

Manuel d'Utilisation
Fascicule U2.02 : Éléments de structure
Document : U2.02.01

Notice d'utilisation des éléments plaques et coques

Résumé :

Ce document est une notice d'utilisation pour les modélisations plaques et coques.

Les éléments de coques et de plaques interviennent dans la modélisation numérique des structures minces à surface moyenne, plane (modélisation plaque) ou courbe (modélisation coques).

Ils sont utilisables en mécanique linéaire ou non linéaire et en thermique.

Table des matières

1 Introduction	4
2 Mécanique	5
2.1 Capacités de modélisation	5
2.1.1 Rappel de la formulation	5
2.1.1.1 Géométrie des éléments plaque et coques	5
2.1.2 Formulation des éléments plaque et coques	7
2.1.2.1 Formulation en linéaire géométrique	7
2.1.2.2 Formulation en non-linéaire géométrique, Flambement d'Euler.....	9
2.1.3 Comparaison entre les éléments.....	9
2.1.3.1 Les différences entre les éléments plaques et coques.....	9
2.1.3.2 Les différences entre les éléments plaques	9
2.1.3.3 Les différences entre les éléments coques	10
2.2 Commandes à utiliser	11
2.2.1 Discrétisation spatiale et affectation d'une modélisation : opérateur AFPE_MODELE	11
2.2.1.1 Degrés de libertés	12
2.2.1.2 Mailles support des matrices de rigidité.....	12
2.2.1.3 Mailles support des chargements	13
2.2.1.4 Modèle : AFPE_MODELE.....	13
2.2.2 Caractéristiques élémentaires : AFPE_CARA_ELEM	14
2.2.3 Matériaux : DEFI_MATERIAU.....	16
2.2.4 Chargements et conditions limites : AFPE_CHAR_MECA et AFPE_CHAR_MECA_F.....	17
2.2.4.1 Liste des mot-clés facteur d'AFPE_CHAR_MECA.....	18
2.2.4.2 Liste des mot-clés facteur d'AFPE_CHAR_MECA_F	20
2.2.4.3 Application d'une pression : mot-clé FORCE_COQUE	20
2.2.4.4 Conditions limites : mots-clés DDL_IMPO et LIAISON_*	20
2.2.4.5 Raccords coques avec autres éléments mécaniques	21
2.3 Résolution	22
2.3.1 Calculs linéaires : MECA_STATIQUE et autres opérateurs linéaires	22
2.3.2 Calculs non linéaires : STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE.....	23
2.3.2.1 Comportements et hypothèses de déformations disponibles.....	23
2.3.2.2 Détail sur les points d'intégration	24
2.3.2.3 Comportement non-linéaire géométrique	24
2.3.2.4 Flambement linéaire.....	25
2.4 Calculs supplémentaires et post-traitements	25
2.4.1 Calculs de matrices élémentaires : opérateur CALC_MATR_ELEM	25
2.4.2 Calculs par éléments : opérateur CALC_ELEM.....	26
2.4.3 Calculs aux nœuds : opérateur CALC_NO	27
2.4.4 Calculs des champs élémentaires : opérateur CALC_CHAM_ELEM	28
2.4.5 Calculs de quantités sur tout ou partie de la structure : opérateur POST_ELEM.....	28

Titre : Notice d'utilisation des éléments plaques et coques
Auteur(s) : A. ASSIRE, P. MASSIN, F. LEBOUVIER

Date : 21/06/02
Clé : U2.02.01-A Page : 3/50

2.4.6 Valeurs de composantes de champs de grandeurs : opérateur POST_RELEVE_T	28
2.4.7 Impression des résultats : opérateur IMPR_RESU	29
2.5 Exemples	30
2.5.1 Analyse statique linéaire	30
2.5.2 Analyse modale en dynamique	33
2.5.3 Analyse statique non linéaire matériau	34
2.5.4 Analyse statique non linéaire géométrique	35
2.5.5 Analyse en flambement d'Euler	37
2.5.6 Raccords coques et autres éléments mécaniques	38
3 Thermique	40
3.1 Définition du problème	40
3.1.1 Discrétisation spatiale et affectation d'une modélisation : opérateur AFFE_MODELE	40
3.1.1.1 Degrés de libertés	40
3.1.1.2 Mailles support des matrices de rigidité	40
3.1.1.3 Mailles support des chargements	41
3.1.1.4 Modèle : AFFE_MODELE	41
3.1.2 Caractéristiques élémentaires : AFFE_CARA_ELEM	41
3.1.3 Matériaux : DEFI_MATERIAU	41
3.1.4 Chargements et conditions limites : AFFE_CHAR_THER et AFFE_CHAR_THER_F	42
3.1.4.1 Liste des mot-clés facteur d'AFFE_CHAR_THER	42
3.1.4.2 Liste des mot-clés facteur d'AFFE_CHAR_THER_F	42
3.2 Résolution	43
3.2.1 Calculs transitoires : opérateur THER_LINEAIRE	43
3.3 Calculs supplémentaires et post-traitements	43
3.3.1 Calculs en post-traitement	43
3.4 Exemples	44
4 Chaînage thermomécanique	45
4.1 Formalisme	45
4.2 Exemples	46
5 Conclusion et conseils d'utilisation	47
6 Bibliographie	49

1 Introduction

Les éléments de coques et de plaques sont particulièrement utilisés pour modéliser des structures minces où les rapports entre les dimensions (épaisseur/longueur caractéristique) sont très inférieur à 1/10 (coques minces) ou de l'ordre de 1/10 (coques épaisses).

Ces modélisations sont utilisables en mécanique linéaire et non linéaire, sous des hypothèse de petites déformations et petits déplacements ou bien des hypothèses de grands déplacements et de grandes rotations, suivant les modélisations. Une modélisation de coque mince est également disponible en thermique linéaire transitoire.

Deux catégories d'éléments de structures minces sont décrites dans ce document :

- Les éléments de **plaques**, qui sont plans, donc la courbure de la structure à représenter n'est pas idéalement prise en compte et il est nécessaire d'utiliser un grand nombre d'éléments de façon à approcher correctement la géométrie de la structure (aspect facettes).
- Les éléments de **coques**, qui sont courbes, donc la géométrie de la structure est mieux approchée.

Concernant la nomenclature et les documentations de référence associées à chacune des modélisations :

- les éléments de plaques plans triangle et quadrangle sont regroupés sous les modélisations, (documentation de référence [R3.07.03]) :
 - DKT : maille TRIA3 élément DKT, maille QUAD4 éléments DKQ (linéaire géométrique) ;
 - DST : maille TRIA3 élément DST, maille QUAD4 élément DSQ (linéaire géométrique) ;
 - Q4G : maille QUAD4 élément Q4G (linéaire géométrique) ;
- les éléments de coques courbes issus de modèles 3D avec une cinématique de coque sont regroupés sous les modélisations :
 - COQUE_3D : maille TRIA7 et QUAD9, structure 3D à géométrie quelconque ([R3.07.04] en linéaire géométrique, [R3.07.05] en linéaire géométrique et [R3.03.07] avec des pressions suiveuses) ;
 - COQUE_AXIS : maille SEG3, coques à symétrie de révolution autour de l'axe OY ([R3.07.02] en linéaire géométrique) ;
 - COQUE_C_PLAN ou COQUE_D_PLAN : maille SEG3, coques à géométrie invariante le long de l'axe OZ ([R3.07.02] en linéaire géométrique).

Une particularité : pour des études sur des structures en béton armé, des éléments de plaques spécifiques ont été développés pour représenter les nappes de ferrailage composées de deux armatures métalliques à 90° l'une par rapport à l'autre (cas le plus général pour les structures en béton armé). Ce sont des éléments de plaques DKT orthotropes à 3 nœuds excentrés par rapport au feuillet moyen en béton. Ce dernier est modélisé par des éléments de plaques DKT ou DST à 3 nœuds. On définit pour les nappes de ferrailage une modélisation GRILLE qui utilise les éléments de plaques DKT à 3 nœuds usuels. La structure en béton armé est alors représentée par la superposition des modélisations GRILLE et de celle utilisée pour le béton (DKT ou DST).

2 Mécanique

2.1 Capacités de modélisation

2.1.1 Rappel de la formulation

2.1.1.1 Géométrie des éléments plaque et coques

Pour les éléments plaques et coques on définit une surface de référence, ou surface moyenne, plane (plan x, y par exemple) ou courbe (x et y définissent un ensemble de coordonnées curvilignes) et une épaisseur $h(x, y)$. Cette épaisseur doit être petite par rapport aux autres dimensions de la structure à modéliser. La figure ci-dessous illustre ces différentes configurations.

