1205) et appartient à la fédération de recherche FR 0776 « Énergétique, Propulsion Espace Environnement » (EPEE). En particulier, les équipes « Vulnérabilité des structures » et « Risques d'Explosion » du laboratoire travaillent sur la maîtrise des risques industriels, étudient les explosions (risque, détonation, déflagration, initiation) et leurs conséquences sur les structures (dynamique des structures, des matériaux fragiles, ...).

1.2.3 INERIS

L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) est un établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle du ministère de l'écologie et du développement durable. À travers ses cinq directions opérationnelles, dont celle des risques accidentels, la mission de l'INERIS est de (faire) réaliser des études et des recherches permettant de prévenir les risques que les activités économiques font peser sur la santé, la sécurité des personnes et des biens ainsi que sur l'environnement, et de fournir toute prestation facilitant l'adaptation des entreprises à cet objectif.

1.2.4 IRSN

L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) est un établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle conjointe des ministères chargés de l'environnement, de la santé, de l'industrie, de la recherche et de la défense. L'IRSN est expert public en matière de risques nucléaires et radiologiques. La prévention des accidents majeurs, la sûreté des réacteurs, des usines, des laboratoires, des transports et des déchets sont autant de domaines d'activités de l'IRSN.

1.2.5 Laboratoire de mécanique (LaM)

Le Laboratoire de Mécanique (LaM) de l'université de Marne-la-Vallée est une unité de recherche (équipe

d'accueil EA 2545) évaluée et contractualisée par le Ministère de la Recherche.

Ce laboratoire est rattaché au département « Mécanique et Génie Civil » de l'Institut Francilien des Sciences Appliquées (IFSA) de l'Université de Marne-la-Vallée. Il est l'une des unités l'Institut Navier, structure Fédérative de Recherche. Les deux thématiques du LaM sont « Mécanique multi-échelle et multi physique des matériaux et structures » et « Dynamique et vibrations ». Un axe de recherche important concerne les risques naturels (séismes et inondations) et technologiques (impacts et effets dominos) ainsi que la modélisation des aléas, de la vulnérabilité des ouvrages et de l'évaluation de la fiabilité.

1.2.6 Laboratoire 3S

Le Laboratoire Sols Solides Structures Risques (L3S-R) est un laboratoire de mécanique, unité mixte de recherche (UMR 5521), entre le CNRS, l'université Joseph Fourier (UJF) et l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG). Le L3S-R appartient à la structure fédérative « Vulnérabilité des ouvrages aux risques » (VOR). L'une des thématiques, « Risques et vulnérabilité », concerne le dimensionnement des ouvrages en béton armé soumis à des sollicitations extrêmes (avalanches, chutes de blocs,...).

1.2.7 Phimeca

La société Phimeca est le vecteur de la valorisation des travaux menés par une équipe de chercheurs dans le domaine des probabilités appliquées à l'ingénierie où il s'agit de prendre en compte les incertitudes dans le dimensionnement et la maintenance des structures et des installations industrielles.

S'appuyant sur une très forte expertise en mécanique avancée, Phimeca s'illustre dans l'ingénierie mécanique (études, expertises, formations, réalisation d'outils informatiques métier) et plus particulièrement dans la mécanique probabiliste des matériaux et des structures, pour lesquelles elle constitue une référence nationale, engagée dans les débats internationaux.

1.2.8 SME Environnement

SME Environnement est l'entité technique de référence du Groupe SNPE (chimie et pyrotechnie) en charge de la maîtrise des risques industriels et technologiques. Cette entité travaille pour le Groupe SNPE et pour des clients externes appartenant à divers d'activités (pétrole/gaz, agroalimentaire, aéronautique, défense, ...).

SME Environnement regroupe une trentaine d'ingénieurs pluridisciplinaires, spécialistes en génie des procédés chimiques, en simulations numériques, en sûreté de fonctionnement, etc.

SME Environnement s'appuie également sur les laboratoires du Centre de Recherches du Bouchet (CRB), dont l'équipe de simulations numériques, dans le domaine des études amont « sécurité – environnement ».

1.3 Définition du projet CONSE2E et plan du document

Le système d'étude est *a priori* composé d'une structure de type enceinte (de stockage ou protection) en béton armé ou métallique (silo, réservoir, enceinte de réacteur,...).

L'objet de l'étude est d'évaluer les conséquences mécaniques d'explosions ou d'impacts de projectiles sur ce type de structure. Ce besoin est commun aux domaines de la sécurité et de la sûreté des installations industrielles.

L'objectif est d'améliorer leur dimensionnement par l'utilisation d'outils performants, bien que simplifiés pour des raisons opérationnelles :

- modélisant le chargement produit par une explosion et/ou un impact ;
- évaluant la résistance mécanique des structures ;
- estimant leur risque de défaillance (probabilité et gravité des dommages mécaniques).

