# Introduction à code_aster

**Avertissement :**

Dans ce document on décrit la philosophie et les domaines d'application de code_aster, sans développer en détail les fonctionnalités disponibles.

Ce document est une première prise de contact avec code_aster et a été donc écrit avec un souci de concision. Il n'a pas pour vocation de répertorier toutes les modélisations ou types d'analyse possibles avec code_aster, et ne se substitue pas à la plaquette de présentation qui en dresse un panorama plus exhaustif.

Toutes les informations, fournies ici ou dans les différents manuels, sont données pour décrire, avec le maximum de précision, le contenu de code_aster. Elles n'ont pas pour ambition de délivrer une formation à la modélisation numérique du comportement des structures mécaniques. code_aster n'est que l'implantation de méthodes décrites et démontrées dans différents ouvrages auquel l'ingénieur devra se reporter, en complément de la documentation de référence, si nécessaire. Les manuels de code_aster supposent acquise par ailleurs une formation à la mécanique des solides et à la méthode des éléments finis.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# Table des matières

1 L'étude du comportement mécanique des structures....4
1.1 Un code généraliste....4
1.2 Méthodologie de calcul avec code_aster....4
1.3 Phénomènes, modélisations, éléments finis et comportements....5
1.3.1 Notions....5
1.3.2 Les phénomènes disponibles dans code_aster....5
1.3.2.1 Le phénomène mécanique....5
1.3.2.2 Le phénomène thermique....6
1.3.2.3 Le phénomène acoustique....7
1.3.3 Les phénomènes couplés disponibles dans code_aster....7
1.3.3.1 Les chaînages internes à code_aster....7
1.3.3.2 Les couplages thermo-hydro-mécaniques....7
1.3.3.3 Les couplages pour l'interaction fluide-structure....7
1.4 Méthodes d'analyse....7
1.4.1 Mécanique statique....8
1.4.2 Thermique....8
1.4.3 Mécanique dynamique....8
1.4.4 Sous-structuration....8
2 La méthode de résolution....10
2.1 Une implantation paramétrée de la méthode des éléments finis....10
2.2 Une bibliothèque d'éléments finis étendue....10
2.2.1 Les milieux continus....10
2.2.2 Les composants de structure....10
2.2.3 Les raccords de modélisations....11
2.2.4 Les milieux discontinus....11
2.2.5 Les modélisations hétérogènes....11
3 Solveurs et algèbre linéaire....11
4 Les outils d'étude....11
4.1 Compléments et opérations sur le maillage....11
4.2 Catalogue de données matériau....12
4.3 Traitement et exploitation des résultats....12
4.3.1 Opérations sur les champs....12
4.3.2 Relevé de valeurs....12
4.3.3 Impression des résultats....12
4.4 Contrôle de la qualité des résultats....12
4.4.1 Estimateurs d'erreur et maillage adaptatif....12
4.4.2 Vérification de la qualité d'une base modale....12
4.4.3 Utilisation de maillages incompatibles....12



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4.4.4 Redécoupage automatique du pas de temps et pilotage du chargement....13
4.4.5 Indicateurs de décharge et de perte de radialité....13
5 Les outils-dédiés....13
5.1 Définition et mode opératoire....13
5.2 Les modes d'échanges....13
5.3 Les logiciels interfacés avec code_aster....13



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 1 L'étude du comportement mécanique des structures

## 1.1 Un code généraliste

code_aster est un code généraliste pour l'étude du comportement mécanique des structures.

Le domaine d'application prioritaire est celui de la mécanique des solides déformables : cela justifie le nombre de fonctionnalités attachées au phénomène mécanique. Cependant, l'étude du comportement mécanique des composants industriels nécessite préalablement la modélisation des sollicitations auxquels ils sont soumis, ou des phénomènes physiques qui modifient les paramètres de ce comportement (fluide interne ou externe, température, changement de phases métallurgiques, efforts d'origine électro-magnétique...). Pour ces raisons, code_aster offre plusieurs possibilités de "chaînage" du phénomène mécanique avec la thermique ou l'acoustique, ou avec des d'autres logiciels, ainsi qu'un « kit » de construction de problèmes thermo-hydro-mécaniques couplés.