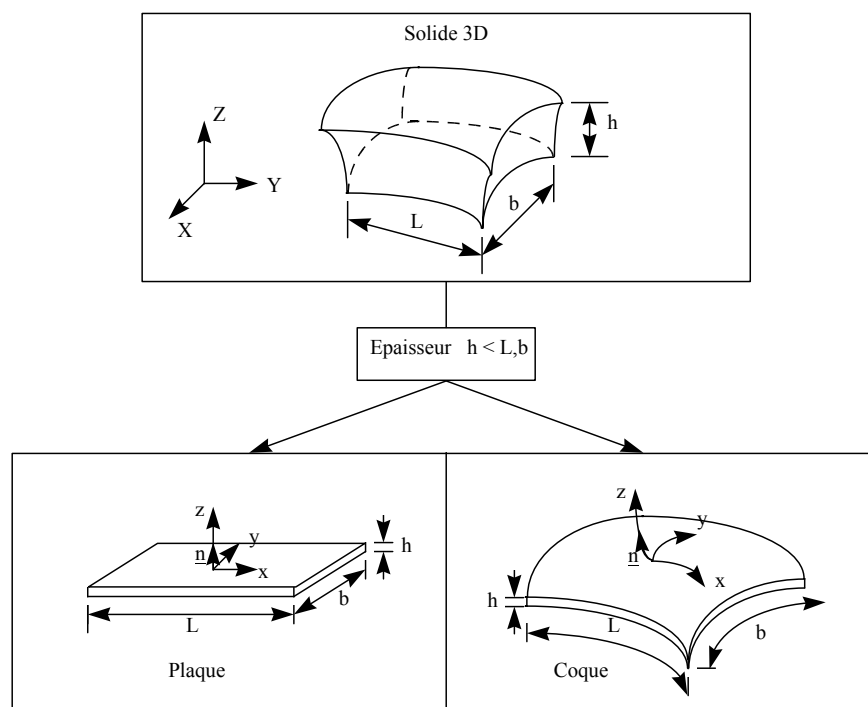


Figure 2.1.1.1-a : Hypothèse en théorie des plaques et des coques

On attache à la surface moyenne ω un repère local $Oxyz$ différent du repère global $OXYZ$. La position des points de la plaque ou de la coque est donnée par les coordonnées curvilignes (ξ_1, ξ_2) de la surface moyenne et l'élévation ξ_3 par rapport à cette surface. Pour les plaques le système de coordonnées curvilignes est un système de coordonnées cartésiennes locales.

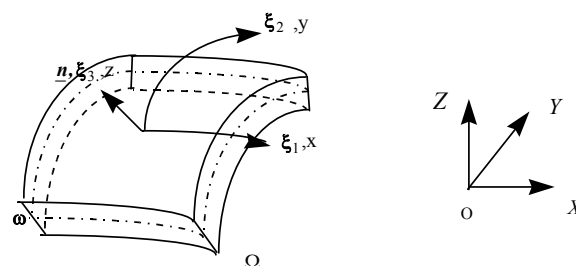


Figure 2.1.1.1-b : Définition d'une surface moyenne

Pour représenter des coques à symétrie de révolution autour d'un axe (COQUE_AXIS) ou des coques à géométrie invariante par translation (COQUE_C_PLAN en contraintes planes ou COQUE_D_PLAN en déformations planes), la connaissance de la section de révolution ou de la trace de la surface moyenne est suffisante, comme la figure [Figure 2.1.2.1-a] nous le montre. Ces coques s'appuient sur un maillage linéique et en un point **m** de la surface moyenne on définit un repère local (**n**, **t**, **e_z**) par :

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{Om}_{,s}}{\|\mathbf{Om}_{,s}\|} ; \mathbf{n} \wedge \mathbf{t} = \mathbf{e}_z.$$

Lorsque l'on souhaite modéliser un solide de forme quelconque (non plan), on peut utiliser des éléments de coques pour rendre compte de la courbure, ou bien des éléments de plaques. Dans ce dernier cas, la géométrie est approximée par un réseau de facettes.

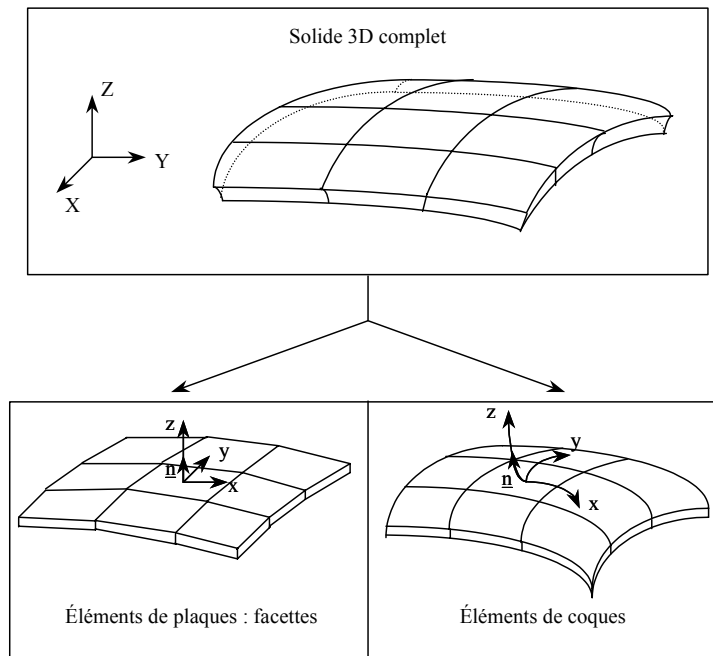


Figure 2.1.1.1-c : Modélisation d'un solide 3D quelconque par des éléments de plaques ou coques

2.1.2 Formulation des éléments plaque et coques

2.1.2.1 Formulation en linéaire géométrique

Dans cette formulation, on suppose que les déplacements sont petits, on peut donc superposer la géométrie initiale et la géométrie déformée. Ces éléments reposent sur la théorie des plaques selon laquelle :

- les sections droites qui sont les sections perpendiculaires à la surface de référence restent droites; les points matériels situés sur une normale à la surface moyenne non déformée restent sur une droite dans la configuration déformée. Il résulte de cette approche que **les champs de déplacement varient linéairement dans l'épaisseur de la plaque ou de la coque**. Si l'on désigne par u , v et w les déplacements d'un point $q(x,y,z)$ suivant x , y et z , on a ainsi :

$$\begin{Bmatrix} u(x,y,z) \\ v(x,y,z) \\ w(x,y,z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \\ w(x,y) \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \beta_x(x,y) \\ \beta_y(x,y) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Le tenseur de déformation associé s'écrit alors : $\varepsilon(x,y,z) = \mathbf{e}(x,y) + \boldsymbol{\gamma}(x,y) + z\boldsymbol{\chi}(x,y)$. Le premier terme \mathbf{e} comprend les déformations de membrane (pour un élément de plaque ce sont les déformations dans le plan de l'élément), le second $\boldsymbol{\gamma}$ celles de cisaillement transversal, et le troisième $z\boldsymbol{\chi}$ les déformations de flexion, associées au tenseur de courbure $\boldsymbol{\chi}$. Pour les plaques ou les coques épaisses les cisaillements transverses $\boldsymbol{\gamma}$ sont pris en compte suivant la formulation proposée par Reissner, Hencky, Bollé, Mindlin. Cette formulation englobe l'approche sans cisaillement transverse, où le tenseur $\boldsymbol{\gamma}$ est nul, développée par Kirchhoff pour les plaques ou les coques minces selon laquelle les points matériels situés sur une normale \mathbf{n} à la surface moyenne non déformée restent sur la normale à la surface déformée.

- la contrainte transversale σ_{zz} est nulle** car considérée comme négligeable par rapport aux autres composantes du tenseur des contraintes (hypothèse des contraintes planes).
- on ne décrit pas la variation de l'épaisseur ni celle de la déformation transversale ε_{zz} que l'on peut calculer en utilisant l'hypothèse précédente de contraintes planes.
- la prise en compte du cisaillement transverse dépend de facteurs de correction déterminés a priori par des équivalences énergétiques avec des modèles 3D, de façon à ce que la rigidité en cisaillement transverse du modèle de plaque soit la plus proche possible de celle définie par la théorie de l'élasticité tridimensionnelle. Pour les plaques homogènes, le facteur de correction de cisaillement transverse basé sur cette méthode est $k=5/6$.

Remarque :

La détermination des facteurs de correction repose pour Mindlin sur des équivalences de fréquence propre associée au mode de vibration par cisaillement transverse. On obtient alors $k = \pi^2 / 12$, valeur très proche de 5/6.

Ces éléments font intervenir localement :

- cinq variables cinématiques pour les éléments plaques et coques quelconques ; les déplacements de membrane u et v dans le plan de référence $z=0$, le déplacement transversal w et les rotations β_x et β_y de la normale à la surface moyenne dans les plans yz et xz respectivement.
- trois variables cinématiques pour les éléments linéiques ; les déplacements u et v dans le plan de référence $z=0$ et la rotation β_n de la normale à la surface moyenne dans le plan xy .