Ce document se structure ainsi :

Le paragraphe 2 présente la trame d'une étude préliminaire, qui doit préciser les hypothèses de travail, d'expérimentation et une sélection de méthodes de modélisation utiles à la description du phénomène.

Pour ce faire, le paragraphe 3 est une synthèse des principaux travaux récents ou en cours des partenaires, en lien direct avec le problème posé. Ces travaux sont classés en fonction des compétences des partenaires.

Enfin, le paragraphe 4 donne les grandes étapes d'une approche stochastique qui contribuera à conclure sur la sensibilité du modèle à ses paramètres, ainsi que sur des indicateurs de la fiabilité de la structure.

Un premier rapport écrit en concertation pourra conclure l'étude préliminaire, tandis que le rapport final sera la compilation de rapports d'études complémentaires.

2. Étude préliminaire

2.1 Démarche générale

Une fois les structures types définies (enceintes métalliques et/ou en béton armé), il convient de rassembler et interpréter des résultats provenant d'expériences antérieures (scénarios d'accident, données d'essais expérimentaux,...).

Une tâche consiste ensuite à décrire l'enchaînement des phénomènes aboutissant à la ruine (ou la mise hors service) des structures et à dégager un ou des scénarii possibles de défaillance (ruine progressive ou brutale). Cela implique la définition d'un seuil ou de niveaux cibles de défaillance.

L'application d'une méthode du type arbre de défaillance ou AMDEC (Analyse des modes de défaillance

et des états critiques) peut alors être envisagée, afin d'analyser le plus finement possible les scénarii de défaillance, par exemple :

- en décomposant chaque scénario en événements élémentaires dont on caractérise la gravité et la fréquence (par l'expérience ou par hypothèse) ;
- en hiérarchisant ces événements selon les degrés de gravité et fréquence ;
- en déduisant pour chaque scénario une mesure de risque *a priori*,...

Une autre tâche consiste à s'accorder sur des hypothèses, en vue d'études expérimentale ou numérique. Nous nous attacherons à montrer la cohérence des résultats obtenus par ces deux voies, éventuellement par des partenaires différents.

Si des essais à échelle réelle sont irréalistes, des essais à échelle réduite avec lois de similitude, tant pour la caractérisation de la source que pour l'évaluation de la résistance mécanique, seront réalisés.

Enfin, une importante tâche consiste à sélectionner les paramètres physiques du problème qui sont entachés d'incertitude et d'associer à ces paramètres des variables (voire champs) aléatoires dont les caractéristiques sont à définir (moyenne, dispersion, une loi de distribution, etc.). Le principe des études probabilistes est présenté au § 4.

Le choix de lois de distribution appropriées sera justifié. Outre les lois usuelles (Gaussienne, Lognormale, uniforme,...) modélisant l'ensemble d'une loi de distribution, d'autres lois aux valeurs extrêmes pourront être envisagées afin de modéliser la queue de distribution d'une variable aléatoire caractérisant les événements rares (cf. Marquès et al. [14]).

2.2 Rapport préliminaire

Ce rapport présentera une étude bibliographique ainsi que les choix de bases de données et principales hypothèses concernant :

- la méthodologie générale, qui unifie des savoir-faire complémentaires (aspects expérimental, numérique, probabiliste) ;
- le ou les scénarios d'agression fixés ;
- le chargement (explosions, projectiles) ;
- les structures elles-mêmes (leur géométrie, le comportement des matériaux,...) ;
- le protocole des expérimentations (si nécessaires) ;
- la ou les modélisations numériques ;
- l'approche probabiliste.

Dans ce sens, les partenaires unifieront leurs données et leurs sources d'information, afin de produire ce rapport en concertation, qui répartira les tâches de chacun. Celui-ci sera produit dans un délai de quelques mois, sous la coordination de M. Reimeringer (INERIS).

3. État des travaux récents ou en cours en lien avec CONSE2E

En vue de l'étude préliminaire, nous proposons une première répartition des contributions possibles des partenaires, en fonction de leurs domaines de compétence et d'intérêt. Les travaux récents ou en cours décrits sont classés en trois thèmes principaux : les études des sollicitations, de l'enceinte impactée (en distinguant les enceintes en béton armé et métallique), ainsi que l'analyse probabiliste du système.

Les quatre groupes d'études suivants ne sont bien entendu pas sans interaction. Leur distinction permet cependant de faire apparaître *a priori* des binômes ou trinômes pressentis pour gérer l'étude, en groupant au moins un laboratoire et un industriel.

3.1 Étude des sollicitations

(Caractérisations expérimentales et/ou numériques de projections, ondes de souffle, fragmentations, impacts,...)

SME Environnement, LEES, IRSN (+INERIS)

SME Environnement dispose de données expérimentales de diverses origines (données balistiques en particulier de source américaine, TMS-1300, cf. www.ddesb.pentagon.mil,...) et de méthodologies permettant de décrire très précisément les sollicitations, en particulier, aux niveaux technologiques et terroristes.

