

EUROPLEXUS : un code de référence pour la dynamique rapide et l'interaction fluide-structure

A. Beccantini¹, F. Bliard¹, P. Bouda¹, S. de Lambert¹, F. Drui¹, P. Galon¹, O. Jamond¹, N. Lelong¹

¹ Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Etudes Mécaniques et Thermiques, 91191, Gif-sur-Yvette, France

Résumé — Europlexus est un code de mécanique ayant pour objectif la simulation de transitoires rapides à l'aide d'un solveur explicite en temps. Ses capacités transversales (fluide, structure, IFS, SPH, ...), ainsi que son large spectre applicatif (nucléaire, aérospatial, sécurité, ...), font du code une référence dans sa catégorie. Europlexus est en constante évolution grâce un écosystème de développement riche, au sein d'un consortium constitué des copropriétaires et de partenaires majeurs.

Mots clefs — Dynamique rapide, interaction fluide-structure, explicite, transitoire.

1. Présentation générale

Europlexus est un code de calcul qui a été conjointement développé, depuis 1999, par le CEA (DES/ISAS/DM2S) et par la Commission Européenne (Joint Research Center, Ispra, IPSC) dans le cadre d'un contrat de partenariat. Il résulte de la fusion, d'une part, du code de dynamique rapide CASTEM-PLEXUS développé au CEA et, d'autre part, du code PLEXIS-3C développé par la Commission Européenne. Les développements sont effectués au travers d'un consortium comprenant les copropriétaires du code et des partenaires majeurs (EDF, ONERA et Safran Tech).

Europlexus est un logiciel général de dynamique rapide qui permet de traiter en 1D, 2D ou 3D des problèmes comprenant des structures et/ou des fluides avec prise en compte ou non de l'interaction fluide/structure. Europlexus traite le cas des grandes déformations et des grands déplacements. C'est un outil général qui peut s'appliquer à de nombreux problèmes. Il possède des modèles spécifiques permettant d'analyser des situations variées comme des chocs ou des impacts, des explosions, des propagations d'ondes et leurs conséquences sur les structures. Ce programme de calcul est caractérisé par la généralité de ses modèles et la grande variété des applications qu'il permet d'étudier.

A titre d'exemple, on peut citer :

- la tenue mécanique des composants des réacteurs nucléaires sous chargement dynamique,
- l'étude des circuits de tuyauteries en régime transitoire,
- les conséquences des chocs et des impacts sur les structures,
- la perforation,
- les explosions (éventuellement en eau) et leurs conséquences sur les structures environnantes,
- les coups de bélier monophasique ou diphasique,
- la tenue des structures à des agressions diverses,
- la modélisation de systèmes mécaniques articulés.

La discrétisation spatiale est basée sur la méthode des Eléments Finis, la méthode SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) ou DEM (Discrete Element Method) pour les structures. Pour les fluides plusieurs possibilités de discrétisation existent : les Eléments Finis, les Volumes Finis de type "Cell Centred" ou "Node Centered" ou bien encore la méthode particulière SPH. L'algorithme d'intégration temporelle est explicite et est ainsi bien adapté aux transitoires rapides. Les algorithmes de résolution permettent de traiter des problèmes présentant des non-linéarités géométriques (grands déplacements

et grandes rotations) et matérielles (plasticité, endommagement, matériaux hyper-élastiques, etc.). Le formalisme MPI permet au code d'être exécuté en parallèle afin d'accélérer le calcul.

Le programme permet de traiter différents types de liaisons cinématiques, comme des conditions aux limites, les contacts entre structures ou bien encore l'interaction fluide/structure. L'originalité de leurs traitements est liée à la possibilité d'utiliser les multiplicateurs de Lagrange pour les prendre en compte, méthode qui présente l'avantage d'éviter l'utilisation de paramètres non physiques pour traiter par exemple des problèmes de contact entre solides, contrairement aux méthodes de pénalité qui nécessitent l'introduction de coefficients parfois peu aisés à déterminer.

Europlexus est devenu un outil de référence pour la sûreté des installations industrielles et nucléaires. De plus en plus d'industriels s'intéressent au logiciel, parfois dans des domaines très éloignés du nucléaire, car il apporte une aide précieuse pour comprendre la physique de phénomènes complexes. C'est un logiciel dont la structure n'est pas figée. Les développements se poursuivent afin de l'adapter à des domaines toujours plus étendus. On se propose dans le chapitre suivant de détailler succinctement et de manière exhaustive quelques fonctionnalités récentes du code.