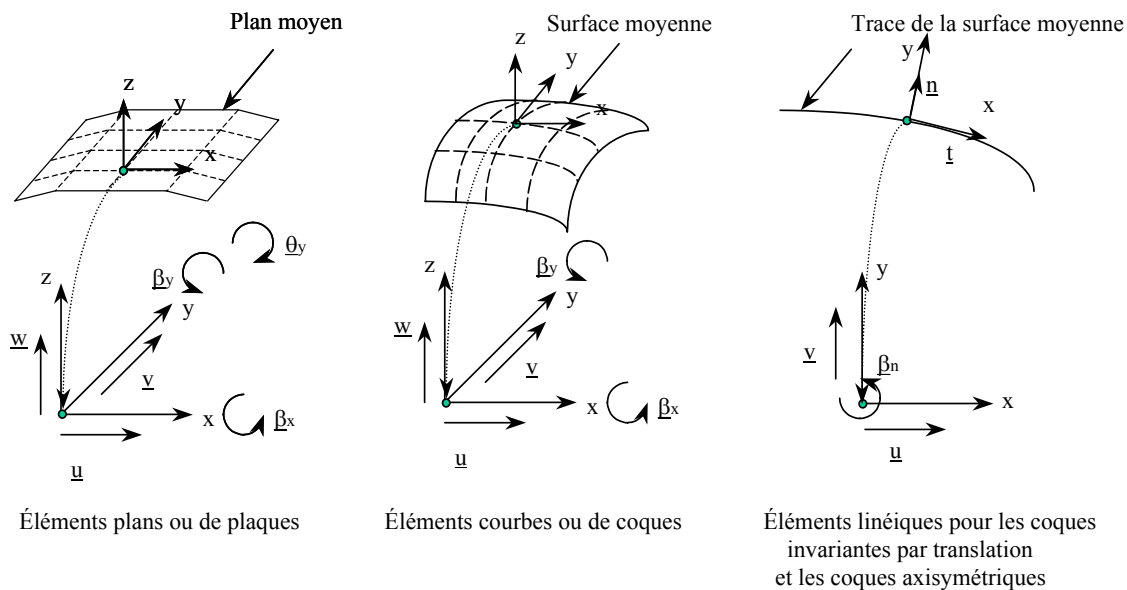


Figure 2.1.2.1-a : Variables cinématiques pour les différents éléments de plaques et de coques

- trois efforts résultants de membrane notés N_{xx}, N_{yy}, N_{xy} et trois moments de flexion notés M_{xx}, M_{yy}, M_{xy} quel que soit l'élément de plaque ou de coque ; deux efforts tranchants notés V_x et V_y dans le cas des éléments de plaques et de coques quelconques.

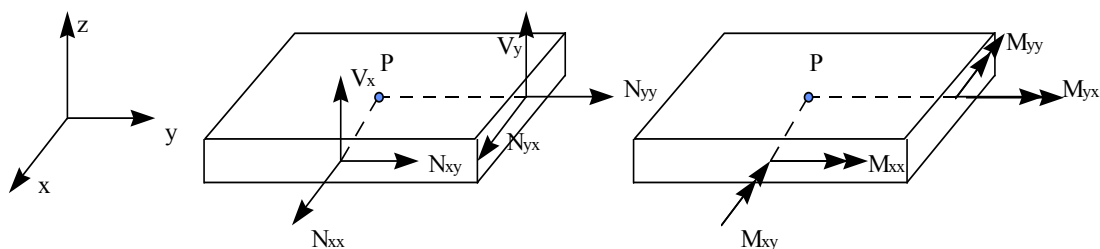


Figure 2.1.2.1-b : Efforts résultants pour un élément de plaque ou de coque

2.1.2.2 Formulation en non-linéaire géométrique, Flambement d'Euler

Dans la formulation en **non-linéaire géométrique**, on est en présence de grands déplacements et de grandes rotations, on ne peut pas superposer la géométrie initiale et la géométrie déformée.

La formulation, décrite dans la documentation de référence [R3.07.05], est basée sur une approche de milieu continu 3D, dégénérée par l'introduction de la cinématique de coque de type Hencky-Mindlin-Naghdi en contraintes planes dans la formulation faible de l'équilibre. La mesure des déformations retenues est celle de Green-Lagrange, énergiquement conjuguées aux contraintes de Piola-Kirchhoff de deuxième espèce. La formulation de l'équilibre est donc une formulation Lagrangienne totale. Le cisaillement transverse est traité de la même manière que dans le cas linéaire [R3.07.04].

L'élément retenu en non-linéaire est un élément de coque volumique (COQUE_3D) de surface moyenne courbe tel que présenté au paragraphe précédent, dont les mailles supports sont des QUAD9 et des TRIA7.

Il est possible d'appliquer sur ces éléments des pressions suiveuses, dont la formulation est décrite dans le document de référence [R3.03.07]. Ce chargement à la particularité de suivre la géométrie de la structure au cours de sa déformation (par exemple, la pression hydrostatique reste toujours perpendiculaire à la géométrie déformée).

Le flambement linéaire appelé aussi **flambement d'Euler**, décrit dans la documentation de référence [R3.07.05], se présente comme un cas particulier du problème non-linéaire géométrique. Il est basé sur une dépendance linéaire des champs de déplacements, de déformations et de contraintes par rapport au niveau de charge.

L'élément retenu en flambement linéaire est l'élément de coque volumique (COQUE_3D) de surface moyenne courbe tel que présenté au paragraphe précédent, dont les mailles supports sont des QUAD9 et des TRIA7.

2.1.3 Comparaison entre les éléments

2.1.3.1 Les différences entre les éléments plaques et coques

Les éléments de coque sont des éléments courbes alors que les éléments de plaques sont plans. La variation de métrique de la géométrie (c'est à dire son rayon de courbure) en fonction de son épaisseur est prise en compte pour les éléments de coques mais pas pour les éléments de plaques. Cette variation de métrique implique un couplage entre les effets de membrane et de flexion pour des structures non planes qui ne peut pas être observé avec des éléments de plaque plan pour un matériau homogène (voir [bib1]).

Le choix des fonctions de forme pour la discrétisation de ces éléments est différent car les éléments de coques courbes ont un nombre de degrés de liberté plus important. Ainsi, les éléments de plaques sont des éléments linéaires en membrane alors que les éléments de coques sont quadratiques.

2.1.3.2 Les différences entre les éléments plaques

On distingue les éléments avec cisaillement transversal (DST, DSQ et Q4G) des éléments sans cisaillement transversal (DKT et DKQ). Les éléments DST et DKT ont des mailles support triangulaires à 3 nœuds ($3 \times 5 = 15$ ddl) et les éléments DKQ, DSQ et Q4G des mailles supports quadrangulaires à 4 nœuds ($4 \times 5 = 20$ ddl).

Remarque importante :

Pour les éléments de plaque à 4 nœuds (DSQ, DKQ et Q4G), les 4 nœuds doivent être coplanaires pour que la théorie des plaques puisse être validée. Cette vérification est effectuée systématiquement par le Code_Aster, et l'utilisateur est alarmé dans le cas où l'un des éléments du maillage ne respecte pas cette condition.

Dans le cas des éléments avec cisaillement transversal, pour éviter le blocage des éléments en cisaillement transverse (surestimation de la rigidité pour des épaisseurs très faibles), une méthode consiste à construire des champs de cisaillement de substitution constants sur les bords de l'élément, dont la valeur est l'intégrale du cisaillement sur le bord en question. Dans le *Code_Aster*, les éléments de plaque et coque avec du cisaillement transverse utilisent cette méthode de façon à ne pas bloquer en cisaillement transverse. Ce blocage en cisaillement vient du fait que l'énergie élastique de cisaillement est un terme proportionnel à h (h étant l'épaisseur de la plaque ou de la coque) bien plus grand que le terme d'énergie élastique de flexion qui est proportionnel en h^3 . Quand l'épaisseur devient faible devant la longueur caractéristique (le rapport h/L est inférieur à $1/20$), pour certaines fonctions de forme, la minimisation du terme prépondérant en h conduit à une mauvaise représentation des modes de flexion pure, pour lesquels la flèche n'est plus calculée correctement (voir [bib1] page 295 avec $h/L=0.01$).

L'élément Q4G est un élément quadrilatéral à quatre nœuds sans blocage en cisaillement transverse, avec des fonctions de forme bilinéaires en x et y pour représenter w , β_x et β_y . Il en est de même pour les éléments DST et DSQ. La différence entre DSQ et Q4G (modélisation DST, [bib1]) vient du fait que l'on utilise pour ces derniers des fonctions de forme quadratiques pour discrétiser sur chaque bord la rotation β_s dans le plan sz où s est la coordonnée le long des côtés. La rotation β_n dans le plan nz où n est la normale au côté dirigée vers l'extérieur de l'élément reste discrétisée avec des fonctions de forme bilinéaires (voir la [Figure 2.1.3.2-a]).

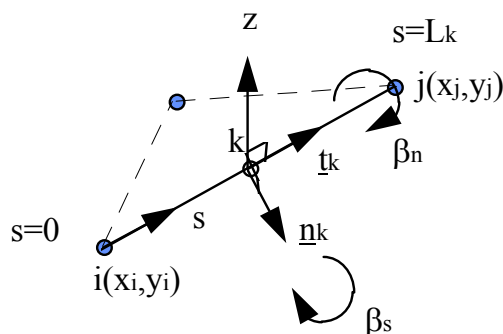


Figure 2.1.3.2-a : Élément de plaque avec cisaillement transverse

2.1.3.3 Les différences entre les éléments coques

On distingue les éléments de coques linéiques COQUE_C_PLAN, COQUE_D_PLAN et axisymétrique COQUE_AXIS des éléments de COQUE_3D.

Les premiers sont utilisés pour modéliser des structures invariantes selon l'axe Oz ou de révolution d'axe Oy et les seconds dans tous les autres cas. Dans le cas des coques invariantes suivant la direction z , on distingue les coques libres en z (contraintes planes COQUE_C_PLAN) des coques bloquées en z (déformations planes COQUE_D_PLAN). Pour ces éléments de coques, les mailles supports sont linéiques à 3 nœuds. Le nombre de degrés de liberté de ces éléments est de 9.