Ces bases de données ont permis le développement de méthodologies et de codes de calculs basés à la fois sur des lois physiques (balistique,...) et sur des relations empiriques (cf. par exemple Kent [10]).

SME Environnement, en collaboration avec l'équipe de simulations numériques du Centre de Recherches du Bouchet (CRB) dispose des moyens de calculs les plus performants (Abaqus, MULTIMA, LS-DYNA, CPS, ...), qui lui ont par exemple permis d'évaluer l'endommagement des structures lors de l'explosion de la raffinerie de La Mède.

Une étude comparative (benchmark) par rapport aux évolutions des outils américains dans le domaine des fragmentations et des projections a aussi été menée.

Le laboratoire Énergétique, Explosions, Structures (LEES) a présenté trois thèses dans le cadre du programme de recherche BCRD AP 2000 confié à l'INERIS. L'objectif était de développer des outils simples d'analyse et de calcul destinés à l'ingénieur expert.

Une étude (thèse de Zyskowski, cf. Zyskowski et al. [27]) concerne des méthodes caractérisant le chargement de type explosion sur une structure, en s'attachant aux aspects numériques de l'interaction fluide-structure lorsque l'onde de souffle atteint la structure. Cette étude a utilisé le logiciel AUTODYN. Des équations empiriques, conçues pour prévoir les charges issues de détonations en milieu libre et confiné, ont été validées.

Les collaborations avec l'INERIS se poursuivent :
- amélioration du code 2D de macro-éléments-discrets : gestion précise des chocs et impacts,... ;
- développement d'un dispositif original de flexion dynamique (utilisant une barre de Hopkinson) pour des matériaux quasi-fragiles (la rupture pour de faibles déformations et peu d'énergie dissipée).

L'IRSN, en collaboration avec le LEES, a permis la soutenance de thèse de Sophie Trelat [24] concernant l'impact de fortes explosions sur des bâtiments de type industriel (cadre des études relatives à la vulnérabilité des structures face à la détonation de substances explosives, cf. Trelat et al. [25,26]).

L'objectif de cette thèse était de proposer des outils afin de prédire les chargements appliqués aux structures. Des essais menés en laboratoire consistent à faire détoner un mélange stœchiométrique propane-oxygène au sol ou en altitude. L'étude a pour objet de recueillir des données expérimentales sur les effets de pression d'ondes de choc rencontrant des obstacles. Deux types d'obstacles de dimensions connues, rencontrés fréquemment sur un site industriel, sont étudiés : un obstacle de forme parallélépipédique et un obstacle de forme cylindrique.

Des abaques déterminent les paramètres caractéristiques d'une onde de souffle en fonction de la taille de l'explosif, de la position de l'explosif par rapport au bâtiment (en altitude ou non), du point d'impact sur la structure. Enfin, la démonstration d'une équivalence énergétique entre le TNT et le gaz utilisé dans les expériences est proposée en fonction d'une distance (champ proche / champ lointain). À cet égard, l'un des résultats marquants de la thèse est qu'un équivalent énergétique entre gaz et TNT décrit au moyen d'une constante ne permet de représenter qu'avec une fiabilité très relative les effets d'une explosion de TNT à échelle réelle.

Notons enfin le développement d'une modélisation probabiliste d'impacts de projectiles suite à des explosions d'enceintes industrielles (LaM/INERIS).

Remarques :

- des partenariats existent déjà (LEES/IRSN, LEES/INERIS, LaM/INERIS) ;
- des documents de référence ont été rédigés pour le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable par SME Environnement (évaluation des effets de projection en cas d'accident dans une installation classée, cf Guengant [8]) ou par l'INERIS (différents rapports disponibles sur www.ineris.fr) ;
- des essais expérimentaux et numériques ont été mis en œuvre par tous les partenaires ;
- les codes de calcul LS-DYNA et AUTODYN sont utilisés au moins par l'IRSN, SME Environnement, le LEES et l'INERIS et apparaissent nécessaires ;
- les bases de données évoquées peuvent, sans doute, avant toute expérimentation nouvelle, être exploitées pour l'étude de modèles numériques.

3.2 Étude d'une enceinte en béton armé

(Caractérisations expérimentales et/ou numériques du comportement de structures en béton armé sous impact)

L3S, SME Environnement (+ INERIS, LEES)

Une thématique forte du laboratoire 3S-R est l'étude de structures en béton armé sous impact.

Un 1^{er} volet de celle-ci concerne la modélisation par la méthode des éléments discrets (ED) d'ouvrages d'une part, soumis à des impacts de corps rigides de type missiles ou réacteurs d'avion (thèses Shiu et Frangin) et d'autre part des chutes de blocs rocheux (thèses de Lorentz et Plassiard). Ce travail nécessite de définir une procédure d'identification des paramètres caractéristiques du modèle décrivant le béton à l'échelle mésoscopique ou macroscopique suivant l'échelle de discrétisation (cf. Hentz et al. [9], Lorentz et al. [13], Shiu et al. [22]).

