



HAL
open science

CASTEM-PLEXUS: un logiciel de dynamique rapide pour évaluer l'intégrité des structures en cas d'accident

Marie-France Robbe, Pascal Galon, Tamara Yuritzinn

► **To cite this version:**

Marie-France Robbe, Pascal Galon, Tamara Yuritzinn. CASTEM-PLEXUS: un logiciel de dynamique rapide pour évaluer l'intégrité des structures en cas d'accident. INSTRUC 4 - 4e Conférence INSTRUC, Prévion et estimation de la durée de vie des structures mécaniques, Nov 1999, Courbevoie, France. pp.224-233. cea-03956828

HAL Id: cea-03956828

<https://cea.hal.science/cea-03956828>

Submitted on 25 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CASTEM-PLEXUS : UN LOGICIEL DE DYNAMIQUE RAPIDE POUR EVALUER L'INTEGRITE DES STRUCTURES EN CAS D'ACCIDENT

par M.F. ROBBE, P. GALON, T. YURITZINN

Commissariat à l'Energie Atomique - CEN Saclay - DRN/DMT/SEMT - 91191 Gif sur Yvette cedex - FRANCE

Résumé

La dynamique rapide concerne les phénomènes transitoires dont la durée est inférieure (ou du même ordre de grandeur) que la période propre du système considéré.

CASTEM-PLEXUS permet le calcul, par la méthode des éléments finis, de structures composées de fluides et de solides, avec une possibilité de couplage fluide-structure. Les structures sont soumises à des sollicitations dynamiques rapides pouvant conduire jusqu'à la ruine. Les calculs sont menés en 1D, 2D ou 3D suivant les besoins. La résolution en temps est explicite.

Les applications de CASTEM-PLEXUS peuvent être regroupées en cinq domaines principaux: impacts, explosions, circuits de tuyauterie, hydrodynamique et robotique.

Trois exemples d'application seront détaillés:

- impact d'un conteneur chutant à grande vitesse sur le sol,
- impact d'un jet de fluide (modélisé avec la méthode particulaire SPH) contre le couvercle d'une cuve,
- explosion de vapeur dans le fond de cuve d'un réacteur nucléaire (faisant intervenir un couplage eau-structure).

CASTEM-PLEXUS: A FAST DYNAMIC SOFTWARE TO ASSESS THE STRUCTURE INTEGRITY IN CASE OF ACCIDENT

Abstract

The fast dynamics concerns the transient phenomena which last less than (or as long as) the self-period of the considered system.

CASTEM-PLEXUS can perform computations of structures composed of fluids and solids, with a possibility of fluid-structure interaction. Fast dynamic loads, possibly leading to the structure collapse, are applied to the structures. The computations can be carried out in 1D, 2D or 3D. The code uses the finite element method and the time resolution is explicit.

The CASTEM-PLEXUS applications can be grouped into five main fields: impacts, explosions, pipe circuits, hydrodynamics and robotics.

Three examples of application are detailed:

- *impact of a container falling down at high speed,*
- *impact of a fluid spurt (represented thanks to the SPH particular method) against a tank lid,*
- *steam explosion in the lower head of a nuclear reactor (requiring a fluid-structure coupling).*

1. INTRODUCTION

La dynamique est la partie de la mécanique qui étudie les relations entre les forces et les mouvements. Depuis les premières réflexions de Newton sur les lois de l'attraction universelle, les chocs et les mouvements des fluides en 1666, concrétisées dans les "Principes mathématiques de la philosophie naturelle", l'étude de la dynamique s'est approfondie et structurée en plusieurs domaines.

La dynamique rapide concerne les phénomènes transitoires dont la durée est inférieure (ou du même ordre de grandeur) que la période de résonance du système considéré. Dans certains cas, les temps caractéristiques des phénomènes peuvent être très inférieurs au mode de vibration le plus bas de la structure.

CASTEM-PLEXUS est un logiciel général de dynamique rapide pour le calcul des structures, développé par le C.E.A. Saclay depuis 1978 [1, 2, 3].

Depuis la première version capable de traiter des problèmes plans et axisymétriques de structures bidimensionnelles, les capacités du code n'ont cessé d'augmenter:

- traitement des fluides eulériens et couplage fluide-structure,
- structures tridimensionnelles et monodimensionnelles impliquant la création de nombreux éléments,
- structures articulées avec des applications en robotique,

- modèles d'impact et de perforation avec une représentation à l'aide de billes,
- schémas du 2^e ordre de type Van Leer pour les ondes de choc en milieu fluide [4],
- ajout de nombreux matériaux (béton armé, multicouches pour les coques, modèles avec critère d'endommagement...),
- ajout de modèles spécifiques pour représenter des accidents dans les centrales nucléaires : réaction sodium-eau et accident de confinement dans les Réacteurs à Neutrons Rapides, explosion de vapeur et détonation hydrogène dans les réacteurs à eau pressurisée...

Pour le développement d'applications industrielles spécifiques, la structure de base de CASTEM-PLEXUS a été reprise pour donner lieu à la création de nouveaux logiciels développés en partenariat avec des industriels ou d'autres centres de recherche:

- PLEXIS-3C [5] est développé en collaboration avec le Centre Commun de Recherche d'Ispra en Italie pour le couplage fluide-structure,
- PROCOP est développé par Matra pour la mise en forme des matières plastiques,
- PLEXUS-R [6] est développé par la SFIM pour les structures articulées et la robotique.

Cet article a pour objet de faire le point sur les possibilités actuelles du logiciel CASTEM-PLEXUS en terme de types de problèmes traités et méthodes disponibles pour le calcul des structures, ainsi que de montrer des applications de calcul de structures pour des cas concrets d'accidents.

