



HAL
open science

Salome-Meca : une plate-forme au service de la simulation mécanique

Josselin Delmas, Aimery Assire

► **To cite this version:**

Josselin Delmas, Aimery Assire. Salome-Meca : une plate-forme au service de la simulation mécanique. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592745

HAL Id: hal-00592745

<https://hal.science/hal-00592745>

Submitted on 3 May 2011

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.

Salome-Meca : une plate-forme au service de la simulation mécanique

J. Delmas, A. Assire, I. Fournier

EDF R&D, Département Analyses Mécaniques et Acoustique, France, {josselin.delmas,aimery.assire,isabelle.fournier}@edf.fr

Résumé — Salome-Meca est une plate-forme dédiée à la simulation en mécanique. Son ambition est de fournir un environnement logiciel permettant de réaliser la chaîne complète de calcul CAO, maillage, calcul, visualisation des résultats.

Mots clefs — Code_Aster, Salomé, Salome-Meca, simulation numérique, open source.

1 Code_Aster

La sûreté et la disponibilité des installations mécaniques et de génie civil d'EDF nécessitent d'étayer les décisions d'exploitation, de réparation ou de remplacement par des modélisations non linéaires en mécanique. Ainsi, au delà des fonctionnalités standards d'un logiciel généraliste de simulation aux éléments finis en mécanique, *Code_Aster* capitalise les modèles numériques issus des travaux de recherche spécifiques à ces enjeux, assurant ainsi la maîtrise de leur mise en œuvre et surtout leur transfert rapide aux études d'ingénierie.

L'ambition de *Code_Aster* est donc double :

- mettre un logiciel de simulation puissant, robuste et stable à disposition des études d'expertise (environ 200 utilisateurs en interne et des milliers à travers le monde pour la diffusion en logiciel libre), dans un contexte de développement et de diffusion sous assurance de la qualité ;
- accueillir et capitaliser les modèles en mécanique numérique produits par EDF R&D et ses partenaires.

En lien avec les deux objectifs cités, développer son propre code garantit la capitalisation de la R&D et son transfert rapide vers l'ingénierie, difficile à obtenir avec un code commercial. Cette R&D est spécifique car EDF est exploitante, et non manufacturière de ses matériels, en particulier nucléaires, dont elle doit justifier la durée de vie, économiquement et réglementairement.

Ainsi, *Code_Aster* intègre des modèles numériques spécifiques :

- pour simuler le vieillissement des matériaux et des structures : fatigue, endommagement, mécanique de la rupture, milieux poreux, etc. ;
- pour les calculs propres aux problématiques de l'exploitation nucléaire : interaction sol-structure et séisme, calculs réglementaires, modélisation des assemblages combustibles, etc.

Depuis 2001, *Code_Aster* est diffusé comme *logiciel libre* (GNU general public licence) avec les objectifs suivants : améliorer la qualité et le référencement du code par la démultiplication de son usage ; être le support logiciel de nos partenariats. Le logiciel et son code source, mais aussi les cas tests et toute la documentation, sont librement accessibles à tous [1]. Après 10 années, *Code_Aster* est un succès mondial de diffusion et fédère un réseau d'utilisateurs par le forum du site web <http://www.code-aster.org>.

2 Salomé

EDF R&D développe depuis plusieurs années des codes de calculs dans le domaine de la simulation (*Code_Aster*, *Code_Saturne*, *Syrthes*, etc.). Ces codes de calculs sont très souvent stratégiques, porteurs d'une très forte innovation technologique par les phénomènes physiques qu'ils permettent de simuler et sont l'objet d'investissements lourds.

Salome propose un environnement utilisateur interactif (Pré/Post Processeur : modules GEOM, SMESH et VISU) unifié, indispensable à l'utilisation ergonomique de ces codes dans l'ingénierie, en facilitant la phase de construction du jeu de données et limitant le coût d'entrée de nouveaux utilisateurs. De plus, de par son architecture modulaire, la plate-forme Salome facilite l'interopérabilité entre la CAO et les codes de calculs et l'implémentation des couplages entre les codes de calculs dans un environnement hétérogène distribué.