Le 2nd volet est un partenariat avec la Direction générale de l'armement (DGA) : le L3S-R s'est vu confié l'exploitation d'une presse triaxiale de grande capacité (GIGA) permettant la caractérisation du béton sous sollicitation extrême (Gabet [7]). Ce partenariat se situe parmi des actions stratégiques de la DGA sur la vulnérabilité d'infrastructures militaires et civiles vis-à-vis d'impacts de projectiles ou d'explosion.

L'étude du comportement triaxial du béton selon différents trajets de chargement a fait l'objet d'une thèse, où des essais mettent en évidence l'influence du chemin de sollicitation. L'étude numérique complémentaire permet d'évaluer la capacité du modèle PRM-couplé (loi de comportement plastique endommageable) à reproduire les essais triaxiaux réalisés sur GIGA.

Le 3^{ème} volet est un partenariat L3S/EDF, dans le cadre duquel une thèse concerne la modélisation numérique du comportement dynamique de structures en béton armé sous impact sévère avec un couplage éléments finis / éléments discrets (ED/EF).

Le logiciel de dynamique rapide EUROPLEXUS, permet la simulation numérique de tels accidents. La thèse en cours doit développer une méthodologie de calcul avancée avec une modélisation réaliste du comportement des structures en béton armé sous impacts sévères, afin d'étudier des scénarii où la structure impactée serait fortement endommagée. Un objectif est la prédiction de la pénétration d'un ouvrage par un impacteur métallique.

SME Environnement, en collaboration avec le CRB, a mené des travaux concernant la prédiction de la perforation de parois en béton sous impacts à grande vitesse (cf. par exemple Terrier [23]).

Enfin, des études expérimentales et numériques menées par l'INERIS, en collaboration avec le LEES, concernent le comportement d'une structure en béton armé soumise à une onde de pression interne. Parmi d'autres travaux, la thèse de M. Reimeringer vise à quantifier la vulnérabilité

d'un bâtiment en béton armé vis à vis du risque d'effondrement (cf. Reimeringer et al. [19]). Une approche simplifiée, utilisant la méthode des éléments discrets, a été développée. Son originalité repose sur l'utilisation de macroéléments de poutre équivalents aux éléments finis de poutre de Timoshenko. Un modèle simplifié du comportement de béton basé sur des contraintes équivalentes prenant en compte des modifications des propriétés mécaniques au cours des déformations induites par l'explosion a été proposé (cf. Zyskowski et al. [27]).

Une autre étude LEES/INERIS (thèse de Richomme, cf. Pignon et al. [18]) s'intéresse au comportement dynamique d'éléments de béton sous différentes sollicitations dynamiques (compression, flexion, cisaillement, ...), à différentes échelles (barres de Hopkinson au LEES, voiles en béton armé sur le site d'essai d'explosions de l'INERIS). Un système d'essai a été mis au point afin de faire apparaître des ruptures par cisaillement sur des éléments de poutre. Un effet structurel en compression et l'influence de la longueur de portée lors d'essais de flexion dynamique ont été mis en évidence.

Remarques : ces modélisations numériques se distinguant en fonction l'échelle d'étude :

- la méthode des éléments finis (EF) a fait ses preuves pour la description continue d'un ouvrage ;
- la méthode des éléments discrets (ED) semble plus adaptée pour représenter localement des mécanismes d'endommagement particuliers (fragmentation, fissuration, compaction, cf. figure 1) ou pour accéder à l'état résiduel de la structure.

L'étude d'une représentation multi-échelle est actuelle :

- thèse (Rousseau [20]) en cours, L3S / EDF : approche mixte (EF/ED) ;
- thèse (Funfschilling [6]) SME Environnement / École Centrale Paris sur la modélisation numérique de matériaux composites à échelle mésoscopique intégrant une technique d'homogénéisation.

Ce projet représente l'opportunité d'un bilan sur le degré de validation des outils numériques et la cohérence de ceux-ci avec les méthodes analytiques. En particulier pour des sollicitations relativement lentes (quelques dizaines de ms) fréquemment observées lors d'accidents industriels.

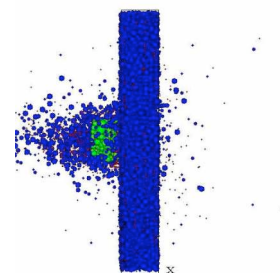


FIG. 1 : simulation de la perforation d'une dalle en béton par un projectile (Shiu et al. [21])

3.3 Étude d'une enceinte métallique

(Caractérisations expérimentales et/ou numériques du comportement de structures métalliques sous impact)

INERIS, LEES, LaM (+ SME Environnement)

Dans le cadre de ce programme de recherche BCRD AP 2002 confié à l'INERIS, deux thèses ont été soutenues au LEES et concernent la prédiction des différentes phases de l'éclatement d'enceintes métalliques sous pression.