2. Fonctionnalités et applications

Les applications d'Europlexus touchent de nombreux domaines, ce qui l'a conduit au cours des 40 ans de développement du code à proposer un catalogue très fourni de fonctionnalités. On se propose ici de décrire de manière ciblée quelques développements et applications majeures de ces dernières années. Un aperçu plus exhaustif du code peut être obtenu sur le site web dédié à Europlexus [1].

2.1 Circuits de tuyauteries

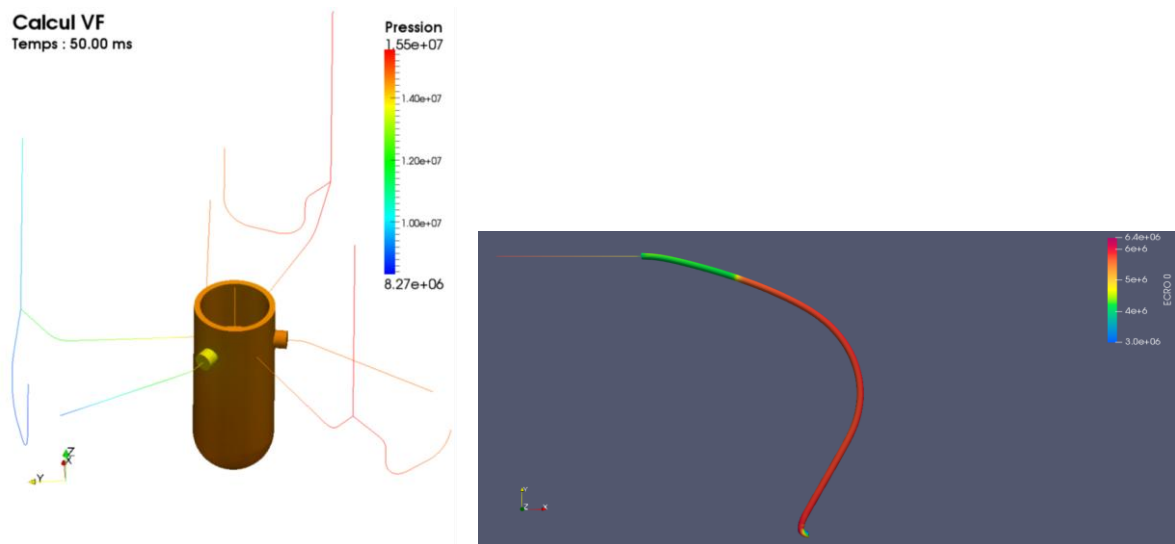


Figure 1 : Modélisations de circuits de tuyauteries - APRP (à gauche) / Fouettement de tuyauterie (à droite)

L'une des applications majeures d'Europlexus est la modélisation de transitoires rapides thermohydrauliques dans les circuits de tuyauteries sous pression, en particulier dans les installations nucléaires. Dans ce contexte, on peut citer l'analyse de l'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) qui cherche à déterminer les conséquences d'une onde de dépressurisation due à une rupture brutale de tuyauterie dans le circuit primaire d'un Réacteur à Eau Pressurisée sur la cuve et ses

structures internes. On peut également citer le fouettement de tuyauterie ou les coups de bélier (Figure 1).

Ces applications ont nécessité de nombreux développements autour de la méthode des Volumes Finis, à la fois en 2D et 3D, mais aussi des éléments de tuyauterie 1D à section variable, ainsi que des éléments de couplage 1D/3D [2]. Des éléments spécifiques pour les tuyauteries flexibles 1D ont été développés, associant un élément de tuyauterie 1D (modélisant le fluide) à un élément poutre (modélisant la structure), afin de coupler la déformation et la rupture (brèche dynamique) de la structure à l'écoulement du fluide [3]. Pour le calcul des écoulements dans le circuit primaire du réacteur, un modèle spécifique tabulé eau/vapeur est utilisé.

