

>2.38E+07
 < 5.51E+06
 2.35E+07
 2.22E+07
 2.08E+07
 1.94E+07
 1.80E+07
 1.67E+07
 1.53E+07
 1.39E+07
 1.26E+07
 1.12E+07
 9.99E+06

Version 7

Code_Aster[®]
 Analyse des Structures
 et Thermo-mécanique
 pour des Études et des Recherches

R & D

Quand votre monde s'éclaire



Possibilités de Code_Aster

Code_Aster propose, bien au-delà des fonctionnalités standards d'un code de calcul thermo-mécanique, toute une panoplie de méthodes d'analyse et de modélisation multiphysique : de l'analyse sismique aux milieux poreux en passant par l'acoustique, la fatigue, la dynamique stochastique... Ses modélisations, ses algorithmes et ses solveurs bénéficient de travaux continus d'amélioration et de complétude (1 200 000 lignes de code, 200 opérateurs). Résolument ouvert, il est chaîné, couplé et encapsulé de façon multiple.

Phénomènes

Mécanique

- Statique, quasi statique linéaire ou non
- Dynamique, linéaire ou non, sur base physique ou modale
- Rupture, endommagement et fatigue
- Interactions Sol-Structure, Fluide-Structure et Sol-Fluide-Structure

Thermique

- Stationnaire, transitoire, linéaire ou non
- Repère fixe ou mobile

Phénomènes associés

- Acoustique
- Métallurgie
- Hydratation et séchage

Types d'analyse

Standard

- Décomposition en modes de Fourier
- Sous-structuration
- Superposition de modèles, multiéchelle
- Maillage adaptatif
- Calcul de sensibilité
- Recalage et optimisation
- Calcul mécano-fiabiliste



Multiphysique

Chaînages internes avec la thermique

- Hydratation, séchage
- Métallurgie

Chaînages internes avec la mécanique

- Thermique
- Métallurgie
- Hydratation et séchage

Couplages internes

- Thermo-hydro-mécanique
- Fluide-Structure

Couplage externe avec d'autres codes

- Sol-(Fluide)-Structure (**MISS3D**)

Chaînages externes avec d'autres codes

- Hydraulique : **Code_Saturne**
- Thermique : **SYRTHES**
- Electromagnétisme : **Flux2D/3D**
- Dynamique rapide : **EUROPLEXUS**

Chargements

Mécanique

- Effort nodaux ou répartis
- Pression
- Poids propre
- Accélération centrifuge
- Mouvements imposés
- Déformation anélastique
- Effet du vent

Thermique

- Température
- Flux linéaire ou non
- Convection forcée
- Échange entre parois
- Chauffage par effet Joule

Chargements spécifiques (forces suiveuses, électromagnétiques, états initiaux)

Non linéarités en statique et en dynamique

Géométriques

- Réactualisation géométrique, grandes déformations, grandes rotations
- Forces suiveuses
- Pilotage en déplacement, par longueur d'arc, en déformation, par sortie de critère
- Indicateurs de décharge et non-radialité du chargement
- Contact et frottement : par contraintes actives, multiplicateurs de lagrange, par pénalisation ou encore par la méthode continue (lagrangien augmenté)
- Flambement au premier ordre

Matériaux (95 lois de comportement)

- Elasticité linéaire, non linéaire
- Hyperélasticité non linéaire
- Elastoplasticité locale et à gradient
- Viscoélasticité non linéaire
- Endommagement local et à gradient
- Elastoviscoplasticité
- Effets métallurgiques
- Données matériaux fonction de

la température, de l'état métallurgique, de l'hydratation, du séchage, de la fluence

- Déformation progressive
- Hydratation, retrait et fluage du béton
- Géomatériaux

Dynamique

Analyse modale

- Sans ou avec amortissement (visqueux, hystérétique, modal)
- Directe ou par sous-structuration
- Normalisation, filtrage, paramètres modaux

Réponse transitoire linéaire

- Directe
- Sur base modale
- Par sous-structuration

Réponse transitoire avec non-linéarités locales (sur base modale)

- Chocs
- Frottement
- Lamme fluide

Réponse harmonique

- Directe
- Sur base modale
- Par sous-structuration

Réponse aléatoire

- Probabiliste paramétrique et non paramétrique
- Stochastique

Analyse non linéaire directe

- Implicite
- Explicite
- Chocs
- Plasticité, endommagement
- Contact et frottement



Sous-structuration

- Classique ou cyclique
- Analyse modale, transitoire ou harmonique

Analyse sismique

- Avec chocs ou multiappui
- Spectrale ou transitoire linéaire directe ou sur base modale
- Calcul amortissement modal (RCC-G)

Extrapolation de mesures expérimentales

- Temporelle ou fréquentielle

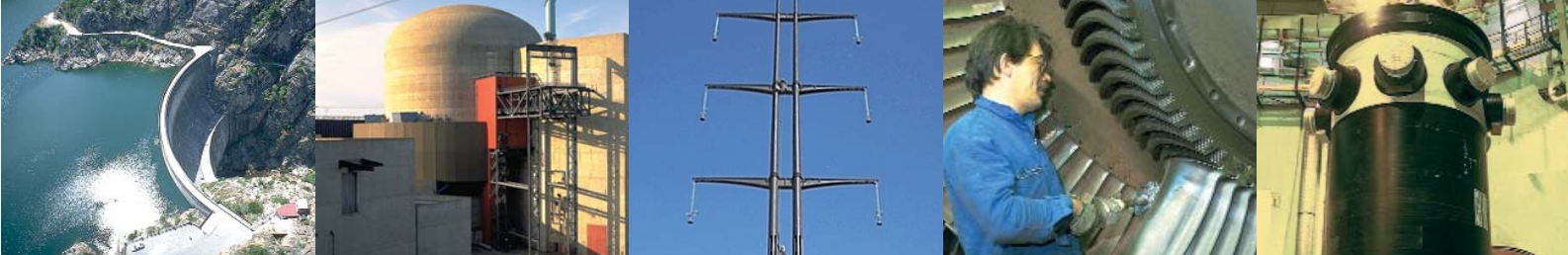
Interactions

Fluide-Structure

- Interaction structure-écoulement incompressible ; efforts turbulents
- Vibro-acoustique (surface libre)

Sol-Structure et Sol-Fluide-Structure

- Eléments de frontière absorbante
- Couplage fréquentiel avec **MISS3D**



Analyse thermique

- ❖ Thermique linéaire et non linéaire
 - Changement de phase
 - Hydratation et séchage
 - Résolution en repère mobile
- ❖ Evolutions métallurgiques
 - Aciers, Zircaloy
 - Calcul de dureté de phases
- ❖ Traitements thermiques et soudage

Génie civil-Géotechnique

- ❖ Lois de comportement béton (armé ou précontraint), géomatériaux
- ❖ Hydratation, séchage, fluage propre à différentes échelles de temps
- ❖ Effet des armatures passives ou de la pré-contrainte avec comportement élasto-plastique : barre, grilles et membrane
- ❖ Couplage fluage-fissuration
- ❖ Thermo-hydro-mécanique (milieu poreux, formulation en contraintes effectives, lois de comportement en kit...)
- ❖ Chargements spécifiques (flux hydriques et gazeux)
- ❖ Procédure d'excavation



Rupture, endommagement, fatigue et ruine des structures

- ❖ Taux de restitution d'énergie globale
 - thermo-élasticité : G
 - thermo-élasto-plasticité : GP et GTP
- ❖ Taux de restitution d'énergie locale en 3D
- ❖ Facteurs d'intensité de contraintes
- ❖ Modèles de rupture fragile et ductile, amorçage et instabilité
- ❖ Pilotage spécifique du chargement
- ❖ Endommagement local et non local
- ❖ Modélisation de fissure : élément joint et X-FEM
- ❖ Endommagement découplé
- ❖ Analyse à la fatigue
 - Historique de chargement
 - Méthodes de comptage
 - Applications de critères spécifiques
- ❖ Vérification de critères du RCC-M
- ❖ Méthode Zarka-Casier en chargement cyclique
- ❖ Usure progressive
- ❖ Analyse limite
- ❖ Approche micro-macro : modèle polycristallin



Qualité des études

- ❖ Indicateurs d'erreur spatiale
 - Mécanique (en résidu pur, par lissage)
 - Thermique (en résidu pur)
- ❖ Raffinement/déaffinement de maillage *via* HOMARD
- ❖ Eléments finis plus robustes
 - Mécanique (sous-intégré, incompressible)
 - Thermique (modélisation lumpé)
- ❖ Diagnostic du maillage
- ❖ Redécoupage du pas de temps thermo-mécanique
- ❖ Calculs de sensibilité
 - Mécanique
 - Thermique
 - Par rapport aux matériaux, aux chargements et à des variations de domaine.
- ❖ Recalage de paramètres
 - Matériau ou chargement
 - Par rapport à un échantillonnage d'essais ou de résultats numériques.
- ❖ Calculs fiabilistes : probabilité de dépassement de seuil par une méthode de type FORM



Modélisation

- ❖ Catalogue de données matériaux
- ❖ Raccordement de maillages incompatibles. Superposition de modèles par méthode Arlequin
- ❖ Raccord de modélisation (coque-3D, poutre-tuyau...)
- ❖ Condition contraintes planes adaptable à tous les modèles
- ❖ Calcul de caractéristiques de poutres
- ❖ Homogénéisation (composites, répétitivité...)
- ❖ Ajout ou enlèvement de matière



Bibliothèque d'éléments (360 éléments finis)

- ❖ Mécanique
 - 2D, 2D axi (avec ou sans décomposition de Fourier), 3D, sous-intégrés, incompressibles
 - Barres, poutres (simple ou multi-fibres), tuyaux, plaques, coques, membranes, câbles, éléments discrets ou indéformables
- ❖ Thermique : 2D, 2D axi (avec ou sans décomposition de Fourier), 3D, coques
- ❖ Hydratation-Séchage : 2D, 2D axi, 3D
- ❖ Couplage THM : 2D, 2D axi, 3D

Solveurs

- ❖ linéaires (Gauss, LDLT, multifrontal parallélisée, GCPC, FETI, sous-structuration)
- ❖ Non linéaires (Newton...)
- ❖ Schémas d'intégration (Runge-Kutta, Newmark, adaptatifs...)
- ❖ Modaux (Puissance, Lanczos, IRAM...)
- ❖ Paramétrage étendu. Plusieurs stratégies de renumérotation, stockage, pré-conditionnement, post-vérification...