La 1^{ière} étude (thèse de Martial Mosnier, cf. Pennetier et al. [17]) portait sur les aspects expérimentaux. Un dispositif a été développé pour soumettre des plaques métalliques à des chargements sous forme d'explosion et examiner leur mode de fissuration. Une seconde campagne d'essai a consisté à faire exploser des enceintes d'une vingtaine de litres. Les résultats obtenus indiquent que les vitesses de fissuration sont indépendantes du chargement, tandis que la taille des fragments augmente avec la violence de l'explosion.

La 2^{nde} étude (thèse de Benjamin Daudonnet, cf. Pennetier et al. [17]) s'intéresse à la modélisation de la rupture dynamique de réservoirs. La recherche a porté sur la définition du chargement à appliquer, la recherche de lois de comportement, le choix de critères de rupture et la modélisation de la propagation. Des confrontations satisfaisantes avec l'expérience ont été obtenues.

Il existe plusieurs études expérimentales concernant l'impact d'un projectile (acier) sur une plaque (acier) (entres autres Neilsen [16], Lepareux et al. [12], Bukhrev et al. [3]). Le projet IMFRA en partenariat entre l'INERIS, le LaM et le LEES, a permis d'exploiter certaines de ces dernières bases de données donnant des longueurs de pénétrations en fonction des caractéristiques du projectile (angle d'incidence, sa vitesse, sa masse, son diamètre) et de la cible (sa résistance, cf. figure 2).

De premiers travaux (Mebarki et al. [15]) pourraient être complétés et étendus à un problème plus complexe.

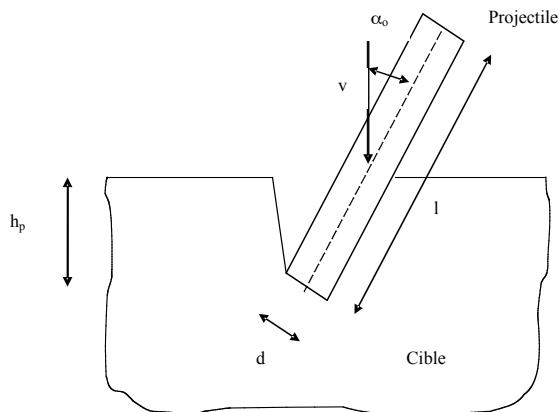


FIG. 2 : impact considéré lors de l'étude (Mebarki et al. [15])

3.4 Approche aléatoire des modèles

(Études probabilistes de sensibilité, de propagation d'incertitudes, de fiabilité)

Phimeca, CEA (+ LaM, L3S)

Parmi les projets auxquels Phimeca participe, le dimensionnement fiabiliste des Risers (2005-2007) est mené dans le cadre du CLAROM (Club d'Actions de Recherches pour les Ouvrages en Mer), en partenariat avec l'Institut Français du Pétrole (IFP), l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER), le Bureau Véritas, Principia et Total.

Le projet a pour objet de contribuer à améliorer les règles de conception des risers, dans le cadre théorique offert par les approches fiabilistes.

Un autre projet nommé « MIRADOR » (2006-2009) est financé par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) (appel à projets 2006). Le projet associe : Séchaud et Metz, Coyne et Bellier, Arcadis, Scétauroute, Phimeca, Armines, LCPC, LAMSID, EDF R&D, LaMI (IFMA).

MIRADOR consiste à élaborer la méthodologie et les outils nécessaires pour être en mesure d'évaluer la sécurité d'un ouvrage de génie civil à sa conception, puis pendant sa phase de service. Cette démarche doit être validée dans le cas de plusieurs ouvrages : barrage, pont sur le Tage, paroi moulée du Havre, tunnel, enceinte de confinement... L'approche pourra s'appliquer à l'étude de la sécurité des ouvrages anciens, dont la conception est mal connue.

Le laboratoire LCFR du CEA/Cadarache, en collaboration avec l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA, Grenoble), s'intéresse à la modélisation des événements rares et l'estimation des quantiles extrêmes, ainsi qu'aux méthodes de sélection de modèles pour les queues de distribution (Devictor et al. [4]).

En plus de ses travaux en dynamique aléatoire, le laboratoire LaM a publié récemment une approche probabiliste du problème cité au § 3.3 (Mebarki et al [15]). Des analyses de fiabilité de niveau 2 et des méthodes de simulation (de convergence accélérée : techniques de séparations, tirages d'importance et conditionnement) y sont développées.

Le laboratoire 3S-R possède enfin des compétences en matière d'éléments finis stochastiques (MEFS). Ces méthodes sont une alternative aux méthodes de Monte-Carlo pour le traitement des problèmes de propagation d'incertitudes dans les modèles mécaniques structuraux. L'un des buts de la thèse de Baroth [1] (et des travaux qui suivent depuis) est de développer des MEFS pour des problèmes mécaniquement non linéaires, ce qui peut être un outil d'analyse intéressant dans le cadre de CONSE2E.

