

Code_Aster, l'outil de modélisation en mécanique à EdF

Objectifs et enjeux

EDF doit garantir dans le temps la maîtrise technique et économique de ses moyens de production et de transport d'électricité. La sûreté et la disponibilité de ces installations mécaniques et de génie civil nécessitent d'étayer les décisions d'exploitation, de réparation ou de remplacement par des modélisations non linéaires en mécanique et en thermique. Le *Code_Aster*, prévu pour répondre à ces enjeux, bénéficie aujourd'hui des compétences et des processus qualité de l'ingénierie nucléaire et est reconnu, au sein d'EDF, comme l'outil de simulation numérique délivrant à temps les innovations indispensables à l'expertise des problèmes. A ce titre, son ambition est double :

- Mettre à disposition de l'ingénierie du parc nucléaire en exploitation un outil de simulation avancé en mécanique des solides et structures;
- Capitaliser dans une plate forme unique de développement la R&D de la communauté mécanicienne d'EDF dans le domaine de la simulation numérique;

Ce double rôle est le garant de la transmission rapide et sous environnement d'assurance qualité de la R&D vers l'ingénierie.

Le contexte de développement

Pourquoi EDF développe-t-elle son propre code ?

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, difficiles 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. Les problématiques des études en mécanique sont de trois ordres :

- comprendre un événement imprévu à la conception,
- quantifier les marges par rapport aux études de conception,
- justifier l'utilisation d'un matériel ou process en cours de vie.

Ainsi, EdF se doit d'assurer avec crédibilité et dans la durée la maîtrise de son outil de calcul, indépendamment des éditeurs de logiciel.

La production de l'outil sous assurance-qualité d'une part, l'intégration continue des travaux de recherche d'EdF et de ses partenaires d'autre part, offre donc la garantie d'un code performant et qualifié. Ces vertus du logiciel *Code_Aster* sont nécessaires à l'ingénierie d'EdF qui, en lien avec ses fournisseurs et les Autorités de Sûreté, mène les études assurant la sécurité des personnes et la performance des installations.

Par quels moyens ?

Le code est développé depuis 15 ans par une équipe centrale d'une quinzaine d'ingénieurs du département Analyses Mécaniques et Acoustique d'EDF-R&D. Elle se consacre à la cohérence et à la qualité de la plate-forme Aster, de l'architecture à la mise en exploitation au travers d'outils Aster de gestion de configuration, d'acceptation des évolutions, et de retours d'expérience (erreurs, évolutions). Elle s'entoure d'acteurs de la recherche industrielle et universitaire, de fournisseurs d'études et de services se conformant au système qualité Aster (signature d'une convention) qui développent et intègrent des modélisations mécaniques adaptées aux besoins d'EDF.

Motivée par la croissance du nombre d'utilisateur du code, sa validation et l'émergence de partenariats, EdF a choisi en octobre 2001 de diffuser *Code_Aster* en logiciel libre, sous licence GNU-GPL. Plus de trois ans après, on constate une diffusion large, équi-répartie dans les milieux universitaires et industriels, ayant d'ores et déjà suscité des collaborations et des retours de qualifications dans des domaines industriels variés et étrangers à EdF. Le site www.code-aster.org en quelques chiffres, c'est : 10.000 visites par semaine, 1.500 téléchargements des sources pour le cycle de version 7.3 [6 mois], 1.100 personnes ou organismes identifiés.

Un code vivant

Le *Code_Aster* est accessible sous 3 formes exploitation, développement, libre, toutes issues d'un code source unique. La version d'Exploitation (n° 7.4 au 01/2005) est qualifiée (sous Assurance de la Qualité), validée indépendamment, documentée. Sa durée de vie de 2 années voit ses sous versions se décliner au rythme des maintenances correctives et des compléments de validation et de documentation. C'est la version des utilisateurs EdF et des fournisseurs EdF agréés réalisant des études sous AQ.

La version de développement (n° 8.0 au 01/2005) s'enrichit hebdomadairement de corrections, d'améliorations et d'innovations ; elle n'est pas sous AQ. Les nouveautés, dont la recette et le processus de non-régression ont vérifié qu'elles n'ont pas dégradé l'existant, sont néanmoins documentées. De cette version est tirée tous les 2 ans, après qualification, la version d'Exploitation.