Outils dédiés

- ❖ Piquage et coude de tuyauteries : ASPIC/ASCOUF
- ❖ Tubes de Générateur de Vapeur : GEVIBUS

Environnement logiciel

- ❖ Pré-post traitements : I-DEAS™, GIBI, Gmsh, ENSIGHT, AGRAF, GID, Xmgrace
- ❖ Echange de données au format MED
- ❖ Outil de gestion d'études et atelier de génie-logiciel : ASTK
- ❖ Editeur de Fichiers de Commande et Analyseur Syntaxique : EFICAS
- ❖ Portabilité des bases
- ❖ Langage de commande évolué: PYTHON
 - Boucle, test, structures de contrôle...
 - Méthode, classe...
 - Calcul et visualisation interactives (bibliothèques mathématiques, IHM, tracés...)



Sans oublier...

- ❖ Logiciel sous AQ (validations indépendantes, référentiel de 1700 cas-tests, couverture documentaire 13000 pages, gestion des sources, qualification des versions...)
- ❖ Site code-aster.org (téléchargement, documentation en ligne, forum, FAQ, exemples...)
- ❖ Communication et réseau (revue trimestrielle ASTER *échos* ; Club des Utilisateurs, son réseau de correspondants et sa journée annuelle ; *Code_Aster* Libre sous licence GPL...)

Non linéaire

Dans une étude industrielle, il est souvent impossible de faire l'économie d'une véritable prise en compte de non-linéarités : matériau, géométrique, unilatérale, choc ... Pour chacune d'entre elles le *Code_Aster*, au travers des opérateurs `DYNA_TRAN_EXPLI` et `DYNA/THER/STAT_NON_LINE` propose des solutions adaptées.

Des opérateurs non-linéaires...

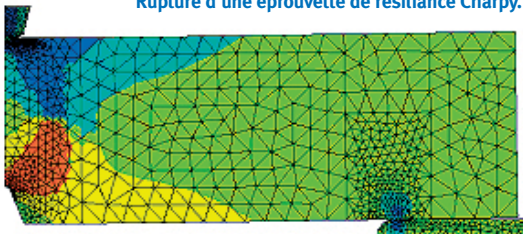
... riches en fonctionnalités et de plus en plus faciles à piloter : `DYNA` et `STAT_NON_LINE` permettent de mener une étude statique ou dynamique implicite avec des non-linéarités géométriques (contact, grandes transformations) et de comportement ; `DYNA_TRAN_EXPLI` les prend en compte en dynamique explicite. Les options de calcul sont communes à ces trois opérateurs, ce qui permet de bénéficier, à la fois en statique et en dynamique, de toutes les méthodes de contact-frottement, de l'archivage sélectif avec observation, des comportements...

En thermique, `THER_NON_LINE` simule aussi des non-linéarités (matériaux, flux) et permet de calculer l'évolution dans le temps de l'hydratation et du séchage du béton.

Des calculs plus rapides et robustes...

« Quelle précision choisir pour calibrer la convergence de mon calcul non linéaire ? » Question mille fois ressassées par le mécanicien à la veille de lancer son calcul. Jusqu'à présent les opérateurs non linéaires implicites utilisent de critères de convergence globaux. La v7 incorpore un nouveau critère utilisant des valeurs de référence physiques (contraintes, déformations...). Ces points forts sont un meilleur confort d'utilisation et une précision plus adaptée, notamment en présence de résidus hétérogènes (mélange de modélisation, de physique...).

Rupture d'une éprouvette de résilience Charpy.



Pour aider à mener à bien le calcul avec des comportements adoucissants, il est possible d'utiliser la matrice sécante au lieu de la tangente. Celle-ci, pour certaines non-linéarités structurelles ou de comportement, peut être non symétrique. La vitesse de résolution de systèmes linéaires non symétriques de grande taille, par la méthode multi-frontale, a été optimisée en v7. Si, de plus, on peut isoler dans la structure des sous-domaines à comportement linéaire, il est désormais possible de les traiter comme des macro-éléments condensés (sous-structuration statique, `MACR_ELEM_STAT`).

Des outils pour améliorer la qualité des études

Quand l'instabilité risque d'apparaître au niveau de la structure (flambage) un critère peut être calculé en continu pour prévenir la proximité de points critiques. Au niveau local, le comportement de Drucker-Prager bénéficie en v7 du critère de localisation de Rice. Les phénomènes de localisation avec dépendance pathologique au maillage, caractéristiques des modèles d'endommagement local, peuvent être résolus grâce à l'utilisation des modèles non locaux (voir encadré).

Lors d'une étude thermo-mécanique, le choix des discrétisations temporelles mécanique et thermique peut s'avérer délicat. Un critère permet dans `STAT_NON_LINE` de les adapter pour prendre en compte les gradients thermiques significatifs. Plus généralement, comment fournir les bonnes données à un calcul (matériaux, chargements...) ? Pour cela une procédure de recalage (`MACR_RECAL`) identifie les paramètres optimaux en comparant les résultats d'une expérience avec ceux de sa simulation. Enfin, la pertinence finale des résultats peut être confrontée à divers calculs de sensibilité (`SENSIBILITE`) et à des estimations d'erreurs (`CALC_ELEM`).

95 lois de comportement...

... sont disponibles dans *Code_Aster* : élasticité isotrope et anisotrope, élastoviscoplasticité (écrouissage isotrope, cinématique, viscoplasticité, modèles de Chaboche, de Lemaître), lois décrivant la déformation progressive (modèle de Taheri, polycristallin), lois d'endommagement fragile ou ductile (modèle de Rousselier) et toutes les lois issues de problématiques ciblées (plasticité et endommagement du béton, aciers, assemblages, éléments cohésifs...). Elles se déclinent sur bon nombre de modélisations et de mailles support. De plus, des modèles en « kit » permettent de démultiplier les possibilités: comportements mono et polycristallins, fluage et plasticité du béton, métallurgie, thermo-hydro-mécanique...



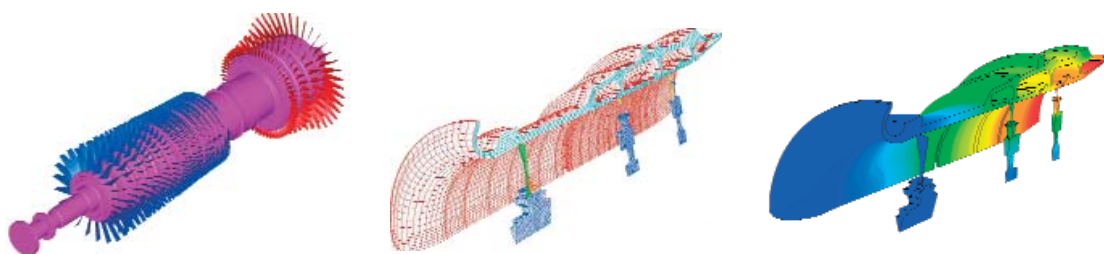
→ Métallurgie

Evaluer les contraintes résiduelles d'un composant mécanique à l'issue d'une opération de soudage ou de transitions thermiques sévères est essentiel pour expliquer certains phénomènes de dégradation (corrosion sous contrainte, fatigue ...). Dans de telles situations, les matériaux sont sollicités dans un large domaine de températures et de vitesses et subissent des évolutions métallurgiques qui modifient leur comportement thermo-mécanique. Les modèles disponibles (un grand choix est proposé *via* la technique du « kit » de lois métallo-mécaniques) sont élasto-(visco)-plastiques et permettent de décrire différents phénomènes: grandes déformations, écrouissage, restauration visqueuse, fluages... Les caractéristiques matériaux sont fournies phase par phase et les lois de mélange peuvent être définies par l'utilisateur.

→ La simulation de milieu poreux...

... est un passage obligé pour le calcul des ouvrages (barrages, sites de stockage, enceintes...). Elle tient compte d'une circulation de fluide interstitiel dans un squelette solide avec pour inconnues, les déplacements, la température et une ou deux pressions si l'on veut calculer celle de l'eau et celle du gaz. Les modélisations thermo-hydro-mécanique du *Code_Aster* (`KIT_THM...`) traitent par couplage fort toutes les interdépendances entre ces inconnues et laissent toute latitude pour mixer des lois de comportements variées. En version 7, les modèles disponibles pour la mécanique se sont enrichis des modèles de Drucker-Prager, Badel, Mazars et ceux de l'université de Barcelone.

Calcul thermo-mécanique non linéaire d'un compresseur de turbine à combustion : rotor aubagé et quart-compresseur.



Toutes ces méthodes sont utilisables en dynamique. Le dépouillement est facilité par la création de champs stockant les valeurs des jeux, des réactions, en chaque lieu potentiel de contact qui peuvent être visualisés sous forme d'isovaleurs ou de courbes. Enfin, l'utilisation du contact est simplifiée, grâce à un point d'entrée unique : AFPE_CHAR_MECA, mot-clé CONTACT.

Transversalité comportement/élément...

Disposer de l'ensemble des comportements non linéaires pour toutes les modélisations est un choix d'architecture qu'il est important de maintenir. Pour cela les spécificités de certaines modélisations tendent à être supprimées. Ainsi, en contraintes planes, plus besoin de développements particuliers : un algorithme dû à De Borst enrichit tous les modèles de cette condition, en isoparamétrique comme en élément de structure. De même, les modélisations à comportements 1D (barres, poutres multifibres, grilles d'armatures pour le béton armé) peuvent bénéficier, via cette méthode, de la richesse des comportements développés en 3D (ALGO_1D=DEBORST).

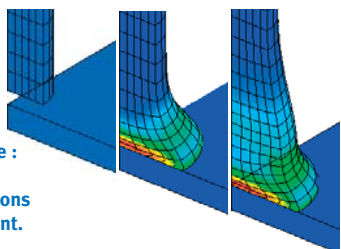
... et éléments finis particuliers

Certaines modélisations sont développées pour répondre à des critères spécifiques. C'est le cas des éléments prenant en compte l'incompressibilité des déformations plastiques ou, pour les calculs de charge limite, des éléments sous-intégrés stabilisés (SHB8 en coques, QUAD4, QUAD8, HEXA27). La modélisation de possibles ruptures de liaisons cohésives se base aussi sur des éléments joints (XX_FISSURE) adossés à une loi d'interface de type Barenblatt.

Le contact-frottement...

... est abordé de différentes manières dans Code_Aster : méthode des contraintes actives, pénalisée ou lagrangienne, sans compter la nouvelle méthode continue. Son périmètre d'utilisation couvre toute la gamme des modélisations (2D/3D, poutre et coque) en se basant éventuellement sur des maillages incompatibles et avec des géométries réactualisées.

Dynamique non linéaire implicite : plasticité + grandes déformations + contact + frottement.



Les grandes déformations et rotations...

