Notice d'utilisation sur le choix des éléments finis

Résumé :

Ce document a pour but de donner quelques informations sur le choix des éléments finis et leur modélisation associée dans le cas d'études thermiques, thermo-mécaniques ou mécaniques non-linéaires. Il s'agit en quelque sorte, de proposer à l'utilisateur un choix a priori, permettant d'éviter certaines erreurs courantes. En cas de difficultés particulières, d'autres choix pourront être faits.

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

1 Introduction

On donne dans ce document les choix a priori qui peuvent être faits concernant les éléments finis. On s'est placé dans le cas d'un chaînage thermo-mécanique mais les conseils sont valables sur des calculs non chaînés thermiques ou mécaniques (linéaires ou non). Une justification rapide est donnée. Pour plus de détails sur la justification de ces choix, l'utilisateur pourra se reporter aux documents R de *Code_Aster* ainsi qu'à la note H [bib1].

2 Choix à priori

2.1 Le maillage

Les éléments peuvent être indifféremment :

- des éléments triangulaires ou des quadrangles en 2D,
- des tétraèdres ou des hexaèdres en 3D.

En effet, contrairement à l'idée souvent répandue, les éléments de type triangle ou tétraèdre donnent de bons résultats, même en plasticité, **à condition bien sûr de ne pas utiliser un maillage trop grossier**. L'avantage de cette famille d'éléments, c'est qu'elle permet d'utiliser le logiciel HOMARD qui réalise l'adaptation de maillages 2D/3D pour éléments finis de type triangulaire ou tétraédrique par raffinement et déraffinement. On peut ainsi obtenir le maillage optimum en fonction d'un indicateur d'erreur (cf. [R4.10.01], [R4.10.02], [R4.10.03], ou le cas test TPLL01j [V4.02.01] pour une démonstration) par appel à la commande `MACR_ADAP_MAIL` dans le fichier de commande Aster.

En revanche, il est conseillé d'utiliser :

- des éléments linéaires en thermique pour les calculs chaînés et les calculs de thermique transitoire rapide. Pour les autres cas, on peut aussi opter pour des éléments quadratiques,
- des éléments quadratiques en mécanique.

Ce choix est d'autant plus important lorsqu'on réalise des calculs chaînés thermiques puis mécaniques. Il faut alors utiliser deux maillages différents pour la thermique et la mécanique. Deux stratégies sont alors possibles :

- soit mailler indépendamment la structure pour le calcul thermique et pour le calcul mécanique
- soit réaliser un maillage avec des éléments linéaires puis le transformer en maillage quadratique grâce à la commande `CREA_MAILLAGE`, mot-clé facteur `LINE_QUAD`.

Quelle que soit la méthode choisie, on peut optimiser chaque maillage séparément avec Homard grâce aux indicateurs d'erreur thermiques et mécaniques disponibles dans Aster (cf. cas-test forma05b [V6.03.120]).

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

Remarques :

1) *Cette remarque s'adresse aux utilisateurs de GIBI qui avaient l'habitude de mailler leurs structures avec des quadrangles ou des cubes et qui souhaiteraient « basculer » leur maillage vers des triangles ou des tétraèdres.*
En général, pour mailler avec des tétraèdres au lieu de cubes, il ne suffit pas de changer dans le fichier de commande OPTI DIME 3 ELEM CU20 par OPTI DIME 3 ELEM TE10. En effet, un certain nombre de commandes GIBI sont spécifiques aux cubes et ne fonctionnent pas pour mailler une structure avec des tétraèdres (ou ne donnent pas le résultat escompté). L'utilisateur peut donc être tenté de garder son fichier de commande initial et d'utiliser à la fin du processus de création de maillage la commande CHAN TET4 pour faire le basculement.
Par expérience, nous déconseillons aux utilisateurs de faire ce choix pour plusieurs raisons. Tout d'abord, sur certains maillages, on a observé une non-convergence de la solution lorsqu'on utilisait un maillage de plus en plus fin obtenu par cette méthode. En plus, le changement n'est effectif que sur le volume : les mailles surfaciques sont toujours des quadrangles ce qui pose problème pour imposer les conditions aux limites dans Aster. Enfin, pour mailler avec des TETRA10, il est nécessaire de passer par l'étape TETRA4 puis de faire CHAN QUADRATIQUE. Or ce changement pose problème pour les SEG2.
En conséquence, avec GIBI, il est important de mailler directement la structure avec les bons éléments quitte à devoir réécrire son fichier de commande. On signale également, que dans certains cas, GIBI n'arrive pas à mailler avec des tétraèdres lorsqu'on demande un raffinement important. Il suffit alors de mailler grossièrement, puis de raffiner le maillage de façon uniforme ou non avec le logiciel Homard.
2) *On rappelle ici que toutes les grandeurs de type contrainte ou déformation sont calculées aux points de Gauss, et que tout passage aux nœuds entraîne un biais. Cela est d'autant plus vrai lorsqu'on cherche ensuite à calculer des normes ; nous avons ainsi remarqué que les tétraèdres étaient plus sensibles que les hexaèdres à la méthode de calcul des contraintes équivalentes par exemple. Il faut donc avoir un œil encore plus critique sur les résultats calculés aux nœuds.*

