

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...

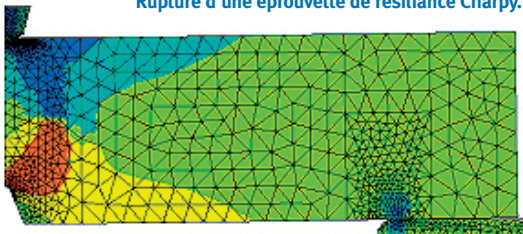
... riches en fonctionnalités et de plus en plus faciles à piloter : `DYNA` et `STAT_NON_LINE` permettent de mener une étude statique ou dynamique implicite avec des non-linéarités géométriques (contact, grandes transformations) et de comportement ; `DYNA_TRAN_EXPLI` les prend en compte en dynamique 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...



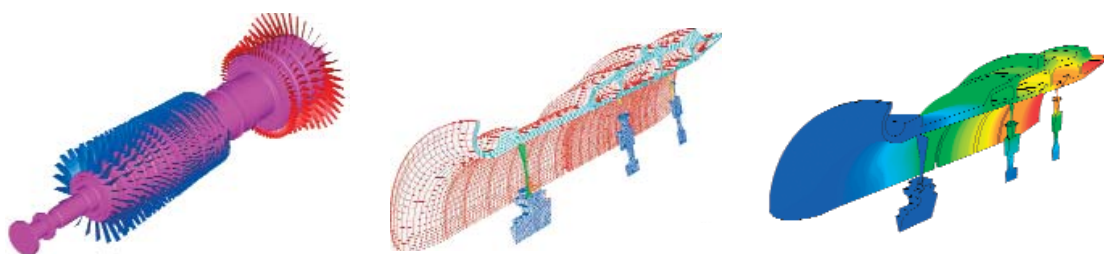
→ Métallurgie

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).

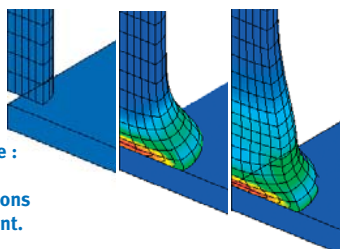
... et éléments finis particuliers

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...

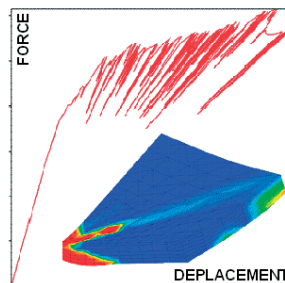
... sont modélisables de diverses façons (mot-clé DEFORMATION) : SIMO_MIEHE traite des grandes déformations plastiques et des rotations importantes, et se décline en v7 sur plusieurs lois de comportement : viscoplasticité, avec éventuellement prise en compte de la métallurgie, endommagement ductile. 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.

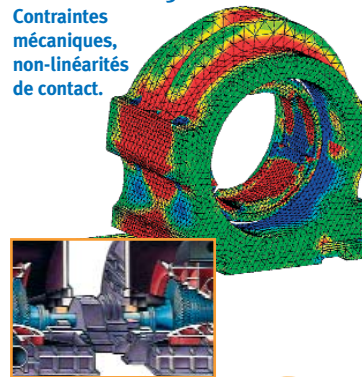
Endommagement : pilotage du chargement.



→ 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.