Bien que code_aster puisse être utilisé pour de nombreux problèmes de calcul de structures (code généraliste), il a été développé notamment pour permettre l'étude des composants de matériels ou de machines utilisés dans le domaine de la production et du transport d'électricité. Ainsi la priorité a été donnée à la modélisation des structures métalliques, des géomatériaux et des composants de structure en béton armé. On trouvera très peu de modélisations disponibles pour les matériaux composites ou les élastomères.

Les analyses non linéaires, aussi bien en mécanique qu'en thermique, sont au cœur de code_aster : leur traitement efficace a nécessité la mise au point d'algorithmes performants et relativement simples d'utilisation, même si le but n'est pas de les faire fonctionner en « boîte noire ». Pour les études complexes, il est donc nécessaire de comprendre la nature des opérations effectuées par le code, afin de pouvoir les piloter de façon optimale : on se reporte alors aux notices théoriques donnant les détails des modélisations et des méthodes, regroupées dans le Manuel de Référence.

## 1.2 Méthodologie de calcul avec code_aster

Un calcul de structure mené avec code_aster consiste en l'enchaînement d'un certain nombre de commandes décrites au sein d'un « fichier de commande » en format texte. Le moteur et l'interpréteur de ce fichier de commande est le langage script PYTHON. Il est donc possible d'utiliser toutes les fonctionnalités apportées par PYTHON. Voir en particulier les documentations [U1.03.01], [U1.03.02] et les exemples d'utilisation [U1.05.00] et [U1.05.01]. Chaque commande (par exemple lecture du maillage, affection des données matériau, calcul statique linéaire) produit un « concept résultat », qui définit une structure de données que l'utilisateur peut manipuler et réutiliser dans les commandes ultérieures du calcul.

La syntaxe de toutes les commandes est décrite et commentée dans les manuels U4 et U7 de la documentation d'Utilisation.

Afin de simplifier la tâche de l'utilisateur, il existe des commandes globales qui regroupent l'enchaînement approprié d'opérations pour un certain nombre de cas de calcul (par exemple statique linéaire - commande MECA_STATIQUE, statique non linéaire - commande STAT_NON_LINE, thermique non linéaire - commande THER_NON_LINE, etc.). Certaines ont été développées directement de manière intégrée, d'autres sont des macros-commandes en Python qui gèrent les appels à différentes commandes unitaires (comme ASSEMBLAGE qui permet de calculer et d'assembler les matrices de masse, amortissement et rigidité d'une structure).

Il existe également des macro-commandes spécialement dédiées à certaines applications.

A l'issue d'un calcul, il est souvent possible d'enrichir l'objet informatique contenant le « concept résultat » obtenu, en effectuant d'autres calculs a posteriori : par exemple, à partir du champ de déplacements et des contraintes aux points de Gauss obtenus dans un calcul mécanique, on peut calculer le champ de déformations, le champ de contraintes interpolé aux nœuds, etc.

Ces opérations de post-traitement sont réalisées par les opérateurs CALC_CHAMP, POST_CHAMP, POST_ELEM, MACR_LIGNE_COUPE, POST_RELEVE_T, etc.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

## 1.3 Phénomènes, modélisations, éléments finis et comportements

### 1.3.1 Notions

Dans code_aster, le PHENOMENE (commande AFFE_MODELE) est une famille de problèmes physiques qui utilisent des inconnues et des équations de conservation similaires : par exemple, le phénomène mécanique fait appel aux inconnues de déplacement, le phénomène thermique aux inconnues de température. Selon la modélisation utilisée, le nombre d'inconnues de ce type peut varier (par exemple on n'a besoin en chaque nœud que d'une inconnue de température en 3D, mais on utilise 3 inconnues pour les coques).

Dans code_aster, la MODELISATION (commande AFFE_MODELE) décrit la manière selon laquelle les équations continues régissant un phénomène donné sont discrétisées, avec l'aide d'éventuelles hypothèses complémentaires (déformations planes, modèle de poutre, modèle de coque...). En mécanique, par exemple, on peut trouver les modélisations 3D, déformations planes, contraintes planes, coques, plaques, poutres d'Euler, poutres de Timoshenko, tuyaux, etc... Chacune des modélisations utilise un jeu de degrés de liberté spécifique : par exemple les déplacements dans les trois directions de l'espace pour les modélisations de milieu continu 3D, trois déplacements et trois rotations pour les coques, etc.

