

Explosions proches de structures en béton armé : différentes méthodes de simulations des effets globaux et locaux

M. ARLERY et C. PONTIROLI

CEA, DAM, GRAMAT, F-46500 Gramat, France, magali.arlery@cea.fr

Résumé :

Les réponses des matériaux et des structures de génie civil aux sollicitations mécaniques sévères générées par une explosion proche sont souvent complexes à modéliser. Leur restitution requiert en premier lieu l'évaluation du chargement généré par le souffle, fortement non-uniforme pour une charge proche, et dépendant des effets de diffraction pour une structure peu étendue. Par ailleurs, les réponses à ce chargement peuvent être dominées par la résistance globale de la structure ou la résistance locale des matériaux. Enfin, la question du couplage entre le chargement appliqué et la réponse des matériaux et structures se pose dans les configurations les plus sévères.

Les travaux présentés illustrent différentes méthodes de simulations dépendantes du scénario étudié : modélisation analytique simplifiée ou calcul hydrodynamiques pour le chargement, méthode des éléments finis couplée ou non au calcul du chargement pour la réponse dynamique des matériaux et structures, en utilisant le modèle de comportement du béton PRM développé au CEA-Gramat. La comparaison des résultats numériques aux résultats expérimentaux permet d'évaluer la pertinence et les limites des différentes méthodes proposées.

Mots clefs : béton armé, explosion, interaction souffle-structure, simulation, endommagement.

Abstract:

Numerical simulations of structural response to close-in detonations are complex. A correct evaluation of the highly non-uniform and clearing dependant blast load is a prerequisite. Different structural response modes may predominate or be combined: global bending, direct shearing or local damaging of materials. For severe configurations, the issue of coupling between the applied load and the structural response must be addressed.

This paper presents several numerical procedures depending on the studied configuration: simplified analytical modelling or fluid dynamic calculations of the blast load, finite element simulations of the structural response, coupled or not with load calculations, using the PRM model to describe the concrete behaviour. Performances and limitations of the proposed numerical procedures are evaluated by comparing numerical to experimental results.

Keywords: reinforced concrete, blast, fluid-structure interaction, numerical simulation, damage

1 Introduction

La réponse mécanique des structures en béton armé aux sollicitations rapides et sévères imposées par une explosion proche est relativement complexe à modéliser. Elle dépend en effet d'un chargement issu de la réflexion et la diffraction de l'onde de choc générée par la source explosive, de la résistance locale des matériaux béton et acier aux grandes vitesses, et de la tenue globale de la structure aux vitesses plus faibles.

Une pratique courante dans l'estimation du chargement par une explosion consiste à utiliser des lois analytiques. Ces lois sont cependant établies sur la base d'expérimentations [1] où la surface de réflexion des structures est suffisamment grande pour qu'aucun phénomène de diffraction ne se produise, au moins pendant la phase positive de la pression appliquée. Cette hypothèse n'est plus valable dès que la structure est de dimension suffisamment faible et introduit alors une surestimation de l'impulsion appliquée [2,3]. La réduction de l'impulsion par effet de diffraction n'induit pour autant pas systématiquement une atténuation de la réponse de la structure sollicitée, si l'arrivée des ondes de détente coïncide avec le rebond de la structure [4,5].

Une autre pratique courante dans l'estimation du chargement consiste à le considérer comme uniforme. Cette hypothèse n'est plus valable lorsque la charge est proche de la structure : le pic de pression réfléchi décroît alors fortement depuis le point de visée directe de la charge jusqu'aux zones les plus éloignées. L'intérêt de prendre en compte cette non-uniformité pour calculer la réponse d'une structure a été démontré, même en utilisant une méthode de calcul de réponse structurale très simplifiée [4].

L'estimation précise du chargement appliqué impose donc bien souvent d'effectuer un calcul de dynamique des fluides, rendant compte de l'ensemble des effets d'interaction d'ondes avec la structure [2,6].

Sous l'effet du souffle, différents modes de réponse structurale et mécanismes de ruine peuvent être sollicités et parfois se combiner [7,8,9] : une réponse globale en flexion, prédominante en régime quasi-statique, une réponse globale par cisaillement direct, prédominante en régime impulsionnel, ou encore une réponse locale des matériaux. Différentes approches numériques peuvent être adoptées pour restituer ces effets. La plus simple, consistant à assimiler l'élément de structure à un système à un degré de liberté (SDOF), est toutefois mal adaptée si la déformation de la structure est dominée par des effets de cisaillement, et ne permet en aucun cas de restituer les phénomènes d'endommagement locaux. Les calculs par éléments finis permettent, en théorie du moins, de prendre en compte tous les modes de réponses. Néanmoins, les méthodes particulières, plus récemment développées, semblent mieux adaptées aux cas les plus sévères.