La version semestrielle *Code_Aster* Libre, éditée sous licence GPL sur www.code-aster.org, en code source et exécutable Linux, provient, après conditionnement, de la version de développement du moment.

Code_Aster est, depuis son origine, toujours développé, maintenu et enrichi de fonctionnalités nouvelles au même rythme soutenu. Le cycle de développement de la version 7 aura vu intervenir, lors de 100 mises à jour en 2 ans, environ 70 ingénieurs restituant leurs développements dans les domaines décrits ci-après. Le travail cumulé sur le cycle de développement représente plusieurs dizaines d'ingénieurs/an et se réparti à parts égales entre les fonctionnalités génériques et les travaux liés aux métiers et à la recherche appliquée.

En quelques chiffres, *Code_Aster* aujourd'hui, c'est : 10^6 lignes de sources, 1700 cas tests gérés en configuration, 200 utilisateurs en interne, 60.000 heures CPU annuelles sur le serveur de calcul interne, 10000 pages de documentation accessible en ligne.

L'horizon 2010 – quelques visions applicatives

On présente ici un focus volontairement restreint sur des applications moteurs de développements dans le code, car porteuses d'ambitions fortes pour la R&D et les modèles de l'ingénierie.

Déformations d'un cœur de réacteur nucléaire

Le calcul des déformations d'un cœur complet sur plusieurs cycles d'irradiation relève aujourd'hui des défis de modélisation. Ces calculs incluent :

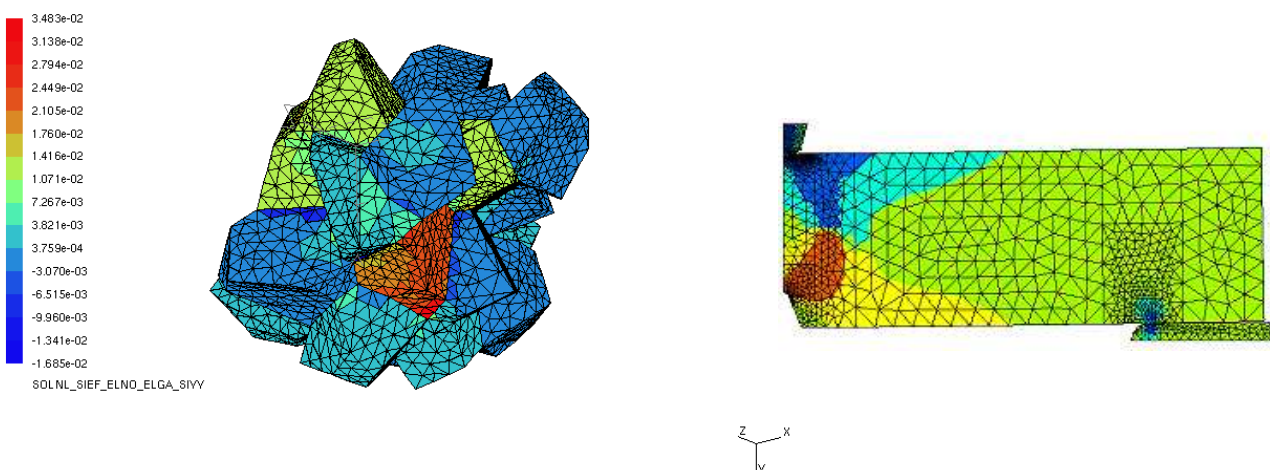
- un couplage fort avec la thermo-hydraulique pour les phénomènes vibratoires, prenant en compte les écoulements axiaux et transverses,
- la prise en compte de contact multi-corps généralisé entre assemblages, liaison frottante crayons-grilles, grappes et guides.
- la simulation de l'usure en ces points de contact,

Les résultats attendus sont :

- la déformation des assemblages en fin de vie, l'enjeu étant de valider le maintien des systèmes en conditions d'exploitation.
- l'usure des crayons, première barrière de confinement du combustible, aux points de contact, en lien avec leur risque de percement.