La plate-forme Salome, développée dans le cadre d'un consortium, est diffusée sous une licence OpenSource LGPL [2]. Le choix du modèle Open Source permet aux développeurs de codes de calculs de se concentrer sur leur cœur de métier (la physique et les méthodes numériques) et d'optimiser, par le système de la mutualisation, l'investissement requis pour disposer d'un environnement interactif efficace.

3 Salome-Meca

Salome-Meca est une plate-forme dédiée à la simulation en mécanique. Son ambition est de fournir un environnement logiciel complet pour les mécaniciens : pré, post et calculs (cf. paragraphe 5).



FIG. 1 – Logo de la plate-forme Salome-Meca

Cette plate-forme permet ainsi à l'utilisateur mécanicien :

- d'obtenir son environnement complet de simulation mécanique en une installation unique,
- de gérer son arbre d'étude complet : géométrie, maillage, fichiers de mise en données, fichiers MED résultats
- d'avoir, via le module d'intégration de *Code_Aster*, accès à une mise en donnée ergonomique, ainsi qu'à des assistants pour des cas d'usage simples (résolution statique linéaire, analyse modale).
- de pouvoir sélectionner les entités topologiques de la mise en données mécanique (zones d'affectation de matériaux, de chargements ...), par saisie interactive dans les fenêtres graphiques de GEOM et SMESH.

4 Nouveautés de Code_Aster

Pour Salome-Meca 2011.2, disponible au téléchargement en juillet 2011, la version embarquée de *Code_Aster* sera la version 10. Elle intègrera de nombreuses nouveautés dont voici quelques exemples concernant les algorithmes, les éléments finis, les lois de comportement et les performances :

- **Propagation de fissure et adaptation de maillage pour FEM et XFEM [3,4] :**

Il existe trois méthodes de propagation de fissure dans *Code_Aster*. Ces fonctionnalités de propagation de fissure ont été éprouvées sur une étude industrielle, dans le cadre d'un benchmark international sur la propagation de fissure. Les résultats donnés sur la figure 3 ont été obtenus avec une méthodologie combinant X-FEM, level sets et raffinement de maillage avec le logiciel de raffinement de maillage Homard [5].

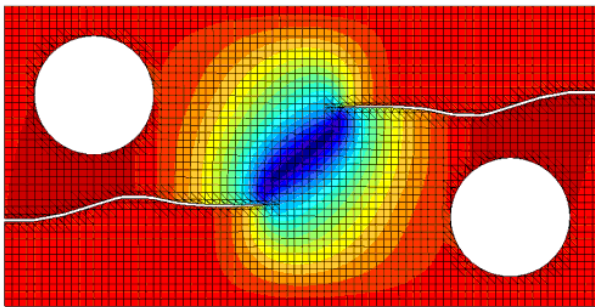


FIG. 2 – Propagation de fissure dans une plaque trouée

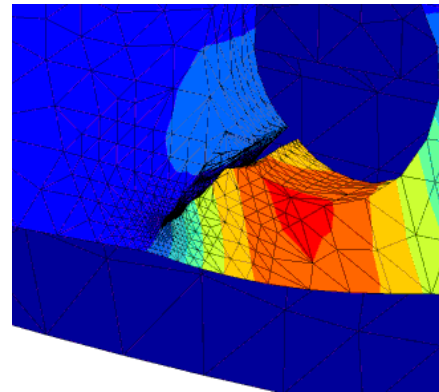


FIG. 3 – Propagation de fissure 3D issu du benchmark proposé à ECCM 2010

- **Liaison entre modélisation 3D et coque :**

La liaison cinématique entre deux portions de modèles portant des modélisations différentes a été améliorée pour qu'elle soit plus simple et plus ergonomique. Dans l'exemple ci-dessous, un cylindre fissuré est soumis à une traction axiale. La zone fissurée est modélisée par des éléments volumiques et le reste du cylindre est modélisé par des éléments de coque DKT.