Depuis les années 1990, le CEA Gramat a développé le modèle de comportement du béton appelé PRM [13], en partenariat avec différents acteurs académiques du Pôle de Recherche et d'Etudes sur la Vulnérabilité des Infrastructures [10]. Il s'est, de plus, doté de différentes méthodes d'évaluation de l'interaction souffle-structure, de complexité et de précision croissantes, adaptées à chaque scénario considéré. Ces approches sont illustrées ici dans trois configurations différentes. Leurs pertinences et limitations sont évaluées par comparaison aux résultats expérimentaux.

2 Méthodes de simulation

2.1 Evaluation du chargement

La méthode la plus simple et la plus rapide pour évaluer le chargement généré par une explosion consiste à utiliser les lois analytiques établies sur la base des expérimentations de Kingery et Bulmash [1]. Ces lois constituent le cœur de l'outil ConWep, implanté dans un certain nombre de codes de calculs, dont ABAQUS, qui fournit l'évolution temporelle de la pression appliquée à un obstacle en fonction de la masse de charge explosive (en équivalent TNT) et de la position de la charge, suivant la formulation en exponentielle décroissante de Frielander [11]. La pression calculée tient compte de l'angle de réflexion entre l'onde de souffle et la surface impactée, mais pas d'effets éventuels de diffraction de l'onde de souffle sur la structure, ni de réflexions multiples.

Dans les cas où ces effets ne peuvent être négligés, des calculs de dynamiques des fluides sont réalisés avec le solveur Eulérien du code OURANOS 3D [12]. Dans ces calculs, sont modélisés la charge explosive, l'air et la structure ; la présence du sol est éventuellement prise en compte par une condition de frontière parfaitement réfléchissante. Ces calculs sont menés depuis l'instant de détonation de la charge, jusqu'à ce que l'onde de choc transmise à l'air ait totalement diffracté autour de la structure et qu'aucune pression significative ne lui soit plus appliquée.

2.2 Comportement des matériaux

Le modèle de comportement PRM [13] décrit l'endommagement du béton sous faibles pressions de confinement selon deux variables scalaires, déterminant la perte de raideur du béton au cours de sa dégradation sous sollicitation de compression ou de traction. Il tient compte des effets de vitesse sur la résistance en traction du matériau et inclut un mécanisme d'amortissement interne, augmentant avec le niveau de dégradation du matériau, pour les cas de sollicitations cycliques. La dépendance des résultats à la finesse du maillage est limitée grâce à la méthode de régularisation d'Hillerborg [14], permettant la dissipation d'une énergie constante lors de la propagation d'une fissure. Ce modèle d'endommagement est de plus couplé à un modèle élasto-plastique inspiré du modèle de Krieg & Swenson [15], afin de reproduire les mécanismes mis en jeu aux plus forts niveaux de pression : compaction par fermeture de pores, cisaillement irréversible et effet de la teneur en eau du matériau. La méthode de couplage utilisée assure une parfaite continuité entre les deux modèles.

Le comportement de l'acier constitutif des armatures est représenté par le modèle élasto-plastique de Johnson-Cook [16] qui permet de rendre compte d'un écrouissage dépendant de la vitesse de sollicitation et d'un endommagement progressif jusqu'à rupture.

2.3 Réponse de la structure

La réponse des structures en béton armé est évaluée par la méthode des éléments finis (codes OURANOS, ABAQUS-Explicit ou LS-DYNA). Les modèles utilisés sont construits à partir d'éléments volumiques pour le béton et d'éléments linéaires de type poutre pour l'acier. Dans la plupart des cas, une hypothèse d'adhérence parfaite entre les deux matériaux est imposée.

Pour les configurations de charges très proches, des éléments n'ayant plus aucune résistance peuvent subir des déformations excessives, rendant le calcul difficile à poursuivre. Un processus d'érosion est

alors activé numériquement, afin d'éliminer du calcul les éléments ayant atteint un seuil d'extension prédéfini. Cette option est néanmoins utilisée avec précaution car l'érosion modifie irréversiblement la masse du modèle et une érosion excessive peut modifier la solution numérique.

Dans le cas d'un chargement issu de l'outil ConWep, les lois analytiques de pression sont directement appliquées à la surface des éléments exposés au souffle.

Dans le cas d'un chargement issu d'un calcul hydrodynamique, deux approches peuvent être adoptées. La plus facile à mettre en œuvre, consiste à effectuer d'abord ce calcul d'hydrodynamique en supposant que la structure est infiniment rigide et à positionner sur la « peau » de cette structure un réseau de stations enregistrant l'historique des pressions appliquées. Ces profils temporels sont ensuite appliqués comme conditions de chargement à la structure déformable dans le calcul par éléments finis. Cette méthode, faisant l'hypothèse d'un découplage entre le chargement et la réponse de la structure, est bien souvent suffisante compte-tenu des durées de chargement usuellement très brèves comparées aux temps de réponses structurales.