Le couple PHENOMENE/MODELISATION permet d'affecter de manière bijective un type d'élément fini à chaque type de maille géométrique.

Dans code_aster, on appelle « élément fini », pour un couple PHENOMENE/MODELISATION donné, l'ensemble constitué par :

- La nature géométrique de la maille support (représentant un morceau de volume ou de frontière : hexaèdre, tétraèdre, triangle, quadrangle, segment...) ;
- Le choix des interpolations pour la géométrie et pour les inconnues (fonctions de forme) ;
- Les « options » de calcul que l'élément peut calculer (les opérations pour lesquelles le calcul des intégrales adéquates a été programmé : par exemple, terme élémentaire de rigidité, terme élémentaire de force surfacique, terme élémentaire de masse...).
- Les schémas d'intégration numérique (formules de quadrature de type Gauss par exemple).

Le comportement est à la base une notion physique liée aux propriétés du matériau. Elle s'exprime ensuite de manière mathématique. Par exemple, en mécanique, la relation de comportement est la relation qui lie le champ de contraintes au champ de déformations. Au cours d'un calcul, la relation de comportement est calculée en chaque point d'intégration (ou point de Gauss).

code_aster fait la distinction entre les caractéristiques du matériau : commandes DEFI_MATERIAU et AFFE_MATERIAU et la relation de comportement (mot-clef COMPORTEMENT ).

### 1.3.2 Les phénomènes disponibles dans code_aster

code_aster est un logiciel qui fait principalement de la mécanique des solides et des structures mais pour compléter la représentation de l'environnement d'exploitation des composants mécaniques, le choix a été fait d'inclure dans code_aster des fonctionnalités permettant la modélisation de phénomènes fréquemment associés au phénomène mécanique comme la thermique ou l'acoustique.

#### 1.3.2.1 Le phénomène mécanique

Le phénomène mécanique est modélisé pour atteindre deux objectifs principaux :

**Premièrement** :
La détermination de l'état interne, en particulier de l'état de contrainte en chaque point d'une structure, sous différentes sollicitations représentant les conditions d'exploitation. La connaissance de cet état de contrainte permet de poursuivre l'analyse du comportement mécanique :

- pour vérifier le respect des règles de construction particulières à chaque type de structure, notamment les Règles de Conception ou de Construction (RCC...) ;



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- pour analyser la nocivité de défauts et de leur éventuelle propagation : défauts inhérents au processus d'élaboration du composant ou de la structure (inclusions, imperfections géométriques...) ou résultant des conditions d'exploitation (fissuration, érosion...) ;
- pour l'étude du comportement en chargement cyclique et de l'analyse à la fatigue ;
- pour la prédiction des charges admissibles avec évolution de l'état interne.

**Deuxièmement** :
La détermination de la configuration déformée induite par un chargement permanent (statique) ou résultant d'une évolution lente (quasi-statique) ou plus rapide (dynamique) des chargements ou des conditions aux limites. La connaissance de cette configuration déformée, et éventuellement des vitesses et des accélérations correspondantes, permet de poursuivre l'analyse du comportement mécanique :

- pour le comportement vibratoire ou acoustique ;
- pour la transmission des sollicitations à d'autres structures ou composants ;
- pour l'analyse des interactions avec les structures voisines pour déterminer les anomalies de fonctionnement ou les paramètres d'usure qui peuvent en résulter.

Les niveaux de modélisation qui interviennent pour l'étude de ce phénomène sont :

La représentation de la structure à partir de la forme géométrique, avec plusieurs modes de représentation possibles pouvant coexister :

- le milieu continu correspondant à une géométrie tridimensionnelle, ou bidimensionnelle avec différentes hypothèses (contraintes planes, déformations planes, axisymétrie complète ou adaptée à la décomposition des chargements en modes de Fourier),
- des éléments structuraux correspondant à un milieu à feuillet moyen, un milieu à fibre moyenne ou un milieu discrétisé (poutres, plaques, coques, tuyaux,… ).

La représentation du comportement des matériaux, éventuellement différents, en tout point d'une structure, avec des relations de comportement permettant de représenter différentes conditions d'utilisation. De nombreuses relations de comportement sont disponibles : élasticité linéaire et non-linéaire, hyperélasticité non_linéaire, visco-élasticité, élasto-plasticité, élasto-visco-plasticité, endommagement. Les paramètres des relations de comportement peuvent en général dépendre de variables dites « variables de commandes » telles que la température, l'état métallurgique, le degré d'hydratation ou de séchage du béton, la fluence (irradiation neutronique), etc.