Les éléments de coques quelconques `COQUE_3D` ont des mailles support triangulaires à 7 nœuds ou quadrangulaires à 9 nœuds :

- Dans le cas de mailles triangulaires, le nombre de degrés de liberté pour les translations est 6 (les inconnues sont les déplacements aux nœuds sommets et sur les milieux des côtés du triangle) et celui des rotations est 7 (les inconnues sont les 3 rotations aux points précédents et au centre du triangle). Le nombre de degrés de liberté total de l'élément est donc de $Nddle=3 \times 6 + 3 \times 7 = 39$.
- Dans le cas de mailles quadrangulaires à 9 nœuds, le nombre de degrés de liberté pour les translations est 8 (les inconnues sont les déplacements aux nœuds sommets et sur les milieux des côtés du quadrangle) et celui des rotations est 9 (les inconnues sont les 3 rotations aux points précédents et au centre du quadrangle). Le nombre de degrés de liberté total de l'élément est donc de $Nddle=3 \times 8 + 3 \times 9 = 51$. Ces éléments ont donc à peu près deux fois plus de degrés de liberté que les éléments de plaque de la famille `DKT` correspondants. Leur coût en temps, à nombre égal, dans un calcul sera donc plus important.

Les éléments de `COQUE_3D` prennent en compte automatiquement la correction de métrique entre la surface moyenne et les surfaces supérieure et inférieure. Pour les éléments linéiques, cette correction doit être activée par l'utilisateur (voir le paragraphe 14). La correction de métrique apporte une contribution en h/L à la contrainte et en $(h/L)^2$ en déplacement (voir [V7.90.03]). Pour les plaques cette correction est sans objet.

Pour les éléments de coques le coefficient de correction de cisaillement k en comportement isotrope peut être modifié par l'utilisateur. Ce coefficient de correction de cisaillement est donné dans `AFFE_CARA_ELEM` sous le mot-clé `A_CIS`. Par défaut, si l'utilisateur ne précise rien dans `AFFE_CARA_ELEM` cela revient à utiliser la théorie avec cisaillement de REISSNER ; le coefficient de cisaillement est alors mis à $k=5/6$. Si le coefficient de cisaillement k vaut 1 on se place dans le cadre de la théorie de HENCKY-MINDLIN_NAGHDI et s'il devient très grand ($\approx 10^6 h/L$) on se rapproche de la théorie de LOVE_KIRCHHOFF.

En pratique il est conseillé de ne pas changer ce coefficient. En effet, ces éléments fournissent une solution physiquement correcte, que la coque soit épaisse ou mince, avec le coefficient $k = 5/6$.

2.2 Commandes à utiliser

2.2.1 Discretisation spatiale et affectation d'une modélisation : opérateur `AFFE_MODELE`

Dans cette partie, on décrit le choix et l'affectation d'une des modélisations plaque ou coques ainsi que les degrés de liberté et les mailles associées. La plupart des informations décrites sont extraites des documentations d'utilisation des modélisations ([U3.12.01] : Modélisation `DKT` - `DST` - `Q4G`, [U3.12.02] : Modélisations `COQUE_C_PLAN`, `COQUE_D_PLAN`, `COQUE_AXIS`).

2.2.1.1 Degrés de libertés

Les degrés de liberté de discrétisation sont en chaque nœud de la maille support les composantes de déplacement aux nœuds de la maille support, sauf indication.

Modélisation	Degrés de liberté (à chaque nœud)	Remarques
COQUE_3D	DX DY DZ DRX DRY DRZ DRX DRY DRZ au noeud central	Les nœuds appartiennent au feuillet moyen de la coque
DKT	DX DY DZ DRX DRY DRZ	Les nœuds appartiennent à la facette tangente au feuillet moyen de la coque
DST	DX DY DZ DRX DRY DRZ	Les nœuds appartiennent à la facette tangente au feuillet moyen de la coque
Q4G	DX DY DZ DRX DRY DRZ	Les nœuds appartiennent à la facette tangente au feuillet moyen de la coque
COQUE_C_PLAN	DX DY DRZ	Les nœuds appartiennent à la surface moyenne de la coque
COQUE_D_PLAN	DX DY DRZ	Les nœuds appartiennent à la surface moyenne de la coque
COQUE_AXIS	DX DY DRZ	Les nœuds appartiennent à la surface moyenne de la coque
GRILLE	DX DY DZ DRX DRY DRZ	Les nœuds appartiennent à la facette tangente au feuillet moyen de la coque.

2.2.1.2 Mailles support des matrices de rigidité

Modélisation	Maille	Élément fini	Remarques
COQUE_3D	TRIA7 QUAD9	MEC3TR7H MEC3QU9H	Mailles non supposées planes
DKT	TRIA3 QUAD4	MEDKTR3 MEDKQU4	Mailles planes
DST	TRIA3 QUAD4	MEDSTR3 MEDSQU4	Mailles planes
Q4G	QUAD4	MEQ4QU4	Mailles planes
COQUE_C_PLAN	SEG3	METCSE3	Mailles non supposées planes
COQUE_D_PLAN	SEG3	METDSE3	Mailles non supposées planes
COQUE_AXIS	SEG3	MECXSE3	Mailles non supposées planes
GRILLE	TRIA3	MEGRDKT	Mailles planes

La modélisation GRILLE utilisée pour modéliser les structures en béton armé a les mêmes caractéristiques de maillage que la modélisation DKT avec triangles. Pour l'instant, cette modélisation n'est disponible que pour la maille TRIA3.

Remarque :

Dans un maillage, pour transformer des mailles TRIA7 en mailles QUAD9, on peut utiliser l'opérateur MODI_MALLAGE.

2.2.1.3 Mailles support des chargements

Tous les chargements applicables aux facettes des éléments utilisés ici sont traités par discrétisation directe sur la maille support de l'élément en formulation déplacement. La pression et les autres forces surfaciques ainsi que la pesanteur sont des exemples de chargements s'appliquant directement sur les facettes. Aucune maille spéciale de chargement n'est donc nécessaire pour les faces des éléments de plaques et de coques.

Pour les chargements applicables sur les bords des éléments, on a :

Modélisation	Maille	Elément fini	Remarques
COQUE_3D	SEG3	MEBOCQ3	
DKT	SEG2	MEBODKT	
DST	SEG2	MEBODST	
Q4G	SEG2	MEBOQ4G	
COQUE_C_PLAN	POI1		Mailles support réduites à 1 point
COQUE_D_PLAN	POI1		Mailles support réduites à 1 point
COQUE_AXIS	POI1		Mailles support réduites à 1 point
GRILLE			

Les forces réparties, linéiques, de traction, de cisaillement, les moments fléchissant appliqués sur les bords de structures coque entrent dans cette catégorie de chargements.

2.2.1.4 Modèle : AFFE_MODELE

L'affectation de la modélisation passe par l'opérateur AFFE_MODELE [U4.41.01].

AFFE_MODELE	Remarques
AFFE	
PHENOMENE :	'MECANIQUE'
MODELISATION	'COQUE_3D'
	'DKT'
	'DST'
	'Q4G'
	'COQUE_C_PLAN'
	'COQUE_D_PLAN'
	'COQUE_AXIS'
	'GRILLE'

Remarque :

| Il est prudent de vérifier le nombre d'éléments affectés.

2.2.2 Caractéristiques élémentaires : AFFE_CARA_ELEM

Dans cette partie, les opérandes caractéristiques des éléments de plaques et de coques sont décrites. La documentation d'utilisation de l'opérateur AFFE_CARA_ELEM est [U4.42.01].

AFFE_CARA_ELEM	COQUE_3D	DKT	DST	Q4G	COQUE_C_PLAN COQUE_D_PLAN COQUE_AXIS
COQUE	•	•	•	•	•
EPAIS	•	•	•	•	•
ANGL REP	•	•	•	•	
A CIS	•				•
COEF RIGI DRZ	•	•	•	•	•
EXCENTREMENT		•	•	•	
INNER_ROTATION		•	•	•	
MODI_METRIQUE	•				•

AFFE_CARA_ELEM	GRILLE
GRILLE	•
EPAIS	•
ANGL REP	•
EXCENTREMENT	•
ANGL L	•
POUR CENT L	•
POUR CENT T	•
SECTION_L	•

Les caractéristiques affectables sur les éléments de plaque ou de coque sont :

- l'épaisseur EPAIS constante sur chaque maille, puisque le maillage ne représente que le feuillet moyen.
- le coefficient de correction du cisaillement transverse A_CIS pour les coques courbes isotropes.
- la prise en compte de la correction de métrique MODI_METRIQUE entre la surface moyenne et les surfaces supérieure et inférieure (effective uniquement pour les COQUE_C_PLAN, COQUE_D_PLAN, COQUE_AXIS).
- une direction de référence \underline{d} définie par deux angles nautiques donnés dans le repère global, par le mot-clé ANGL_REP. La projection de cette direction de référence sur le plan tangent à la coque fixe X1, la première direction du repère local. La normale au plan tangent en fixe une seconde et le produit vectoriel des deux vecteurs associés permet de définir le trièdre local. nécessaire à la fourniture des caractéristiques matériau non isotrope et à l'analyse des efforts généralisés, de l'état de contrainte ou des déformations généralisées et tridimensionnelles. L'utilisateur devra veiller à ce que l'axe de référence choisi ne se retrouve pas parallèle à la normale de certaines mailles du maillage. Par défaut, cette direction de référence est l'axe X du repère global de définition du maillage.
- une fonctionnalité de DEFI_GROUP permet de créer automatiquement un groupe de mailles dont la normale est comprise dans un angle solide donné, d'axe la direction de référence. Cette commande peut être utilisée en pré-traitement pour affecter des données matériau non isotropes ou en post-traitement après un calcul de coque.