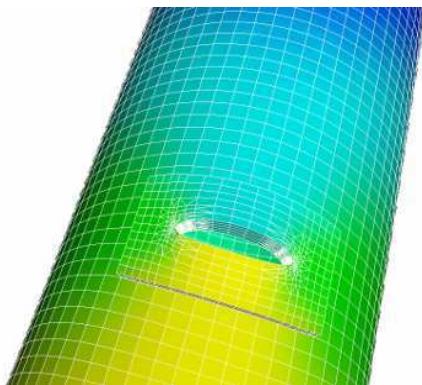


Fig. 4 – Déformée

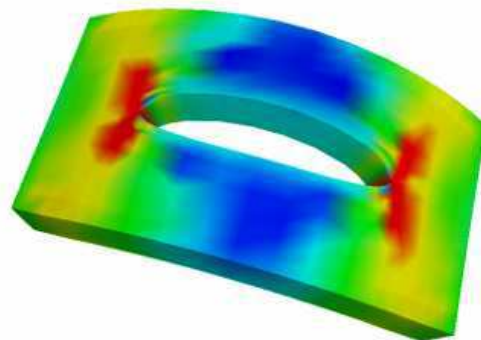


Fig. 5 – Contrainte de Von Mises

- **Recalage en dynamique des modèles numériques à partir des résultats expérimentaux :**

Le processus de recalage d'un modèle dynamique est basé sur la comparaison des modes propres identifiés expérimentalement avec ceux calculés par le modèle numérique. Une fonction objectif composée par les différences des fréquences propres et les termes diagonaux de la matrice de MAC (Modal Assurance Criterion) est minimisée à l'aide des algorithmes d'optimisation. Sur la figure ci-dessous on montre, à la fin du processus de

recalage, la bonne concordance obtenue, entre l'expérience à gauche et le numérique à droite, pour le 9-ème mode propre d'une plaque ayant une masse discrète placée dessus.

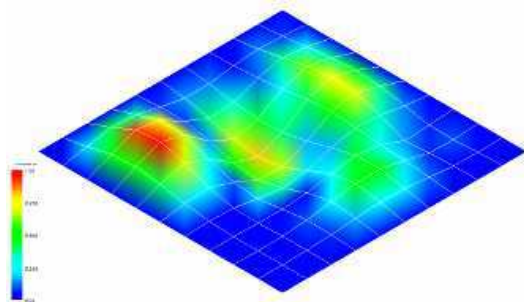


Fig. 6 – Déformée pour le 9ème mode propre - résultat expérimental

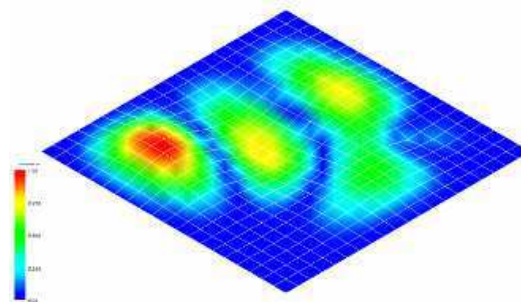


Fig. 7 – Déformée pour le 9ème mode propre - résultat numérique

- **Éléments finis mixtes pour gérer l'incompressibilité et la quasi-incompressibilité [6] :**

En complément des éléments finis mixtes à 3 champs (déplacements / pression / gonflement) existant dans *Code_Aster*, des éléments finis mixtes à 2 champs (déplacements / pression) ont été introduit. L'interpolation retenue est une interpolation quadratique des déplacements et une interpolation linéaire des pressions (P2P1).

En plus de cette interpolation et afin de gagner en efficacité, un autre élément a été introduit : l'élément fini stabilisé appelé « mini-élément ». Les interpolations en déplacement et en pression sont toutes les deux linéaires (P1+P1). Enfin, pour stabiliser cet élément et donc de respecter la condition de LBB, un degré de liberté de déplacement supplémentaire appelé « bulle » est introduit au centre de chaque l'élément. Ce degré de liberté n'est pas modélisé car il se condense naturellement dans la formulation de l'élément. On obtient alors un élément très peu coûteux. Un exemple d'écrasement d'un lopin élastique quasi-incompressible ($\nu=0,4995$) est donnée en figure 8, 9 et 10.