Néanmoins, un couplage permettant les calculs simultanés du chargement et de la réponse structurale doit être envisagé dans certains cas, notamment les configurations les plus sévères générant de très fortes dégradations locales de la cible (cratérisation, ouverture de brèche). Le code OURANOS permet de réaliser un couplage entre ses solveurs Eulériens et Lagrangien grâce à un algorithme de contact-glissement de type Pronto [18]. Le calcul couplé est alors mené tant que les fluides eulériens (air et produits de détonation) transmettent de l'énergie à la structure lagrangienne. Puis, afin de réduire les temps de calcul, seul le calcul Lagrangien est ensuite poursuivi jusqu'à atteindre la réponse complète de la structure.

3 Comparaisons expérience-calcul

3.1 Explosions proches d'une dalle

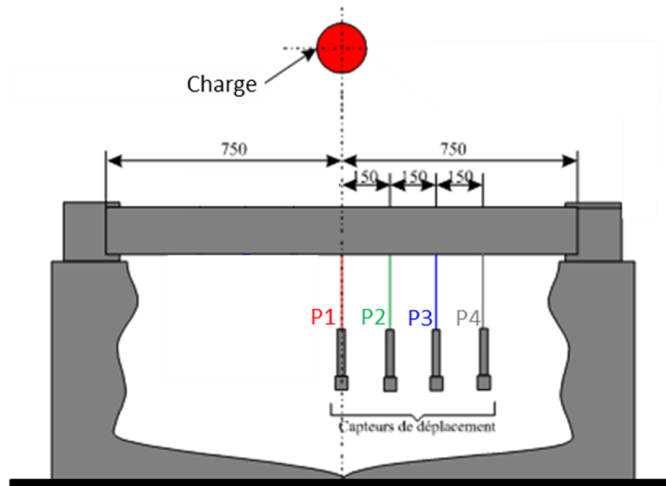
Dans cette configuration, une charge sphérique est positionnée sur l'axe central d'une dalle en béton armé de dimensions 1,5 m x 1,5 m x 0,1 m, encastrée à ses bords (figure 1a). La dalle est renforcée par deux nappes de treillis d'acier de diamètre 10 mm, de mailles de 10 x 10 cm², distantes de 1,5 cm des faces avant et arrière. Des capteurs de type LVDT (Linear Velocity Differential Transformer) placés en face arrière enregistrent les déplacements de la dalle au cours de l'essai.

Cet essai est simulé avec ABAQUS-Explicit en appliquant un chargement issu du module Conwep et en représentant seulement un quart de la dalle.

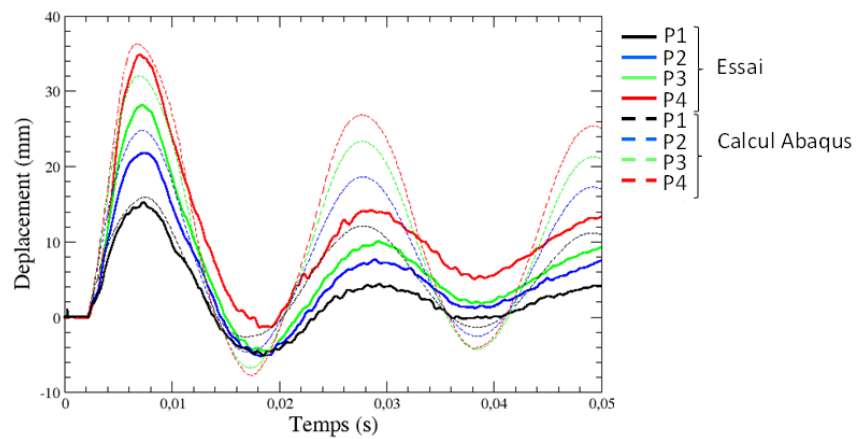
La figure 1b compare l'évolution temporelle des déplacements obtenus expérimentalement et numériquement : les pics de déplacements maximaux et la fréquence des oscillations post-pic sont bien restitués par le calcul, tandis que l'amortissement calculé est trop faible. L'introduction d'un frottement de contact entre la dalle et son support améliorerait vraisemblablement la restitution de l'amortissement expérimental.

