

# EUROPLEXUS, code de référence pour la dynamique rapide et l'interaction fluide-structure : derniers développements et applications

A. Beccantini<sup>1</sup>, F. Bentivegna<sup>1</sup>, F. Bliard<sup>1</sup>, P. Bouda<sup>1</sup>, S. de Lambert<sup>1</sup>, F. Drui<sup>1</sup>, P. Galon<sup>1</sup>, O. Jamond<sup>1</sup>, N. Lelong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Études 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, ...), 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. Après une présentation générale du code, plusieurs évolutions récentes sont détaillées.

**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).

Europlexus est un logiciel 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 généraliste 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. De la même façon que [1], on propose dans le chapitre suivant de détailler succinctement et de manière exhaustive quelques fonctionnalités et applications 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 [2].

### **2.1 Circuits de tuyauteries**

La modélisation des circuits de tuyauteries est un sujet de fort intérêt et de nombreuses fonctionnalités associés à ces applications ont été développées dans Europlexus (éléments 1D rigides/déformables, jonctions, raccords, brèche,...). Notamment, l'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) est un accident hypothétique étudié pour la sûreté des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP). Il s'agit d'une brèche du circuit primaire occasionnant une perte du caloporteur (eau borée). D'un point de vue thermohydraulique, lors de l'ouverture de la brèche, une onde de raréfaction se propage alors au sein du circuit primaire. Lorsque celle-ci arrive au cœur du réacteur, elle emprunte deux voies différentes : le cœur en lui-même et la dérivation située entre l'enveloppe de cœur et le cloisonnement. Le temps de parcours des deux ondes étant différent à cause de différences géométriques (plaques perforées dans la dérivation, ...), des forces de pression s'exercent sur le cloisonnement. Des modèles numériques permettant de reproduire ce phénomène ont été entrepris avec Europlexus, ce qui a permis de comparer des modélisations 1D et 3D. Des calculs avec interaction fluide-structure ont été réalisés, afin de prendre en compte la déformation des tuyaux. Une campagne expérimentale sur la boucle hydraulique du CEA 'MADMAX' (Figure 1) permet d'étudier différentes configurations géométriques soumises à une onde de raréfaction, et ainsi de valider les modèles numériques implémentés. (voir [3] pour plus d'informations).

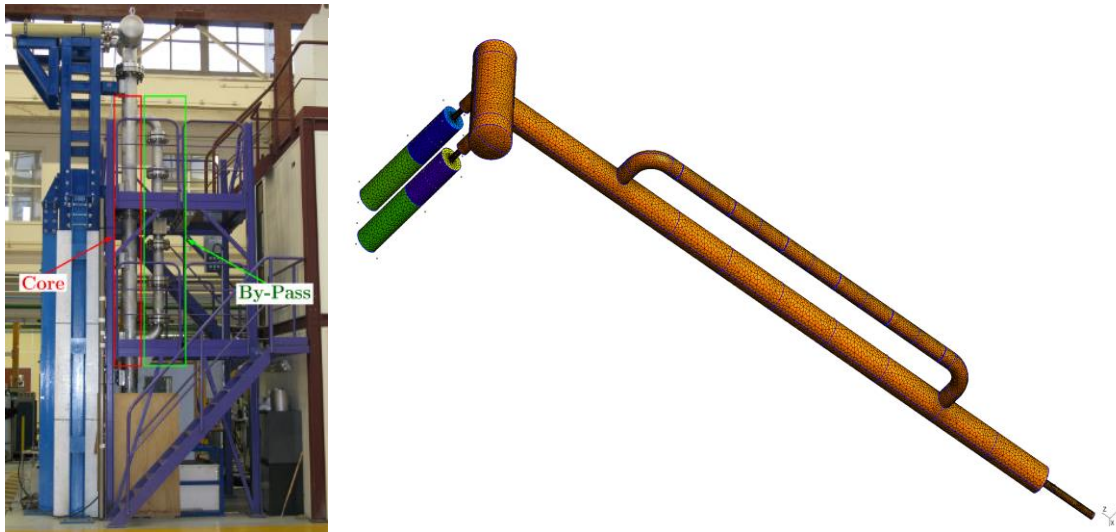
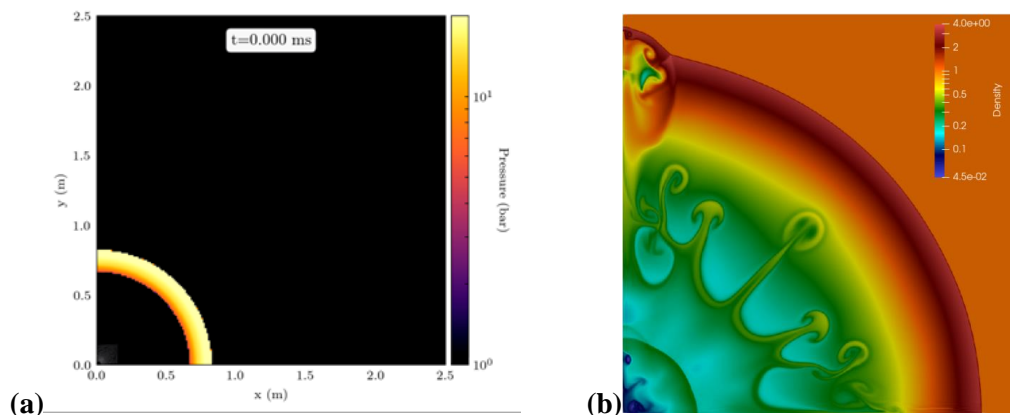