Par la taille des modèles et la généralisation des non-linéarités à traiter, ce calcul se situe à la limite de capacité actuelle du logiciel et des calculateurs.

Identification des lois de comportement des aciers

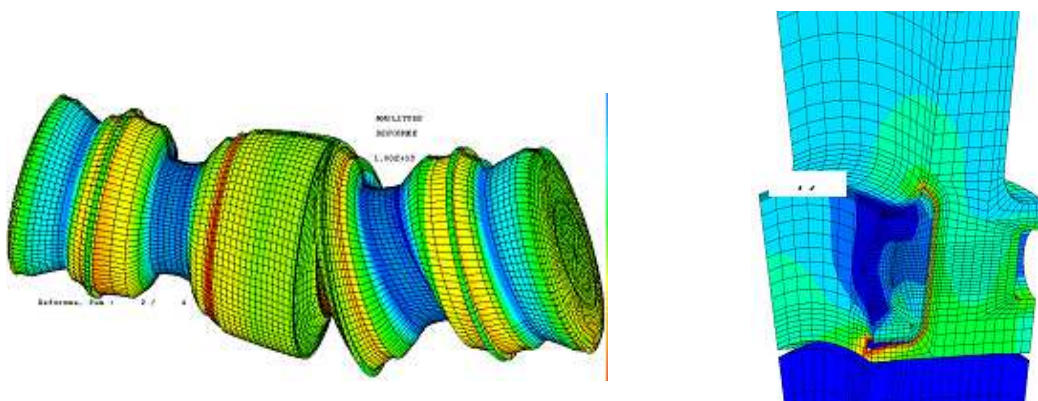


Les modèles de comportement actuels de vieillissement des aciers (en particulier celui de la cuve du réacteur nucléaire sous l'effet de l'irradiation) montrent leurs limites pour apprécier au plus juste la durée de vie du composant. Ils sont essentiellement basés sur des données expérimentales. La prise en compte du comportement du métal à une échelle très fine, l'agrégat cristallin, voire l'échelle atomique, devrait permettre de représenter plus finement le comportement du matériau à l'échelle de la mécanique des milieux continus : la loi utilisée pour les modélisations des matériels.

On identifie les propriétés mécaniques à cette échelle via un maillage généré aléatoirement, dont on affecte chaque grain de propriétés métallurgiques propres à chaque système cristallin. Ce couplage multi-échelles sollicite les limites en puissance de calcul et nécessite une architecture informatique adaptée pour construire différents couples de modèles [plasticité cristalline –homogénéisation].

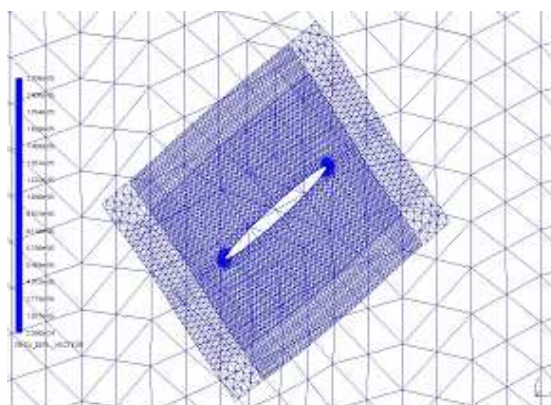
L'enjeu est de déterminer l'augmentation de la température de transition fragile-ductile pour les éléments du réacteur nucléaire soumis à l'irradiation. La ténacité est aujourd'hui déduite d'un essai d'éprouvette CT, le lien ténacité-résilience étant empirique.

Propagation 3D d'une fissure dans un arbre de turbine



Afin de justifier la tenue des matériels au cours de leur vie, une classe de modélisation majeure abordée par *Code_Aster* concerne la nocivité des fissures. Les méthodes réglementaires s'appuient sur des critères conservatifs appliqués à partir de l'analyse mécanique de structures saines. Toutefois, la modélisation explicite de la fissure et de sa propagation permet, par une approche réaliste, de quantifier aussi les marges.