2. DESCRIPTION THEORIQUE

CASTEM-PLEXUS permet le calcul dynamique de structures, composées de solides et de fluides, par la méthode des éléments finis [7]. Les structures sont soumises à des sollicitations dynamiques rapides qui peuvent aller jusqu'à la ruine. Les calculs se font en 1D, 2D ou 3D suivant les besoins.

CASTEM-PLEXUS permet d'utiliser une formulation Lagrangienne, Eulérienne ou A.L.E. (Arbitrary Lagrangian Eulerian Method) [8]. Cette dernière formulation convient bien pour le calcul des grands déplacements et des grandes déformations. Une procédure de remaillage automatique est également disponible en cas de très grande déformation du maillage.

CASTEM-PLEXUS utilise la conservation de la masse pour calculer les flux de matière entre éléments contigus. Il résout l'équation de conservation de la quantité de mouvement (formulation variationnelle). Pour certains matériaux, il fait aussi appel à la conservation de l'énergie totale et calcule les flux d'énergie entre éléments.

La discrétisation temporelle est assurée par un algorithme explicite de Newmark [9] particulièrement adapté au suivi des variations rapides du chargement et aux comportements non linéaires des matériaux. La stabilité de l'algorithme est imposée par la condition de Courant-Friedrichs-Lewy [10]. Afin d'accélérer les calculs, CASTEM-PLEXUS utilise une matrice masse condensée sous forme diagonale [11]. Par ailleurs, le choix d'un algorithme explicite évite l'inversion de la matrice de rigidité.

CASTEM-PLEXUS dispose d'une large bibliothèque d'éléments en 1D, 2D plan, 2D axisymétrique et 3D. Des connexions 1D-2D et 1D-3D permettent de calculer simultanément des structures de formes variées. En 1D, des éléments spécifiques ont été développés pour les solides (barre, poutre), pour les fluides (tube) et pour le couplage fluide-structure (tuyau). En 2D et 3D, les éléments massifs quadratiques et les coques sont réservés aux solides. Par contre, les éléments massifs linéaires sont utilisables indifféremment pour les fluides ou les solides.

L'utilisateur a également accès à une bibliothèque de matériaux classiques (Von Mises, gaz parfait, fluide isotherme...) ou plus spécifiques (béton, composites multicouches, Von Mises couplé avec des modèles d'endommagement, mécanismes associés à des articulations rigides, eau diphasique, impédances de type pompe ou clapet, matériaux multi-constituants tels que "accident de confinement" ou "réaction sodium-eau" ou "détonation hydrogène"...). Un matériau "libre" est également disponible : l'utilisateur peut y définir facilement sa propre loi de comportement.

Les équations de conservation sont complétées par des liaisons servant à imposer localement les conditions aux limites, les couplages entre degrés de liberté ou les mouvements imposés. Des forces de liaison, déterminées par la technique des multiplicateurs de Lagrange, sont introduites dans l'équation du mouvement [12, 13, 14] afin de gérer de manière couplée le mouvement de l'ensemble de la structure. CASTEM-PLEXUS est capable de traiter les redondances de liaisons.

Le pré- et post-traitement peuvent être effectués avec le code CASTEM ou des outils spécifiques tels que IDEAS ou AVS. En effet, CASTEM-PLEXUS dispose d'entrées et sorties au format universel. Celles-ci permettent une connexion avec les produits du commerce ou des logiciels "maison" en vue de réaliser des chaînages de codes pour des applications particulières (MC3D et CASTEM-PLEXUS [15] pour l'explosion de vapeur, CASTEM-PLEXUS et ASTER pour les tuyauteries).

CASTEM-PLEXUS se caractérise par la grande généralité de ses modèles et une structure ouverte permettant l'introduction facile de nouveaux développements, ce qui rend possible une collaboration active avec des universités et des industriels.

3. DOMAINES D'APPLICATION

Les applications de CASTEM-PLEXUS peuvent être regroupées en cinq domaines principaux : impacts, explosions, circuits de tuyauteries, problèmes d'hydrodynamique et robotique.

3.1. Impacts

La sécurité des installations industrielles implique une analyse détaillée des accidents liés aux impacts et projectiles [16]. CASTEM-PLEXUS est capable de traiter des accidents impliquant :

- une déformation seule : démonstration d'acceptabilité des déformations d'un ensemble de structures situées sur la trajectoire d'un objet lourd ayant chuté à la suite d'un accident de manutention...
- une pénétration ou fragmentation : perforation d'une dalle par un objet dur avec éjection de fragments, projection et écrasement d'un jet de fluide contre une structure déformable [17]...

3.2. Explosions

Ce thème a été abordé à travers la sûreté des réacteurs (tenue mécanique des composants des réacteurs nucléaires dans l'hypothèse de situations accidentelles [18]) et pour des applications spécifiques à la Défense Nationale (explosion d'une charge à proximité d'une structure immergée). Les modèles disponibles peuvent également être appliqués ou transposés pour des situations très diverses.

3.3. Circuits de tuyauteries

La sécurité des installations industrielles exige une bonne compréhension des mouvements de tuyauteries [19, 20] en présence d'un écoulement interne, notamment lors de transitoires intenses consécutifs à un changement de régime de fonctionnement ou lors d'une dépressurisation brutale du circuit à la suite d'une rupture de tuyauterie [21, 22, 23, 24].

3.4. Hydrodynamique

Un couplage avec les équations de l'hydrodynamique permet de traiter la propagation d'écoulements variés en présence d'obstacles : écoulements dans des moteurs ou des tuyères. Sont aussi pris en compte, dans la modélisation du code, les effets des mélanges, de la diffusion et de la combustion des gaz.