La figure 1c montre les faciès d'endommagement obtenus après l'essai. La face avant de la dalle présente quelques fissures aux coins. La face arrière présente des fissures diagonales allant des coins de la dalle vers son centre, ainsi que quelques fissures orthogonales au centre. Les faciès numériques représentent l'extension du béton au-delà de 0.1 mm après 50 ms de calcul, soit après trois oscillations de la dalle. La face avant présente une légère fissuration radiale. En face arrière, des fissures radiales et orthogonales sont obtenues, avec un réseau orthogonal plus développé que dans l'expérience.

a)



b)



c)

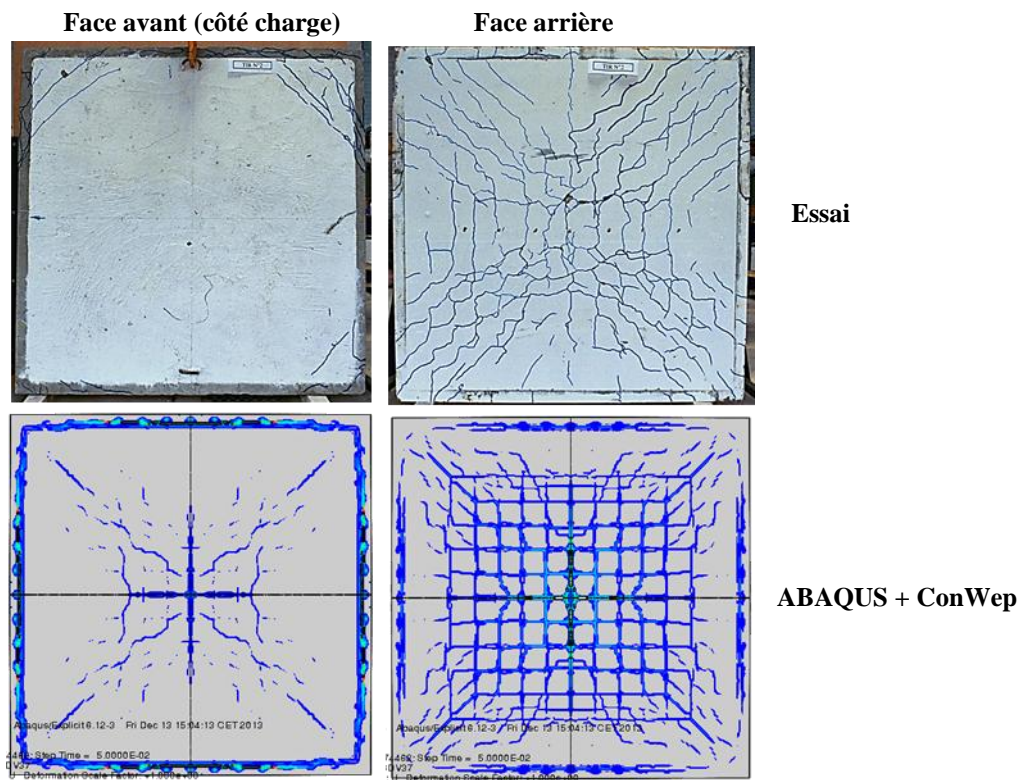


Figure 1 : explosion proche d'une dalle en béton armé a) configuration d'essai b) et c) comparaison des déplacements dynamiques et faciès de fissuration expérimentaux et numériques

3.2 Explosions proches d'un poteau

Dans cette configuration, des poteaux de section 0,1 m x 0,1 m et de 1 m de hauteur sont soumis à l'explosion d'une charge sphérique située à 30 cm de hauteur, dont le centre est aligné avec le plan de symétrie vertical du poteau. La distance de la charge à la face avant du poteau est progressivement réduite de 18 à 10 cm. Les poteaux sont renforcés par 4 armatures longitudinales de diamètre 8 mm et 12 cadres transverses de diamètre 6 mm, espacés de 10 cm dans la partie centrale du poteau et de 5 cm à proximité des extrémités. Le pied des poteaux sont maintenus dans des socles métalliques de 10 cm de hauteur soudés au sol. Leur sommet est maintenu par deux appuis métalliques cylindriques avant et arrière, permettant la rotation du poteau dans le sens du souffle. Des capteurs LVDT (Linear Velocity Differential Transformer) placés en face arrière enregistrent les déplacements du poteau au cours de l'essai.

Compte-tenu de l'importance des effets de diffraction dans cette configuration, des calculs de dynamique des fluides ont été réalisés avec le solveur eulérien d'OURANOS 3D en supposant les poteaux rigides (figure 2a).

La figure 2b compare les champs d'impulsion positive appliquée sur la face avant du poteau obtenus avec l'outil ConWep et avec le calcul OURANOS 3D. Des différences significatives sont observées : elles sont attribuables à la non-prise en compte par ConWep des détentes latérales aux bords du poteau, mais aussi de la réflexion sur le sol en partie basse et du renforcement de l'onde réfléchie par effet de Mach le long de la partie centrale du poteau. Aux très faibles distances près de la charge, se pose la question des limites de validité des lois issues de ConWep et des surpressions calculées par OURANOS, non vérifiable actuellement par la mesure.