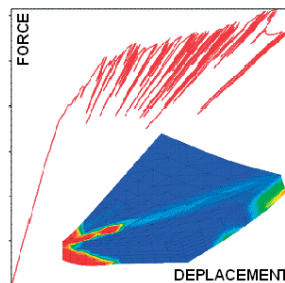
... sont modélisables de diverses façons (mot-clé DEFORMATION) : SIMO_MIEHE traite des grandes déformations plastiques et des rotations importantes, et se décline en v7 sur plusieurs lois de comportement : viscoplasticité, avec éventuellement prise en compte de la métallurgie, endommagement ductile. En élasticité non linéaire, GREEN traite les grandes transformations. Sous l'hypothèse de grands déplacements et petites déformations, il permet aussi d'utiliser tous les comportements incrémentaux. Quant à PETIT_REAC, il se contente de réactualiser la géométrie à chaque pas de temps (nécessairement petit) et ne tolère que les petites rotations. Pour les structures surfaciques ou élancées, les grands déplacements et rotations des poutres et coques sont traités par GREEN_GR.

Pilotage du chargement

L'obtention de réponses quasi-statiques sur structures présentant des instabilités géométriques (flambement...) ou matériau (loi de type adoucissant, endommagement) est un problème difficile. La réponse continue peut ne pas être obtenue par un chargement monotone (phénomènes de snap-back/through) maltraitant ainsi la convergence du processus. Heureusement, les méthodes de suivi de solution (mot-clé PILOTAGE) permettent souvent d'y remédier.

Des méthodes générales sont disponibles pour le suivi de l'évolution de structures instables ou le calcul de charge limite: pilotage en déplacement ou par longueur d'arc. Pour les matériaux à comportement adoucissant, le pilotage par prédiction élastique permet de contrôler la perte de stabilité locale de façon efficace, en maîtrisant les points les plus chargés. Une autre technique consiste à s'assurer de la continuité de la réponse en déformation.

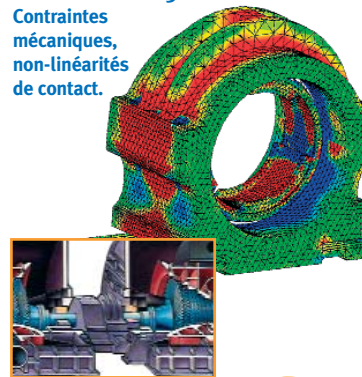
Endommagement : pilotage du chargement.



→ Données matériaux

Via l'opérateur INCLUDE_MATERIAU, l'utilisateur dispose d'une kyrielle de données matériaux usuellement utilisés dans le nucléaire : par type (médiane ou extrême...), par désignation AFNOR et par variante (laminé, forgé...). Cet accès automatisé renforce la fiabilité, la cohérence et la pérennité des études. La base associée capitalise les efforts de validation des spécialistes matériaux d'EDF R&D et les données normatives du RCC-M et du RSEM. On peut bien sûr réutiliser cette fonctionnalité hors de ce contexte pour constituer une autre base, pérenne et partageable.

Palier hydrodynamique de groupe turbo alternateur 1300 MW. Contraintes mécaniques, non-linéaires de contact.



→ Modélisations non-locales

Les comportements adoucissants conduisent naturellement à des résultats dépendants du maillage. Pour éviter cela, Code_Aster propose deux façons de « délocaliser » l'endommagement et ainsi de supprimer une telle dépendance non physique. La première, plus précise, utilise le gradient des variables internes et est donc intimement liée au modèle de comportement. Elle est opérationnelle pour les modèles de plasticité de Von Mises, celui à endommagement fragile de Lorentz et celui, ductile, de Rousselier. La deuxième, limite les concentrations de déformation via un champ de déformation régularisé. Plus rapide, elle s'applique à tous les modèles d'endommagement.



Code_Aster, un facilitateur d'études

Le mécanicien éléments finis est un être exigeant. Du genre : « Quel est le degré de confiance à accorder à mes résultats numériques bruts ? » ou « Comment réutiliser mes chers maillages dans des configurations pour lesquelles ils n'étaient pas *a priori* conçus ? ».

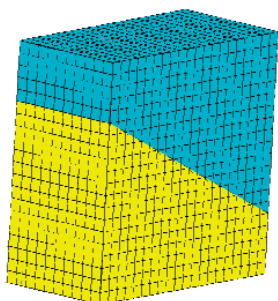
Des fonctionnalités avancées de Code_Aster apportent des réponses à ces questions légitimes !

Effets utilisateurs

A données physiques fixées, trois effets utilisateurs entrent en ligne de compte : le maillage, les types d'éléments finis et la discrétisation temporelle. Concernant le maillage, son élaboration est une phase délicate et coûteuse en temps ingénieur et il est illusoire de prétendre construire, *a priori*, le maillage optimal tant les critères d'une étude industrielle peuvent être variés, voire antagonistes. Il vaut mieux adapter un maillage grossier aux exigences d'un calcul en post-traitant ses résultats. L'opérateur `CALC_ELEM` fournit ainsi une cartographie d'erreur, localisée sur chaque élément, sur laquelle l'outil de raffinement/déaffinement `HOMARD` (voir encadré) s'appuie. Bien sûr, cela ne dispense pas d'effectuer un diagnostic du maillage initial *via*, par exemple, `MACR_INFO_MAIL` et de suivre les préconisations du code en terme d'éléments finis. Quant aux pas de temps, une option de `STAT_NON_LINE` les adapte pour conduire un chaînage thermo-mécanique sans heurt.

→ En complément des chantiers de modélisation...

...l'équipe Code_Aster s'efforce continuellement d'améliorer les performances et le périmètre d'utilisation. Au menu de la V7 : en calcul modal quadratique, meilleure prise en compte des amortissements visqueux et hystériques par l'extension de la méthode IRAM ; En sous-structuration, possibilités d'associer des macro-éléments linéaires avec un calcul non-linéaire ; Gains CPU d'un facteur deux en complexe et en non symétrique pour le solveur linéaire multifrontal ; Introduction de la méthode de décomposition de domaine FETI en mécanique linéaire.



X-FEM : blocs en compression avec interface en contact-frottant.

Sensibilités aux données

A paramètres de discrétisation et de résolution fixés, on aimerait cette fois quantifier la sensibilité d'un résultat par rapport à ses données d'entrée. Soit pour comparer l'influence respective de différents paramètres, soit pour insérer cette dérivée dans un autre calcul (optimisation, recalage, fiabilité voir encadré...). Ainsi, Code_Aster fournit la dérivée analytique des quantités thermo-mécaniques usuelles (déplacement, contrainte, température, flux, modes propres, taux de restitution d'énergie...) par rapport à des paramètres comme les matériaux ou les chargements, en statique comme en dynamique.

Une fois le paramètre "sensible" identifié (*via* `DEFI_PARA_SENSI`), son pilotage requiert simplement le rajout du mot-clé `SENSIBILITE` dans la commande principale. Le résultat est un champ à part entière, exploitable comme n'importe lequel autre. L'expérience montre que ces dérivées sont plus fiables et moins coûteuses que celles obtenues par différences finies.

De l'étude de sensibilités au recalage, il n'y a qu'un pas, que franchit la macro-commande `MACR_RECAL` qui recalcule automatiquement des paramètres matériaux ou chargement à partir d'essais sur éprouvette ou sur structure. Outre les valeurs optimales des paramètres, l'utilisateur obtient une estimation de leurs importances relatives et de leurs éventuels couplages permettant ainsi de discriminer les paramètres peu influents.

Nouvelles frontières pour les éléments finis

Bien que très répandue dans l'industrie, la méthode des éléments finis ne permet pas de résoudre efficacement certains problèmes à géométrie complexe ou évoluant dans le temps (suivi de fissure, d'excavation, jonction de modélisations...). Ceux-ci nécessitent alors des remaillages localisés, laborieux voire impossibles à gérer avec l'existant. Pour y remédier, différentes approches sont proposées : les méthodes Arlequin et X-FEM.

La première (mot-clé `ARLEQUIN`) propose une stratégie multi-échelle pour raccorder des modèles numériques de natures différentes. Par une technique de superposition, elle réalise facilement des zooms locaux, des jonctions et des substitutions (rajout dans un maillage sain d'un maillage de défaut, raccord de maillages ou de modélisations incompatibles...).

La seconde (mot-clé `XFEM`) permet d'affranchir le maillage de la contrainte du respect des entités physiques en modélisant des surfaces libres ou des discontinuités de champs. Un élément fini peut ainsi être traversé par une fissure rendant le remaillage moins systématique.

→ La panoplie des outils mécano-fiabilistes...

... s'étoffe d'une nouvelle macro : `MACR_FIABILITE`. Au cours d'un calcul Aster, il est désormais possible d'évaluer la probabilité de dépassement d'un seuil donné, en fonction d'une certaine variabilité de données. Pour ce faire, Code_Aster a été couplé à un logiciel probabiliste développé en interne EDF R&D, MEFISTO. Basées sur une minimisation de type FORM, les interactions entre les deux codes se nourrissent des dérivées de la valeur cible par rapport à des paramètres. Si ces sensibilités sont disponibles (mot-clé `SENSIBILITE`), il est conseillé de les utiliser pour accélérer le processus ; sinon elles seront calculées par différences finies.

Fig. 1

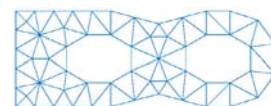


Fig. 2



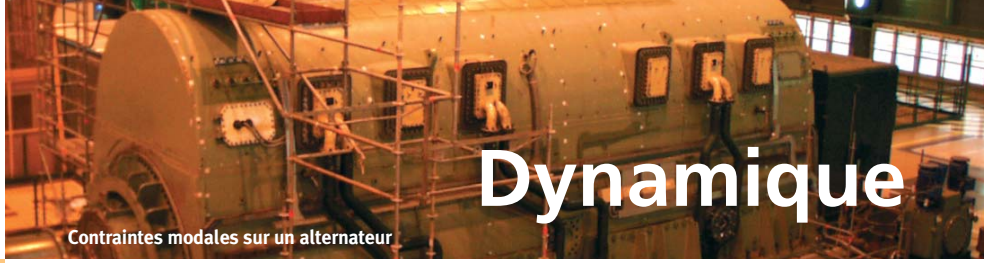
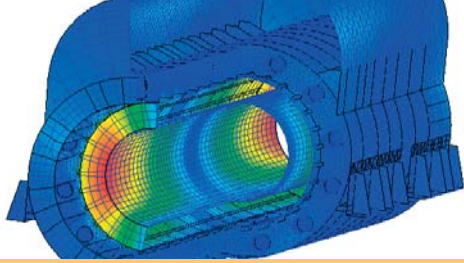
Fig. 3



Maillage adaptatif sans (fig. 2) et avec suivi de frontière courbe (fig. 3).

→ Le suivi de frontière courbe...