- l'excentrement (constant pour tous les nœuds de la maille) `EXCENTREMENT` de chacune d'elles par rapport à la maille support. Cette distance est mesurée sur la normale de la maille support. Dans le cas excentré les inerties de rotation sont obligatoirement prises en compte et `INER_ROTA` est mis à OUI.

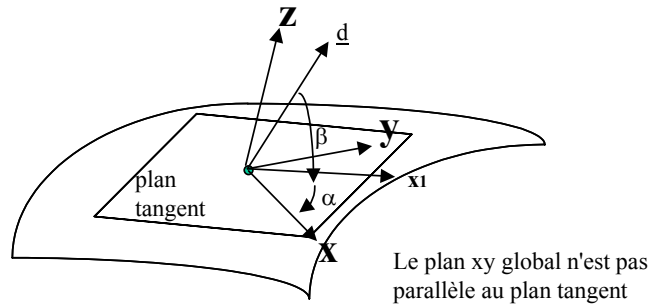


Figure 2.2.2-a : Repère global et plan tangent

Pour la modélisation `GRILLE`, les données géométriques suivantes sont nécessaires pour modéliser les nappes d'armatures (voir [3]) :

- l'excentrement (constant pour tous les nœuds de la maille) `EXCENTREMENT` de chacune d'elles par rapport à la maille support. Cette distance est mesurée sur la normale de la maille support qui, en pratique, est superposable à celle du béton.
- la direction de référence `d` définie précédemment par `ANGL_REP`.
- la direction des armatures par rapport au vecteur `X1` du plan tangent. Une des directions `ANGL_L` suffit car la grille est constituée d'armatures orthogonales entre elles.
- les pourcentages de section d'armature dans la direction 1 `POUR_CENT_L` et la direction 2 `POUR_CENT_T` qui lui est orthogonale.
- la somme des sections d'armatures par unité de largeur dans la direction 1 `SECTION_L`.

Remarque importante :

| *Orientation des éléments de plaques et de coques*

Le sens des normales à chaque élément est un problème récurrent concernant l'utilisation de ce type d'élément, par exemple lorsque l'on applique des chargements de type pression, ou bien pour définir un excentrement ou un repère local.

Par défaut pour les éléments surfaciques l'orientation est donnée par le produit vectoriel $12 \wedge 13$ pour un triangle numéroté 123 (`DKT`,...) ou 1234567 (`COQUE_3D`) et $12 \wedge 14$ pour un quadrangle numéroté 1234 (`DKQ`,...) ou 123456789 (`COQUE_3D`). Pour les coques linéiques `n` est donnée par la formule du paragraphe 2.1.1.1 avec `t` orienté dans le sens de parcours de la maille au niveau du maillage. Généralement, ces données sont accessibles en regardant dans le fichier de maillage, ce qui n'est pas très pratique pour l'utilisateur. En outre il faut qu'il vérifie la cohérence de son maillage et s'assurer que toutes les mailles ont bien la même orientation.

L'utilisateur peut modifier automatiquement l'orientation des éléments du maillage en imposant une direction de normale, pour un maillage ou une partie de maillage utilisant des modélisations de coque et quelle que soit le type de modélisation. La réorientation des éléments se fait par le biais de l'opérateur `ORIE_NORM_COQU` de la commande `MODI_MALLAGE` [U4.12.05]. Le principe est le suivant : on définit sous `ORIE_NORM_COQU` une direction par le biais d'un vecteur et un nœud appartenant au groupe de mailles à réorienter. Si le vecteur introduit n'est pas dans le plan de la maille sélectionnée par `MODI_MALLAGE`, on en déduit automatiquement une direction de normale obtenue comme le vecteur donné moins sa projection sur le plan de la maille. Toutes les mailles du groupe connexes à celles initialement sélectionnée auront alors la même orientation de normale automatiquement. Par ailleurs une vérification automatique de la même orientation des mailles connexes est effectuée par le biais de l'opérateur `VERI_NORM` de la commande `AFFE_CHAR_MECA` [U4.25.01].

2.2.3 Matériaux : `DEFI_MATERIAU`

La définition du comportement d'un matériau s'effectue à l'aide de l'opérateur `DEFI_MATERIAU` [U4.43.01].

<code>DEFI_MATERIAU</code>	<code>COQUE_3D</code>	<code>DKT</code>	<code>DST</code>	<code>Q4G</code>	<code>COQUE_C_PLAN</code> <code>COQUE_D_PLAN</code> <code>COQUE_AXIS</code>	<code>GRILLE</code>
COMP. LINEAIRE						
<code>ELAS</code>	•	•	•	•	•	•
<code>ELAS_FO</code>	•	•	•	•	•	•
<code>ELAS_ORTHO</code>	•	•	•	•		
<code>ELAS_COQUE</code>		•	•	•		
<code>ELAS_COQUE_FO</code>		•	•	•		
<code>DEFI_MATERIAU</code>	<code>COQUE_3D</code>	<code>DKT</code>	<code>DST</code>	<code>Q4G</code>	<code>COQUE_C_PLAN</code> <code>COQUE_D_PLAN</code> <code>COQUE_AXIS</code>	<code>GRILLE</code>
COMP. NON LINEAIRE						
<code>TRACTION</code>	•	•			•	
<code>ECRO_LINE</code>	•	•			•	
<code>ECRO_LINE_FO</code>	•	•			•	
<code>CHABOCHE</code>	•	•			•	
<code>DEFI_COQU_MULT</code>		•	•	•		
<code>DEFI_MATERIAU</code>	<code>COQUE_3D</code>	<code>DKT</code>	<code>DST</code>	<code>Q4G</code>	<code>COQUE_C_PLAN</code> <code>COQUE_D_PLAN</code> <code>COQUE_AXIS</code>	<code>GRILLE</code>
PAR COUCHE						
Tous les comp. <code>C_PLAN</code>	•	•			•	

Les matériaux utilisés avec l'ensemble des éléments plaques ou coques peuvent avoir des comportements élastiques en contraintes planes dont les caractéristiques linéaires sont constantes ou fonctions de la température. Les comportements non linéaires en contraintes planes sont disponibles pour les modélisations `DKT` et coques. Pour plus d'informations sur ces non linéarités on peut se reporter au paragraphe [§2.3.2].

Les structures minces en matériaux composites ne peuvent être traitées actuellement que par les modélisations plaques, en utilisant `DEFI_COQU_MULT` avec des caractéristiques de matériaux homogénéisés. On peut aussi introduire directement les coefficients de rigidité des matrices de membrane, flexion et cisaillement avec `ELAS_COQUE`. Ces coefficients sont donnés dans le repère local de l'élément défini par `ANGL_REP`. Il est à noter que les termes de cisaillement ne sont pris en compte avec le comportement `ELAS_COQUE` que pour les éléments `DST` et `Q4G`. Ils ne sont pas pris en compte avec les éléments `DKT`.

Afin de faciliter la compréhension, nous avons représenté sur la figure ci-dessous les différents repères utilisés.

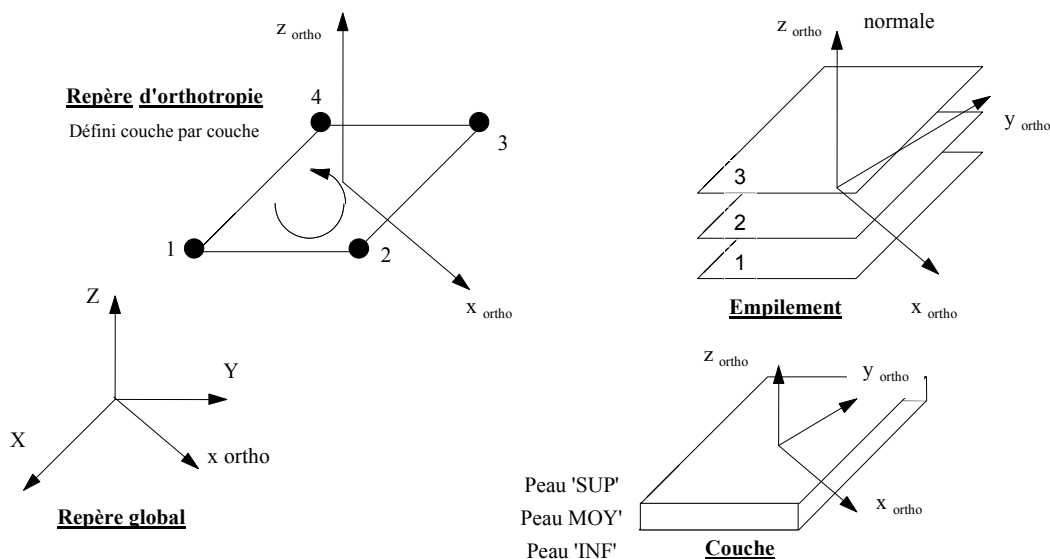


Figure 2.2.3-a : Repères utilisés pour la définition du matériau

L'exemple suivant est extrait du cas-test SSL117B et illustre la syntaxe de `DEFI_COQU_MULT` :

```
MU2=DEFI_COQU_MULT(COUCHE=_F(EPAIS=0.2,
                                MATER=MAT1B,
                                ORIENTATION=0.0, ), );
```

Dans cet exemple, on définit un composite multicouche d'épaisseur 0.2, le matériau étant défini par MAT1B, et l'angle de la 1ère direction d'orthotropie (sens longitudinal ou sens des fibres) étant nul. On se reportera à la documentation [U4.42.03] pour plus de détails concernant l'utilisation de `DEFI_COQU_MULT`.