La figure 2c compare les évolutions temporelles de surpressions enregistrées lors de l'essai sur un capteur placé en partie haute du poteau, avec celles prévues par l'outil ConWep et calculées par OURANOS 3D. Elle montre la capacité du calcul OURANOS à mieux restituer à la fois la chronométrie, le pic de surpression maximale et l'impulsion du signal expérimental.

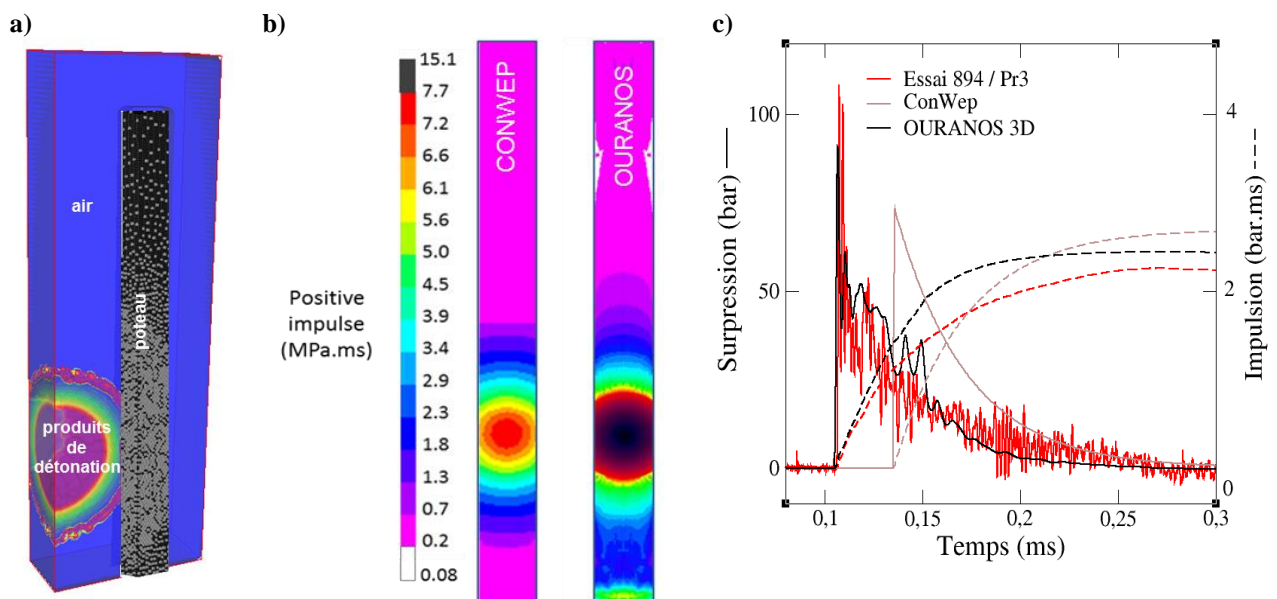


Figure 2 : chargement d'un poteau par une explosion proche a) calcul OURANOS Euler 3D b) champs d'impulsion positive en face avant c) profils temporels de surpression

La réponse dynamique des poteaux est calculée avec ABAQUS-Explicit. Les résultats obtenus présentent une bonne cohérence avec l'ensemble des résultats expérimentaux. Ils reproduisent notamment la transition du mode de réponse du poteau accompagnant la réduction de sa distance à la charge, depuis une réponse dominée par un mécanisme de flexion globale, jusqu'à une réponse localisée associée à un endommagement sévère du béton et de l'acier (figure 3a). Les faciès d'endommagement observés, dominés par des fissurations diagonales depuis le point de visée directe de la charge en régime de flexion sont relativement bien reproduits par le calcul. Les effets de cratérisation en face avant sont toutefois sous-estimés par le calcul, vraisemblablement du fait de l'hypothèse d'adhérence parfaite entre béton et acier. Les déplacements dynamiques à mi-hauteur calculés à partir de chargements issus de ConWep sont sur-estimés, tant sur les flèches maximales que sur les flèches résiduelles (figure 3b). La restitution est meilleure avec les chargements issus d'OURANOS, bien que plus satisfaisante sur les flèches maximales que sur les flèches résiduelles et les fréquences d'oscillations post-pic. Les écarts obtenus sur ces deux dernières valeurs sont attribués aux difficultés de représentation des conditions aux limites réelles et de prise en compte des effets de frottement intervenant dans l'amortissement des déplacements.