... en maillage adaptatif est désormais disponible avec `HOMARD` (encapsulé dans `MACR_ADAP_MAIL`). En effet, quand le bord d'une géométrie est courbe, les maillages l'approchent par une succession de segments. Résultat, cela introduit des angles là où il n'y en a pas ! Un découpage adaptatif standard va inévitablement les conserver et les propager, ce qui est potentiellement nuisible au calcul. L'innovation consiste à placer les nouveaux nœuds issus du découpage sur la frontière réelle. Ces angles fictifs s'aplatissent et la description de la frontière courbe va s'affiner. D'autre part, en 2D, toutes les fonctionnalités du maillage adaptatif et du diagnostic de maillage s'ouvrent aux quadrangles.



Dynamique

Contraintes modales sur un alternateur

Le comportement dynamique des structures peut être l'occasion de surprises et pas toujours agréables. Une résonance et les niveaux de contraintes d'une pompe grimpent ! Lors d'un séisme, les mouvements de surface de l'eau peuvent faire vaciller un réservoir ! Heureusement, *Code_Aster* peut aider à mieux prendre en compte l'inertie des structures et ses effets intempestifs lors des phénomènes transitoires ou stationnaires.

L'introduction des termes d'inertie dans les équations de la mécanique permet de modéliser la complexité des phénomènes dynamiques, des aspects vibratoires ou transitoires. Qu'ils soient déterministes ou aléatoires, que les lois de comportement soient linéaires ou non, que les déformations des structures soient couplées ou non à de l'acoustique ou à des mouvements de fluide, que des composants rentrent en contact ou frottent, *Code_Aster* permet de les modéliser, sur base modale ou dans l'espace physique, sur le système dans son ensemble ou par sous-structuration.

Analyse modale

Le calcul des fréquences propres et des modes propres d'un matériel apporte déjà une information précieuse sur son comportement vibratoire. Les opérateurs *MODE_ITER_XX* calculent les déformées modales et leurs pulsations propres, avec ou sans amortissement structural. Les modes peuvent être aussi la base d'une réduction du modèle à ses principales libertés de mouvement et ainsi alléger l'étude des transitoires. On peut bien sûr normer les modes (*NORM_MODE*) ou les filtrer (*EXTR_MODE*) selon différentes conventions.

Analyse transitoire ou fréquentielle

Connaître la réponse de la structure à une excitation est indispensable à une analyse fine des déformations et des contraintes au cours du temps. Que les efforts soient périodiques (*DYNA_LINE_HARM*), transitoires (*DYNA_LINE_TRAN*, *DYNA_TRAN_MODAL* ou *DYNA_NON_LINE*), exprimés en spectres sismiques (*COMB_SISM_MODAL*) ou basés sur des probabilités (*DYNA_ALEA_MODAL*).

Amortissements

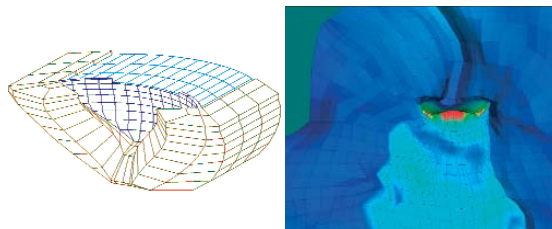
Des phénomènes dissipatifs (frottement, viscosité...) interviennent dans les structures ; Ils ont une influence notable sur l'amplitude des réponses. Cependant l'amortissement est souvent délicat à modéliser. C'est pourquoi trois types d'amortissement sont disponibles : visqueux, hystérétique et modal.

De la mesure au calcul

La modélisation numérique permet de compléter les mesures expérimentales aux zones où l'on ne dispose pas de capteur. Dans le domaine fréquentiel ou temporel des champs mécaniques usuels, *PROJ_MESU_MODAL* extrapole la grandeur souhaitée en transitant par une base modale du modèle numérique.

Les interactions sol-structure...

... qui interviennent en dynamique des bâtiments réacteurs ou des barrages voûtes, peuvent être résolues de deux manières : par couplage fréquentiel avec *MISS3D* (*XX_MISS_3D*), code équation intégrale par sous-structuration de l'ECP, ou *via* des éléments de frontière absorbante modélisant des domaines quasi-infinis (*XX_ABSO*). Dans tous les cas, l'hypothèse d'anéchoïcité est vérifiée (élimination des ondes planes élastiques ou acoustiques diffractées par la structure vers l'infini).



Modélisation du barrage de Grésiole au séisme : couplage sol-structure entre le génie civil et la retenue.

Acoustique

L'étude de propagation acoustique dans un fluide compressible et pour des domaines clos est modélisée (phénomène *ACOUSTIQUE*) *via* deux formulations (classique et mixte). Elles résolvent l'équation de Helmholtz pour en déduire les champs de niveau sonore et d'intensité acoustique.

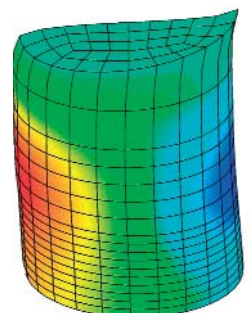
→ Sous-structurer pour mieux calculer !

Devant la complexité des structures mécaniques souvent constituées d'un assemblage de plusieurs composants, les méthodes numériques ou expérimentales classiques se révèlent parfois coûteuses ou inutilisables. Il est donc préférable de décomposer le modèle global en plusieurs sous-structures et d'étudier séparément leur comportement vibratoire avant de les raccorder. Différents types de modes d'interface sont disponibles dans *DEFI_INTERF_DYNA* : *Craig-Bampton*, *Mac Neal* ou modes dynamiques d'interface. Les maillages des faces n'ont même pas besoin d'être coïncidents, *Code_Aster* s'accommode de raccords incompatibles.

→ Différents types de force fluide ...

... sont modélisées dans le *Code_Aster*. En vibration sous écoulement (crayon combustible) on en distingue deux : les forces indépendantes du mouvement de la structure dues à des turbulences ou à la nature diphasique de l'écoulement (*DEFI_SPEC_TURB*) et les "fluide-élastiques" qui concrétisent le couplage fluide-structure proprement dit (*CALC_FLUI_STRU*). *CALC_MATR_AJOU* calcule les coefficients associés à ce couplage. En outre, il est possible d'étudier le couplage vibro-acoustique et le ballonnement de structures remplies de liquide (tuyauterie, réservoir...) avec surface libre à l'aide d'éléments *ad hoc* (modélisations *XX_FLUI_PESA/STRU...*). Ce couplage fort est traité par une formulation (u, p, φ) symétrique. Il a été récemment généralisé à l'opérateur transitoire *DYNA_NON_LINE* : la structure peut présenter tout type de non-linéarité, le fluide restant, lui, modélisé de manière linéaire.

Pression du fluide contenu dans un réservoir et mouvement de la surface libre.



Géomatériaux

Pourquoi EDF s'intéresse-t-elle à la modélisation du comportement des bétons, limons, sables, argiles et roches ? Réponse : au delà de la tenue des barrages, l'expertise des solutions envisagées dans le stockage des déchets radioactifs. Les modèles de thermo-hydro-mécanique de *Code_Aster* sont un des apports d'EDF-R&D dans l'épineuse question de l'aval du cycle.

Non linéaires sous chargement nominal, les géomatériaux sont souvent objet de déformations différées : aussi, prédire l'état des ouvrages à court et long terme requiert la simulation des phases de leur construction. D'autant plus que le comportement de l'eau imbibant ces matériaux n'est pas sans conséquences mécaniques, notamment pour l'évolution lointaine des sols et roches. Il est alors primordial de calculer les écoulements en tant que tels car les effets capillaires liés à des états partiellement saturés influencent significativement l'état de contrainte. En particulier pour des matériaux peu perméables où des fortes succions apparaissent.

Des lois de comportement particulières

Les phénoménologies décrites ici ne peuvent bien sûr être simulées que par des modèles *Aster* spécifiques. Au delà de leur diversité, tous partagent la propriété de représenter une dégradation du matériau sous cisaillement fonction du confinement et s'accompagnant de variations de volume sensibles. Selon qu'il s'agit d'un béton, d'un limon ou d'un sable, d'une argile ou d'une roche, le cadre de la formulation variera. On préférera le formalisme de l'endommagement pour les bétons dont la micro fissuration détériore la rigidité, alors que pour les sols la plasticité permettra de mieux tenir compte des déformations irréversibles. Pour les argiles, on fera dépendre l'érouissage plutôt de la déformation plastique volumique et pour les roches, de la déformation plastique de cisaillement. Dans tous les cas, au delà d'un certain seuil, un comportement adoucissant apparaît. Pour les sols et roches, les fonctionnalités *Aster* modélisent assez finement les phénomènes de dilatance concomitants.

Elles modélisent également les évolutions hydrauliques et thermiques ; ces dernières entraînant directement des dégradations de type fissuration par séchage, effondrement par remouillage, plastification par gonflement des argiles, claquage des terrains dû à la dilatation thermique de l'eau.

Une offre *Aster* adaptée aux géomatériaux



Pour les sables et limons, le premier niveau des lois CJS permet une approche de type "charge limite". Les deuxième et troisième niveaux introduisent un couplage entre mécanismes plastiques isotrope et déviatoire avec des érouissages isotropes ou cinématiques incluant la dilatance et le radoucissement pour le troisième niveau.

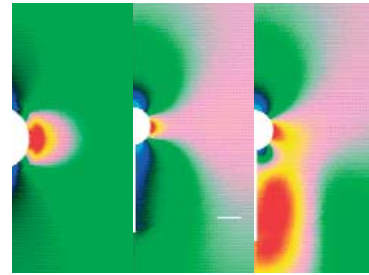
Pour les argiles saturés, Cam Clay (`RELATION_KIT='CAM_CLAY'`), la star des modèles, associe une élasticité non linéaire et une plasticité limitant les contraintes à un domaine dont la taille dépend de la pression de consolidation. Son extension aux sols non saturés, connue sous le nom de modèle de Barcelone (voir encadré), fait en outre dépendre ce domaine de la pression capillaire. Pour les roches, *Aster* a bénéficié de l'expérience du Centre EDF d'Ingénierie Hydraulique de Chambéry qui a démontré la nécessité de retenir le comportement dit post pic, c'est à dire fissuré, des roches et a proposé une généralisation du modèle de Hoek et Brown (`'LAIGLE'`).

Code_Aster répond à la variété des phénomènes hydrauliques par des modèles simples pour le séchage et l'hydratation du béton, ou plus complexes basés sur l'intégration couplée de deux lois d'écoulement non linéaires et celle de conservation de l'énergie. Dans la version élaborée de cette modélisation sans hypothèse sur la pression de gaz, les échanges entre phases sont régis par les lois d'équilibre très générales de la thermodynamique. Les écoulements sont darcéens, perméabilités et saturation sont reliées par des lois quelconques fournies par l'utilisateur. De même pour la relation entre saturation et pression capillaire. Les mécanismes de diffusion au sein des mélanges gazeux (gaz « sec » et vapeur) et liquides (gaz dissous et eau liquide) sont régis par des lois de Fick.