2.2 Explosions

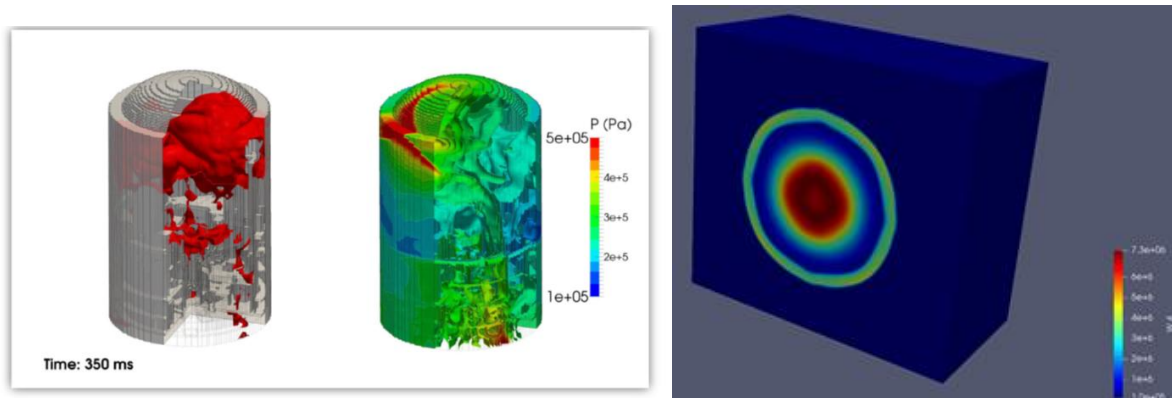


Figure 2 : Explosion H2 dans une enceinte de réacteur (Front de flamme / Pression) / Explosion d'une charge de TNT dans un bunker

Europlexus dispose de modèles et fonctionnalités adaptés au calcul de la propagation d'ondes de souffle (lois d'état dédiées, prise en compte de la vitesse de détonation) et aux écoulements réactifs [4] (combustion, ...). Les fonctionnalités d'interaction fluide-structure en ALE (maillage conforme) ou frontières immergées permettent de déterminer les conséquences de ces phénomènes sur les structures (voir section 2.4). Ce type de calcul requiert une détermination précise des fronts d'onde (Figure 2) et donc des maillages fins. Pour réduire les temps de calcul, Europlexus fournit des fonctionnalités de raffinement de maillage adaptatif (AMR), de mapping, et de partitionnement temporel.

2.3 Modélisation du béton en dynamique rapide

L'étude du comportement des structures sous impact est complexe. Il repose à la fois sur l'expérimentation, la modélisation et enfin la simulation. La modélisation nécessite de prendre en compte toutes les caractéristiques du matériau béton sous sollicitation rapide (effet de vitesse, caractère unilatéral, anisotropie induite, ...). Un exemple de modélisation d'une dalle est en Figure 3.

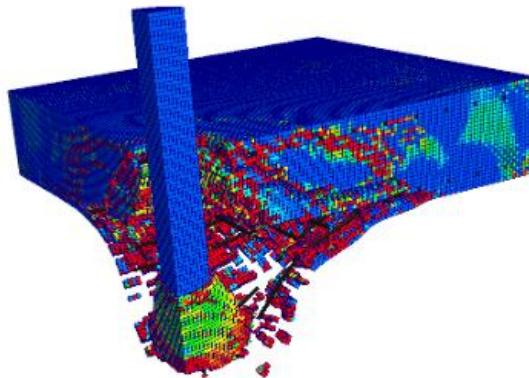


Figure 3 – Exemple de calcul d'impact sur dalle fait avec Europlexus [5]

Un travail récent a été initié sur la prise en compte du contact rugueux entre les lèvres de fissures (engrènement des granulats). Ce dernier repose sur le modèle de Trost [6] (Figure 4), et s'appuie sur un modèle orthotrope d'endommagement.

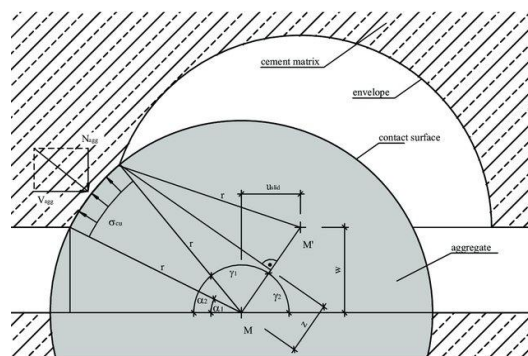


Figure 4 – Contact granulat/matrice cimentaire vu par Trost [6]

2.4 Interaction fluide-structure

Europlexus offre de nombreuses méthodes pour traiter des problèmes d'interaction fluide-structure avec des structures déformables, que le fluide soit traité par une approche Eléments Finis ou une approche Volumes Finis.