La représentation des conditions aux limites et des chargements[1], pour lesquels on dispose de fonctionnalités permettant de représenter en tout point de la structure, en repère global ou en repère défini par l'utilisateur :

- Des conditions de Dirichlet : déplacement imposé, relations linéaires entre composantes de déplacement ;
- Des conditions de Neumann : force imposée ponctuelle, chargements surfaciques et linéiques, permettant notamment de représenter les chargements de pression ;
- Des chargements volumiques, permettant notamment de représenter la pesanteur et les efforts centrifuges des corps en rotation.
- Des conditions de contact unilatéral, bilatéral et de frottement sec (Coulomb)

Ces conditions aux limites et chargements peuvent dépendre du temps (ou de la fréquence) et d'une ou plusieurs variables d'espace.

Les non-linéarités prises en compte dans le phénomène mécanique sont les non-linéarités de comportement, les non linéarités géométriques (grands déplacements et grandes rotations, grandes déformations, flambement) et les non-linéarités de contact/frottement.

#### 1.3.2.2 Le phénomène thermique

Il permet de déterminer la réponse thermique de milieux solides en régime permanent (problème stationnaire) ou transitoire (problème évolutif). On peut modéliser la conduction solide, l'échange convectif, l'échange de chaleur entre parois, et le rayonnement à l'infini. Le phénomène thermique peut inclure la modélisation au chauffage ou au refroidissement du changement de phase métallurgique des aciers, ce qui permet de simuler les opérations de traitement thermique ou de soudage (l'identification du comportement est basée sur les diagrammes expérimentaux TRC).

1 Une particularité de code_aster est d'affecter les conditions aux limites et les chargements de bords à des mailles de bord qui doivent être explicitement définis dans le maillage.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Par analogie des équations résolues, le phénomène thermique peut également être utilisé pour modéliser l'hydratation (l'inconnue est le degré d'hydratation) ou le séchage du béton (l'inconnue est la concentration en eau).

#### 1.3.2.3 Le phénomène acoustique

Le phénomène acoustique est modélisé pour atteindre deux objectifs principaux :

- L'étude de la propagation acoustique en milieu clos correspondant à l'équation d'Helmholtz dans un fluide compressible, pour des domaines de propagation à topologie complexe. La connaissance du champ de pression permet de poursuivre l'analyse acoustique pour déterminer le champ de niveaux sonores (exprimés en $dB$) et les champs d'intensité acoustique active et réactive.
- L'étude des problèmes couplés vibro-acoustiques 3D correspondant au comportement vibratoire d'une structure dans un domaine borné de fluide compressible, non visqueux.

### 1.3.3 Les phénomènes couplés disponibles dans code_aster

Pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté, on distinguera :

- Le chaînage de deux phénomènes (ou couplage faible) : étude préalable du premier phénomène dont on utilise les résultats comme données du second ;
- Le couplage complet (ou couplage fort) de plusieurs phénomènes : résolution simultanée des phénomènes avec des équations effectivement couplées.

#### 1.3.3.1 Les chaînages internes à code_aster

Le chaînage peut être réalisé à l'intérieur de code_aster ou bien entre celui-ci et un logiciel externe.

Les chaînages actuellement réalisés au sein de code_aster sont les suivants :

- Thermique – mécanique : toutes les caractéristiques mécaniques des matériaux peuvent dépendre de la température et les algorithmes disponibles pour le phénomène mécanique permettent d'exploiter les résultats d'un calcul thermique préalable (déformations anélastiques : dilatations thermiques, retrait du béton...) effectué sur un maillage éventuellement différent ;
- Thermique – métallurgique : après un calcul thermique, il consiste à calculer les proportions des différentes phases métallurgiques des aciers ;
- Thermique – métallurgique – mécanique : prise en compte de quatre effets mécaniques des transformations métallurgiques (déformation de changement de phase, modification des caractéristiques mécaniques, plasticité de transformation, restauration d'écrouissage) ;
- Électrique – mécanique : le couplage électrique est limité à la prise en compte des forces de Laplace induites par des courants de court-circuit dans des câbles électriques ;
- Fluide – mécanique : affectation de champ de pression sur une paroi déduite d'un calcul de mécanique des fluides.