Une bonne expérience d'utilisation



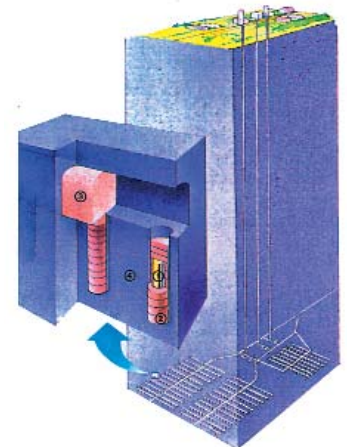
L'ancienneté de certains de ces modèles, leur longue utilisation ont contribué à accroître leur robustesse. Les modélisations THM couplées sont bien adaptées aux besoins EDF : étanchéité des enceintes de confinement des centrales nucléaires, problèmes liés au stockage profond des déchets, à la resaturation et la thermo-mécanique d'argiles gonflantes, à l'endommagement lors du creusement et de la consolidation de galeries...



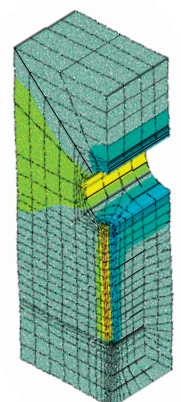
Contraintes effectives sur un site de stockage : après excavation de la galerie, creusement du puits et un an après la mise en place des colis.

→ La modélisation des sols non saturés...

... a fait l'objet de récents développements : introduction du modèle de Barcelone et d'une loi de couplage hydraulique prenant en compte la dissolution d'un gaz dans l'eau et la diffusion au sein de ce mélange (`LIQU_AD_GAZ_VAPE`).



Stockage profond et ses alvéoles : concept suédois KBS-3 en milieu granitique.



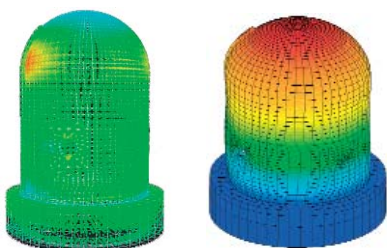
Contraintes mécaniques dans la jonction galerie-puits.

Dans la prévision et la maîtrise de la tenue mécanique des structures de génie civil de production d'électricité, comme les 58 enceintes de confinement et les 28 aéroréfrigérants des centrales nucléaires, ou bien les 213 barrages, les préoccupations EDF de sûreté des installations sont dominantes. Le positionnement résolu de *Code_Aster* sur la modélisation non linéaire du béton armé précontraint permet d'envisager sereinement un suivi numérique dans le temps de tels ouvrages.

Evaluer la durée de vie d'une structure en béton, anticiper et remédier à ses défauts requièrent la connaissance de son état au jeune âge ou à un instant donné. D'où l'intérêt de la diversité des modélisations béton, des méthodologies d'études réalisables et de leurs validations expérimentales : thermo-hydratation, séchage, retrait, fissuration, endommagement, fluage, effet des armatures actives et passives. Outre la tenue physique, les problématiques à couvrir sont vastes ; par exemple, l'étanchéité des enceintes béton de confinement des centrales nucléaires, leurs déformations dans le temps. Mais aussi les effets des chargements accidentels comme le séisme, la perte de réfrigérant primaire ou le choc de projectiles.

Comportement physico-mécanique du béton

Les évolutions des propriétés du béton sont traitées par des modèles de thermo-hydratation et de séchage associés (Granger, Bazant, Mensi...). Les opérateurs *Aster* calculent le retrait du béton au jeune âge à partir des variations de l'hydratation et le retrait de dessiccation *via* un calcul de séchage. Pour le fluage propre, deux modèles sont disponibles : Granger et UMLV biaxial. Quant au fluage de dessiccation intrinsèque, phénomène à long terme sous l'effet du chargement mécanique, *Code_Aster* propose le modèle de Bazant.



Maquette SANDIA d'enceinte : déformée sous poids propre et précontrainte et contraintes radiales aux points de Gauss.

Modèles non linéaires

Le modèle de Laborderie (uniaxial, porté par des éléments finis de poutres multifibre) couvre bien les analyses statiques ou à comportement sismique car il tient compte des dégradations dissociées en traction et en compression, ainsi que l'ouverture-refermeture des fissures. En 2D et 3D, le modèle DDP (Double Drücker Prager) isotrope élastoplastique adoucissant distingue la traction de la compression. La réponse *Code_Aster* à la simulation du couplage fluage-fissuration, cause de la rupture potentielle prématurée des structures, est l'emploi couplé des modèles de Granger et du DDP. Pour suivre l'endommagement par fissuration du béton, les modèles 3D de Badel (ENDO_ISOT_BETON), de Godard (ENDO_ORTH_BETON) et de Mazars sont utilisables en formulation locale ou non. Et en cas de convergence lente, il désormais possible de recourir à la matrice sécante de rigidité au lieu des matrices élastiques ou tangentés.

Béton armé et précontraint

Les armatures du béton sont modélisées par des éléments finis de barres ou de grilles orthotropes excentrées pour les nappes de treillis soudés. *Code_Aster* tire de ce type d'éléments simplicité de maillage et faible nombre de noeuds. La loi non linéaire de Pinto-Menegotto simule les mécanismes de plastification, d'écrouissage non linéaire et de flambement ; ce dernier étant décrit de façon phénoménologique. Dans la modélisation des ouvrages en béton précontraint, en dissociant le maillage des câbles de précontrainte de celui du béton traversé, on décrit mieux les sollicitations selon les règles du BPEL (Béton Précontraint aux Etats Limites). Pour des structures fortement "encablées" comme les enceintes de confinement, on accède ainsi aux effets de la tension des câbles sur les déformations de la structure.

Des développements récents facilitent la modélisation de cette précontrainte. *CALC_PRECONT* permet ainsi d'appliquer la tension dans les câbles et de la retrouver de manière effective en sortie du calcul. Cette tension peut s'appliquer de manière progressive et différenciée, câble par câble.

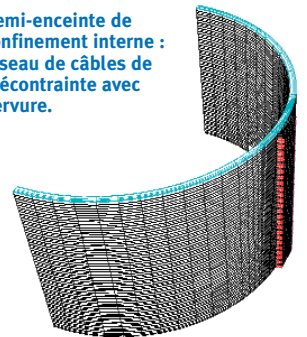
Dans les zones d'ancrages, le poinçonnement donne lieu à des niveaux de contraintes irréalistes. Avec la nouvelle option *CONE* de *DEFI_CABLE_BP*, l'utilisateur peut définir un volume de béton rigidifié, représentant le cône d'évanouissement qui n'est généralement pas présent dans le maillage. Ceci afin de répartir les efforts sur plusieurs noeuds du béton et, ainsi, de garantir une solution élément fini plus correcte.

CALC_PRECONT : phasage de câbles sur une poutre modèle.

→ Un nouveau modèle de fluage...

... 3D du béton (BETON_UMLV_FD) permet de prendre en compte les déformations dues aux différents retraits (endogène, thermique et de dessiccation) et du fluage de dessiccation.

Demi-enceinte de confinement interne : réseau de câbles de précontrainte avec nervure.

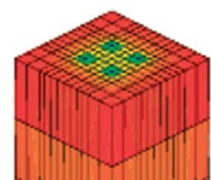


→ La modélisation des nappes d'armature...

... est facilitée par l'introduction d'un nouvel élément, dit *GRILLE_MEMBRANE*, qui vient compléter les traditionnels *BARRE* et *GRILLE*. Cet élément 2D plaque travaille en unidirectionnel (2 éléments superposés sont nécessaires pour décrire une nappe de treillis) et ne possède pas de rigidité de flexion.

→ Liaison acier béton

Le comportement d'une structure en béton armé est déterminé par ses composants, mais aussi par leurs interactions. Le catalogue des modèles décrivant le béton et l'acier est complété par celui de la liaison acier-béton, *JOINT_BA*. Disponible en 2D, il décrit le mécanisme de rupture des liaisons chimiques, l'écrasement du béton et son glissement relatif autour des armatures. Toutes choses essentielles à la prédiction des zones de fissuration.



Rupture, Endommagement et Fatigue

L'analyse des causes de la ruine d'un ouvrage ou d'un composant mécanique doit tenir compte de la nature même des dégradations constatées et du degré de finesse recherché.

Code_Aster, en offrant une large gamme de modélisations et d'outils d'analyse, des plus éprouvés aux plus exploratoires, couvre les problématiques de l'endommagement, de la rupture, de la fatigue et des charges limites.

Pour les dégradations mécaniques sous sollicitations répétées on parle de "fatigue". Dans le cas contraire il s'agit de "rupture" ou "d'endommagement". La mécanique de la rupture s'appuie sur des critères globaux pour statuer sur la propagation d'une fissure existante, alors que la mécanique de l'endommagement intervient au niveau des matériaux afin de déceler l'amorçage et le développement de zones endommagées.

Evolution de fissures

Le classique taux de restitution d'énergie G , paramètre clé en mécanique de la rupture, permet de conclure quant à la propagation ou non d'une fissure. Les opérateurs *Aster* `CALC_G_XX` le calculent pour diverses situations : 2D, 3D, matériau dépendant de la température, forces de surface ou de volume, pression sur les lèvres.... Et ce, en élasticité comme en élasto-plasticité, pourvu que le chargement demeure monotone et radial. Les autres critères usuels en élasticité que sont les facteurs d'intensité de contraintes sont accessibles en 2D et dans certaines configurations 3D *via* `CALC_G_THETA` ou `POST_K1_K2_K3`. Pour dépasser ces limites, `POST_ELEM` propose deux nouveaux paramètres : `GTP` (G-total plastique) dédié aux situations ductiles et `GP` (G-plastique) réservé à la rupture fragile en présence de plasticité. Ce dernier critère est une extension à la plasticité de la formulation de Francfort-Marigo (`RUPT_FRAG`) qui, basée sur la théorie de Griffith, décrit l'apparition et la propagation de fissures dans un matériau élastique. Par ailleurs une approche s'appuyant sur des éléments de joint basés sur une loi d'interface de type Barenblatt (prise en compte d'une interaction résiduelle entre les lèvres de la fissure) permet de modéliser l'évolution de fissures bidimensionnelles dans une direction donnée, en statique comme en dynamique.