Figure 1 – Boucle ‘MADMAX’ du CEA (gauche) et son modèle 3D dans Europlexus (droite)

## 2.2 Explosions

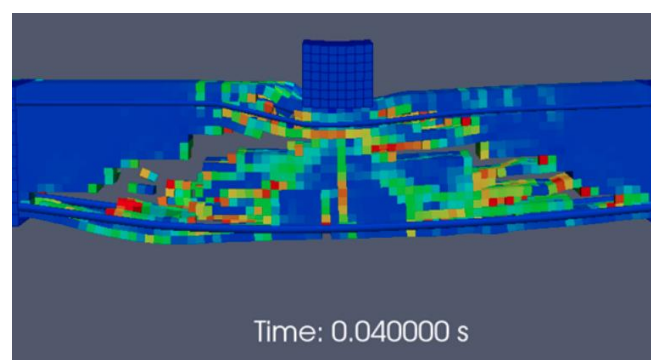
Europlexus dispose de nombreuses fonctionnalités permettant de traiter les phénomènes d’explosion (explosifs solides, hydrogène...), de la propagation des ondes de souffle à la ruine de structures soumises à un chargement en pression, jusqu’au calcul couplé avec interaction fluide-structure (ALE, frontières immergées). Des développements récents ont notamment permis d’améliorer la modélisation du chargement fluide en formulation Volumes Finis. Une fonctionnalité de mapping générique a été implémentée, permettant de projeter le résultat d’un calcul sur maillage très fin mais de faible dimension, vers un nouveau calcul plus grossier et de plus grande dimension. Cela permet une très grande précision autour de la source de l’explosion, avec un coût de calcul réduit, et une meilleure capture des pics de pression en champ lointain, lorsque ceux-ci impactent les structures. Le mapping est applicable de toute dimension (1D-2D-2D axisymétrique-3D) vers une autre, plus grande ou égale, il peut être déclenché à un temps prédéfini ou suivant un seuil de pression fixé. Une autre avancée est le traitement des instabilités de type « carbuncle », que l’on peut notamment retrouver lors de calculs axisymétriques, avec maillages réguliers, utilisant des solveurs de Riemann peu diffusifs (de type HLLC par exemple). Des travaux récents ont permis l’implémentation de nouveaux solveurs dédiés à cette problématique, mitigeant le problème de carbuncle sans augmenter la diffusion.