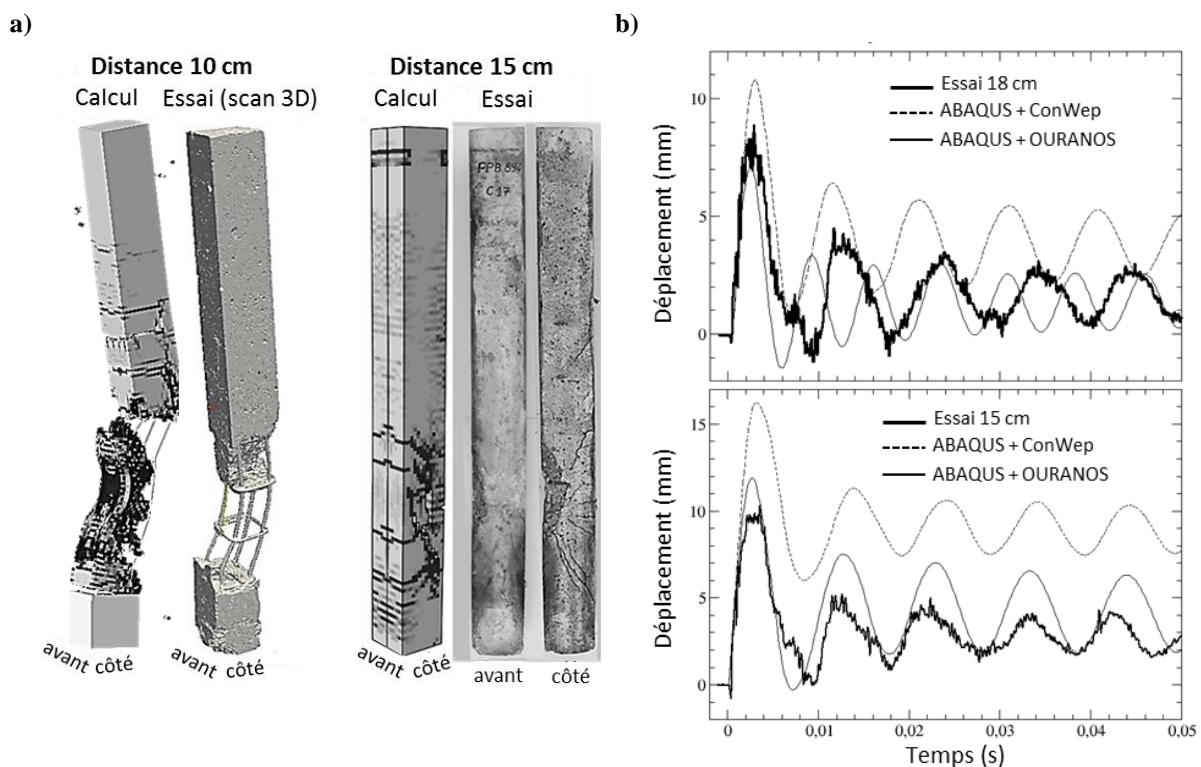


Figure 3 : explosions proches de poteaux en béton armé, comparaison expérience-calculs a) faciès d'endommagement b) déplacements à mi-hauteur

3.3 Explosions au contact d'une dalle

Une charge sphérique de masse variable est positionnée à 6 cm du centre de dalles en béton, armées ou non dans leur partie centrale, de dimensions latérales 1,4 m x 1,4 m et d'épaisseurs égales à 10,4 ou 10,8 cm. La face arrière de la dalle est maintenue en appui sur un cadre métallique. Pour les masses d'explosif les plus faibles, les dommages locaux observés sont une cratérisation peu étendue et de faible profondeur en face avant, ainsi qu'un écaillage plus large et profond en face arrière (figure 4a). Pour les masses plus importantes se produit une ouverture de brèche traversant l'épaisseur de la dalle

de part en part, la face avant présentant une perforation nette de la largeur de la brèche et la face arrière un écaillage plus large (figure 4b).

Les résultats expérimentaux obtenus pour des charges identiques sur dalles ferrillées ou non en partie centrale étant très proches, il a été fait l'hypothèse que des simulations en géométrie 2D-axisymétrique et sans ferrailage, pouvaient, en première approche, être pertinentes. Les calculs sont réalisés dans un premier temps par couplage des solveurs Euler et Lagrange d'OURANOS jusqu'à 500 μ s après la détonation de la charge. Puis, une fois que les fluides eulériens (air et produits de détonation) n'exercent plus de pression significative sur la dalle, seul le calcul Lagrange est poursuivi jusqu'à 20 ms. Durant la phase de couplage, l'ouverture de brèche, simulée par l'érosion progressive de mailles lagrangiennes de la dalle, rend le calcul délicat. La topologie des lignes de contact entre les objets eulériens et l'objet lagrangien est en effet régulièrement modifiée. Il s'en suit une perte soudaine de contact entre les objets eulériens et lagrangiens au moment de l'érosion lagrangienne et une très forte détente des fluides eulériens juste après l'érosion.