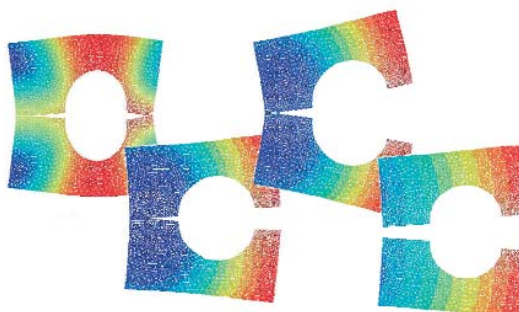
Endommagement de structures

La fissuration suivant une loi d'interface n'est qu'un mode de dégradation, la mécanique de l'endommagement en permet une modélisation plus fine en se situant à l'échelle du point matériel. Si on se cantonne à l'étude *stricto sensu* de l'amorçage, l'opérateur `POST_ELEM` en fournit une probabilité grâce au modèle de `WEIBULL`. Par contre, si on souhaite modéliser l'ensemble de la réponse de la structure, de l'amorçage jusqu'à la ruine, il est indispensable de recourir à des lois de comportement couplant à l'échelle du point matériel l'évolution de l'endommagement et des contraintes : par exemple, `BETON_DOUBLE_DP`, `ENDO_ISOT_BETON` ou `MAZARS` pour le béton, `ROUSSELIER` pour l'acier. Cependant, si elles autorisent des modélisations plus fines, ces lois se heurtent à deux difficultés : l'instabilité de la réponse globale de la structure et la localisation des déformations. Pour les surmonter *Code_Aster* apporte des réponses novatrices: un pilotage du chargement spécifique permet de suivre les instabilités (phénomènes de snap-back/through) et des comportements à formulation non locale évitent une dépendance pathologique au maillage.

Domage par fatigue

La plupart des ruptures de composants industriels en fonctionnement normal sont dues à la fatigue. Son caractère larvé n'a d'égal que sa nocivité, d'où l'importance de l'évaluation de ce type de phénomène dès la phase de conception. Suivant le type de fatigue (à grands nombres de cycles, oligocyclique...), de sollicitations (déterministe, aléatoire, périodique, multiaxiales...), de données d'entrées disponibles (composante ou tenseur des contraintes...) et de résultats souhaités (champ en un point, critère...), *Code_Aster* propose la méthode adaptée (opérateur `XX_FATIGUE`...). Du classique `WOHLER` au critère de Dang Van Papadopoulos, en passant par la "méthode maison" de `TAHERI`, le spectre des combinaisons traitées est large.

Eléments joints pour modéliser l'évolution d'une fissure dans une plaque trouée.



→ L'anisotropie induite par l'endommagement dans le béton...

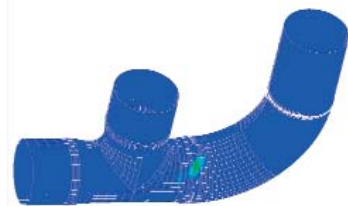


... est prise en compte dans la loi `ENDO_ORTH_BETON`. Cette dernière permet en outre de rendre compte du caractère unilatéral du comportement du béton (dissymétrie traction/compression, effet de refermeture des fissures). La version non locale de cette loi est disponible, *via* la méthode de régularisation des déformations `GRAD_EPSI`.

→ La modélisation de la liaison acier-béton...



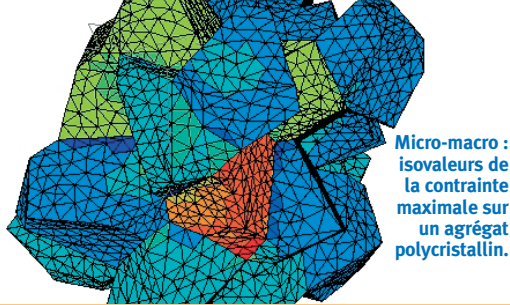
... s'effectue en 2D à partir d'éléments de joints s'appuyant sur une loi de comportement `JOINT_BA` décrivant la dégradation et la rupture de la liaison acier béton.



Coude de circuit RRA : calcul de dommage par le critère de Dang Van et faïençage thermique.

→ Critère d'amorçage en fatigue

Afin de répondre au problème posé par la fatigue thermique, des critères multiaxiaux d'amorçage en fatigue à grand nombre de cycles ont été développés. L'idée consiste à chercher la direction normale pour laquelle, soit la demi-amplitude de cisaillement, soit le dommage est maximal. Avec ces critères, des chargements périodiques ou non périodiques peuvent être analysés.



Micro-macro : isovaleurs de la contrainte maximale sur un agrégat polycristallin.

Du multiéchelle au multiphysique

Tout serait plus simple si un seul domaine de la physique intervenait en mécanique des structures. Mais dans l'industrie électrique, comme ailleurs, les phénomènes sont souvent couplés. *Code_Aster* propose des outils pour réaliser des chaînages ou des couplages de phénomènes, en interne, comme en externe avec d'autres codes spécialisés.

Pour le multiéchelle et le multiphysique, on peut distinguer les approches internes et externes au code. Dans le premier cas, la multiplicité de la physique est prise en compte directement par *Code_Aster*, alors que dans l'autre, l'interaction est réalisée soit par couplage, soit par chaînage avec un autre logiciel de calcul.

Approches internes

Chaînage **thermo-mécanique** pour des études avec matériaux dépendant de la température, avec des évolutions thermiques ou de l'hydratation-séchage-retrait.

En couplant fortement cette fois les équations de la thermique, de l'hydraulique et de la mécanique (**thermo-hydro-mécaniques**), on s'intéresse aux milieux poreux, saturés ou non : roches, argiles, bétons.

En thermo-métallo-mécanique, plus particulièrement utilisée pour la simulation du soudage multipasse, le comportement des aciers dû aux changements de phase est modélisable en 2D et 3D.

L'interaction **fluide-structure** permet le calcul des vibrations d'une structure contenant (ou baignant) dans un fluide au repos ou en écoulement.

Un chaînage **électricité-mécanique** fournit la dynamique de structures soumises aux forces de Laplace induites.

Enfin, le **multiéchelle** fait son entrée dans le code avec deux nouvelles fonctionnalités : la méthode Arlequin (mot-clé ARLEQUIN) et le micro-macro (DEFI_COMPOR).

La première raccorde, par une technique de superposition, des modèles numériques de natures différentes. Cela ouvre de nombreuses perspectives. Par exemple, on peut effectuer des zooms structuraux dans des zones particulièrement sensibles aux chargements : fissures, soudures, supportages...

Le micro-macro, quant à lui, permet de manipuler de façon modulaire des lois de comportement à diverses échelles (voir encadré).



Approches externes

Chaînage **Code_Saturne** (EDF-CEA, thermohydraulique pour le fluide)-**Syrthes** (EDF, évolution thermique pour la paroi)-**Code_Aster** (structure) avec interpolation du champ de températures ou de pression sur le maillage mécanique.

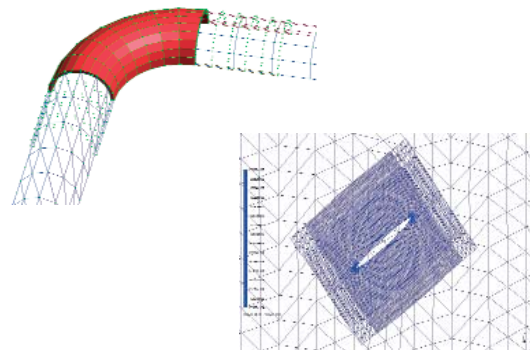
Chaînage **Code_Aster-Europlexus** (code de dynamique rapide du consortium EDF-CEA-CCR/Ispra-SNECMA-Samtech).

Exportation de résultats d'analyse modale vers **LADY** (analyse vibratoire expérimentale). Calcul des déplacements et contraintes induits par des charges statiques et sismiques à partir d'un modèle défini dans **CIRCUS** (vibrations sous écoulements des tuyauteries).

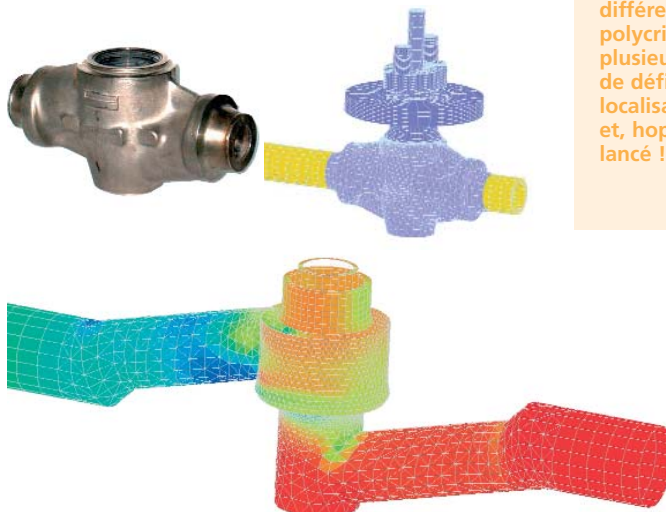
Réponse fréquentielle, par **MISS3D** (code d'équations intégrales pour la propagation des ondes de l'ECP), à une excitation sismique, pour des sols stratifiés avec ou sans domaine fluide.

Importation dans *Code_Aster* de champs d'efforts volumiques délivrés par le code d'électromagnétisme **Flux2D/3D** en vue du calcul de la tenue thermomécanique de transformateurs ou de moteurs électriques.

Arlequin : raccord de modélisation coque-3D sur un coude ; patch d'un bloc fissure sur une structure saine.



Chaînage Code_Saturne/Code_Aster sur un robinet à soupape Alstom-Velan : maillage et champ de pression du fluide interne.



→ Grâce au format MED, **Modélisation et Echanges de Données...**

... d'éléments finis développés par EDF-R&D et le CEA, *Code_Aster* échange avec d'autres codes, des maillages, des entités topologiques et des résultats. La structure de ces derniers est relativement riche : tous types de champs par éléments et de champs de grandeurs, des champs définis partout ou non, et à composantes hétérogènes. Cette richesse, gage d'ouverture à l'utilisation d'outils de pré et post-traitements non propriétaires, a un seul point d'entrée, `FORMAT='MED'`, dans `LIRE_MALLAGE`, `LIRE_CHAMP` et `IMPR_RESU`.

→ **Micro-macro**

DEFnir un **COMPORTEMENT** à partir de briques élémentaires : telle loi d'écoulement, tel écrouissage cinématique, tel autre isotrope, c'est ce qui permet d'éviter la définition de tous les comportements combinés. Via l'opérateur `DEFI_COMPOR`, ces briques sont associées à un monocristal et ses systèmes de glissement, pour créer ainsi un modèle de comportement propre à un groupe de mailles dans `STAT_NON_LINE`. On peut alors effectuer des calculs d'agrégats où chaque grain maillé est constitué d'un monocristal orienté. Cette nouvelle fonctionnalité « micro-macro », ouvre la voie à du multiéchelle complètement modulaire. Il suffit d'intégrer ces différentes échelles dans un polycristal formé de plusieurs monocristaux, de définir une règle de localisation pour l'ensemble et, hop, le calcul peut être lancé !