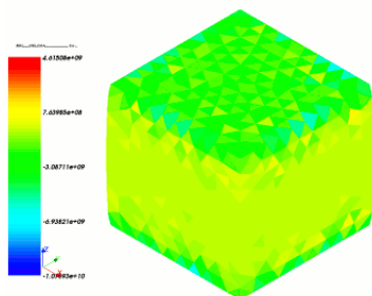


Fig. 8 – Trace du tenseur des contraintes, formulation classique, éléments P2

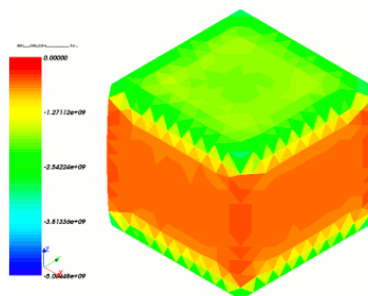


Fig. 9 – Trace du tenseur des contraintes, formulation mixte, éléments P1+P1

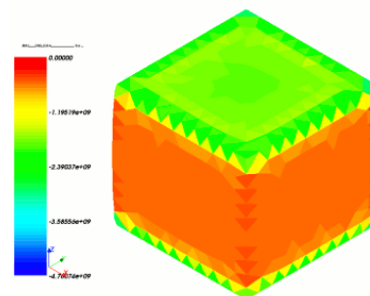


Fig. 10 – Trace du tenseur des contraintes, formulation mixte, éléments P2P1

- **Modèle de grandes déformations logarithmiques :**

Ce modèle de grandes déformations logarithmiques est compatible avec de l'écroutissage isotrope, cinématique, voire anisotrope mais également avec l'interfaçage UMAT. Tous les comportements incrémentaux écrits en petites déformations sont a priori appelables. Et l'efficacité n'est pas en reste : en bonus, il s'accompagne d'une matrice tangente exacte et symétrique, d'où une convergence quadratique. Comme l'ont constaté les auteurs de ce modèle, Miehe, Apel et Lambrecht, les résultats pour les matériaux élastoplastiques sont au rendez-vous : très proches de ceux de Simo et Miehe, pour un temps de calcul voisin, optimisé grâce à 6 variables internes particulières. Voici un exemple d'emboutissage d'une tôle par un poinçon hémisphérique (cas-test *Code_Aster* SSNV501). Il faut noter au passage l'amélioration de l'ergonomie du contact (introduction

d'une commande dédiée à la définition des conditions de contact) et l'amélioration des performances (temps de calcul divisé par deux, cf. tests de performance *Code_Aster*).

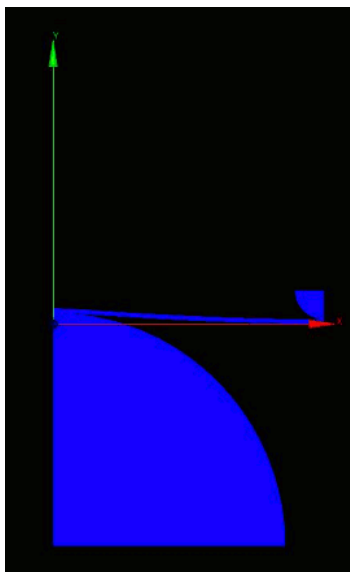


Fig. 11 – Configuration initiale

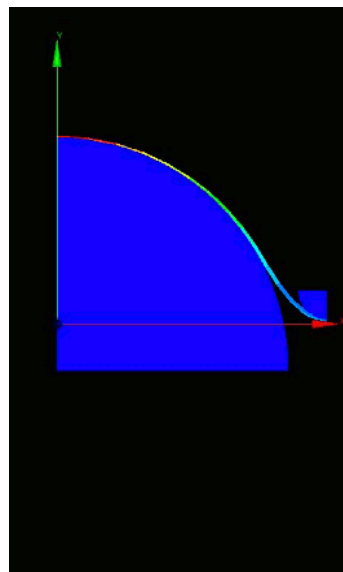


Fig. 12 – Configuration finale

- **Une loi de comportement de béton-armé pour des simulations performantes :**

La loi de comportement de béton armé globalisé GLRC_DM permet, par ses performances, d'étendre le calcul sous chargement sismique à des modèles de plus grande taille, donc des structures industrielles plus réalistes. Cette loi de béton armé permet de modéliser la perte de raideur des voiles et des planchers engendrée par l'apparition d'endommagement en flexion et en membrane.