Nous précisons dans le prochain paragraphe la trame d'une approche stochastique utile au projet CONSE2E.

4. Modélisation stochastique

Afin de justifier davantage la sûreté des structures, nous aurons recours au couplage entre le modèle reproduisant le comportement de la structure et un outil probabiliste qui, s'appuyant sur la variabilité d'un certain nombre de variables aléatoires, pilote l'outil mécanique en vue d'estimer la sensibilité de la réponse aux variations des paramètres d'entrée d'une part, et la fiabilité de la structure d'autre part. L'enjeu est d'améliorer la compréhension du comportement des structures et les règles de dimensionnement actuelles.

4.1 Position du problème

Nous cherchons par exemple à représenter le système mécanique par une fonction f telle que :

$$y = f(x) \quad (1)$$

où x représente les paramètres incertains du modèle d'étude et y la réponse mécanique étudiée. Après un choix concerté de caractérisation probabiliste de x , par exemple par une variable aléatoire X , nous cherchons à caractériser la variable aléatoire Y , par une moyenne, une dispersion (cadre d'une étude de sensibilité), voire une densité de probabilité, afin d'accéder une probabilité.

Nous nous accordons sur le choix de méthodes pertinentes : par exemple la simulation de type Monte-Carlo ainsi qu'une ou des méthodes d'éléments finis stochastiques (Lemaire et al. [11], Baroth [1]). La première méthode sera utile sur des modèles simples mais risque d'être trop coûteuse pour des modèles plus élaborés. Nous utiliserons alors la ou les seconde(s) méthodes, préalablement jaugées grâce à la simulation de Monte-Carlo.

4.2 Étude de convergence des méthodes

Nous prenons soin ici de montrer la convergence numérique des méthodes probabilistes employées et si possible une mesure de la qualité des approximations calculées.

4.3 Analyse de sensibilité

L'analyse de la sensibilité consiste à évaluer l'évolution des variations de la résistance de l'ouvrage en fonction des variations des paramètres d'entrée. Ces derniers paramètres peuvent être les sollicitations, des caractéristiques des matériaux ou du mode de construction, ou des paramètres de calculs non linéaires mal maîtrisés : fluage, fissuration du béton, etc.

Des indicateurs des variations de la charge sont par exemple des approximations de l'écart type σ_Y , du coefficient de variation COV_Y de Y ($\text{COV}_Y = \sigma_Y / m_Y$,

où m_Y est la moyenne de Y), voire de la densité de probabilité p_Y de Y .

Cette analyse vise à la conception robuste des structures, *c.a.d.* qui peut s'adapter à des variations de ces paramètres sans se rapprocher de la ruine.

4.4 Couplage mécano-fiabiliste

Nous nous intéressons ici à une approche probabiliste déduisant de l'analyse AMDEC (cf. § 2.1) et d'un certain nombre de calculs numériques l'approximation de la probabilité de défaillance de l'enceinte d'étude. À titre d'exemple, le LaM dispose à cet effet de savoir-faire en termes méthodologiques et applicatifs.

Nous nous proposons de calculer une estimation de la probabilité de défaillance, notée P_f de l'enceinte. La méthode fiabiliste s'appuie sur la donnée d'une règle de dimensionnement, par exemple $R - S < 0$. R et S représentent respectivement les efforts résistants et sollicitants s'exerçant sur la structure. Nous notons $G = R - S$ l'état limite, ou « fonction d'état limite » ou « fonction de performance », dépendant des données du chargement (fonction du régime d'explosion), des caractéristiques physiques ou géométriques de la structure. Nous pouvons ainsi définir un domaine de non performance D , voire de ruine, tel que par exemple $G(x) < 0$. La probabilité de ruine P_f à approcher s'exprime alors telle que :

$$P_f = P(G(x) < 0) = \int_D p_{R,S}(r,s) dr ds \quad (2)$$

où $p_{R,S}$ est la densité conjointe de probabilité du couple (R, S). Une étape préliminaire à cette approximation est donc de choisir un ou des domaines de performances adéquats. Les modes de défaillance, définis en particulier à partir de l'AMDEC (cf. § 2.2.1) pourraient être :

- l'amorçage d'une fissure existante, soumise à un chargement exceptionnel ;
- le dépassement une contrainte dans l'enceinte d'une contrainte limite du matériau ;
- le dépassement en un point de l'enceinte d'une déformation maximale ;
- la perforation de l'enceinte, etc.

Nous distinguons deux approches complémentaires de calcul de probabilité :

1. une approche qualitative où nous étudions l'évolution de P_f (sans précision accrue, de l'ordre de 1 à 10^{-3}) en fonction des variations de paramètres incertains ;
2. une approche quantitative où nous cherchons une valeur très faible et précise de P_f ($< 10^{-6}$) correspondant à des événements rares.

Nous privilégions dans le second cas l'usage de lois aux valeurs extrêmes les plus appropriées (cf. Marquès et al. [14], Devictor et al. [4]).

