

Manuel d'Utilisation

Fascicule U1.0- : Introduction à Code_Aster

Document : U1.02.00

Introduction à Code_Aster

Avertissement :

On se propose de décrire ici, la philosophie et les domaines d'application de *Code_Aster*, sans développer en détail les méthodologies d'étude utilisables.

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 en aucun cas à la plaquette de la Version 7 qui en dresse un panorama 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 le lecteur 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.

Table des matières

1 L'étude du comportement mécanique des structures.....	3
1.1 Un code général.....	3
1.2 Méthodologie de calcul avec Code_Aster	3
1.3 Phénomènes, modélisations, éléments finis et comportements.....	4
1.3.1 Notions.....	4
1.3.2 Le phénomène mécanique.....	5
1.3.3 Les phénomènes associés.....	6
1.3.3.1 Phénomène thermique.....	6
1.3.3.2 Phénomène acoustique	6
1.3.4 Les « couplages » de phénomènes.....	6
1.3.4.1 Les chaînages internes à Code_Aster	6
1.3.4.2 Les vrais couplages.....	7
1.4 Plusieurs méthodes d'analyse.....	7
1.4.1 Statique / Quasi-statique / Transitoire.....	7
1.4.2 Dynamique : notion de base physique ou de base modale.....	7
1.4.3 Décomposition en modes de Fourier.....	8
1.4.4 Sous-structuration.....	8
2 Une méthode de résolution : les éléments finis.....	9
2.1 Une implantation paramétrée de la méthode des éléments finis	9
2.2 Une bibliothèque d'éléments finis étendue.....	9
2.2.1 Les milieux continus.....	9
2.2.2 Les composants de structure.....	10
2.2.3 Les raccords de modélisations.....	10
2.3 Les modélisations hétérogènes.....	10
3 Les outils d'étude.....	11
3.1 Compléments et opérations sur le maillage.....	11
3.2 Catalogue de données matériau.....	11
3.3 Traitement et exploitation des résultats.....	11
3.3.1 Opérations sur les champs.....	11
3.3.2 Relevé de valeurs.....	11
3.3.3 Impression des résultats.....	11
3.4 Contrôle de la qualité des résultats.....	11
4 Les outils-dédiés.....	13
4.1 Définition et mode opératoire.....	13
4.2 Les outils-dédiés disponibles.....	13
5 Les échanges avec d'autres logiciels.....	14
5.1 Les modes d'échanges.....	14
5.2 Les logiciels interfacés avec Code_Aster	14

1 L'étude du comportement mécanique des structures

1.1 Un code général

Code_Aster est un code général 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 les phénomènes thermique ou acoustique, ou avec des logiciels externes, 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 général), 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 isotropes, des géomatériaux et des composants de structure en béton armé ou en matériau composite.

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.

La mise sous Assurance de la Qualité pour pouvoir effectuer des études industrielles justifie plusieurs choix :

- existence d'une version de référence figée et documentée du code,
- mise à disposition d'algorithmes complets, figés mais paramétrés,
- principe d'orthogonalité des commandes (indépendance du contexte d'utilisation),
- objectif de complétude des modélisations utilisables.

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 docs [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, affectation des données matériau, calcul statique linéaire) produit un « concept résultat », ensemble de structures de données que l'utilisateur peut manipuler et réutiliser dans les commandes ultérieures du calcul (par exemple le maillage, le champ de données matériau, le champ de déplacements...).

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 ad'hoc 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 ne font que gérer les appels aux différentes commandes unitaires (comme `MACRO_MATR_ASSE` 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 (voir [§4]).

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. On appelle alors cela mettre en œuvre une « option » de calcul, qui est affublée d'un nom barbare, mais qui suit une logique « *quoi_où_comment* » (par exemple l'option `EPSI_NOEU_DEPL` pour les déformations données aux nœuds à partir des valeurs des déplacements).

1.3 Phénomènes, modélisations, éléments finis et comportements

1.3.1 Notions

On appelle « phénomène » une famille de problèmes physiques reposant sur le même type d'inconnues (et associé à un type d'équation de conservation) : 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).

Remarque :

Pour les problèmes de thermo-hydro-mécanique couplés, cette notion a été étendue dans la mesure où l'on rassemble, dans ce cas, sous le phénomène « mécanique », l'ensemble des équations de conservation associées au problème thermo-hydro-mécanique.

On appelle modélisation 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, 2D déformations planes, 2D contraintes planes, coques 3D, plaques, poutres d'Euler, poutres de Timoshenko, tuyaux, etc... Chacune des modélisations utilise un jeu de degrés de liberté qui lui est propre : par exemple les déplacements dans les 3 directions de l'espace pour les modélisations de milieu continu 3D, 3 déplacements et 3 rotations pour les coques 3D, etc.

Le couple phénomène / modélisation permet d'affecter de manière bijective un type d'élément fini à chaque type de maille du maillage.