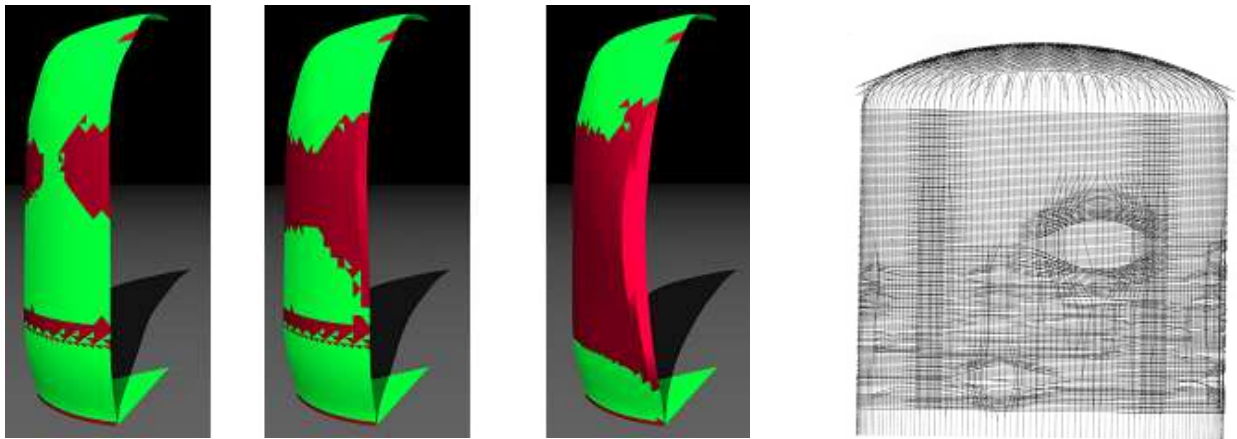
Si la modélisation de structures fissurées est déjà ancienne dans *Code_Aster*, ce sont des calculs contraignants à mettre en œuvre par l'ingénieur d'études car il doit anticiper, dès la CAO et l'étape de maillage, la présence de l'indication du défaut. Des gains de productivité importants sont attendus d'une représentation de la fissure par application de patch [bloc fissure, méthode Arlequin] ou par des level-sets [approche meshless XFEM]. Alors, seule la structure saine sera représentée et maillée, facilitant les études paramétriques sur les caractéristiques de la fissure, taille, localisation et trajet de propagation. En outre, la méthode Arlequin permettra également toute localisation de singularité à une échelle inférieure à celle du modèle : inclusion, trou ... ou simple zoom structural.



Appréhension du débit de fuite d'une enceinte en béton armé

La longévité des enceintes de confinement peut être impactée par des dysfonctionnements aujourd'hui bien identifiés comme l'étanchéité, l'augmentation des déformations dans le temps, et résistance mécanique face aux agressions externes.

En étant capable de réaliser des études 3D d'enceintes, nous pourrions intégrer toutes les interactions qui existent entre la précontrainte, le fluage, la fissuration (modèles d'endommagement), les conditions aux limites avec le dôme et le radier, et la zone d'accès matériel, pour finalement évaluer les marges de sécurité (étanchéité et déformations). Et ainsi mesurer l'effet des épreuves répétées, appréhender l'efficacité des réparations et anticiper les travaux. Tout cela dans les meilleures conditions économiques pour l'exploitant grâce aux simulations de l'ensemble des scénarios possibles.