**Figure 2 : Propagation d'ondes de souffle (calculs 2D axisymétrique) - Initialisation du calcul par mapping d'une solution 1D (a) / Illustration du phénomène de carbuncle au voisinage de l'axe ; explosion sphérique gaseuse, solveur HLLC (b)**

### 2.3 Comportement dynamique du béton - MFRONT

MFRONT [4] est un outil permettant de développer et générer des lois de comportement mécaniques indépendamment d'un code de calcul. Ses avantages sont multiples. Une fois la loi développée, chaque code de calcul incluant une interface avec MFRONT peut en principe utiliser cette loi, en d'autres termes, la loi peut être externalisée et utilisée sur plusieurs plateformes. Une bibliothèque (Gallery) est disponible sur le site de MFRONT [5], disposant d'un panel important de lois déjà existantes à disposition des utilisateurs. L'outil dispose de méthodes numériques optimisées pour l'intégration de lois de comportement, garantissant une qualité accrue. L'interface générique MFRONT (MGIS) a été implémentée dans Europlexus pour permettre aux utilisateurs d'utiliser des lois développées avec l'outil. Cette interface est disponible dans la version 2024 du code. En parallèle, un travail de refactorisation de la loi béton DPDC d'Europlexus [6] (Damage Plastic Dynamic Concrete – Figure 2) a été initié avec MFRONT afin, notamment, d'externaliser et simplifier la loi.

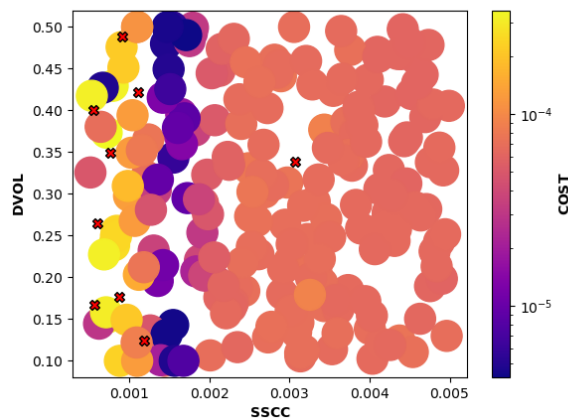


**Figure 3 - Exemple de calcul d'impact sur poutre avec le modèle DPDC 'classique' d'Europlexus**

### 2.4 Europlexus et le traitement des incertitudes

La quantification des incertitudes est la science étudiant la caractérisation des incertitudes et leur réduction. Très utilisée en informatique, elle possède aussi des applications concrètes en ingénierie. Le traitement des incertitudes peut porter sur des modèles dont les temps de calcul peuvent être importants, un grand nombre d'exécutions de ces modèles (souvent nécessaire pour avoir des résultats satisfaisants)

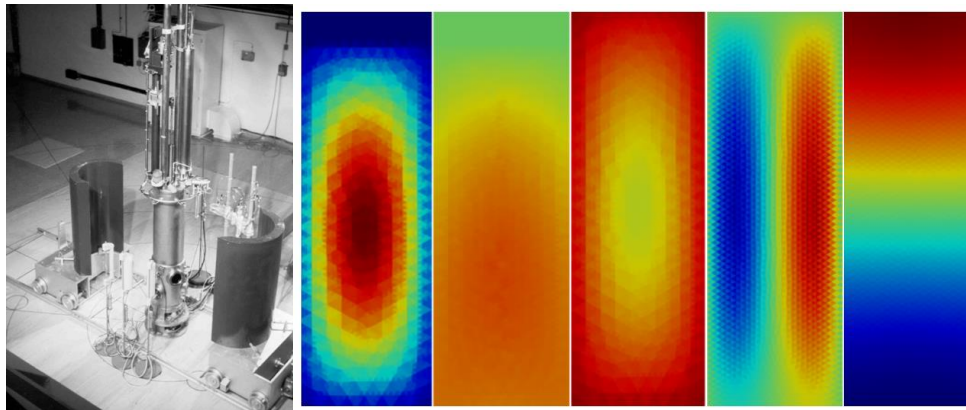
devient alors prohibitif. Le développement de nouvelles méthodes et la progression constante de l'informatique a pu offrir de nouvelles perspectives pour cette problématique. On peut citer par exemple l'analyse de sensibilité globale, l'utilisation de méta-modèles pour reproduire le comportement d'un modèle complexe ou bien l'optimisation bayésienne. La plateforme open-source Uranie développée au CEA offre des modules permettant, entre autres, la propagation d'incertitudes, l'étude de sensibilité, la génération de méta-modèles, la calibration ou l'optimisation (voir [7] pour plus d'informations sur Uranie). Un outil facilitant l'interfaçage d'Europlexus avec Uranie a été développé récemment, permettant le lancement des plans d'expérience et l'analyse des données de sortie. Il est aussi dorénavant possible de déclarer des variables dans Europlexus à l'aide d'expressions mathématiques pour éviter un problème de variables dépendantes. Uranie a déjà été testé pour la modélisation du phénomène de fouettement de tuyauterie, et la modélisation de l'impact sur structure en béton (Figure 3). Ces deux applications d'intérêt serviront de support à la mise en place des méthodes évoquées précédemment.