3.5. Robotique

Le calcul des structures fait parfois intervenir des articulations dont la modélisation est indispensable pour analyser le comportement mécanique de l'ensemble. La souplesse de la structure d'accueil de CASTEM-PLEXUS a permis d'insérer des éléments (roulements, rotules, glissières et contacts) et des commandes spécifiques (capteurs, actionneurs et lois de commandes). Ces éléments sont traités comme des éléments finis usuels.

4. IMPACT D'UN CONTENEUR CHUTANT A GRANDE VITESSE SUR LE SOL

Dans l'optique du transport de conteneurs de matières radioactives par avion, un nouveau concept d'emballage dit à parois minces (colis de type C) est étudié. Ce futur emballage devra satisfaire les recommandations édictées par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA). L'une de ces exigences est de démontrer l'intégrité d'un tel emballage lors d'un impact à 90 m/s.

Une étude du comportement d'un conteneur à échelle réduite impactant le sol à 130 m/s a été effectuée avec le code de dynamique rapide CASTEM-PLEXUS afin d'identifier les phénomènes importants. Une attention particulière a été apportée au traitement du contact des plis formés lors de l'impact.

Lors des chocs, certaines structures métalliques peuvent flamber. Le flambage de la structure métallique, lors de l'impact, se caractérise par la formation de grands plis. Pour éviter l'interpénétration des plis qui n'est pas conforme à la réalité et qui réduit la déformation calculée, un algorithme de contact [25], appelé auto-contact, a été développé dans CASTEM-PLEXUS. La structure est ici modélisée par des éléments coques (éléments SHB8), sinon il serait nécessaire de modéliser dans l'épaisseur plusieurs couches d'éléments massifs (au moins 3 ou 4) ce qui entraînerait un coût de calcul rédhibitoire.

Modélisation du conteneur

L'objectif de cette étude est d'analyser l'interaction entre la coque externe du conteneur et son contenu lors d'un impact à grande vitesse.

Dans cette étude, le matériau constituant le conteneur est un Inox 316 L. La plasticité est prise en compte dans CASTEM-PLEXUS par l'intermédiaire du critère de "Von Mises Isotrope" c'est-à-dire une loi de comportement indépendante de la vitesse de déformation. Elle correspond à la courbe de traction statique de l'Inox 316 L. La déformation maximale est de 45 % et, lorsque, dans la simulation, la fin de la courbe de traction est atteinte, CASTEM-PLEXUS la prolonge en conservant la pente.

Les principales caractéristiques du matériau, à 20°C, sont :

- Module d'Young : $2,2 \cdot 10^5$ MPa
- Masse volumique : 7850 kg/cm^3
- Limite d'élasticité à 0,2 % : 220 MPa
- Coefficient de Poisson : 0,3

Le conteneur a été schématisé en :

- une enveloppe externe qui comporte le fond, la coque et le couvercle,
- un cylindre creux qui représente le contenu du conteneur.

On a considéré que l'encastrement est parfait entre la partie coque du conteneur et le fond, respectivement le couvercle. De manière à pouvoir considérer un encastrement de même nature entre le cylindre creux et le fond, respectivement le couvercle, la longueur du cylindre creux est égale à celle de la partie coque du conteneur.

Les dimensions de l'emballage étudié sont telles que la coque et le cylindre creux :

- ont la même épaisseur qui représente 11 % du rayon externe de la coque,
- sont séparés par une distance représentant 21 % du rayon externe de la coque.

Les éléments retenus pour mailler les parties coque et cylindre creux de l'emballage sont des éléments hexaédriques intégrés dans l'épaisseur (SHB8). Un élément SHB8 est tel que les 4 premiers noeuds sont sur la peau externe et les 4 derniers noeuds sur la peau interne. On a considéré que le fond et le couvercle de l'emballage sont suffisamment rigides pour ne pas se plier : ils sont donc maillés avec des éléments standard CUB8.

La même découpe axiale (40 intervalles) est appliquée dans les parties coque et cylindre creux du conteneur. Le maillage comporte 4212 noeuds dont 3936 noeuds pour les parties concernées par l'auto-contact (coque et cylindre creux), 1920 éléments SHB8 (coque et cylindre creux) et 208 éléments CUB8 (fond et couvercle).

Traitement du contact

Pour l'algorithme d'auto-contact, les zones en contact sont les faces interne et externe de la coque du conteneur d'une part et celles du cylindre creux d'autre part. Comme cet algorithme de contact ne permet pas de gérer l'interaction possible entre le cylindre creux et la coque du conteneur, une condition de glissement entre le cylindre et la coque a été introduite dans la simulation CASTEM-PLEXUS de manière à limiter l'interaction entre la coque et le contenu du conteneur.

L'emballage est parfaitement vertical. Tous les noeuds du conteneur ont la même vitesse initiale correspondant à la vitesse d'impact dans la direction verticale, soit 130 m/s.

Le sol est considéré comme un plan indéformable et est modélisé dans CASTEM-PLEXUS par un point matériel dont tous les déplacements sont bloqués. Ce point matériel est situé à une distance d_0 parcourue par l'emballage dans la direction de l'impact.

Dans le manuel d'utilisation de CASTEM-PLEXUS, il est précisé que d_0 doit être égale au minimum à la distance parcourue par le projectile, en l'occurrence le conteneur, durant un pas de temps. La distance d_0 retenue dans les calculs vaut 0,08 mm. Du point de vue dynamique, la condition de choc est représentée par la directive IMPACT du code avec le coefficient de restitution du choc valant 0, ce qui correspond à un choc mou. Ce qui signifie que les noeuds auront tous la même vitesse après le choc.