#### 1.3.3.2 Les couplages thermo-hydro-mécaniques

Les milieux poreux saturés ou non saturés (géomatériaux, sols, béton) doivent être étudiés en couplant les trois équations de la mécanique, de la thermique et de l'hydraulique. L'utilisateur choisit les comportements qu'il souhaite utiliser parmi un kit de modèles thermo-hydro-mécaniques dits `THM`. Il peut ainsi choisir de prendre en compte ou non l'effet de la température, et de représenter une ou deux pressions. Le choix de chacun des comportements associés aux phénomènes retenus est effectué dans ce cadre également.

#### 1.3.3.3 Les couplages pour l'interaction fluide-structure

Trois types de couplages sont disponibles dans le domaine de l'interaction fluide-structure :

- Le calcul de modes propres d'une structure contenant (ou baignant dans) un fluide au repos (avec ou sans surface libre) ;
- Le calcul des vibrations d'une structure dans un écoulement et l'estimation de l'endommagement en résultant par fatigue vibratoire ou usure ;
- La prise en compte d'une condition aux limites de type domaine fluide infini.

## 1.4 Méthodes d'analyse



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Pour mettre en œuvre les différentes modélisations, on dispose de plusieurs méthodes d'analyse qui correspondent à différents processus d'application des sollicitations.

### 1.4.1 Mécanique statique

**Analyse statique** : elle correspond à des sollicitations permanentes pour le traitement de la thermique stationnaire et la thermo-mécanique. Pour les analyses linéaires, les résultats obtenus peuvent être combinés linéairement, suivant les besoins, et sont utilisables pour décrire l'état initial d'un processus évolutif.

**Analyse quasi-statique** : pour tous les processus mécaniques où l'on peut négliger les phénomènes d'inertie, des algorithmes incrémentaux implicites sont disponibles pour résoudre les équations de comportement non-linéaires avec prise en compte de chargements et conditions aux limites évolutifs.

### 1.4.2 Thermique

**Analyse stationnaire** : en thermique linéaire et non - linéaire, calcul de l'état d'équilibre thermique.
**Analyse transitoire** : en thermique linéaire et non-linéaire, avec prise en compte éventuelle des effets métallurgiques pour les métaux et de l'hydratation et du séchage pour les bétons, ainsi que pour les problèmes de thermo-hydro-mécanique en négligeant les effets d'inertie sur la partie mécanique.

### 1.4.3 Mécanique dynamique

Pour les processus où les effets de l'inertie et de la propagation doivent être pris en considération, on parle d'analyse dynamique.
L'analyse en base physique est la résolution des équations dans la base classique des degrés de liberté physiques.
L'analyse en base modale consiste en un calcul préalable des valeurs et vecteurs propres de la structure, représentant l'état « vibratoire » du système. On projette ensuite les équations à résoudre sur une base de vecteurs propres : le nombre de degrés de liberté du système à résoudre est proportionnel à la taille de la base modale utilisée.

Pour ces deux types d'analyses en base physique ou modale, le calcul de réponse peut être effectué en temporel ou en harmonique (dans le cas linéaire).

Pour l'analyse sismique, on peut également formuler le problème en mouvement imposé dans un référentiel relatif (sans le mouvement d'entraînement).

Les analyses dynamiques linéaires peuvent être faites en incluant les effets, du second ordre sur la rigidité, des contraintes statiques initiales calculées au préalable (rigidité géométrique, raidissement centrifuge).

Pour les problèmes non linéaires, deux méthodes d'analyse sont disponibles :
- L'analyse par recombinaison modale avec des conditions aux limites non linéaires localisées pour des problèmes avec choc (opérateur DYNA_VIBRA) ;
- L'analyse dynamique non linéaire en base physique (opérateur DYNA_NON_LINE).

### 1.4.4 Sous-structuration

La sous structuration consiste à regrouper plusieurs éléments finis au sein d'un macro-élément et à « condenser » l'ensemble de leur rigidité sur les degrés de liberté (moins nombreux) de ce macro-élément.
La résolution du problème global se limite alors à la détermination des inconnues portées par les macro-éléments puis au calcul des inconnues portées par chaque « petit » élément de manière indépendante au sein de chacun des macro-éléments.