Malgré ces difficultés numériques, les calculs reproduisent bien l'occurrence ou non de l'ouverture d'une brèche selon la masse d'explosif mise en jeu, y compris dans un cas à la limite d'ouverture (figure 4c). Les mécanismes de cratérisation en face avant et d'écaillage en face arrière sont activés numériquement, mais l'étendue des cratères et écaillages calculée est généralement sur-évaluée. Enfin, les vitesses des éjectas en face arrière sont en très bon accord avec l'expérience : l'écart moyen étant égal à 8.5 % pour une gamme de vitesses allant de 16 à 117 m/s.

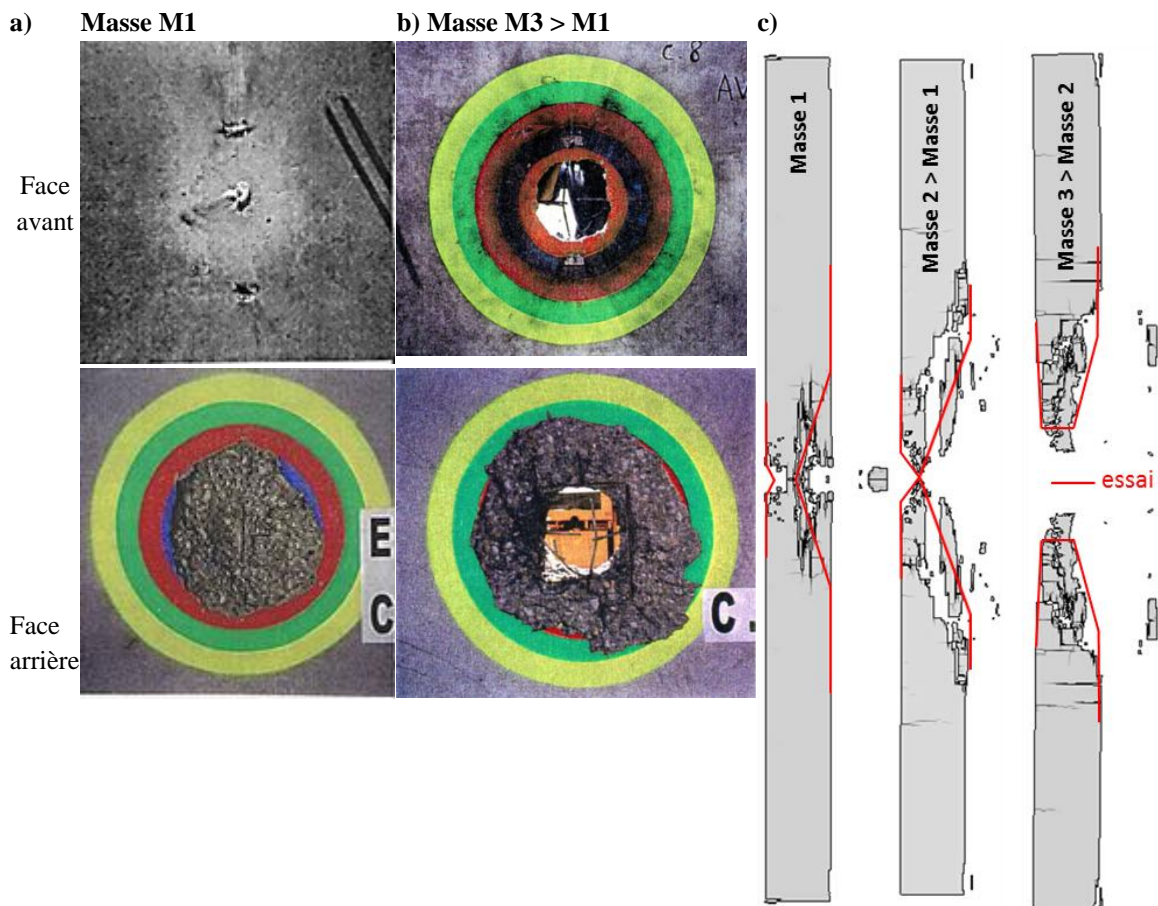


Figure 4 : explosions au contact de dalles en béton armé a) et b) faciès d'endommagement observés c) comparaison calcul – expérience

4 Conclusion

Cet article présente différentes méthodes de simulation pour restituer les effets d'explosions proches de structures en béton armé. Trois types de configurations sont étudiés : explosion proche d'une dalle, explosion proche d'un poteau et explosion au contact d'une dalle. Les effets à reproduire couvrent à la fois des effets structuraux globaux de flexion, ainsi que des effets plus localisés pouvant aller jusqu'à l'ouverture d'une brèche dans la structure.