Code_Aster, son site web, sa version libre

Le site www.code-aster.org, base multimédia du code, répond à la double exigence d'être au service des utilisateurs et développeurs et en soutien à sa diffusion en logiciel libre. Visite guidée des sections et rubriques du site et arrêt sur les motivations techniques et politiques de la mise en libre de *Code_Aster*.

Produit

Les rubriques **Généralités**, **Fonctionnalités**, et **Domaines de modélisation** reprennent et développent les chapitres de cette plaquette *Code_Aster V7*. On trouve aussi les transparents présentés lors des **Journées Annuelles Utilisateur** et **Code_Aster Libre**. La rubrique **Applications** est consacrée à des études industrielles *Aster*. La distinction entre les versions Libre, de Développement et d'Exploitation est expliquée en rubrique **Versions**. La rubrique **Qualité** précise les critères d'acceptation des évolutions et des corrections. Enfin la rubrique **Outils** liste les logiciels utilisant ou utilisés par *Code_Aster*.

Utilisation

La rubrique **Documentation** offre la totalité de la documentation technique du code : d'Utilisation, de Référence, de Descriptif Informatique, de Validation. Le Dossier d'**Administration** (procédures qualité) et les documentations relatives à la version qualifiée EDF sont, dans cette rubrique, en accès restreint. Pour la **Prise en main**, en rubrique **Exemples** et **Formations**, des exemples commentés et illustrés avec leurs fichiers de commandes ainsi que les supports de cours et travaux pratiques des formations.

Développement

On y notera en rubrique **Présentation** les règles à respecter pour développer dans la version centralisée et valider son développement. En **Organisation**, les historiques des mises à jour successives de la version de développement, leurs procès verbaux (accès restreint) et un organigramme des acteurs contribuant aux développements du code.

En **Formation**, les supports de cours des formations au développement et, en **Versión NEW**, on trouve toutes les informations pour faire vivre ses propres surcharges avec les patches de la version hebdomadaire.

Services

En rubrique **Liste et Commande** convention-type d'accès à *Code_Aster* et à ses outils dédiés pour EDF et ses partenaires (gestion de comptes, assistance téléphonique...). Pour tous, en **Anomalies** et **Evolutions Logicielles** le système de collecte des erreurs et de traitement des évolutions, ses outils et sa documentation. D'autres rubriques concernent l'Aide à l'Optimisation des Modélisations (AOM), le Club des Utilisateurs, le serveur centralisé, sans oublier les incontournables **Forums** (voir encadré).

Téléchargement

Cette rubrique donne accès aux téléchargements du code, de ses outils et pré-requis : **aster** le code source des différentes versions, **astk** gestionnaire graphique d'études, **GIBI** mailleur et post traitements du code CAST3M, **Gmsh** mailleur et post traitement libres, **Eficas** éditeur graphique intelligent de commandes *Aster*, **METIS** algorithme de renumérotation des nœuds adapté pour *Aster*, **MED** module d'échange de données et **HDF5** sa librairie...

→ Les Forums

Très actifs, ils sont un lieu privilégié d'échange entre utilisateurs et développeurs, interne ou externe à EDF. Ils sont dissociés par thèmes : Utilisation, Installation et Développement.

→ Code_Aster en logiciel libre ! Pourquoi ?

La réponse est bien évidemment la reconnaissance et l'enrichissement par l'usage. Les défauts, plus rapidement et complètement identifiés, les savoir-faire diversifiés et la créativité des contributions métiers précipiteront et garantiront *in fine* une meilleure validation/qualification des modèles par les utilisateurs du réseau. Au delà de l'aspect technique, la dimension politique apportée par EDF R&D et son *Code_Aster Libre* sous licence GPL (GNU General Public License) fruit de la compétence et des exigences qualité de l'ingénierie nucléaire se place résolument dans le transfert innovation – industrie. Cette démarche entend stimuler les contributions *Aster* d'équipes issues du public et du privé (voir AE n°43) en leur offrant en retour une plate-forme d'accueil pérenne réutilisable pour leurs propres travaux. *Code_Aster Libre* est téléchargeable semestriellement et bénéficie, à chaque fois, de la méthodologie *Aster* de non-régression précision performance de l'existant.

→ Tout en un !

La version Linux 7.4 a inauguré un nouveau mode de distribution : le tout en un ! Les paquets *aster-full*, téléchargeables depuis le site, fournissent le code source du logiciel et l'ensemble des outils et pré-requis nécessaires. L'installation s'en trouve grandement facilitée et se résume en général à une ligne de commande.



La page d'accueil informe des faits marquants (nouvelle version, manifestations...) et vous guide lors de votre visite.

Produits et services

La traditionnelle Journée Utilisateurs en salle Ailleret (EDF R&D, Clamart)

Produits



L'architecture *Aster*, 1 200 000 lignes de FORTRAN en conception objet (dont 250 000 nouvelles ou modifiées en v7), épaulé par du C et du Python, repose sur un gestionnaire de la mémoire/image disque, un "superviseur" des commandes et un moteur de calculs EF (algorithmes indépendants de la formulation des éléments finis). Son ouverture s'appuie sur une large utilisation de catalogues décrivant les commandes et les éléments finis.

Code_Aster est accessible sous trois formes...



... exploitation, développement, libre, toutes issues d'un code source unique. Ce source, ses outils et pré-requis sont maintenus et validés sous Unix et Linux, mais la communauté *Aster Libre* a montré la faisabilité de leur portage sous Windows, MacOS...

La version d'Exploitation (v7.4 en déc. 2004) répond aux exigences qualité dites IPS (Important Pour la Sûreté). Elle fait pendant 2 ans objet de maintenances correctives et de compléments de validation et de documentation. C'est la version des utilisateurs EDF et de leurs fournisseurs agréés. Elle reste disponible pendant 2 années supplémentaires au titre de la reprise d'études.

La version de Développement (v8.0 en déc. 2004) s'enrichit hebdomadairement de corrections, d'améliorations et d'innovations (40 mises à jour annuelles). Elle devient la version d'Exploitation au terme d'un cycle de développement de 2 ans et après qualification.

Les exécutables Unix *Aster* d'exploitation et de développement sont accessibles pour EDF et ses partenaires sur le serveur centralisé.

La version semestrielle *Code_Aster Libre* est éditée sous licence GPL sur www.code-aster.org. Elle provient du conditionnement de la version de Développement du moment. Des patchs hebdomadaires permettent d'en suivre les mises à jour.

→ Toujours plus...

... de ressources calculs pour les utilisateurs de *Code_Aster* : une machine centralisée AlphaServer Tru64 ES45 (24 processeurs à 1Ghz, 100 Go de mémoire, 48 Gflops), un cluster de 10 processeurs Opteron 64 bits et un accès aux machines massivement parallèles du Centre de Calcul Recherche et Technologie (CCRT) du CEA.

Documentation



Utilisation (généralités, syntaxe des commandes, exemples), Descriptif informatique (architecture, gestion mémoire, superviseur, structures de données), Référence (formulations et algorithmes) et Validation (cas test de mécaniques élémentaires ou de non régression). En v7: 13 000 pages (60 % du corpus renouvelé) sont diffusées sur www.code-aster.org.

Formation et aide à la modélisation



La valeur d'un logiciel de simulation repose aussi sur la compétence et l'esprit critique de ses utilisateurs, qualités qui s'acquièrent par une formation initiale et continue significative. Les stages *Aster* en proposent pour tous les goûts: « Initiation » au code ou à son « Développement », maîtrise des « Post-traitements » ou des outils de « Qualité des études », analyses « Dynamique » ou « Statique non linéaire ».

→ Le service AOM...

... pour Aide à l'Optimisation de la Modélisation apporte l'expertise nécessaire aux études complexes ou novatrices. Contact : code-aster@edf.fr.

Depuis 1989, *Code_Aster* est reconnu, au sein d'EDF, comme l'outil de simulation numérique délivrant à temps les innovations indispensables à l'expertise des problèmes. La version 7 confirme sa double mission : un outil de calcul qualifié et opérationnel qui accueille des développements issus de la recherche.

Qualité par la transparence et la validation



Les critères qualité *Aster* gouvernant le développement et la diffusion du code s'appuient sur un référentiel qualité auditable satisfaisant aux exigences de l'Autorité de Sûreté des ouvrages nucléaire EDF. Ces critères constituent le Plan Qualité Logiciel *Aster* et sont définis dans le manuel d'Administration du code. Les fondements théoriques des modèles *Aster* sont documentés dans les manuels de Référence. La validation indépendante des versions d'exploitation du code, effectuée par des sociétés externes de calculs, porte sur la conformité du logiciel vis-à-vis de sa documentation, la couverture effective des domaines d'analyse affichés, la non-régression précision-performance. La fiche Qualité qui accompagne chaque version d'exploitation est actualisée par sous version (erreurs corrigées, documentations applicables).

→ Le retour d'expérience...

... est un outil précieux dans le processus de développement, il collecte les demandes des utilisateurs, répertorie les anomalies constatées et suit leur évolution au cours du temps. Il s'appuie désormais sur des technologies intranet pour gérer une base de plus 5000 fiches.

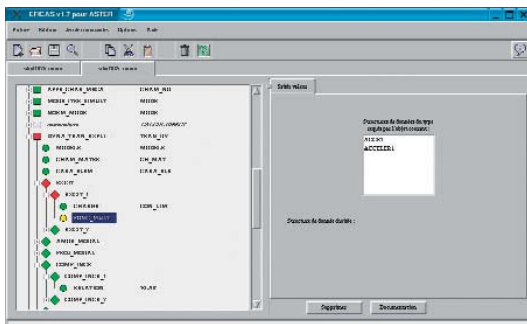
Une équipe centrale d'une vingtaine d'ingénieurs...



... d'EDF-R&D se consacre à la cohérence et à la qualité de la plate-forme *Aster* (1700 tests de validation ou non-régression) : architecture, outils, versionnement, mise en exploitation, gestion du REX, validation, documentation, communication, formation... Elle s'entoure aussi d'acteurs des projets applicatifs EDF, de la recherche industrielle et universitaire, de fournisseurs d'études et de services. Ainsi, plus de 70 ingénieurs ont participé à la v7.

Code_Aster, un logiciel convivial

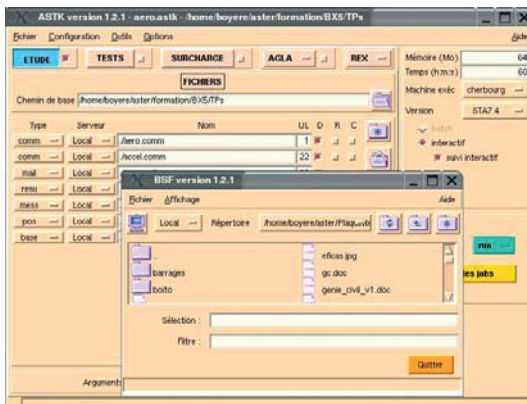
Calcul de haut niveau ne rime plus avec « casse-tête à l'utilisation ». Aujourd'hui, des interfaces ergonomiques facilitent grandement l'utilisation du code. En quelques clics, EFICAS, ASTK et STANLEY définissent, effectuent et post-traitent votre calcul. A terme, l'intégration à la plate-forme d'environnement logiciel SALOME découplera ces possibilités.