Les avantages de cette méthode sont les gains en temps et mémoire, lorsque la structure complète est formée d'éléments reproduits plusieurs fois par translation ou rotation.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

En dynamique, l'analyse modale et le calcul de réponse harmonique ou transitoire peuvent être effectués en sous-structuration dynamique classique par les méthodes de Craig-Bampton, Mac Neal ou pour la méthode dite des modes d'interface.

Pour les structures présentant une symétrie cyclique, les méthodes disponibles permettent de calculer les modes propres de la structure globale à partir du comportement dynamique d'un secteur de base.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 2 La méthode de résolution

Pour la résolution des différents problèmes évoqués, la principale méthode de discrétisation spatiale implantée actuellement dans code_aster est la méthode des éléments finis.

## 2.1 Une implantation paramétrée de la méthode des éléments finis

Un effort particulier a été fait pour paramétrer l'implantation de la méthode des éléments finis. Les options de calcul nécessaires à chaque méthode d'analyse (statique, quasi-statique, dynamique) et à chaque phénomène (mécanique, thermique, acoustique) sont traitées globalement pour toute la structure, quelles que soient les modélisations retenues pour une étude particulière.

Parmi les possibilités offertes par cette architecture, citons :

- L'indépendance entre la topologie de discrétisation (MAILLAGE) et les propriétés d'interpolation des éléments finis affectés à ces mailles (MODELE) d'où la diversité des modélisations utilisables sur un même maillage ;
- La diversité des relations de comportement et des propriétés des matériaux utilisables dans un même modèle ;
- Le traitement des conditions aux limites et des chargements par des éléments finis spécifiques de bord, pour permettre leur localisation sans ambiguïté, notamment pour les milieux continus ;
- Une procédure systématique permettant de traiter la dépendance des propriétés de matériaux et des conditions aux limites à différents paramètres (température, temps, variable d'espace...) à l'aide de FONCTION ou de FORMULE définies en Python.
- Des structures de données permettant d'utiliser toutes les modélisations avec les différents algorithmes de résolution.

## 2.2 Une bibliothèque d'éléments finis étendue

La bibliothèque d'éléments finis est paramétrée pour permettre l'affectation, aux différentes mailles reconnues, des formulations discrétisées des phénomènes disponibles.

### 2.2.1 Les milieux continus

On appelle milieu continu une portion de structure tridimensionnelle ou bidimensionnelle, traitée comme un volume.

Les modélisations 3D sont les formes les plus simples de milieu continu, car elles ne font appel à aucune hypothèse supplémentaire. Dans les modélisations 2D, on supprime une équation, mais on doit rajouter des hypothèses : par exemple de déformations planes ou de contraintes planes en mécanique, d'axisymétrie en thermique et en mécanique.

### 2.2.2 Les composants de structure

Les éléments structuraux sont construits en intégrant des hypothèses sur le comportement cinématique tridimensionnel (représentant plus ou moins bien les phénomènes de flexion, torsion, cisaillement, gauchissement...). On peut les classer en trois catégories :

1. Les éléments à feuillet moyen (plaques, coques) : chaque type d'élément repose sur des hypothèses de variation des inconnues dans l'épaisseur, qui permet de calculer la valeur en tout point à partir de celle prise sur le feuillet moyen (et éventuellement les faces inférieure et supérieure en thermique);
2. Les éléments à fibre moyenne (barres, poutres, tuyaux, câbles) : les hypothèses relient pour chaque section transverse la valeur des inconnues en tout point à celle prise sur la fibre moyenne;
3. Les éléments discrets (masses, ressorts, amortisseurs...) : ils permettent d'introduire sur des mailles ponctuelles ou des segments des caractéristiques exprimées dans un repère quelconque.

Ces composants nécessitent l'usage de la commande AFFE_CARA_ELEM pour définir leurs caractéristiques.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

### 2.2.3 Les raccords de modélisations

L'implantation retenue pour la méthode des éléments finis permet de traiter des structures modélisées avec différents types d'éléments mécaniques (milieux continus ou éléments structuraux). Le raccord d'éléments finis s'appuyant sur des degrés de liberté différents, en un même nœud, peut être fait en écrivant des relations linéaires adaptées à la nature du raccord. Une méthodologie particulière a été mise au point pour transmettre aussi correctement que possible (au sens des moindres carrés) les torseurs d'effort. On peut ainsi représenter de manière satisfaisante le raccord entre un milieu 3D et des poutres, des plaques, des coques ou des tuyaux, ainsi que les raccords coque-poutre, coque-tuyau ou poutre-tuyau.