La force de la loi GLRC_DM est son écriture globalisée. Concrètement, la loi de comportement est écrite de telle manière que le béton et les armatures en aciers sont homogénéisés en un même milieu continu. De plus, la cinématique de plaque est introduite directement dans les équations. On travaille alors directement avec les déformations généralisées et les contraintes généralisées. Un des autres avantages de GLRC_DM est son caractère non adoucissant qui évite les problèmes de localisation de l'endommagement. Afin d'illustrer le potentiel de la loi GLRC_DM, un cas de démonstration d'un bâtiment subissant un chargement sismique d'accélération maximale 0,2g été mis en œuvre. Les zones qui apparaissent en rouge sont celles qui ont été endommagées aux cours du chargement.

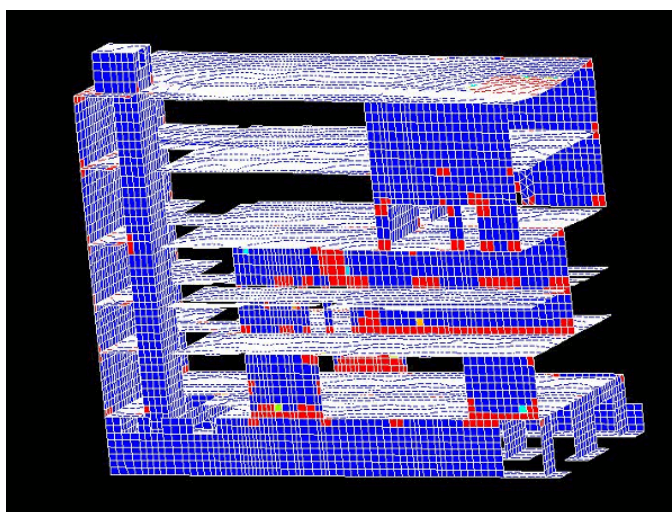


Fig. 13 – Bâtiment endommagé par un chargement sismique

- **Volumes finis SUSHI (Scheme Using Stabilisation and Hybrid Interfaces) pour des modélisations hydrauliques des géomatériaux [7] :**

Cette famille de schémas est performante pour représenter les problèmes de front raide (milieu saturé au contact d'un milieu non saturé), de forts contrastes, ainsi que pour gérer l'apparition ou la disparition d'une phase. SUSHI est compatible avec des maillages très déformés.

La figure suivante représente la pression de gaz obtenue à 500 ans lors de la modélisation d'une alvéole de stockage. Du gaz est injecté dans le coin en bas à gauche durant les 500 ans premières années puis la resaturation du jeu (initialement désaturé en eau) et la désaturation du milieu géologique (initialement saturé en eau) sont observées. Le gaz quant à lui s'étend dans ces deux matériaux au cours du temps.

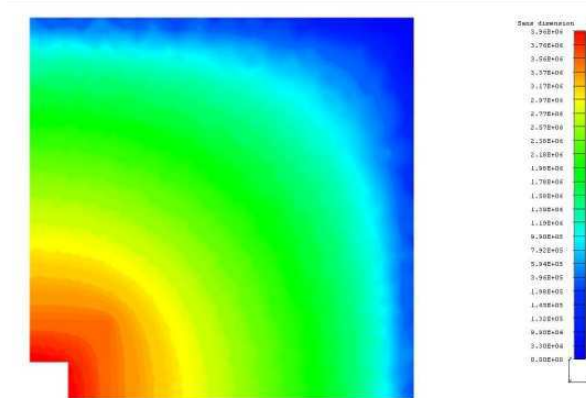


Fig. 14 – Modélisation d'une alvéole de stockage : pression de gaz à 500 ans

- **Un modèle d'endommagement dédié aux matériaux hétérogènes [8] :**

Ce modèle est employé notamment pour la simulation de fracturation des roches due à l'injection de gaz. Ce modèle prend en compte l'effet de l'hétérogénéité de la roche sur sa probabilité de rupture. Une approche de type Poisson-Weibull est utilisée pour représenter la répartition des micro-défauts initiaux. La formation du réseau de fissures est ensuite modélisée macroscopiquement en étudiant l'interaction de ces sites d'amorçage.

Ce modèle est intégré comme un modèle d'endommagement non local basé sur les gradients de contraintes. On distingue deux seuils : un seuil d'amorçage probabiliste et un seuil de propagation basé sur le facteur d'intensité des contraintes. Les deux seuils utilisent la même grandeur c'est-à-dire les contraintes régularisées. In fine, chaque élément est représenté soit comme un élément sain, soit comme un élément cassé. Actuellement le modèle ne traite que la fissuration en mode I (traction normale au plan de fissuration).