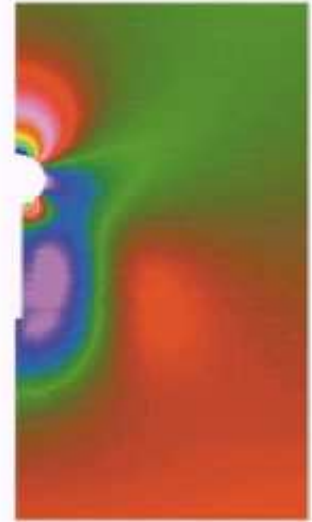
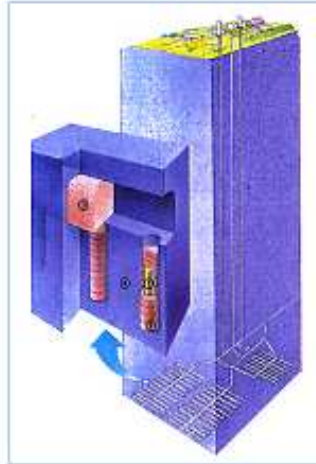
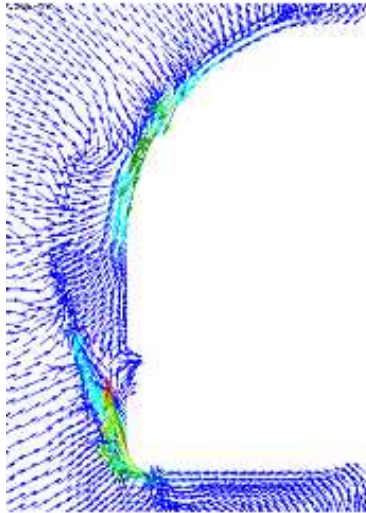
Les défis de modélisations concernent l'utilisation concomitante de tous les phénomènes non linéaires dans un même calcul. Egalement, la distorsion de caractéristiques géométriques entre le matériel globalement modélisé (enceinte de l'ordre de la dizaine de mètres) et le phénomène fin et local (fissure, endommagement, liaisons acier-béton) génère de gros modèles, coûteux en CPU et difficiles à manipuler pour l'interprétation. Ce problème est aussi vrai pour les structures fissurées du chapitre précédent.

La mise en œuvre industrielle de telles modélisations est l'aboutissement du développement des méthodes numériques avancées pour l'algorithme de statique non linéaire : représentation de l'endommagement non local, optimisations de gestion de la convergence.

Simulation 3D de l'excavation, fissuration, re-saturation et écoulement potentiel dans les zones endommagées d'un site de stockage

Dans le cadre des travaux de R&D relatif au stockage des déchets HAVL (haute activité et vie longue), ANDRA et CEA développent la plate-forme Alliances de simulation des différents phénomènes à prendre en compte (Diffusion, Transport, Chimie, Thermo-hydro-mécanique,...). EdF collabore avec l'ANDRA afin de mettre à disposition les modélisations disponibles dans *Code_Aster* pour les analyses thermo-hydro-mécaniques non saturées.

Ces modélisations multi-physiques peuvent soulever des problèmes numériques difficiles (fronts raides pour les phénomènes hydrauliques, localisation des déformations pour les phénomènes mécaniques adoucissants). Elles nécessitent l'intégration de lois de comportement de géo-matériaux et la gestion globale des physiques (couplage endommagement-perméabilité).



Qualité et performance des études

Les études de mécanique sont des outils d'aide à la décision sur des sujets tels que la maintenance, la disponibilité, la durée de vie du parc de production nucléaire. La question de la confiance à accorder au résultat obtenu revêt une grande importance. De fait, *Code_Aster* se dote d'outils permettant d'appréhender la propagation des incertitudes liées aux données physiques et celles liées aux approximations de la modélisation numérique.

Concernant l'incertitude liée aux données, la voie consiste à développer et promouvoir les calculs de sensibilité (calcul du problème et de sa dérivée). Ils sont déjà disponibles pour une large classe de modélisation dans *Code_Aster*. Ce calcul de sensibilité par dérivation permet d'obtenir une étude mécano-fiabiliste, associant un taux de confiance aux paramètres calculés.

Pour les approximations numériques, *Code_Aster* développe, outre des règles de bonne pratique en modélisation, des outils de vérifications ou d'adaptation des calculs : adaptation de maillage (couplage avec HOMARD), calcul d'indicateurs d'erreur.

Pour conclure, deux autres enjeux majeurs à l'échéance 2010, génériques et transverses aux applications déjà décrites, sont :

- les performances en taille mémoire et temps calcul avec un développement probablement massif de la décomposition de domaines et du parallélisme,
- l'ergonomie des outils de post-traitement permettant de manipuler toujours plus de données issues de modèle de plus en plus gros.