### 2.2.4 Les milieux discontinus

Il existe également des éléments prenant en compte les discontinuités (eg : fissure)

1. Par la méthode des level-sets (éléments XFEM) avec modélisation du contact et du frottement ;
2. Par les méthodes CZM (Cohesive Zone Models) avec modélisation du contact en refermeture et de l'endommagement en ouverture ;
3. Les éléments à discontinuité interne ;

### 2.2.5 Les modélisations hétérogènes

Des techniques d'homogénéisation permettent de représenter à moindre coût un réseau de tubes baignant dans un fluide incompressible, des coques composites multicouches, ou des poutres multi-fibres.

# 3 Solveurs et algèbre linéaire

Concernant les méthodes de numérotation des inconnues, de stockage des matrices assemblées et de résolution des systèmes linéaires sur lesquels s'appuient les différents algorithmes, on dispose aujourd'hui de plusieurs méthodes : solveur direct ou itératif, séquentiel ou parallèle.
En « natif » dans code_aster :

- Solveurs directs : méthode multi-frontale (parallélisé OpenMP) et méthode $LDL^T$.
- Solveur itératif : gradient conjugué préconditionné.

Ces méthodes sont associées à des algorithmes de renumérotation des degrés de liberté permettant d'optimiser la taille mémoire nécessaire pour stocker les matrices.
En externe, il est possible d'utiliser les solveurs suivants :

- MUMPS : solveurs direct parallélisé MPI out-of-core ;
- PeTSC : bibliothèque de solveurs itératifs, parallélisées MPI ;

Pour le calcul modal : méthodes de Lanczos, Sorensen, les méthodes par puissance inverse, pour les problèmes réels et complexes, symétrique ou non.

# 4 Les outils d'étude

## 4.1 Compléments et opérations sur le maillage

La notion de maillage utilisée par code_aster est réduit très simple : liste des nœuds et de leurs coordonnées, liste des mailles et de leur topologie (connectivités). A ces entités est rajoutée la notion des groupes de nœuds et de groupe de mailles. Ces groupes permettent d'affecter différentes caractéristiques de modélisation (éléments finis, matériaux, conditions aux limites, chargements…) et de conduire le dépouillement des résultats (extraction sélective de composantes).

L'utilisateur peut créer des groupes de nœuds ou de mailles à tout moment dans le déroulement du calcul, grâce à des critères logiques ou géométriques. On peut également modifier la structure de données contenant le maillage : changement de repère, ajout de nœuds supplémentaires sur des



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

mailles, création de nouvelles mailles ou groupes de mailles, destruction de mailles, etc. L'ajout et l'ablation de matière peuvent être donc modélisés simplement.

La construction d'un maillage complexe ne peut se faire que via l'utilisation d'un outil plus adapté à cet usage comme Salome et ses mailleurs intégrés (Netgen, BLSurf, Hexotic, etc.) ou GMSH.

## 4.2 Catalogue de données matériau

Un catalogue de données matériau sous AQ donne accès aux valeurs des paramètres de lois de comportement pour différents matériaux couramment utilisés dans les études. Les caractéristiques matériaux peuvent être directement incluses dans le fichier de commandes grâce à un opérateur spécifique. Pour la version libre, tout l'appareillage du catalogue est disponible mais la base est vide.

## 4.3 Traitement et exploitation des résultats

### 4.3.1 Opérations sur les champs

Les champs calculés peuvent être utilisés dans toutes sortes de combinaisons algébriques. En analyse linéaire, on peut ainsi par exemple déduire la réponse à un chargement complexe des réponses aux chargements unitaires sur lesquels il se décomposent.

### 4.3.2 Relevé de valeurs

Des opérations d'extraction des champs de résultats sont disponibles sur des nœuds ou des mailles. Il est également possible de définir un chemin d'observation quelconque indépendant du maillage initial. Différents calculs sont proposés sur les champs extraits (moyenne, écart-type, invariants tensoriels, passage en axes locaux, etc.). Pour les évolutions temporelles ou fréquentielles, il est possible d'extraire la déformée à un instant (une fréquence) ou la réponse d'une grandeur particulière.