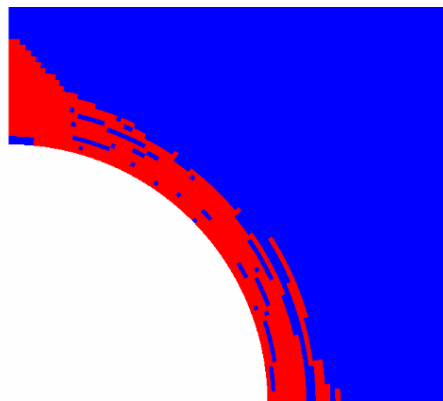


Fig. 15 – Endommagement d'une argile en traction autour d'une alvéole soumise à de fortes pressions

- **Calculs distribués (étude paramétrique et recalage), calculs parallèles et performance :**

Une étude paramétrique est une étude standard dans laquelle on souhaite faire varier un ou plusieurs paramètres, comme par exemple, des propriétés matériaux, des caractéristiques géométriques, des chargements... Le nombre de calculs à réaliser peut devenir très important, jusqu'à plusieurs milliers de calculs et leur mise en œuvre devient très fastidieuse. Globalement, une étude paramétrique est la donnée d'une étude nominale (fichier de commande unique) et d'un jeu de paramètres : *Code_Aster* va décliner l'étude nominale en plusieurs études en fonction des paramètres fournis, puis va exécuter chaque déclinaison en prenant en compte les ressources machine disponibles. Celles-ci déterminent directement le gain obtenu : pour une étude comptant 300 calculs de 2 heures, si chacun est distribué sur une centaine de processeurs alors les résultats sont disponibles en un peu plus de 6 heures.

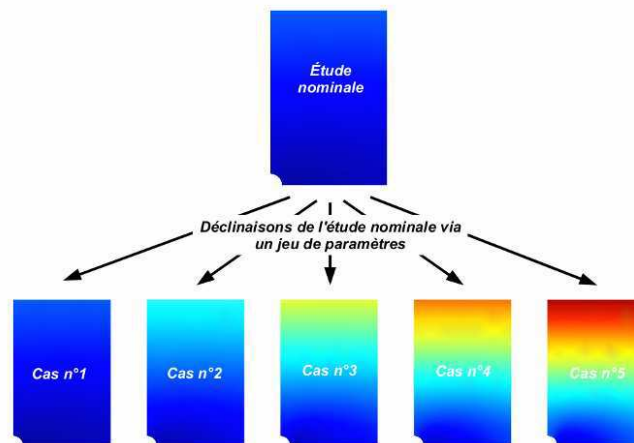


Fig. 16 – Principe de fonctionnement du calcul distribué

Grâce au solveur MUMPS [9], dont la dernière version est utilisable dans *Code_Aster*, le parallélisme est aujourd'hui accessible à tous. Il suffit de choisir d'utiliser une version de *Code_Aster* compilée avec MPI, de choisir le solveur MUMPS dans son fichier de commande et de donner le nombre de processeur que l'on souhaite utiliser. Le parallélisme et ses performances sont suivis semaine après semaine grâce à l'ajout de nouveaux cas tests (tests perfxxx) dans la base de cas test. Les résultats des tests perf010 et perf011 sont donnés ici (de 1 à 32 processeurs) :

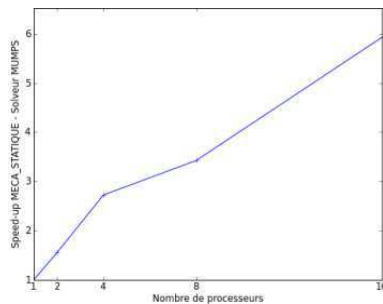
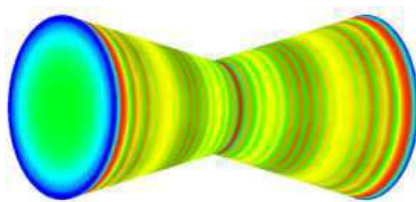