Suffisant pour simuler le chargement sur une dalle, l'outil ConWep montre ses limites dans le cas d'un poteau isolé où les effets de diffraction ne sont plus négligeables. Un calcul hydrodynamique eulérien, mené avec OURANOS 3D, permet de mieux restituer le chargement appliqué à la structure. Ce calcul peut même être couplé au calcul de la réponse structurale, grâce au couplage Euler-Lagrange d'OURANOS.

Les résultats obtenus démontrent la pertinence du modèle de béton PRM et des méthodes numériques adoptées pour restituer de manière satisfaisante la réponse dynamique des structures soumises aux effets d'une explosion, qu'elle soit prédominée par une réponse globale ou locale. Les effets de flexion sont relativement bien reproduits dans la phase initiale de fléchissement dynamique. Les faciès d'endommagement sont globalement cohérents avec les observations. L'ouverture ou non d'une brèche est correctement reproduite sur les cas étudiés.

Des progrès doivent être encore faits dans la restitution de l'amortissement post-pic et de la déformée résiduelle des éléments de structures, ou encore dans l'étendue des zones de cratérisation et d'écaillage du béton. Il convient aussi de garder à l'esprit que la réponse des structures en béton armé est fortement influencée par de nombreuses sources d'incertitudes : charges, géométries, matériaux... L'analyse de l'influence de la variabilité de ces paramètres constituera un axe de travail futur.

Références

- [1] C.N. Kingery and G. Bulmash, Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst, Report ARBL-TR-02555, U.S. Army BRL, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984
- [2] T.A. Rose and P.D. Smith, An approach to the problem of blast wave clearing on finite structures using empirical procedures based on numerical calculations, 16th Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock (MABS16), Oxford, UK, 2000
- [3] D. Bogosian, J. Ferritto and Y. Shi, Measuring uncertainty and conservatism in simplified blast models, 30th Explosive Safety Seminar, Atlanta, Georgia, 2002
- [4] S.E. Rigby, A. Tyas and T. Bennett, Single-degree-of-freedom response of finite targets subjected to blast loading – the influence of clearing, *Engineering Structures* 45 (2012) 396-404.
- [5] M. Teich and N. Gebbeken, The influence of the underpressure phase on the dynamic response of structures subjected to blast loads, *International Journal of Protective Structures* 1 (2010) 219-234

- [6] Y. Shi, H. Hao and L. Zhong-Xian, Numerical simulation of blast wave interaction with structure columns, *Shock Waves* 17 (2007) 113-133
- [7] S.J. Yao, D. Zhang, F.Y. Lua, W. Wang, X.G. Chen, Damage features and dynamic response of RC beams under blast, *Engineering Failure Analysis* 62 (2016) 103-111
- [8] Y. Shi, H. Hao and Z.X. Li, Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast load, *International Journal of Impact Engineering* 35 (2008) 1213-1227
- [9] J. Xu, C. Wu, H. Xiang, Y. Su, Z.X. Li, Q. Fang, H. Hao, Z. Liu, Y. Zhang, J. Li, Behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete columns subjected to blast loading, *Engineering Structures* 118 (2016) 97-107
- [10] PREVI, Pôle de Recherche et d'Etudes sur la Vulnérabilité des Infrastructures, CEA-Gramat + 3S-R de l'Université Grenoble Alpes et de Grenoble INP (UMR CNRS 5521) + laboratoire LamCube (Laboratoire de Mécanique Multiphysique et Multiéchelle) de l'Université des Sciences et Technologies de Lille I (UMR CNRS 8107) + laboratoire LMT (Laboratoire de Mécanique et Technologie) de l'ENS Paris-Saclay (UMR CNRS 8535).
- [11] W. Baker, *Explosions in air*, University of Texas Press, Austin, Texas, 1973
- [12] H. Jourden, J-M. Sibeaud, M. Adamczewski-Cauret, Logiciel OURANOS : présentation générale et utilisation en détonique, *Revue Scientifique et technique de la Défense*, 4 (1995) 51-58
- [13] C. Pontiroli, A. Rouquand and J. Mazars, Predicting concrete behaviour from quasi-static loading to hypervelocity impact: an overview of the PRM model, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14 (2010) 703-727
- [14] A. Hillerborg, M. Modeer and P.E. Petersson, Analysis of crack formation and growth in concrete beams of fracture mechanics and finite element, *Cement and Concrete Research*, 6 (1976) 773-782
- [15] R.D. Krieg, A simple constitutive description for soils and crushable foams, Sandia National Laboratories Report, SC-DR-72-0833, Albuquerque, New Mexico, 1978
- [16] G. R. Johnson and W. H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1) (1985) 31-48
- [17] S.W. Attaway, B.A. Hendrickson, S.J. Plimpton, D.R. Gardner, C.T. Vaughan, K.H. Brown, M.W. Heinstein, A parallel contact detection algorithm for transient solid dynamic simulations using PRONTO3D, *Computational Mechanics*, 22 (1998) 143-159