L'énergie cinétique initiale mise en jeu est importante dans la déformation de la structure. Elle dépend de la vitesse d'impact et des masses en présence. A la masse du conteneur, s'ajoute la masse effective de son contenu. Pour avoir une énergie cinétique initiale suffisamment importante pour initier le phénomène de pliage, cette masse a été prise du même ordre de grandeur que la masse du conteneur et a été uniformément répartie sur tous les noeuds du cylindre creux.

Résultats

Le calcul a été arrêté 0,8 ms après le début de l'impact, car le contenu a fortement interagi avec la coque du conteneur.

Des plis se sont formés sur le contenu et la coque du conteneur (cf. figure 1). Grâce au traitement de l'auto-contact, les plis de la coque du conteneur (1 pli) et du cylindre creux (3 plis) ont pu se fermer sans s'interpénétrer. L'allure des plis du contenu indique que le phénomène physique a conduit au percement de la coque du conteneur par le cylindre creux : le cylindre creux a totalement transpercé la coque à une distance du bord impactant en premier le sol, inférieure à 6 % de la longueur du conteneur.

Le conteneur, 0,8 ms après le début de l'impact, présente un raccourcissement de 33 % de sa longueur initiale (cf. figure 2). Le tracé de la déformation plastique équivalente sur la déformée de la structure, à l'instant 0,8 ms, indique qu'un niveau de déformation plastique équivalente de 94 % est atteint (cf. figure 3).

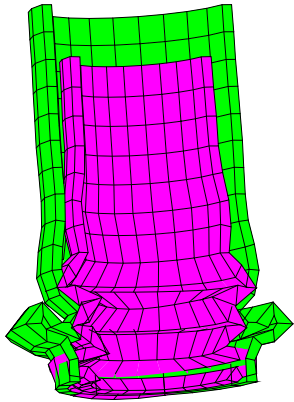


Figure 1 : Auto-contact

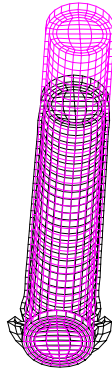


Figure 2 : Conteneur raccourci

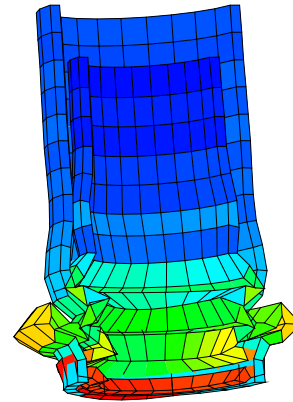


Figure 3 : Déformation plastique

Conclusion et perspectives

Le traitement de l'auto-contact des plis d'une coque fine est important pour analyser ses déformations en cas d'impact. Une simulation d'un conteneur à échelle réduite impactant le sol à une vitesse initiale de 130 m/s a été effectuée avec le code de dynamique rapide CASTEM-PLEXUS. Le contenu du conteneur a été modélisé par un cylindre creux de manière à en étudier l'interaction avec la coque externe du conteneur. De plus, des masses ajoutées représentant une masse totale égale à la masse du conteneur ont été réparties uniformément sur le cylindre creux du conteneur, de manière à avoir une énergie cinétique initiale suffisamment importante pour générer des déformations importantes et initier le phénomène de pliage.

Grâce à l'auto-contact introduit dans CASTEM-PLEXUS, cette étude a permis de mettre en évidence le flambage dynamique (création de plis) d'un conteneur à échelle réduite impactant à une vitesse initiale de 130 m/s ainsi que le rétrécissement axial important qui représente 33 % de la longueur initiale du conteneur, 0,8 ms après le début de l'impact. On a montré sur cette configuration simple du contenu modélisé par une coque cylindrique qu'il y a percement de la coque du conteneur par le contenu lors d'un impact à grande vitesse.

Ce résultat devrait être confirmé par une étude avec la géométrie réelle d'un conteneur et une modélisation plus détaillée du contenu (répartition des masses internes et des appuis ainsi que des caractéristiques mécaniques du matériau constitutif).

5. IMPACT D'UN JET DE FLUIDE CONTRE LE COUVERCLE D'UNE CUVE

Dans le cas très peu probable où se produirait simultanément dans un Réacteur à Eau Pressurisée une perte du système de refroidissement et une défaillance des systèmes de sauvegarde, on pourrait aboutir à la fusion du coeur et au relâchement de produits radioactifs hors du circuit primaire si aucune procédure de récupération d'eau n'était efficace.

Le contact entre la coulée de corium et l'eau peut entraîner une explosion de vapeur. Le risque d'une telle explosion est la création d'un projectile susceptible de percuter le couvercle de la cuve et ainsi de mettre en défaut son étanchéité. Pour étudier la réponse du couvercle, un programme d'essais, nommé BERDA a été initié en Allemagne à FZK [26]. Il correspond à une série d'essais d'impact sur le couvercle d'une cuve de réacteur à l'échelle 1:10.

Le projectile pendant l'impact est fortement déformé, il s'écoule sur le couvercle. Pour modéliser ce matériau écoulable, on utilise une des méthodes particulières disponible dans CASTEM-PLEXUS :

- la méthode Nabor [27, 28, 29]. Elle consiste à discrétiser le projectile par un assemblage de particules réparties initialement sur un réseau géométrique bien défini. Pour chaque couple de noeuds voisins, s'exercent des forces opposées fonction de la distance entre ces noeuds et de la répartition spatiale des particules les plus proches.

- la méthode SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics). Cette méthode a été utilisée avec succès pour modéliser l'impact d'oiseaux sur les aubes de turbines de réacteurs d'avions [30, 31].