2.2.4 Chargements et conditions limites : `AFFE_CHAR_MECA` et `AFFE_CHAR_MECA_F`

L'affectation des chargements et des conditions aux limites sur un modèle mécanique s'effectue à l'aide de l'opérateur `AFFE_CHAR_MECA`, si les chargements et les conditions aux limites mécaniques sur un système sont des valeurs réelles ne dépendant d'aucun paramètre, ou bien `AFFE_CHAR_MECA_F`, si ces valeurs sont fonctions de la position ou de l'incrément de chargement.

La documentation d'utilisation d'`AFFE_CHAR_MECA` et `AFFE_CHAR_MECA_F` est [U4.44.01].

2.2.4.1 Liste des mot-clés facteur d'AFFE_CHAR_MECA

AFFE_CHAR_MECA	COQUE_3D	DKT	DST	Q4G	COQUE_C_PLAN COQUE_D_PLAN COQUE_AXIS	GRILLE
DDL_IMPO
FACE_IMPO
LIAISON_DDL
LIAISON_OBLIQUE
LIAISON_GROUP
CONTACT
LIAISON_UNIF
LIAISON_SOLIDE
LIAISON_ELEM
LIAISON_COQUE
FORCE_NODALE

DDL_IMPO	Mot clé facteur utilisable pour imposer, à des nœuds ou à des groupes de nœuds, une ou plusieurs valeurs de déplacement.
FACE_IMPO	Mot clé facteur utilisable pour imposer, à tous les nœuds d'une face définie par une maille ou un groupe de mailles, une ou plusieurs valeurs de déplacements (ou de certaines grandeurs associées).
LIAISON_DDL	Mot clé facteur utilisable pour définir une relation linéaire entre des degrés de liberté de deux ou plusieurs nœuds.
LIAISON_OBLIQUE	Mot clé facteur utilisable pour appliquer, à des nœuds ou des groupes de nœuds, la même valeur de déplacement définie composante par composante dans un repère oblique quelconque.
LIAISON_GROUP	Mot clé facteur utilisable pour définir des relations linéaires entre certains degrés de liberté de couples de nœuds, ces couples de nœuds étant obtenus en mettant en vis-à-vis deux listes de mailles ou de nœuds.
CONTACT	Mot clé facteur utilisable pour notifier des conditions de contact et de frottement entre deux ensembles de mailles.
LIAISON_UNIF	Mot clé facteur permettant d'imposer une même valeur (inconnue) à des degrés de liberté d'un ensemble de nœuds.
LIAISON_SOLIDE	Mot clé facteur permettant de modéliser une partie indéformable d'une structure.
LIAISON_ELEM	Mot clé facteur qui permet de modéliser les raccords d'une partie coque avec une partie poutre ou d'une partie coque avec une partie tuyau (voir paragraphe 2.2.4.5).
LIAISON_COQUE	Mot clé facteur permettant de représenter le raccord entre des coques au moyen de relations linéaires.
FORCE_NODALE	Mot clé facteur utilisable pour appliquer, à des nœuds ou des groupes de nœuds, des forces nodales, définies composante par composante dans le repère GLOBAL ou dans un repère oblique défini par 3 angles nautiques.

AFFE_CHAR_MECA particuliers	COQUE_3D	DKT	DST	Q4G	COQUE_C_PLAN COQUE_D_PLAN COQUE_AXIS	GRILLE
FORCE_ARETE		
FORCE_COQUE						
global
pres
local tangent
PESANTEUR
PRES_REP
ROTATION	.				.	
TEMP_CALCULEE
EPSI_INIT	

FORCE_ARETE	Mot clé facteur utilisable pour appliquer des forces linéiques sur une arête d'un élément de coque. Pour les éléments linéiques l'équivalent revient à appliquer une force nodale aux nœuds supports de l'élément. Il n'y a donc pas de terme dédié particulier. En revanche, il nécessite des éléments de bords.
FORCE_COQUE	Mot clé facteur utilisable pour appliquer des efforts surfaciques (pression par exemple) sur des éléments définis sur tout le maillage ou sur une ou plusieurs mailles ou des groupes de mailles. Ces efforts peuvent être donnés dans le repère global ou dans un repère de référence défini sur chaque maille ou groupe de mailles; ce repère est construit autour de la normale à l'élément de coque et d'une direction fixe (voir paragraphe 2.2.2).
PESANTEUR	Mot clé facteur utilisable pour un chargement de type pesanteur.
PRES_REP	Mot clé facteur utilisable pour appliquer une pression sur une ou plusieurs mailles, ou des groupes de mailles.
ROTATION	Mot clé facteur utilisable pour calculer le chargement dû à la rotation de la structure.
TEMP_CALCULEE	Permet de récupérer le chargement thermique issu d'un calcul thermique linéaire ou non linéaire. Cette fonctionnalité est utile pour les chaînes thermomécaniques, point qui sera abordé au paragraphe 4.
EPSI_INIT	Mot clé facteur utilisable pour appliquer un chargement de déformation initiale.

Remarque :

Les efforts de pression s'exerçant sur les éléments de plaques peuvent s'appliquer soit par FORCE_COQUE (pres) soit par PRES_REP. L'utilisateur devra donc faire attention (en version 5) à ne pas appliquer deux fois le chargement de pression pour les éléments concernés, surtout dans les cas où les modélisations de plaques seraient mélangées avec d'autres modélisations utilisant PRES_REP.

Par ailleurs il faut noter que les efforts de pression, que ce soit avec FORCE_COQUE (pres) ou PRES_REP sont tels qu'une pression positive agit dans le sens contraire à celui de la normale à l'élément. Par défaut, cette normale est dépendante du sens de parcours des nœuds d'un élément, ce qui n'est pas toujours très facile pour l'utilisateur. En outre il faut que celui-ci s'assure que tous ces éléments sont orientés de la même manière. On conseille donc d'imposer l'orientation de ces éléments par le biais de l'opérateur ORIE_NORM_COQU de la commande MODI_MAILLAGE (voir paragraphe [§2.2.2]).

2.2.4.2 Liste des mot-clés facteur d'AFFE_CHAR_MECA_F

Les mot-clés facteur généraux de l'opérateur AFFE_CHAR_MECA_F sont identiques à ceux de l'opérateur AFFE_CHAR_MECA présentés ci-dessus.

AFFE_CHAR_MECA_F particuliers	COQUE_3D	DKT	DST	Q4G	COQUE_C_PLAN COQUE_D_PLAN COQUE_AXIS	GRILLE
FORCE ARETE		
FORCE_COQUE global
pres
local tangent

Les chargements de pression fonctions de la géométrie peuvent être renseignés par le biais de FORCE_COQUE (pres).

2.2.4.3 Application d'une pression : mot-clé FORCE_COQUE

Le mot-clé facteur FORCE_COQUE permet d'appliquer des efforts surfaciques sur des éléments de type coque (DKT, DST, Q4G, ...) définis sur tout le maillage ou sur une ou plusieurs mailles ou des groupes de mailles. Suivant le nom de l'opérateur appelé, les valeurs sont fournies directement (AFFE_CHAR_MECA) ou par l'intermédiaire d'un concept fonction (AFFE_CHAR_MECA_F).

AFFE_CHAR_MECA AFFE_CHAR_MECA_F		Remarques
FORCE_COQUE :		.
Repère global	TOUT: 'OUI'	• Lieu d'application du chargement
	MAILLE	
	GROUP_MA	
	FX	
	FY	
	FZ	
Repère local	MX	• Fourni directement pour AFFE_CHAR_MECA, sous forme de fonction pour AFFE_CHAR_MECA_F
	MY	
	MZ	
	PLAN	
	'MOY'	
	'INF'	
Repère local	'SUP'	• Permet de définir un torseur d'efforts sur le plan moyen, inférieur, supérieur ou du maillage (éléments DKT et DST)
	'MAIL'	
	F1	
	F2	
	F3	
	MF1	
Repère local	MF2	• Fourni directement pour AFFE_CHAR_MECA, sous forme de fonction pour AFFE_CHAR_MECA_F

Nous renvoyons au paragraphe correspondant au mot-clé FORCE_COQUE du document d'utilisation des opérateurs AFFE_CHAR_MECA et AFFE_CHAR_MECA_F.