Fig. 17 – Résultat pour le cas-test perf010

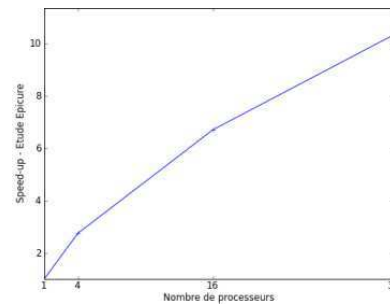
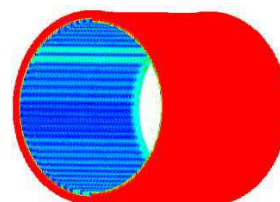


Fig. 18 – Résultat pour le cas-test perf011

5 Nouveautés de Salomé-Méca

La plate-forme Salome-Meca 2011.2 permettra d'accéder dans un environnement intégré et unique à de nombreux outils :

- **Code_Aster**, solveur de mécanique implicite ;
- **Europlexus**, solveur de dynamique explicite [10] (hors distribution open source de Salome-Meca 2011.2) ;
- **OpenTURNS**, logiciel permettant de traiter les incertitudes et de réaliser des études de sensibilité des paramètres du calcul [11] ;

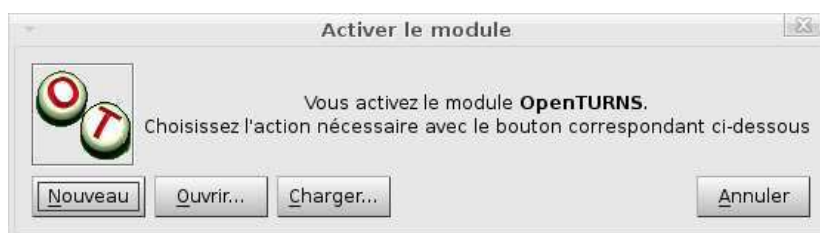


Fig. 19 –Boite d'accès au module OpenTURNS

- **ADAO**, bibliothèque d'algorithmes mathématiques d'assimilation de données permettant d'établir des scénarios de recalage de paramètre avec les solveurs de la plate-forme (hors distribution open source de Salome-Meca 2011.2) ;
- **Paravis**, module de visualisation basé sur le moteur graphique parallèle de Paraview [12] ;
- **Homard**, logiciel de raffinement et déraffinement de maillage [5] ;
- **Module outis-métiers**, module permettant l'enchaînement de la production de géométries et de maillages paramétriques avec des séquences de calcul *Code_Aster* prédéfinies. Dans sa première version, qui ne sera pas diffusé en open source, le module contient un outil de calcul de sous-épaisseur dans un coude ou un tube.

Le module **YACS** permet à partir de ces composants de réaliser une chaîne complète de calcul.

La plate-forme Salome-Meca, construite à partir des modules open source et de Salome, est diffusée [1] sous une licence Open Source LGPL en suivant le rythme des versions stabilisées de *Code_Aster*, soit une version semestrielle.

Références

- [1] Site officiel de Code_Aster, www.code-aster.org
- [2] Site officiel de Salome, www.salome-platform.org
- [3] D. Colombo, P. Massin. *Fast and robust level set update for 3D non-planar X-FEM crack propagation modelling*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, submitted.
- [4] S. Geniaut, E. Galenne. *A simple method for crack growth in mixed mode with X-FEM*, International Journal of Solids and Structures, in preparation.
- [5] Site officiel de Homard, www.code-aster.org/outils/homard
- [6] F. Brezzi, M. Fortin: *Mixed and Hybrid Finite Element Methods*, Springer Series in Computational Mathematics, 15, Springer Verlag, Berlin, 1991.
- [7] O. Angelini, C. Chavant, E. Chénier, R. Eymard, S. Granet. *Finite volume approximation of a diffusion-dissolution model and application to nuclear waste storage*, Mathematics and Computers in Simulation, In Press, Corrected Proof, Available online 11 January 2011.
- [8] N. Guy. *Modélisation probabiliste de l'endommagement des roches : application au stockage géologique du CO2*. Thèse de Doctorat, ENS Cachan, 2010.
- [9] Site officiel de MUMPS, <http://graal.ens-lyon.fr/MUMPS/>
- [10] Site officiel d'Europlexus, <http://europlexus.jrc.ec.europa.eu>
- [11] Site officiel d'Open TURNS, <http://trac.openturns.org>
- [12] Site officiel de Paraview, www.paraview.org