L'idée de base de la méthode est de traiter un milieu continu comme un ensemble de particules dont le mouvement du centre de masse est déterminé par les lois de conservation de la mécanique des milieux continus.

Le principe de la méthode repose sur l'identité triviale suivante, pour une fonction f :

$$f(\vec{r}) = \int f(\vec{r}') \delta(\vec{r} - \vec{r}') dV' \quad (1)$$

avec : \vec{r} : vecteur position
 δ : distribution de Dirac

En premier lieu on cherche à approcher l'intégrale précédente par un noyau "régularisant" c'est-à-dire en remplaçant la distribution de Dirac par la "fonction noyau" $W(\vec{r}, h)$ où h est la longueur caractéristique de lissage. On peut alors définir l'approximation $\langle f(\vec{r}) \rangle$ du champ $f(\vec{r})$:

$$f(\vec{r}) \approx \langle f(\vec{r}) \rangle = \int f(\vec{r}') W(\vec{r} - \vec{r}', h) dV' \quad (2)$$

De plus, le noyau possède les propriétés suivantes :

- lorsque la longueur de lissage tend vers 0, il se réduit à la distribution de Dirac

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\vec{r} - \vec{r}', h) = \delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (3)$$

- il est normalisé

$$\int W(\vec{r}, h) dV' = 1 \quad (4)$$

Nous cherchons maintenant à calculer une valeur approchée de l'intégrale (2). On écrit cette équation sous la forme suivante :

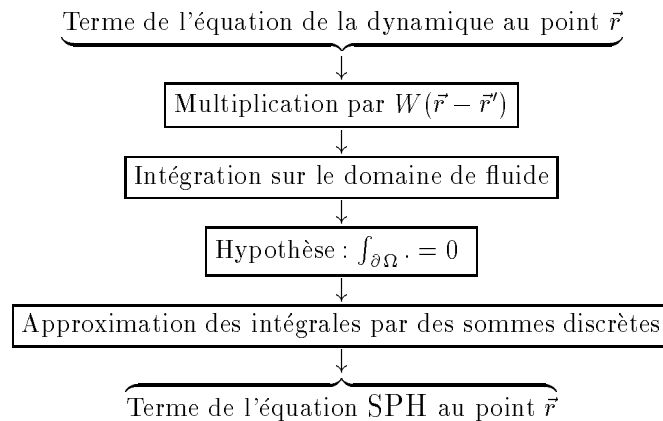
$$\langle f(\vec{r}) \rangle = \int \frac{f(\vec{r}')}{\rho(\vec{r}')} W(\vec{r} - \vec{r}', h) \rho(\vec{r}') dV'$$

Si l'on "imagine" le fluide composé de N volumes élémentaires dV^j de masse m^j tels que $dV^j = \frac{m^j}{\rho^j}$, l'intégrale précédente peut être approximée par une somme finie sur les N particules "voisines" :

$$\langle f(\vec{r}) \rangle \approx \sum_{j=1}^N m^j \frac{f(\vec{r}^j)}{\rho^j} W(\vec{r} - \vec{r}^j, h) \quad (5)$$

En utilisant l'équation (5), il est possible d'approximer un champ f par la fonction $\langle f(\vec{r}) \rangle$. Si le noyau W est n fois différentiable alors $\langle f(\vec{r}) \rangle$ l'est aussi.

En résumé pour construire les équations de la méthode SPH on procède de la manière suivante [31], quelque soit le système d'équations à résoudre :



Pour la simulation de l'impact du corium sur le couvercle d'une cuve, le projectile (de forme cylindrique) est modélisé en utilisant la méthode SPH et le couvercle par des éléments de coques triangulaires (cf figure 4).

Le couplage fluide-structure se fait par l'intermédiaire d'un algorithme de contact de type maîtres-esclaves [29]. Le calcul permet de déterminer le "trajet" du corium sur le couvercle (cf. figure 7) et de déterminer les parties de la structure les plus sollicitées (cf. figure 5 et 6). Ce type d'approche a été validé par comparaison avec des résultats expérimentaux [17].