Dans *Code_Aster*, on appelle « élément fini », pour une modélisation donnée, le triplet constitué par :

- la nature de la maille support (représentant un morceau de volume ou de frontière : hexaèdre, tétraèdre, triangle, quadrangle, segment...) : c'est une information topologique (elle inclut le nombre de nœuds) ;
- les lois d'interpolation des inconnues (fonctions de forme) ;
- les « options » de calcul que l'élément « sait » 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...).

Une particularité de *Code_Aster* est d'affecter les conditions aux limites et les chargements de bords à des éléments de bord spécifiques, et non pas aux frontières des éléments finis de volume.

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, on appelle relation de comportement la relation qui lie le champ de contraintes au champ de déformations, soit de manière directe (comportement élastique), soit de manière incrémentale (comportement incrémental). Au cours d'un calcul, la relation de comportement est exprimée en chaque point de Gauss. En thermique, on a utilisé le terme « comportement » pour qualifier le domaine physique associé à la résolution de l'équation modèle de conduction-diffusion : les deux grandes classes de comportements, qui comportent chacune plusieurs sous-catégories, sont la thermique (éventuellement couplées à l'hydratation) et le séchage.

1.3.2 Le phénomène mécanique

Le phénomène mécanique est modélisé pour atteindre deux objectifs principaux :

- la détermination de l'état interne, en particulier de l'état de contrainte en tout 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 du point de vue :
 - des règles de construction particulières à chaque type de structure, notamment les Règles de Conception ou de Construction (RCC...) ;
 - de 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...) ;
 - de l'étude du comportement en chargement cyclique et de l'analyse à la fatigue ;
 - de la prédiction des charges admissibles avec évolution de l'état interne.
- 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 du point de vue :
 - du comportement vibratoire et acoustique ;
 - de la transmission des sollicitations à d'autres structures ou composants ;
 - des risques d'impact 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 :
 - 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),
 - éléments structuraux correspondant à un milieu à feuillet moyen, un milieu à fibre moyenne ou un milieu discrétisé.
- 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 (cf. plaquette) : élasticité linéaire et non linéaire, hyperélasticité non linéaire, visco-élasticité, élasto-plasticité, élasto-visco-plasticité, endommagement. Les coefficients des relations de comportement peuvent en général dépendre de variables dites « de pilotage » telles que la température, l'état métallurgique, le degré d'hydratation ou de séchage du béton, la fluence, etc.
- la représentation des conditions aux limites et des chargements, 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 ou relations linéaires entre composantes de déplacement,
 - des conditions de NEUMANN : force imposée ponctuelle ou 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.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, et les non linéarités géométriques (grands déplacements et grandes rotations, grandes déformations, contact et frottement, flambement).

1.3.3 Les phénomènes associés

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.

1.3.3.1 Phénomène thermique

Il permet de déterminer la réponse thermique de milieux solides en régime permanent (problème stationnaire) ou transitoire (problème évolutif). On modélise 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).

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).

1.3.3.2 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),
 - 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.

1.3.4 Les « couplages » de phénomènes

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

- le chaînage de deux phénomènes : étude préalable du premier phénomène dont on utilise les résultats comme données du second,
- le couplage de deux phénomènes : résolution simultanée des deux phénomènes avec des équations effectivement couplées (cf. [§1.3.4.2]).

1.3.4.1 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 (cf. [§5.2]).

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 - métallurgie : après un calcul thermique, il consiste à calculer les proportions des différentes phases métallurgiques des aciers,
- thermique - métallurgie - 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 d'origine métallurgique),
- électrique - mécanique : intégré au phénomène 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.

1.3.4.2 Les vrais couplages

Milieux poreux

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.

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 Plusieurs méthodes d'analyse

1.4.1 Statique / Quasi-statique / Transitoire

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

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.

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.

1.4.2 Dynamique : notion de base physique ou de base modale

Pour les processus où les effets de l'inertie et de la propagation doivent être pris en considération (mécanique vibratoire, acoustique), 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 repose sur le calcul préalable des valeurs et vecteurs propres de la structure, et consiste à projeter 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. Il est nécessaire que la base modale choisie soit de taille suffisante pour reproduire les principaux phénomènes physiques : des critères de qualité de base modale existent et peuvent être vérifiés (cf. [§3.4.3]).

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,
- l'analyse dynamique non linéaire en base physique.

1.4.3 Décomposition en modes de Fourier

L'analyse en mode de Fourier est destinée à calculer la réponse linéaire d'une structure à géométrie axisymétrique soumise à des chargements non axisymétriques en ne maillant qu'une section de la structure.

Concrètement, le chargement étant décomposé en série de Fourier, la résolution est faite pour chaque mode de Fourier puis la réponse globale est obtenue par recombinaison des résultats sur chaque mode.

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.

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

2 Une méthode de résolution : les éléments finis

Pour la résolution des différents problèmes évoqués, la seule méthode de discrétisation implantée actuellement 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 (« modèle ») 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...),
- des structures de données permettant d'utiliser toutes les modélisations avec les différents algorithmes de résolution.