**Figure 4 - Optimisation de paramètres d'un critère d'érosion pour DPDC (modèle béton) à l'aide d'un algorithme EGO (Efficient Global Optimization)**

## 2.5 Europlexus et le couplage multiphysique

Des travaux récents visent à intégrer Europlexus au sein d'un schéma de couplage multiphysique, notamment à travers l'intégration de la norme ICoCo [8] dans Europlexus et via l'outil de couplage C3PO du CEA. Une application notable est la description des réacteurs de 4ème génération, plus particulièrement, l'accident de criticité au sein d'un réacteur à sels fondus. Ces réacteurs sont généralement à combustible liquide, et leurs designs foisonnent actuellement en France (startups) comme à l'international. L'accident étudié est caractérisé par un couplage fort de la puissance neutronique (calculée par le code APOLLO3® [9]) en cas de surcriticité prompte avec les ondes de dilatation résultantes dans le fluide combustible (calculées par Europlexus). La stabilité de la nappe de puissance, ainsi que l'étude de l'impact de ces ondes sur la cuve (pouvant nécessiter de l'interaction fluide-structure) sont des éléments importants pour la sûreté de ce type de réacteur. A ce jour, un travail important est engagé sur la validation de ce couplage, qui fait l'objet d'une thèse. Une première étape de validation consiste à reproduire correctement les essais de salve ayant été effectués dans le réacteur SILENE (solution aqueuse de nitrate d'uranyle) au CEA/DAM [10].



**Figure 6 - Réacteur SILENE [10] (gauche) et résultat d'un couplage Europlexus-APOLLO3 2D : puissance, pression, densité, vitesse selon x, vitesse selon y, à 44 ms de temps physique (droite)**

## Références

- [1] A. Beccantini et al. EUROPLEXUS: un code de référence pour la dynamique rapide et l'interaction fluide-structure. CSMA2022-15ème Colloque National en Calcul des Structures, 2022.
- [2] <http://www-epx.cea.fr>
- [3] F. Bentivegna et al. Numerical and experimental parametric investigation of rarefaction wave propagation across an orifice plate. The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE), 2023.
- [4] T. Helfer et al. Introducing the open-source mfront code generator: Application to mechanical behaviours and material knowledge management within the PLEIADES fuel element modelling platform. Computers & Mathematics with Applications, 2015.
- [5] <https://tfel.sourceforge.net/>
- [6] D. Guilbaud, Damage plastic model for concrete failure under impulsive loadings, COMPLAS, 2015.
- [7] J.-B. Blanchard et al. The Uranie platform: an open-source software for optimisation, meta-modelling and uncertainty analysis. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, vol. 5, 4, 2019.
- [8] <https://github.com/cea-trust-platform/icoco-coupling>
- [9] D. Schneider et al., APOLLO3®, CEA/DEN deterministic multi-purpose code for reactor physics analysis, PHYSOR, 2016.
- [10] F. Barbry et al. Review of the CRAC and SILENE Criticality Accident Studies. Nuclear Science and Engineering, vol. 161.2, pp. 160–187, 2009.