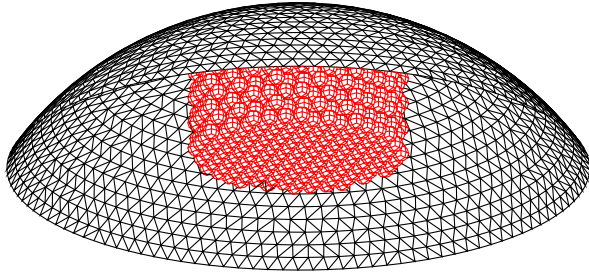


Figure 4 : Maillage

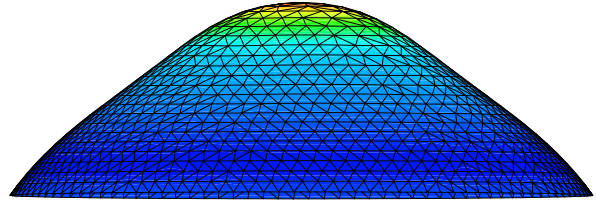


Figure 5 : Déformée de la structure à $t = 1$ ms

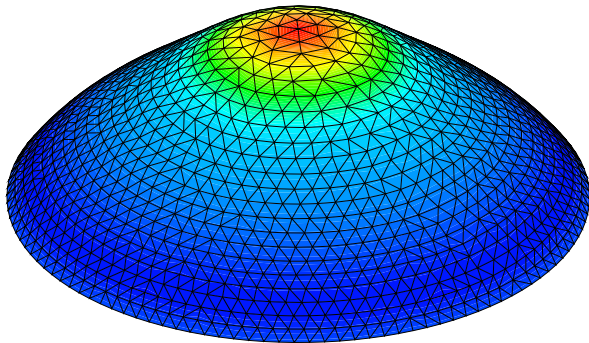


Figure 6 : Déformation plastiques à $t = 1$ ms

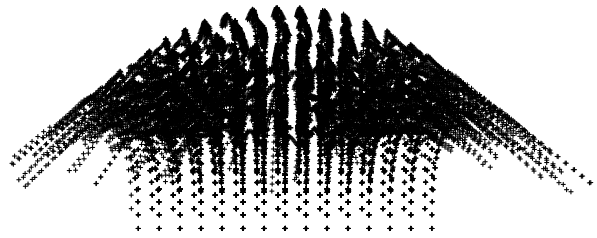


Figure 7 : Trajectoires des particules fluides

6. EXPLOSION DE VAPEUR DANS LE FOND DE CUVE D'UN REACTEUR NUCLEAIRE

Le circuit primaire d'un Réacteur à Eau Pressurisée se compose du réacteur, ainsi que d'un ensemble de tuyauteries et de composants. Ces composants ont pour mission de :

- transformer l'énergie thermique, fournie par échauffement de l'eau circulant au contact du coeur du réacteur, en vapeur servant à alimenter les turbines productrices d'électricité (les générateurs de vapeur). Ce procédé permet de réguler la température de l'eau circulant dans le coeur.
- faire circuler l'eau dans le circuit à débit constant (les pompes).
- maintenir l'eau à l'état liquide en pressurant le circuit (le pressuriseur).

Dans l'hypothèse d'une rupture de tuyauterie du circuit [21, 22, 23, 24], d'un dysfonctionnement du circuit d'injection de sécurité et d'une inintervention humaine, le circuit se vidangerait peu à peu. Cela conduirait à un dénoyage progressif du coeur du réacteur.

En l'absence de refroidissement, la température du coeur augmenterait, ce qui pourrait conduire à la fusion d'une partie du coeur. Le corium (partie fondue du coeur) chuterait alors dans l'eau froide restant au fond du réacteur. Par contact avec le corium à très haute température, l'eau se vaporiserait brusquement, ce qui provoquerait une explosion de vapeur [32].

Ce scénario accidentel [33] très hypothétique (moins d'une chance sur un million) est pris en compte pour le dimensionnement de la cuve du futur réacteur EPR.

Pour la simulation de l'accident, on suppose que la partie centrale du coeur a fondu et que le corium se trouve au milieu de l'eau liquide lorsque se produit l'explosion de vapeur (cf. figure 8). La modélisation présentée ici est axisymétrique (cf. figure 9).

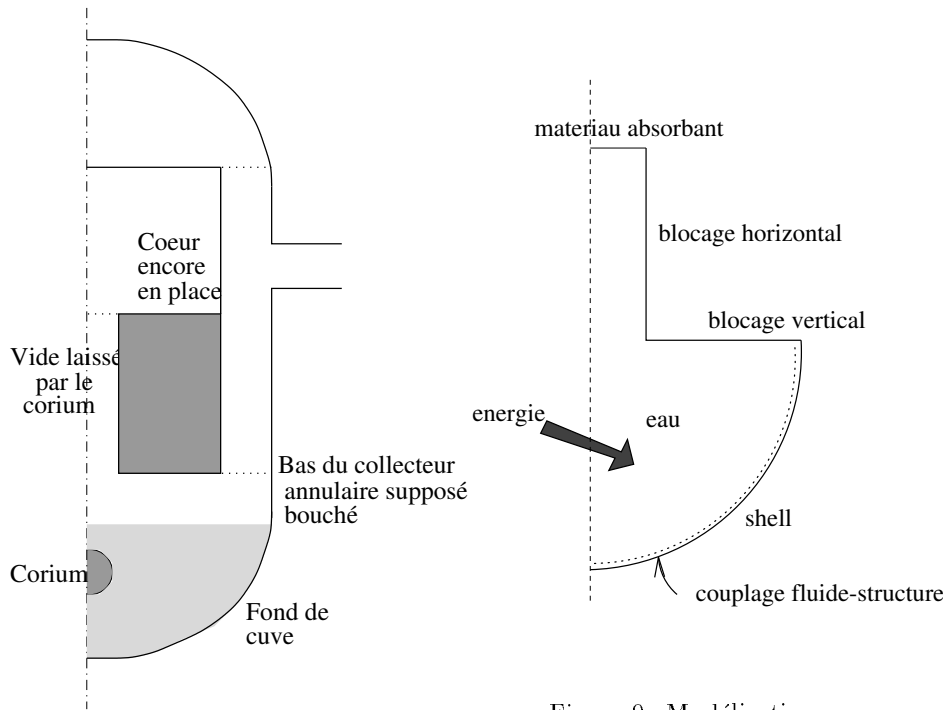


Figure 8 : Scénario

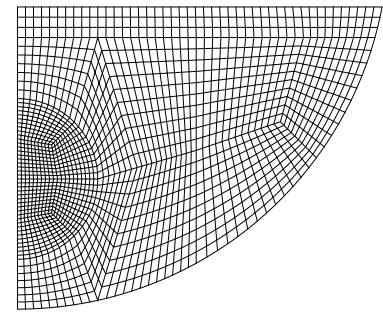


Figure 10 : Maillage

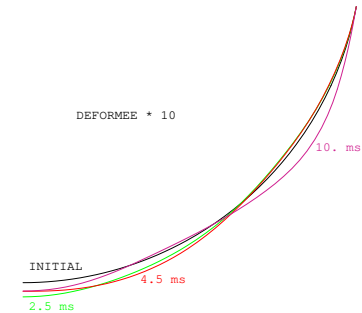


Figure 11 : Déformée

Un modèle d'eau diphasique a été développé dans CASTEM-PLEXUS pour pouvoir représenter correctement la phase de vaporisation. Le corium n'est pas maillé mais est pris en compte sous forme d'une source de chaleur qui intervient dans l'équation de conservation de l'énergie totale. La cuve est représentée par une coque mince. Elle est couplée au fluide via un couplage de type FSA [34, 35]. Les modèles d'explosion ont été qualifiés dans le cas d'un autre type d'accident (Accident de Confinement dans les RNR) par comparaison avec des résultats expérimentaux [36].