5. Conclusion, perspectives

Ce document présente le projet « Conséquences d'événements extrêmes sur la tenue de structures industrielles » (CONSE2E). Ce projet mené en partenariat entre plusieurs entreprises et laboratoires universitaires (cf. tableau 1), consiste à mettre en œuvre une méthodologie d'étude des conséquences mécaniques d'explosions ou d'impacts de projectiles sur des enceintes métalliques et en béton armé sous impact.

Ce document constitue une première étape confrontant des savoir-faire complémentaires, ainsi qu'à titre indicatif les moyens que les partenaires déclarés proposent de mettre en œuvre (cf. tableau 1). Ce même tableau informe des disponibilités *a priori* de chacun.

Ce projet pourrait donc débiter par une étape préliminaire de 6 mois environ, puis durer 2 à 3 ans, suivant les co-financements obtenus.

À terme, l'objectif est de mettre à disposition des outils simplifiés :

- modélisant le chargement produit par une détonation et/ou un impact ;
- évaluant la résistance mécanique des structures ;
- estimant leur risque de défaillance (probabilité et gravité des dommages mécaniques).

Un meilleur dimensionnement de ce type de structure, largement utilisée dans de nombreux domaines (agriculture, industrie chimique, défense, etc.), vise à réduire les coûts de conception (voire de maintenance) et à accroître la sécurité et la sûreté des biens et personnes concernées.

Outre les déclarations d'intérêt manifestées à ce jour par les co-auteurs de ce document, au sein du groupe IMdR « sécurité et la sûreté des structures », une collaboration pourrait de plus être potentiellement proposée à :

- la Direction générale de l'armement (DGA) où sont en jeu des bases de données et/ou un cofinancement et qui collabore déjà au moins avec le L3S-R ;
- Électricité de France (EDF) (mêmes motivations) ;
- L'INRIA de Grenoble, pour ses compétences dans la modélisation statistique d'événements rares.

A. Lannoy (Institut de Maîtrise des Risques) est vivement remercié pour ses diverses contributions.

TAB. 1 : moyens et disponibilités des partenaires
Condition commune (sauf IRSN/LEES) : cofinancement à 50 % (INERIS, L3S-R, PHIMECA, SNPE) à 66 % (LEES)

Partenaire	Nom	Moyens	Budget	Disponibilité
INERIS	Mathieu REIMERINGER	8 mois (ou 1000 h) ingénieur/an	120 k€ /an	2008-
L3S-R VOR	Julien BAROTH	Thèse (Cifre,...) 3 ans+300h encadrement	120 k€ / 3 ans	2007-
PHIMECA	Thierry YALAMAS	8 mois (ou 1000 h) ingénieur/an	120 k€ /an	2007-
LEES-ENSIB	Jean-Luc HANUS	Thèse (Cifre,...) 3 ans+300h encadrement	120 k€ / 3 ans	2007-
LaM	Ahmed MÉBARKI	Thèse (Cifre,...) 3 ans+300h encadrement	120 k€ / 3 ans	2007-
SNPE	Yves GUENGANT	1000 h ingénieur	120 k€ /an	?
CEA	Nicolas DEVICTOR	en cours d'évaluation en interne		2008-
IRSN	Bruno AUTRUSSON	en cours d'évaluation en interne		?

Remarque : les points d'interrogation correspondent à des informations manquantes au moment de la rédaction de l'article.