EFICAS : éditeur graphique intelligent de commandes Aster.

EFICAS

L'écriture directe, "à la main", du fichier de commande dans un éditeur de texte peut se révéler fastidieuse et source de bien des déboires. Il faut naviguer continuellement dans la documentation des commandes pour y trouver leur syntaxe, traquer les parenthèses manquantes, les virgules oubliées... Aussi l'Editeur de Fichiers de Commande et Analyseur Syntaxique, EFICAS, simplifie grandement la vie. C'est un logiciel doté d'une IHM conviviale qui, en fonction des choix de l'utilisateur, génère directement un fichier garanti syntaxiquement valide. En interprétant les catalogues de commande, il gère automatiquement, syntaxe et mots clés, règles diverses et type des concepts attendus.



ASTK

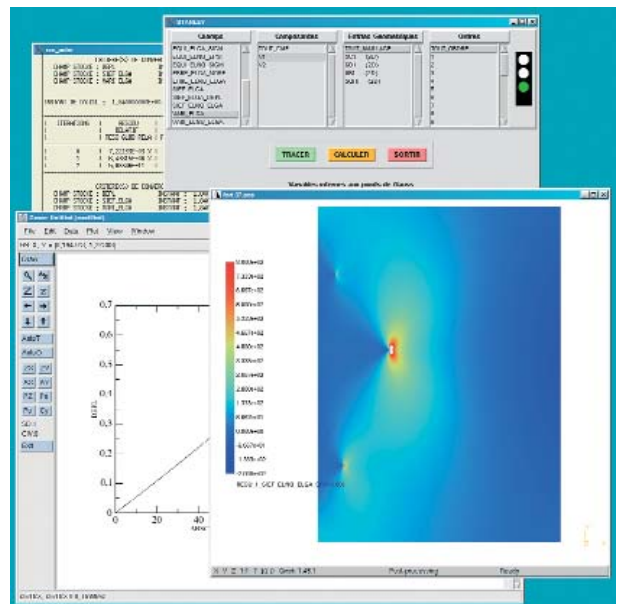
La mise à disposition d'un outil informatique multi plate-forme, multiversion, utilisé et co-développé par différentes équipes passe nécessairement par un gestionnaire d'études et de développements. C'est la raison d'être ASTK : sélection de la version du code, accès aux différents serveurs de calcul, définition des fichiers composant une étude, du type de job (batch ou interactif), création d'une version surchargée, accès aux outils de gestion de configuration pour les développeurs et enfin, la gestion des fiches d'anomalies et d'évolutions du REX. L'évolution rapide des moyens de calcul centralisé et la diffusion en libre de Code_Aster ont accéléré la mutation de l'ancien gestionnaire d'étude ASTERIX. Son successeur, ASTK, a adopté une architecture de type tcl/tk plus modulaire et portable. Le choix d'une architecture client-serveur autorise une séparation nette entre l'interface et les outils d'accès au code. Ainsi, ASTK intègre, dans une seule interface, l'ensemble des outils de l'Atelier de Génie Logiciel Aster (AGLA) utilisés pour gérer la version de référence en batch (traitement par lots) et ceux des versions locales. Cette interface utilise des protocoles réseaux pour transférer les fichiers entre les clients et le serveur ou pour lancer des commandes distantes, y compris à travers Internet. L'utilisateur peut facilement répartir ses fichiers de données et de résultats sur différentes machines, l'interface assurant le transfert des fichiers, éventuellement compressés, à travers le réseau.

Outre l'accès à Code_Aster, ASTK permet de lancer différents outils au choix de l'utilisateur, comme EFICAS, STANLEY ou des logiciels de maillage et de visualisation. Pour les utilisateurs qui souhaitent suivre les évolutions hebdomadaires du code, rien n'est plus simple, ASTK s'occupe de tout ! Récupération des fichiers de mise à jour sur le site et reconstruction de l'exécutable.

STANLEY

L'application STANLEY est un outil de post-traitement interactif pour les calculs Aster. Elle permet d'accéder à la liste des champs disponibles dans les structures de données résultats (déplacements, contraintes, variables internes...), d'en calculer de nouveaux, d'en extraire des sous-parties et de les visualiser sous forme d'isovaleurs (avec Gmsh) ou de courbes (avec Xmgrace). Il est également possible de créer de nouveaux lieux géométriques pour le post-traitement (point ou droite). Devenu une commande Aster à part entière, STANLEY s'utilise facilement: il suffit de rajouter STANLEY () à la fin de son fichier de commande. Il s'adapte à toutes les configurations: poste de travail sous Unix, Linux ou Windows, calcul en local ou sur un serveur distant. Son paramétrage permet une gestion multi-configuration, l'ensemble étant mémorisé d'une session à l'autre.


STANLEY : explorateur de résultats issus de Code_Aster.



ASTK : plaque tournante pour l'utilisation et le développement dans Code_Aster.



Code_Aster, un logiciel souple et ouvert



Calcul des effets de la houle sur un mat d'éolienne par un chaînage STREAM-GIBI-Code_Aster.

L'utilisateur avancé peut intervenir facilement dans le code, en partie grâce à PYTHON, pour par exemple : écrire des applications métiers, introduire éléments finis et lois de comportement, définir de nouveaux formats d'échanges.

Le langage de commandes

L'utilisateur de *Code_Aster* décrit les paramètres et le cheminement de son étude dans un fichier texte. Celui-ci est composé de commandes contenant elles-mêmes des mots-clés qui reçoivent en arguments : textes, entiers, réels ... ou des noms de concepts précédemment créés par d'autres commandes. Ces concepts sont des objets nommés par l'utilisateur, produits par des commandes et potentiellement utilisables ou modifiables par d'autres.

La grammaire et le vocabulaire de ce langage de commande, propre à *Code_Aster* mais écrit sur base PYTHON, sont décrits dans des catalogues. Pour composer des fichiers de commande corrects, l'utilisateur devra soit connaître les règles élémentaires d'écriture PYTHON, s'informer de la syntaxe de chaque commande dans la documentation, soit plus interactivement utiliser la saisie graphique des commandes d'EFICAS.

Superviseur et PYTHON

Dans une utilisation plus avancée, l'utilisateur peut, grâce à PYTHON, introduire de la programmation dans son jeu de données : de la plus simple (structures de contrôle, boucles, tests), à la plus complexe exploitant toute la richesse de ce langage interprété (méthodes, classes, importation de modules exogènes comme TkInter, pour les IHM, numerical pour des usages mathématiques ...).

Sur cette illustration, au cours d'un unique job et sans manipulation de fichiers par l'utilisateur, le même calcul est conduit plusieurs fois en appelant un modeleur/mailleur distant avec modification du rayon de cintrage du coude. La boucle s'arrête conditionnellement sur une valeur limite de contrainte.

Tout objet élémentaire de la mémoire FORTRAN peut être récupéré dans l'espace de nom PYTHON par l'utilisateur : dans cet exemple, il s'agit d'un indicateur de contrainte maximum dans le coude du tuyau. Pour les concepts globaux les plus utiles et généraux (tables, résultats, champs, maillages), des passerelles existent et permettent d'en obtenir une représentation PYTHON à fins de manipulation dans ce langage.

D'autre part, il est possible de définir facilement des macro-commandes écrites directement en PYTHON dans le fichier de commande. Cela permet d'encapsuler une séquence de commandes récurrente et d'épurer ses entrées-sorties. L'utilisateur n'a donc plus à surcharger l'exécutable pour en profiter ! Le développement d'outils métier en est grandement facilité.

Cependant, un fichier contenant d'autres instructions que les seules commandes officielles ne pourra être ni produit, ni édité par EFICAS. L'emploi des fonctionnalités évoquées ci-dessus constitue une utilisation "avancée" du code qui n'est pas, pour l'instant, supportée par cet outil.

Pour le chaînage avec d'autres codes, tout est possible : lancement d'un exécutable tiers par EXEC_LOGICIEL ou soumission directe en PYTHON ; pour les échanges de champs et de maillage, le format MED est à privilégier.

Éléments finis et lois de comportement

Si votre problème ne s'accommode pas des 95 lois de comportement actuellement présentes, la programmation ou la modification d'une loi de comportement est aisée. Après avoir enrichi en conséquence les catalogues des commandes DEFI_MATERIAU et STAT/DYNA_NON_LINE des mots clés permettant d'introduire ses paramètres d'entrée, il reste à écrire la routine réalisant l'intégration de cette loi de comportement. Elle fournira les données élémentaires indispensables à l'algorithme de résolution (tenseur des contraintes et variables internes réactualisées, matrice tangente ...). Différents utilitaires facilitent et fiabilisent cette intégration.

De même pour les éléments finis, si vous ne trouvez pas l'élément adéquat dans les 360 existants, vous pouvez créer le vôtre. Moyennant l'appropriation de la démarche décrite dans la documentation de développement, introduire un nouvel élément fini est modulaire et ne nécessite pas de maîtriser tout le code.

Echanges pré/post dans différents formats

Code_Aster est aussi un solveur souple par le nombre de ses formats d'échange et de stockage des données. Maillages, champs et résultats peuvent être lus et écrits dans la plupart des standards connus. Maquetter en PYTHON une interface de traduction de maillages et de résultats dans un nouveau format est aisé. L'image mémoire des objets calculés, éventuellement conservée en fin d'exécution, peut être écrite dans un format portable sur toute plate-forme.



Optimisation du rayon de cintrage d'un coude par un chaînage Gmsh- Code_Aster.

Contact Mathieu COURTOIS
Tél. (33) 01 47 65 41 56, Fax (33) 01 47 65 41 18
code-aster@edf.fr

Contact pour ASTER *éch*os : Olivier BOITEAU
Tél. (33) 01 47 65 52 57
olivier.boiteau@edf.fr

Conception : Olivier BOITEAU et Emmanuel BOYERE
Relecture : Jean-Michel PROIX et Christophe DURAND
Responsable de la publication : François WAECKEL
Archivage : HT-66/05/010/A



EDF R&D
1 AVENUE DU GENERAL DE GAULLE - 92141 CLAMART CEDEX - FRANCE - Tél. : 01 47 65 43 21 - www.rd.edf.fr

EDF - SA AU CAPITAL DE 8 129 000 000 euros
SIEGE SOCIAL : 22 - 30 AVENUE DE WAGRAM 75008 PARIS - R.C.S. PARIS B 552 081 317