A partir d'un état initial au repos (cf. figure 10), CASTEM-PLEXUS permet de simuler le déroulement de l'explosion [37] et de visualiser la propagation de l'onde de pression dans l'eau diphasique (cf. figures 14 et 15) et la création et l'expansion de la bulle de vapeur (cf. figures 12 et 13). Les déplacements (cf. figure 11), déformations et contraintes dans la cuve sont obtenus grâce au couplage fluide-structure. Ces résultats permettent de localiser les zones de la cuve les plus sollicitées et de déterminer s'il y a un risque de rupture locale.

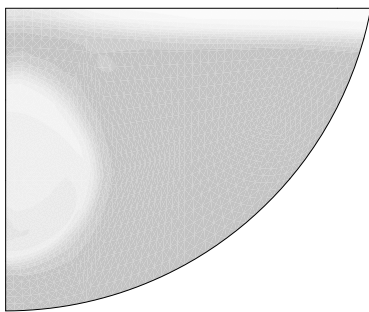


Figure 12: Densité à $t = 2$ ms

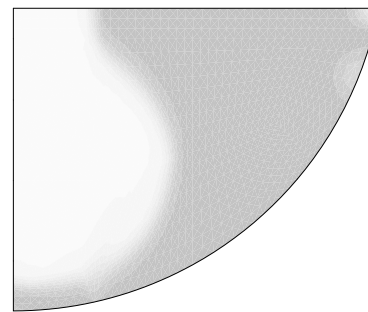


Figure 14: Densité à $t = 8$ ms

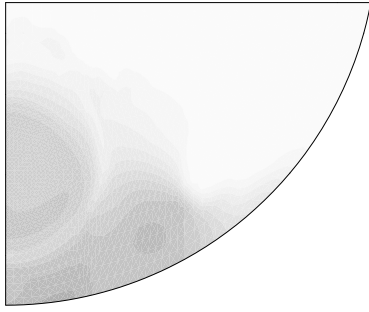


Figure 13: Pression à $t = 2$ ms

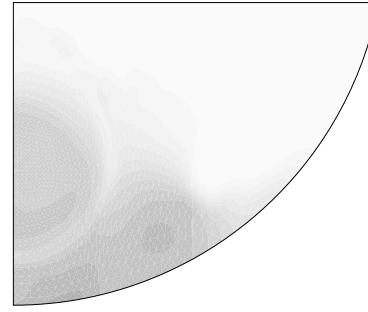


Figure 15: Pression à $t = 10$ ms

7. CONCLUSION

CASTEM-PLEXUS est un code généraliste de calcul de structures solides et fluides en dynamique rapide. Il permet de traiter des problèmes de type : impacts, explosions, circuits de tuyauteries, hydrodynamique et robotique. Trois applications de calcul de structures sont présentées ici : impact d'un conteneur chutant à grande vitesse sur le sol, impact d'un jet de fluide (modélisé par des billes) contre le couvercle d'une cuve et explosion de vapeur dans le fond de cuve d'un réacteur nucléaire avec un couplage fluide-structure.

Références

- [1] CHAVANT C., HOFFMANN A., VERPEAUX P., DUBOIS J., Plexus: A general computer code for explicit Lagrangian computation, *Proc. SMIRT 5, Vol. B 2/8 (1979)*.
- [2] HOFFMANN A., LEPAREUX M., SCHWAB B., BUNG H., Plexus: A general computer code for fast dynamic analysis, *Proc. Conf. Structural Analysis and Design on Nuclear Power Plant, Porto Alegre, Brésil (1984)*.
- [3] ROBBE M.F., LEPAREUX M., BUNG H., PLEXUS - Notice théorique, *Rapport CEA DMT/94-490*.
- [4] BREITUNG W., MASSIER H., MOSCHLE M., REDLINGER R., VESER A. (FZK-INR), GALON P., LEPAREUX M., Hydrogen-air detonation and their analysis with different codes. *DELLA LOGGIA E., editor, FISA 95, Reinforced concerned action on reactor safety, EUR16896 en (1996)*.
- [5] BUNG H., CASADEI F., HALLEUX J.P., LEPAREUX M., PLEXIS-3C: a computer code for fast dynamic problems in structures and fluids, *Proc. SMIRT 10 (1989)*.
- [6] LEPAREUX M., MICHELIN J.M., THIAULT D., Plexus-R: une extension de Plexus à la robotique, *Rapport CEA DMT/94-138*.
- [7] JAFFRE J., KERN M., MAMMERI B., MARROCCO A., SAIAC J.H., TAYLOR R.L., ZIENKIEWICZ O.C., La méthode des éléments finis. Formulation de base et problèmes linéaires, *Edition Afnor (1991)*.
- [8] BUNG H., LEPAREUX M., Le programme PLEXUS et la méthode A.L.E., *Rapport CEA DMT/82-012*.
- [9] HUGUES T.R.J., BELYTSCHKO T., A precis of developments in computational methods for transient analysis, *Journal Applied Mechanics, Vol. 50 (1983)*.
- [10] HUGUES T.R.J., LIU W.K., Implicit-explicit finite elements in transient analysis: stability theory, *Journal Applied Mechanics, Vol. 45, pp 371-374 (1978)*.
- [11] KEY S.W., Transient response by time integration: review of implicit and explicit operators, *Advanced Structural Dynamics, Edition Applied Science, Londres (1980)*.
- [12] BONINI J., Contribution à la prédiction numérique de l'endommagement de stratifiés composites sous impact basse vitesse, *Thèse 95-75-AM-09*.
- [13] BONINI J., BUNG H., Structural impact modelling in explicit finite element code with the Lagrange multiplier method, *Proc. SMIRT 14, Vol. J 1/6 (1997)*.
- [14] BONINI J., LLORCA F., BUNG H., JUANICOTENA A., Improving contact-friction conditions in dynamic simulations: application to the Taylor impact test, *Proc. DYMAT 97*.
- [15] VIVIEN N., ROBBE M.F., VALETTE M., A steam explosion assessment by thermalhydraulic and mechanical linked computations, *Proc. SMIRT 14, Vol. P 2/4 (1997)*.
- [16] LEPAREUX M., BUNG H., Comportement des structures sous impact, *Calcul des structures et Intelligence artificielle Vol.3 pp 31-52, Pluralis*.
- [17] STRUB C., AUTRUSSON B., Analysis of slug impact against the reactor pressure vessel head. Interpretation of the BERDA test 07 with the finite element code Plexus, *Proc. ASME/JSME Joint Pressure Vessels Piping Conference, San Diego, USA (1998)*.
- [18] STUDER E., GALON P., Hydrogen combustion loads - Plexus calculations, *Nuclear Engineering and Design 174, 119-134 (1997)*