Une première approche est celle de l’ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian). Dans ce cadre, le maillage structure est congruent du maillage fluide qui se déforme pour suivre le mouvement de la structure. Cette approche offre la meilleure précision, mais n’est pas applicable quand la structure a une géométrie très complexe ou subit d’importants déplacements voire se rompt.

Dans ces derniers cas, on doit utiliser des techniques de « structures immergées ». Le maillage structure est alors indépendant topologiquement du maillage fluide et superposé à celui-ci. Différentes méthodes numériques, faisant certaines approximations par rapport à l’ALE, permettent de traiter le couplage entre le fluide et la structure. Parmi ces méthodes, la « Mediating Body Method » [7] a été récemment développée dans Europlexus (Figure 5). Elle permet aujourd’hui d’obtenir la meilleure précision sur les résultats obtenus lorsque le fluide est traité en Volumes Finis.

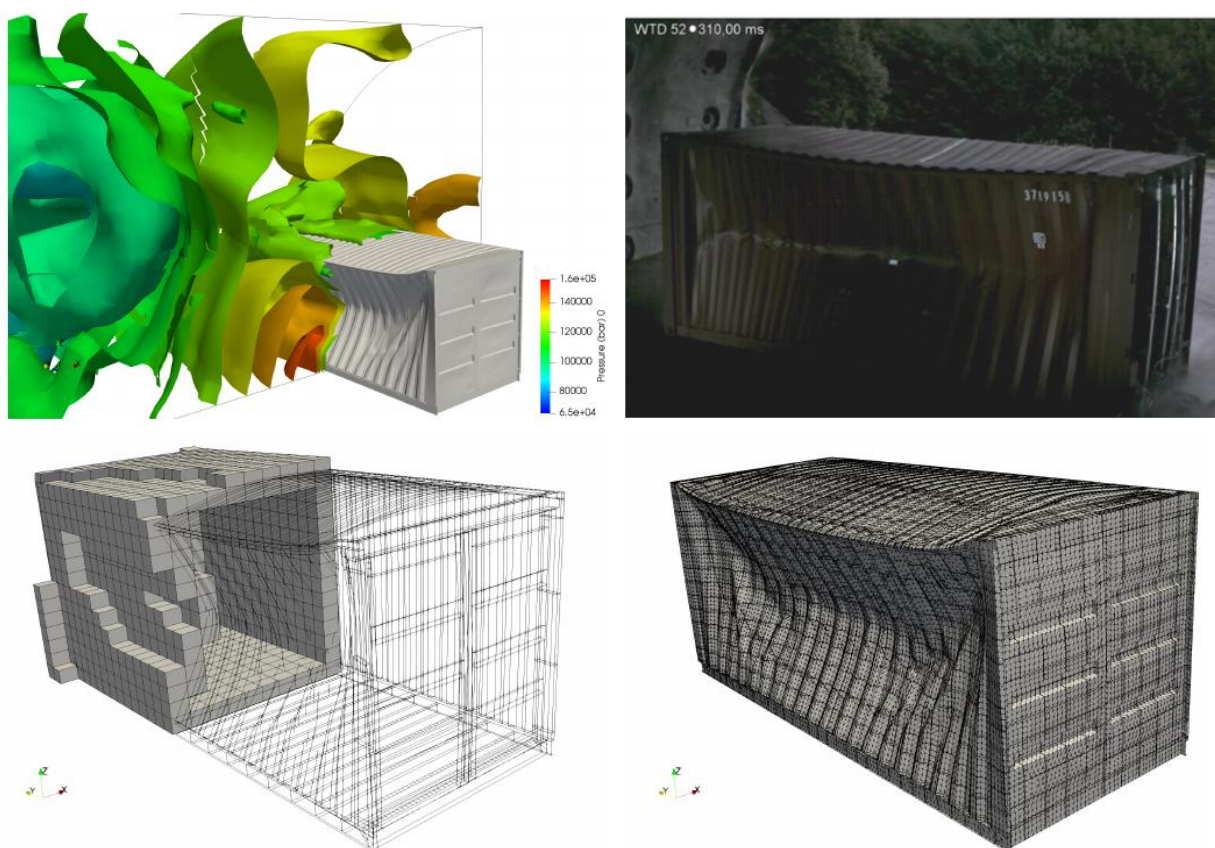


Figure 5 : Explosion à proximité d'un container traitée par l'approche MBM

2.5 Europlexus et couplage multiphysique

Dans un contexte scientifique où la description fine de phénoménologies complexes passe par le couplage entre différentes physiques, un travail a été entrepris visant à interfacer Europlexus avec d'autres codes de calcul scientifique, notamment à travers l'outil de couplage C3PO du CEA. Bien que ces développements soient dans un état préliminaire, des résultats encourageants ont été obtenus dans le cadre de la modélisation des réacteurs de 4^{ème} génération. En l'occurrence, des travaux portant sur un possible accident de criticité au sein de réacteurs à sels fondus (combustible liquide) ont été entrepris. Ils visent à modéliser l'interaction entre la puissance neutronique générée par surcriticité prompte, via le code déterministe APOLLO3® [8], et les ondes de dilatation résultantes, via Europlexus (Figure 6). La prise en compte de l'interaction fluide-structure pour étudier l'impact des ondes sur la cuve est également possible (Figure 7).