2.2.4.4 Conditions limites : mots-clés DDL_IMPO et LIAISON_*

Le mot-clé facteur DDL_IMPO permet d'imposer, à des nœuds introduits par un (au moins) des mots clés : TOUT, NOEUD, GROUP_NO, MAILLE, GROUP_MA, une ou plusieurs valeurs de déplacement (ou de certaines grandeurs associées). Suivant le nom de l'opérateur appelé, les valeurs sont fournies directement (AFFE_CHAR_MECA) ou par l'intermédiaire d'un concept fonction (AFFE_CHAR_MECA_F).

Les opérandes disponibles pour DDL_IMPO, sont listés ci-dessous :

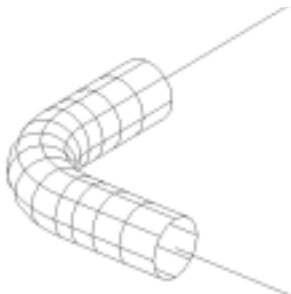
- DX DY DZ Blocage sur la composante de déplacement en **translation**
- DRX DRY DRZ Blocage sur la composante de déplacement en **rotation**

2.2.4.5 Raccords coques avec autres éléments mécaniques

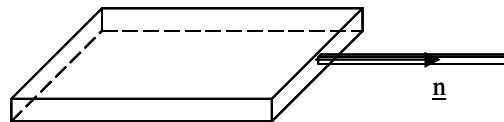
Ces raccords doivent satisfaire les exigences établies dans [bib4] et que l'on retrouve en particulier dans le raccord 3D-POUTRE en [R3.03.03].

Les raccords disponibles avec les éléments de plaques et de coques sont les suivants :

- Raccord Poutre-Coque** : il s'agit d'établir la liaison entre un nœud extrémité d'un élément de poutre et un groupe de mailles de bord d'éléments de coques. Les théories de poutre et de plaque ne connaissent que des coupures normales à la fibre ou à la surface moyenne. Les raccords ne peuvent avoir lieu que suivant ces fibres ou surfaces moyennes. Le raccord poutre-coque est **réalisable pour des poutres dont la fibre neutre est orthogonale aux normales aux facettes des plaques ou des coques**. L'étendre à d'autres configurations (une poutre arrivant perpendiculairement au plan d'une plaque par exemple) demande une étude de faisabilité car les éléments de plaque ou de coque n'ont pas de rigidité associée à une rotation dans le plan perpendiculaire à la normale à la surface moyenne. Le raccord est utilisable en utilisant le mot-clé `LIAISON_ELEM` : (OPTION : 'COQ_POU') de `AFFE_CHAR_MECA`.
- Raccord Coque-Tuyau** : il s'agit d'établir la liaison entre un nœud extrémité d'un élément de tuyau et un groupe de maille de bord d'éléments de coques. La formulation du raccord coques-tuyaux est présenté dans le document de référence [R3.08.06]. Les théories de tuyau et de plaque, ne connaissent que des coupures normales à la fibre ou à la surface moyenne. Les raccords ne peuvent avoir lieu que suivant ces fibres ou surfaces moyennes. Le raccord coque-tuyau est réalisable pour des tuyaux dont la fibre neutre est orthogonale aux normales aux facettes des plaques ou des coques. Le raccord est utilisable en utilisant le mot-clé `LIAISON_ELEM` : (OPTION : 'COQ TUYAU') de `AFFE_CHAR_MECA`.



Raccord coque - tuyau

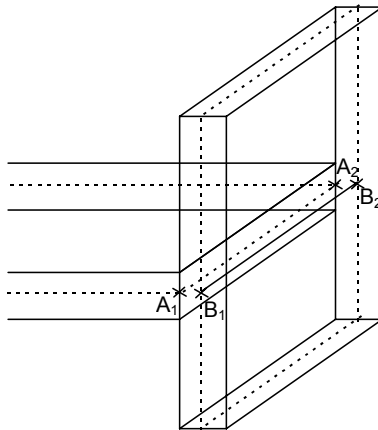


\underline{n} normale à la facette de la coque = tangente à la poutre

Raccord plaque ou coque - poutre

Figure 2.2.4.5-a : Raccords coques avec autres éléments mécaniques

- Raccord Coque – 3D massif** : le raccord **coque-3D** massif est à l'étude mais il sera limité dans un premier temps aux cas où la normale au solide est orthogonale à la normale à l'une des facettes de l'élément de plaque ou de coque (voir [bib4]).
- Raccord entre éléments de Coques** : pour raccorder deux éléments de coques entre eux, on utilise le mot-clé `LIAISON_COQUE` d'`AFFE_CHAR_MECA` (_F) (documentation [U4.44.01]). Ce raccord est effectués au moyen de relations linéaires. L'approche classique admet que 2 plans maillés en coques se coupent selon une droite qui appartient au maillage de la structure. Afin d'éviter que le volume qui est l'intersection des 2 coques soit compté deux fois, on arrête le maillage d'une coque perpendiculaire à une coque donnée au niveau de la peau supérieure ou inférieure de cette dernière. Sur la [Figure 2.2.4.5-b], la liaison entre les 2 coques se fait par des liaisons de corps solide entre les nœuds en vis-à-vis des segments A_1 A_2 et B_1 B_2 .

**Figure 2.2.4.5-b : Raccord entre éléments de coques**

Des cas-tests permettant de valider ces raccords sont disponibles dans la section exemples,

2.3 Résolution

2.3.1 Calculs linéaires : MECA_STATIQUE et autres opérateurs linéaires

Les calculs linéaires s'effectuent en petites déformations. Plusieurs opérateurs de résolution linéaires sont disponibles :

- MECA_STATIQUE : résolution d'un problème de mécanique statique linéaire ([U4.51.01]) ;
- MACRO_ELAS_MULT : calcule des réponses statiques linéaires pour différents cas de charges ou modes de Fourier. ([U4.51.02]).
- MODE_ITER_SIMULT : calcul des valeurs et vecteurs propres par des méthodes de sous espaces. ([U4.52.03]).
- MODE_ITER_INV : calcul des valeurs et vecteurs propres par la méthode d'itérations inverses ([U4.52.04]).
- MODE_ITER_CYCL : calcul des modes propres d'une structure à symétrie cyclique ([U4.52.05]) ;
- DYNA_LINE_TRAN : calcul de la réponse dynamique transitoire à une excitation temporelle quelconque ([U4.53.02]) ;
- DYNA_TRAN_MODAL : calcul est effectué par superposition modale ou par sous-structuration ([U4.53.21]) ;

2.3.2 Calculs non linéaires : STAT_NON_LINE et DYNA_NON_LINE

2.3.2.1 Comportements et hypothèses de déformations disponibles

Les informations suivantes sont extraites de la documentation d'utilisation de l'opérateur STAT_NON_LINE : [U4.51.03].

			COQUE_3D	DKT	DST	Q4G	COQUE_C_PLAN COQUE_D_PLAN COQUE_AXIS
COMP_INCR (petite déformations)	RELATION	Toutes les relations disponibles en contraintes planes	•	•			•
		Les relations 3D en utilisant : ALGO C PLAN: 'DEBORST'	•	•			•
	DEFORMATION : 'GREEN_GR'	Coque_3D en grands déplacements et grandes rotations disponible avec comportements incrémentaux non linéaires, mais en petites déformations	•				
COMP_ELAS (grande déformations)	RELATION	ELAS					
	DEFORMATION : 'GREEN GR'		•				
	TYPE_CHARGE : 'SUIV'	Pression suiveuse	•				

Tous les comportements non linéaires mécaniques de contraintes planes du code sont accessibles. On distingue les relations de comportement incrémentales (mot clé facteur COMP_INCR) des relations de comportements élastiques non linéaires (mot clé facteur COMP_ELAS). La relation de comportement relie les taux de déformation aux taux de contraintes.

Pour la modélisation GRILLE des structures en béton armé, les comportements non linéaires correspondent à des comportements incrémentaux particuliers dans STAT_NON_LINE (COMP_INCR) :

- GRILLE_ISOT_LINE pour la plasticité à écrouissage isotrope,
- GRILLE_ISOT_CINE pour la plasticité à écrouissage cinématique bi linéaire,
- GRILLE_PINTO_MEN pour le comportement de Pinto Menegotto.

De plus, le comportement du feuillet moyen en béton est donné par une loi de type NADAI_B.

Le concept RESULTAT de STAT_NON_LINE contient des champs de déplacements, de contraintes et de variables internes aux points d'intégration toujours calculées aux points de gauss :

- DEPL : champs de déplacements.
- SIEF_ELGA : Tenseur des contraintes par élément aux points d'intégration (COQUE_3D et DKT) dans le repère local. Pour chaque couche, on stocke dans l'épaisseur et pour chaque épaisseur sur les points d'intégration surfacique. Ainsi si on veut des informations sur une contrainte pour la couche NC, au niveau NCN (NCN = -1 si inférieur, NCN = 0 si milieu, NCN = +1 si supérieur) pour le point d'intégration surfacique NG, il faudra regarder la valeur donnée par le point défini dans l'option POINT tel que : NP = 3*(NC-1)*NPG+(NCN+1)*NPG+NG où NPG est le nombre total de points d'intégration surfacique de l'élément de COQUE_3D (7 pour le triangle et 9 pour le quadrangle) et de l'élément DKT.