2.2 La modélisation

Que ce soit pour la résolution des problèmes thermiques ou mécaniques, plusieurs modélisations sont disponibles dans *Aster*. Ces différentes modélisations peuvent se distinguer par le nombre ou le type de degrés de liberté, le nombre de points d'intégration, des traitements particuliers… En fonction du calcul réalisé, certaines sont bien sûr plus adaptées que d'autres.

2.2.1 En thermique

Pour faire du calcul thermique dans *Aster*, deux types de modélisations sont accessibles ([U3.23.01], [U3.24.01], [R3.06.02], [R3.06.07]) :

- les éléments finis classiques : modélisation 3D, AXIS ou PLAN
- les éléments finis lumpés ou diagonalisés : modélisation 3D_DIAG, AXIS_DIAG ou PLAN_DIAG

Nous proposons comme choix par défaut :

modélisation XXXX_DIAG avec éléments linéaires

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

Justification

En thermique, le pas de temps Δt ne peut être quelconque, il doit vérifier une condition $\Delta t_{min} < \Delta t < \Delta t_{max}$, Δt_{min} et Δt_{max} dépendant des propriétés matériaux, de la taille des éléments finis et des paramètres d'intégration temporelle (cf. [R3.06.07]).
Dans le cas de problèmes de thermique transitoires rapides, on peut être amené à utiliser un pas de temps trop petit. On peut alors observer des oscillations de la solution et des températures non physiques dues à la violation du principe du maximum (température supérieure à la température initiale d'une pièce qu'on refroidit). La modélisation DIAG, qui consiste à diagonaliser la matrice de masse, permet de s'affranchir de la condition sur Δt_{min} et d'éviter les problèmes associés.
Notons cependant que cette diagonalisation ne suffit pas pour supprimer les oscillations avec des éléments quadratiques. Toutefois, dans Aster, un traitement particulier est fait pour les éléments 2D : les triangles sont automatiquement coupés en éléments finis linéaires qui sont eux-mêmes lumpés.

2.2.2 En mécanique

Trois types de modélisations sont disponibles pour résoudre des problèmes de mécanique non-linéaire utilisant des lois de comportement « classiques » (du type élasto-plasticité) :

- les éléments finis classiques isoparamétriques : 3D, D_PLAN, C_PLAN, AXIS ([U3.14.01], [U3.13.01]),
- les éléments sous-intégrés : 3D_SI, D_PLAN_SI, C_PLAN_SI, AXIS_SI ([U3.14.01], [U3.13.05]),
- les éléments s'appuyant sur une formulation quasi-incompressible : 3D_INCO, D_PLAN_INCO, AXIS_INCO ([U3.14.06], [U3.13.07], [R3.06.08]).