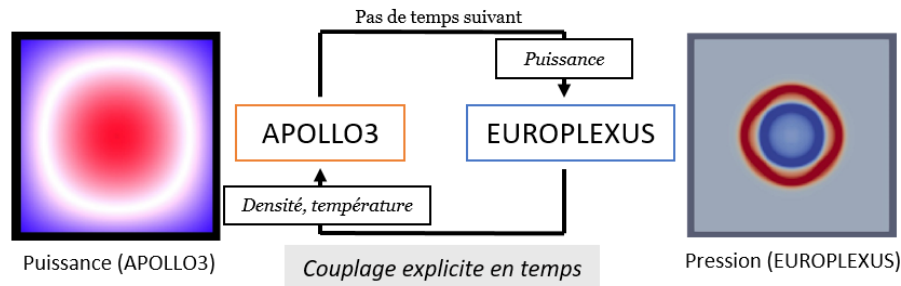


Figure 6 – Illustration de l'utilisation d'Europlexus au sein d'un couplage explicite en temps

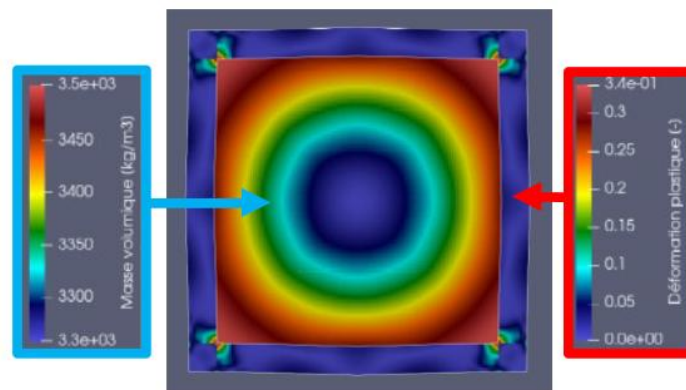


Figure 7 – Calcul couplé Europlexus/Apollo3 avec interaction fluide-structure (densité du fluide en bleu, déformation plastique de la structure en rouge)

Références

- [1] <http://www-epx.cea.fr>
- [2] F. Daude, P. Galon, T. Douillet-Grellier. 1D/3D Finite-Volume coupling in conjunction with beam/shell elements coupling for fast transients in pipelines with fluid–structure interaction, Journal of Fluids and Structures, 101, 103219, 2021
- [3] F. Daude, P. Galon. A Finite-Volume approach for compressible single- and two-phase flows in flexible pipelines with fluid-structure interaction, Journal of Computational Physics, 362, 375-408, 2018
- [4] A. Velikorodny, E. Studer, S. Kudriakov, A. Beccantini, Combustion modeling in large scale volumes using EUROPLEXUS code, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 35, 104-116, 2015.
- [5] D. Guilbaud, Damage plastic model for concrete failure under impulsive loadings, COMPLAS, 2015.
- [6] B. Trost, Interaction of sliding, shear and flexure in the seismic response of squat reinforced concrete shear walls, ETH Zurich, Thesis, 2017.
- [7] O. Jamond & A. Beccantini. An embedded boundary method for an inviscid compressible flow coupled to deformable thin structures: The mediating body method. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 119(5), 305-333, 2019
- [8] D. Schneider et al., APOLLO3®, CEA/DEN deterministic multi-purpose code for reactor physics analysis, PHYSOR, 2016.