- [19] LEPAREUX M., SCHWAB B., BUNG H., PLEXUS - A general computer program for the fast dynamic analysis - The case of pipe-circuits, *Proc. SMIRT 8, Vol. F1 2/1 (1985)*.
- [20] LEPAREUX M., SCHWAB B., HOFFMANN A., JAMET P., BUNG H., Un programme général pour l'analyse dynamique rapide - Cas des tuyauteries, *Proc. Colloque Tendances Actuelles en Calcul des Structures, Bastia, France (1985)*.
- [21] ROBBE M.F., LEPAREUX M., TROLLAT C., Hydrodynamic loads on a PWR primary circuit due to a LOCA. Pipe computations with the CASTEM-PLEXUS code, *Proc. SMIRT 15, Vol J, (1999)*.
- [22] ROBBE M.F., LEPAREUX M., TROLLAT C., Assessment of the hydrodynamic loads due to a LOCA in a 3-loop PWR. CASTEM-PLEXUS computations, *Proc. ICONE 8, Baltimore, USA (2000)*.
- [23] ROBBE M.F., POTAPOV S., A pipe-model to assess the hydrodynamic effects of a blowdown in a 4-loop PWR, *Proc. ICONE 8, Baltimore, USA (2000)*.
- [24] ROBBE M.F., POTAPOV S., Hydrodynamic consequences of a LOCA in a 4-loop PWR, *Proc. ECCOMAS, Barcelone, Espagne (2000)*.
- [25] Manuel d'utilisation de CASTEM-PLEXUS
- [26] DOLENSKY B., GOLLER B., Calculations to interpret the BERDA Tests 05,06, 07 and 09 without internal structures, *Forschungszentrum Karlsruhe - Interner Bericht - IRS 14/98, PSF 3306*
- [27] GALON P., BUNG H., Loi de comportement pour une modélisation par des billes, *Note technique CEA DMT/91.225 (1991)*.
- [28] BUNG H., GALON P., LEPAREUX M., LETELLIER A., A lagrangian particle method for treatment of impact and penetration problems, *In Euro-Dymat C8, 507-513, Oxford, Les éditions de physique, (1994)*.
- [29] GALON P., BUNG H., LEPAREUX M., COMBESURE A., A new method for treatment of impact and penetration problems. *In Trans. 12th Int. Conf on SMIRT, Volume B, 248-257. Springer Verlag (1993)*.
- [30] LETELLIER A., BUNG H., GALON P., Bird Impact on blade fan analysis using Smooth Particle Hydrodynamics coupled with Finite Elements. *In Structure Under Extreme Loading Conditions. ASME, 27-31 july, Orlando USA (1997)*
- [31] LETELLIER A., Contribution à l'étude des impacts d'oiseaux sur les aubes des réacteurs d'avions. Thèse de doctorat, 1996
- [32] BERTHOUD G., Vaporisation explosive, *La Houille Blanche, n° 2 (1988)*.
- [33] LIBMANN J., Eléments de sûreté nucléaire, *Les éditions de physique, Les Ulis, France (1996)*.
- [34] CASADEI F., Recent advances in the modelling of fast transient fluid-structure interactions of the permanent type, *Proc. SMIRT 14, Vol. B 7/1 (1997)*.
- [35] SORIA A.; CASADEI F., Arbitrary Lagrangian-Eulerian multicomponent compressible flow with fluid-structure interaction, *Int. Journal for Numerical Methods in Fluids (1997)*.
- [36] CARIOU Y., SPERANDIO M., LEPAREUX M., CHRISTODOULOU K., LMFBR's whole core accident. Validation of the Plexus code by comparison with Mara tests, *Proc. SMIRT 12, Vol. E 7/4 (1993)*.
- [37] ROBBE M.F., LEPAREUX M., VIVIEN N., CENERINO G., Screening calculations on the vessel lower head behaviour due to an in-vessel steam explosion, *Proc. SMIRT 14, Vol. PW/9 (1997)*.