Nous proposons comme choix à priori d'utiliser :

des éléments quadratiques

En ce qui concerne le choix de la modélisation, il est fonction du type d'éléments et du besoin de traiter la condition d'incompressibilité. Ces considérations sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	normal	**quasi-incompressible (forte plasticité ou ν >0.45)**
triangles/tétraèdres	**standard**	**INCO**
quadrilatères/hexaèdres	**SI**	**SI ou INCO**

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

Justifications et précautions :

- Si le matériau est quasi-incompressible (ν > 0.45), il est préférable d'utiliser la formulation INCO, car la formulation standard en déplacement ne donne pas de bons résultats.
- L'écoulement plastique se fait à volume constant. Cette condition d'incompressibilité peut provoquer des difficultés avec la modélisation classique à savoir un comportement trop rigide et surtout l'apparition d'oscillations au niveau des contraintes. La sous-intégration permet d'améliorer ces problèmes, car on vérifie alors la condition d'incompressibilité en moins de points de Gauss. Toutefois, **seuls les élements QUAD8 et HEXA20 sont réellement sous-intégrés,** pour les autres mailles, c'est l'intégration classique qui est conservée. En conséquence, lorsque des phénomènes d'oscillations sont observés pour un maillage composés de triangles ou de tétraèdres, il est préférable d'utiliser la formulation INCO. Ceci améliore nettement les résultat mais les calculs seront plus longs.
- Dans le cas général, la modélisation sous-intégrée donne d'aussi bon résultats que les éléments finis classiques, et ceci pour un temps de calcul plus rapide puisqu'on utilise moins de points de Gauss. En plus dans le cas de calculs thermo-mécaniques, cela permet de limiter les difficultés lors du passage de la déformation d'origine thermique au calcul mécanique quand les raffinements des maillages thermique et mécanique diffèrent. Toutefois, la sous-intégration peut parfois conduire à l'apparition de modes parasites. Si à l'issue du calcul la déformée présente ce genre de modes de déformation non physiques, il vaut mieux faire le calcul avec la modélisation classique ou quasi-incompressible si les niveaux de plasticité sont très importants.

3 Mise en œuvre *Aster*

On rappelle ici les principales étapes du calcul *Aster* dans le cas d'un calcul en déformations planes, en précisant explicitement où interviennent les spécifications dont on a parlé. Pour la partie mécanique, on a écrit en gras ce qui est spécifique au cas d'un calcul thermo-mécanique.

3.1 Etude Thermique

- Lecture du maillage thermique

```
PRE_GIBI(UNITE_GIBI=19,
         UNITE_MAILLAGE=20,)

MA=LIRE_MAILLAGE(UNITE=20,)
```

```
PRE_GMSH(UNITE_GMSH=19,
         UNITE_MAILLAGE=20,)

MA=LIRE_MAILLAGE(UNITE=20,)
```

- Choix du modèle thermique

```
MOTH2D=AFFE_MODELE(MAILLAGE=MA,
                   VERIF='MAILLE',
                   AFFE=_F(GROUP_MA= ('GMA1','GMA2',…),
                           PHENOMENE='THERMIQUE',
                           MODELISATION='PLAN_DIAG',),)
```

- Propriétés thermiques du matériau
- Chargement thermique
- THER_LINEAIRE ou THER_NON_LINE
  THER = …
- Post traitements éventuels

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

3.2 Etude mécanique

- Lecture maillage mécanique

```
PRE_GIBI() ou PRE_GMSH()

MAME=LIRE_MAILLAGE()
```

```
MAME=CREA_MAILLAGE(
    MAILLAGE = MA,
LINE_QUAD=_F(TOUT='OUI'))
```

- Définition du modèle mécanique

```
MOME=AFFE_MODELE(MAILLAGE=MAME,
                 VERIF='MAILLE',
                 AFFE=_F(GROUP_MA= ('GMA1','GMA2',…),
                         PHENOMENE='MECANIQUE',
                         MODELISATION='D_PLAN_SI',),);
```

- Projection du calcul thermique si calcul chaîné sur 2 maillages différents

```
CHTHER=PROJ_CHAMP(METHODE='ELEM',
                  RESULTAT=THER,
                  MODELE_1=MOTH2D,
                  MODELE_2=MOME,);
```

- Caractéristiques mécaniques du matériau

…

```
CHMAT = AFFE_MATERIAU(MAILLAGE = MAME,
                      AFFE = F(TEMP_REF = 20., …)
```

- Chargement mécanique et thermique

```
CLIM=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MOME,
                    TEMP_CALCULEE=CHTHER ou THER si pas de projection,
                    DDL_IMPO=(…),
                    …);
```

- STAT_NON_LINE
- Post-traitements

4 Bibliographie

1) S. MICHEL-PONNELLE, A. RAZAKANAIVO : Qualité des Etudes en Mécanique des Solides : étude des éléments finis. Note EDF HT-64/02/007/B

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