Références

- [1] J. Baroth. *Analyse par éléments finis stochastiques de la propagation d'incertitudes dans un modèle mécanique non linéaire*. Thèse de doctorat, université B. Pascal de Clermont-Ferrand, 2005.
- [2] P. Berthet-Rambaud, Mazars J., Daudeville L. *Impact on a RC rock-shed slab/FEM modelling*. EURO-C 2006 Computational Modelling of Concrete Structures, Mayrhofen, Tyrol, Austria, G. Meschke, R. de Borst, H. Mang, N. Bicanic Ed., 689-698, 2006.
- [3] Y.I. Bukhrev, V.I. Zhukov. *Model of the penetration of a metal barrier by a rod projectile with an angle of attack*. Combustion, explosion and shock waves, 31 (3), 104-109, 1995.
- [4] N. Devictor, M. Marquès et P. van Gelder. *Extreme laws and tail distributions - Applications to the probabilistic modelling of material samples for structural reliability analysis*. Chapitre 3.3 de *Lifetime Management of Structures*, A. Lannoy (éditeur). DNV, ISBN 82-5150302-7, 2004.
- [5] F. V. Donzé et S.-A. Magnier. *Spherical Discrete Element Code*. Discrete Element Project Report n° 2. GEOTOP, Université du Québec, Montréal, 1997.
- [6] C. Funfschilling. *Modélisation du comportement mécanique et de l'endommagement des matériaux composites*. Thèse de doctorat, École Centrale de Paris, 2006.
- [7] T. Gabet, Y. Malecot, L. Daudeville. *Ultimate strength of plain concrete under extreme combined stresses: triaxial and proportional stress paths*. Revue Européenne de génie civil, 10 (3), 375-390, 2006.
- [8] Y. Guengant. *Prise en compte des risques projections par, SME Environnement (SNPE)*. Journée technique du GTPS « Évolution de la réglementation - mise en œuvre des nouveaux textes », Pessac, Gironde, 2006.
- [9] S. Hentz, F.V. Donzé and L. Daudeville. *Discrete elements modeling of a reinforced concrete structure submitted to a rock impact*. Italian Geotechnical Journal, XXXIX, 4, 83-94, 2005.
- [10] R. Kent. *Dangers créés par les projections - Évaluation et protection (SNPE)*. Actes de colloque, Lavoisier Tecdoc éditeur, 1985.
- [11] M. Lemaire, A. Châteauneuf et J.-P. Miteau, *Fiabilité des structures*. Hermès, 2005.
- [12] M. Lepareux, P. Jamet, P. Matheron, Lieutenant J.L., J. Couilleaux, D. Duboelle et J. Aguilar. *Experimental and numerical studies of impacts on stainless steel plates subjected to rigid missiles at low velocity*. Nuclear Engrg and Design, 115, 105-112, 1989.
- [13] J. Lorentz, F.V. Donzé, P. Perrotin and P. Plotto, *Experimental study of the dissipative efficiency of a multilayered protective structure against rockfall impact*. Revue Européenne de Génie Civil, 10-3, 295-308, 2006.
- [14] M. Marquès, N. Pérot, N. Devictor et V. Bruel. *Comparison of methods for fitting a 3-parameters Weibull distribution on fracture toughness data*. ICOSSAR 2005, G. Augusti, G.I. Shuëller, M. Ciampoli (éditeurs), Millpress, 3765-3772, 2005.
- [15] A. Mebarki, Q.B. Nguyen, F. Mercier, R. Amisaada, F. Mefta, M. Reimeringer. *A probabilistic model for the vulnerability of metal plates under the impact of cylindrical projectiles*. J. of Loss Prevention in the Process Industries, in Press, 2006.
- [16] A.J. Nielsen. *Empirical equations for the perforation of mild steel plates*. Int. J. Impact. Engrg. 3 (2), 137-142, 1985.
- [17] O. Pennetier, K. Woznica, M. Mosnier, B. Daudonnet, J. Renard, F. Mercier. *Behaviour of metallic plates subjected to explosions. Experiments and modelling in the field of large deformations and rupture*. 16th Technical DYMAT Meeting, 27-28/10, Brussels, Belgium, 2005.
- [18] A. Pignon, G. Mathieu, S. Richomme, J. M. Margot, F. Delvare, *Modified split Hopkinson pressure bars for dynamic bending and shear tests*, J. of Physics IV, 134, 725-730. 2006.
- [19] M. Reimeringer, J.-L. Hanus, K. Woznica. *Effondrement de structures en béton armé : une approche par éléments discrets*. 7^{ème} colloque national en calcul des structures, Giens, 2, 547-552, 2005.
- [20] J. Rousseau. *Modélisation numérique du comportement dynamique de structures sous impact sévère avec un couplage éléments finis / éléments discrets*. Thèse de doctorat en cours de l'université J. Fourier de Grenoble, soutenance prévue : 2009.
- [21] W. Shiu, F. V. Donzé et L. Daudeville. *Missile impact on a concrete slab: a 3D discrete element study*. In http://geo.hmg.inpg.fr/frederic/Discret_Element_Group_FVD.html, Discret Element Group for Hazard Mitigation, Annual report, part II, 2005.
- [22] W. Shiu, F. V. Donzé et S.A. Magnier. *Numerical study of rockfalls on covered galleries by the Discrete Elements Method*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 11 (D), 2006.
- [23] J.M. Terrier. *Calculs non linéaires de structures en béton armé ou non armé soumises à des explosions*. J. de physique, 1998.
- [24] S. Trélat. *Impact de fortes explosions sur les bâtiments représentatifs d'une installation industrielle*. Thèse de doctorat, université d'Orléans, 2006.
- [25] S. Trélat, I. Sochet, B. Autrusson, O. Loiseau, K. Cheval. *Strong explosion near a parallelepipedic structure*. Shock Waves, Detonations and Explosions preprint, Springer, 193, 2006.
- [26] S. Trélat, I. Sochet, B. Autrusson, K. Cheval, O. Loiseau. *Impact of a shock wave on a structure. Explosion at altitude levels*. Soumis à Journal of Loss and Prevention in the Process Industry, 2006.
- [27] A. Zyskowski, I. Sochet, G. Mavrot, P. Bailly, J. Renard. *Study of the explosion process at small scale experiments - structural loading*. J. of Loss Prevention in the Process Industries, 17, 291-299, 2004.