### 4.3.3 Impression des résultats

Les résultats peuvent être imprimés sous une forme aisément consultable ou au format des outils de visualisation (MED, I-DEAS, GMSH). code_aster communique avec Salomé à l'aide du format MED.

On peut également tracer des courbes à différents formats (postscript ou d'autres formats d'images) à l'aide du traceur xmgrace.

## 4.4 Contrôle de la qualité des résultats

De nombreuses fonctionnalités permettent de contrôler la qualité des résultats d'une étude ou d'en faciliter sa mise en œuvre.

### 4.4.1 Estimateurs d'erreur et maillage adaptatif

Deux catégories d'estimateur d'erreur sont disponibles. Couplés avec le logiciel de raffinement/ déraffinement HOMARD (chaînage interne à code_aster par l'intermédiaire de macros-commande), ils permettent d'adapter le maillage en cours de calcul afin d'atteindre une précision donnée, pour un coût calcul optimal.

### 4.4.2 Vérification de la qualité d'une base modale

Des critères de vérification de la qualité d'une base modale permettent de s'assurer que le nombre de modes propres retenus permet de représenter correctement les phénomènes que l'on souhaite étudier.

### 4.4.3 Utilisation de maillages incompatibles

Des opérateurs de projection permettent de poursuivre sur un second maillage un calcul effectué sur un premier maillage. On peut ainsi utiliser des maillages différents en thermique et en mécanique (en incluant par exemple un bloc fissure dans la structure uniquement au moment de son analyse en



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

exploitation, après avoir calculé sur un maillage plus simple les contraintes résiduelles dues à son mode de fabrication).

### 4.4.4 Redécoupage automatique du pas de temps et pilotage du chargement

En cas de non convergence de l'algorithme global de résolution, l'utilisateur peut demander à ce que le code engage de lui même un redécoupage des pas de temps afin de permettre la convergence. Un mécanisme de gestion par événements est également disponible.
Par ailleurs, il est aussi possible, afin de faciliter la convergence des calculs, de piloter l'application progressive du chargement par la valeur d'un degré de liberté ou d'une déformation (méthodes de continuation).

### 4.4.5 Indicateurs de décharge et de perte de radialité

Ces indicateurs permettent a posteriori de vérifier la validité des hypothèses formulées sur le comportement non linéaire d'une structure, et la pertinence du mode d'application du chargement retenu (pas de charge).

# 5 Les outils-dédiés

## 5.1 Définition et mode opératoire

On appelle outil-dédiés des outils très liés au métier d'exploitant de matériels de production et distribution électrique, et utilisant code_aster comme solveur. Les outils-dédiés peuvent avoir une intégration plus ou moins forte à code_aster. On distingue deux cas de figure :

- Intégration au fichier de commandes code_aster en tant que macro-commande (incluant la création du maillage à partir de données géométriques simples et appel à un mailleur externe) ;
- Production par un outil séparé (pré-post processeur autonome) de fichiers de commandes pilotant le calcul code_aster, et traitement dans cet outil des fichiers des résultats récupérés.

## 5.2 Les modes d'échanges

code_aster peut recevoir en données des fichiers provenant de calculs préalablement effectués par des logiciels externes. Il peut également exporter ses résultats sous un format exploitable par d'autres outils. Pour certains types d'analyses (par exemple interaction sol-structure ou sol-fluide-structure avec le logiciel MISS3D) les deux types de chaînage peuvent être activés.

Les échanges avec d'autres logiciels se font actuellement soit au format MED, soit dans un format spécifique au logiciel chaîné. Plusieurs commandes de code_aster permettent la lecture ou l'écriture des objets à transmettre (champs de résultats, matrices, chargements...). Dans certains cas (MISS3D), des macro-commandes facilitent la mise en œuvre d'un calcul chaîné.

## 5.3 Les logiciels interfacés avec code_aster

Les logiciels de maillage interfacés avec code_aster sont salome_meca, Gibi (sous-ensemble de CASTEM2000), I-DEAS ou GMSH. Pour la visualisation des résultats, on peut utiliser salome_meca, I-DEAS ou GMSH.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)