Concernant le traitement des conditions aux limites, signalons que la méthode privilégiée actuellement est celle de la dualisation. Elle permet de représenter tout système de relations linéaires entre les inconnues discrétisées, notamment pour le raccordement de modélisations différentes ou la prise en considération d'hypothèses locales supplémentaires (planéité d'une face de milieu continu...). Une autre méthode par élimination des degrés de liberté imposés, existe en complément pour les calculs linéaires.

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 deux méthodes directes, et d'une méthode itérative :

- méthode multi-frontale,
- factorisation LDL^T,
- gradient conjugué préconditionné (méthode itérative).

On peut ajouter le solveur FETI pour décomposition de domaines dont une première version (limité au linéaire et à certains types de conditions aux limites) est présente en version 7.4.

Ces méthodes sont associées à des algorithmes de renumérotation des degrés de liberté permettant d'optimiser la taille mémoire nécessaire pour stocker les matrices.

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.

Il existe également des éléments prenant en compte les discontinuités (eg : fissure) par la méthode des level-sets (éléments XFEM).

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 :

- 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),
- les éléments à fibre moyenne (barres, poutres, tuyaux, câbles) : les hypothèses relient pour chaque section transversale la valeur des inconnues en tout point à celle prise sur la fibre moyenne,
- les éléments discrets (masses, ressorts, amortisseurs...) : ils permettent d'introduire sur des mailles ponctuelles ou des segments des caractéristiques exprimées dans un repère cartésien quelconque.

2.2.3 Les raccords de modélisations

L'implantation retenue pour la Méthode des Eléments 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.

La méthode ARLEQUIN permet aussi de faire des raccords entre maillages et/ou phénomènes différents.

2.3 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 Les outils d'étude

3.1 Compléments et opérations sur le maillage

La notion de maillage utilisée par *Code_Aster* est réduite à sa plus simple expression : liste des nœuds et de leurs coordonnées, liste des mailles et de leur topologie. 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). Ce parti pris permet de construire un maillage, soit par rédaction manuelle sans lourdeurs inutiles, soit par interfaçage avec des mailleurs du commerce (Gibi, I-DEAS, GID) ou gratuits (GMSH).

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 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.

3.2 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 (à la charge de l'utilisateur de la remplir avec ses données).

3.3 Traitement et exploitation des résultats

3.3.1 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.

3.3.2 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.

3.3.3 Impression des résultats

Les résultats peuvent être imprimés sous une forme aisément consultable ou au format des outils de visualisation (Gibi, I-DEAS, GMSH ou ENSIGHT). L'utilisateur peut intégrer aux impressions de résultats des titres personnalisés intégrant des informations extraites automatiquement du contexte de l'étude. Plusieurs outils sont disponibles pour limiter l'impression à des portions des champs calculés.

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

3.4 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.

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.

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.

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

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. 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.

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).

4 Les outils-dédiés

4.1 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 *Aster* en tant que macro-commande (incluant la création du maillage à partir de données géométriques simples),
- production par un outil séparé (pré-post processeur autonome) de fichiers de commandes pilotant le calcul *Aster*, et traitement dans cet outil des fichiers des résultats récupérés.

4.2 Les outils-dédiés disponibles

Les outils-dédiés suivants sont disponibles sous la forme de macro-commandes du *Code_Aster* :

- ASCOUF : analyse à la rupture de coudes fissurés ou avec sous-épaisseurs,
- ASPIC : analyse non linéaire de piquages sains ou fissurés,
- CABRI : calcul de brides,
- CALC_PRECONT : mise en tension de câbles de précontrainte.

Les outils-dédiés suivants communiquent avec le *Code_Aster* par des fichiers de commandes et de résultats :

- MEKELEC : analyse des postes de transformation et des lignes aériennes,
- EVEREST : dimensionnement des charpentes métalliques et des pylônes en treillis,
- GEVIBUS : vibrations sous écoulement des tubes de générateurs de vapeur,
- EPICURE/SECURE : nocivité de défauts dans une cuve.

5 Les échanges avec d'autres logiciels

5.1 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 I-DEAS, 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. Enfin, le développement du format MED crée un standard pour l'échange des fichiers qui est amené à se développer.

5.2 Les logiciels interfacés avec *Code_Aster*

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

Les principaux logiciels de calcul pouvant être chaînés avec la Version 7 de *Code_Aster* sont les suivants :

- CIRCUS : vibrations des circuits de tuyauteries et calcul réglementaire,
- N3S-SYRTHES : analyse thermique en présence d'écoulement,
- EOLE : propagation acoustique en écoulement,
- EURO_PLEXUS : dynamique rapide
- MISS3D : propagation d'ondes dans les sols stratifiés (séisme) par éléments de frontière,
- LADY : analyse vibratoire expérimentale,
- HOMARD : raffinement et déraffinement de maillage à partir d'un estimateur d'erreur,
- MEFISTO : calcul de fiabilité,
- SATURNE : code de mécanique des fluides.