- **VARI_ELGA** : Champ de variables internes (DKT et COQUE_3D) par élément aux points d'intégration surfacique. Pour chaque point d'intégration surfacique, on stocke les informations sur les couches en commençant par la première, niveau 'INF'. Le nombre de variables représentées vaut donc $2 \times \text{NCOU} \times \text{NBVARI}$ où NBVARI représente le nombre de variables internes.

Il peut être enrichi des champs suivants, calculés en post-traitement par l'opérateur **CALC_ELEM** :

- **SIEF_ELNO_ELGA** : active le calcul du tenseur des efforts généralisés par élément aux nœuds (efforts membranaires, moments fléchissants, efforts tranchants), dans le repère utilisateur (défini au paragraphe [§2.2.2]).
- **VARI_ELNO_ELGA** : active le calcul du champ de variables internes par élément aux nœuds dans l'épaisseur (par couche SUP/MOY/INF dans l'épaisseur sauf indication).

2.3.2.2 Détail sur les points d'intégration

Pour les calculs non-linéaires la méthode d'intégration pour les éléments de plaque et de coques est une méthode d'intégration par **couches**, dont le nombre est défini par l'utilisateur. Pour chaque couche, sauf modélisation **GRILLE**, on utilise une méthode de Simpson à trois points d'intégration, au milieu de la couche et en peaux supérieure et inférieure de couche. Pour N couches le nombre de points d'intégration dans l'épaisseur est de $2N+1$.

Pour traiter les non-linéarités matériau, on conseille d'utiliser de 3 à 5 couches dans l'épaisseur pour un nombre de points d'intégration valant 7, 9 et 11 respectivement. Pour la rigidité tangente, on calcule pour chaque couche, en contraintes planes, la contribution aux matrices de rigidité de membrane, de flexion et de couplage membrane-flexion. Ces contributions sont ajoutées et assemblées pour obtenir la matrice de rigidité tangente totale. Pour chaque couche, on calcule l'état des contraintes et l'ensemble des variables internes, au milieu de la couche et en peaux supérieure et inférieure de couche. Ces informations sont disponibles dans **VARI_ELGA** et **SIEF_ELGA**. Le comportement plastique ne comprend pas les termes de cisaillement transverses qui sont traités de façon élastique, car le cisaillement transverse est découplé du comportement plastique.

Pour la modélisation **GRILLE** des structures en béton armé, il n'y a qu'un point d'intégration par couche.

2.3.2.3 Comportement non-linéaire géométrique

Les calculs en non-linéaire géométrique (grands déplacements et grandes rotations), disponibles avec la modélisation **COQUE_3D**, sont réalisées à l'aide de l'opérateur **STAT_NON_LINE**, en utilisant le mot-clé **COMP_ELAS**, comme illustré dans l'exemple suivant :

```
STAT_NON_LINE (
    COMP_ELAS ( RELATION      : 'ELAS'
                COQUE_NCOU    : 3
                DEFORMATION   : 'GREEN_GR' )
)
```

ou bien en utilisant un comportement incrémental (mot-clé **COMP_INCR**) en petites déformations.

Il est possible d'appliquer sur les éléments de **COQUE_3D**, des pressions suiveuses. Ce chargement a la particularité de suivre la géométrie de la structure au cours de sa déformation (par exemple : la pression hydrostatique reste toujours perpendiculaire à la géométrie déformée). Pour prendre en compte ce type de chargement, il faut préciser dans l'opérateur **STAT_NON_LINE** les informations suivantes :

```
STAT_NON_LINE (
    EXCIT ( CHARGE : pres
            TYPE_CHARGE : 'SUIV' )
)
```


Le comportement non-linéaire géométrique des structures peut présenter des instabilités (flambement, snap-through/snap-back...). La détermination et le passage de ces points limites, ne peuvent pas être obtenus en imposant le chargement, cependant les options de pilotage du chargement 'DDL_IMPO' ou 'LONG_ARC' de l'opérateur STAT_NON_LINE permettent de franchir ces points critiques.

2.3.2.4 Flambement linéaire

Les calculs en flambement linéaire sont similaires à la recherche de fréquences propres et de modes de vibration. Le problème à résoudre s'exprime sous la forme :

Trouver $(\lambda, X) \in (R, R^N)$ tels que $AX = \lambda BX$

où A est la matrice de rigidité
B est la matrice de rigidité géométrique (calculée avec l'option RIGI_GEOM de CALC_MATR_ELEM)
 λ est la charge critique
X est le mode de flambement associé à la charge critique

Les opérateurs MODE_ITER_INV [U4.52.04] et MODE_ITER_SIMULT [U4.52.03] sont utilisés pour déterminer la charge critique et le mode de flambement associé.

2.4 Calculs supplémentaires et post-traitements

2.4.1 Calculs de matrices élémentaires : opérateur CALC_MATR_ELEM

L'opérateur CALC_MATR_ELEM (documentation [U4.61.01]) permet de calculer des matrices élémentaires, qui sont ensuite assemblables par la commande ASSE_MATRICE (documentation [U4.61.22]).

Les options élémentaires de l'opérateur CALC_MATR_ELEM sont décrites ci-dessous :

CALC_MATR_ELEM	COQUE_3D	DKT	DST	Q4G	COQUE_C_PLAN COQUE_D_PLAN COQUE_AXIS	GRILLE
'AMOR_MECA'	•	•	•	•	•	•
'MASS_MECA'	•	•	•	•	•	•
'RIGI_GEOM'	•					
'RIGI_MECA'	•	•	•	•	•	•
'RIGI_MECA_HYST'	•	•	•	•	•	•

- AMOR_MECA : Matrice d'amortissement des éléments calculée par combinaison linéaire de la rigidité et de la masse.
- MASS_MECA : Matrice de masse.
- RIGI_GEOM : Matrice de rigidité géométrique (pour les grands déplacements).
- RIGI_MECA : Matrice de rigidité des éléments.
- RIGI_MECA_HYST : Rigidité hystérétique (complexe) calculée par le produit par un coefficient complexe d'amortissement structural de la rigidité simple.

2.4.2 Calculs par éléments : opérateur CALC_ELEM

On présente ci-après les options de post-traitement pour les éléments de plaques et de coques. Elles correspondent aux résultats que peut obtenir un utilisateur après un calcul thermomécanique (contraintes, déplacements, déformations, variables internes, etc...). Pour les structures modélisées par éléments de coques ou de poutres il est particulièrement important de savoir comment sont présentés les résultats de contraintes de façon à pouvoir les interpréter correctement. L'approche adoptée dans le Code_Aster consiste à observer les contraintes dans un repère particulier lié à l'élément dont l'axe de référence a été défini au paragraphe [§2.2.2]. En effet, pour une structure cylindrique les contraintes les plus faciles à interpréter ne sont pas les contraintes en repère cartésien mais les contraintes en coordonnées cylindriques. En outre cette approche permet une plus grande souplesse d'utilisation.

OPTIONS	COQUE_3D	DKT	DST	Q4G	COQUE_C_PLAN COQUE_D_PLAN COQUE_AXIS	GRILLE
'SIEF_ELGA_DEPL'
'SIGM_ELNO_DEPL'
'SIGM_ELNO_CART'						
'EQUI_ELNO_SIGM'	.	.				
'EFGE_ELNO_DEPL'
'EFGE_ELNO_CART'						
'EPSI_ELNO_DEPL'
'DEGE_ELNO_DEPL'	
'EPOT_ELEM_DEPL'
'ECIN_ELEM_DEPL'
'VNOR_ELEM_DEPL'		•MEDKTR3				.
'SIEF_ELNO_ELGA'	.	.				.
'VARI_ELNO_ELGA'	.	.				.
'SIGM_ELNO_COQU'	.	.				.
'VARI_ELNO_COQU'	.	.				.
NUME_COUCHE	
NIVE_COUCHE	

- SIEF_ELGA_DEPL : Calcul des efforts généralisés par élément aux points d'intégration de l'élément à partir des déplacements (utilisation uniquement en élasticité). Repère utilisateur.
- SIGM_ELNO_DEPL : Calcul des contraintes par élément aux nœuds à partir des déplacements en un point de l'épaisseur (mot-clé NIVE_COUCHE = INF, SUP ou MOY). Utilisation en élasticité. Repère utilisateur.
- SIGM_ELNO_CART : Expression des contraintes par élément aux nœuds dans le repère global de description du maillage. Non disponible pour les éléments de plaques et coques.
- EQUI_ELNO_SIGM : Contraintes équivalentes aux nœuds, calculées en un point de l'épaisseur à partir de SIGM_ELNO_DEPL ou SIGM_ELNO_COQU :
 - VMIS : Contraintes de Von Mises.
 - VMIS_SG : Contraintes de Von Mises signées par la trace de σ .
 - PRIN_1, PRIN_2, PRIN_3 : Contraintes principales.
- EFGE_ELNO_DEPL : Calcul des efforts généralisés par élément aux nœuds à partir des déplacements (utilisation uniquement en élasticité). Repère utilisateur.
- EFGE_ELNO_CART : Expression des efforts généralisés par élément aux nœuds dans le repère global de description du maillage.
- EPSI_ELNO_DEPL : Calcul des déformations par élément aux nœuds à partir des déplacements, en un point de l'épaisseur (utilisation uniquement en élasticité). Repère utilisateur.

- `DEGE_ELNO_DEPL` : Calcul des déformations généralisées par éléments aux nœuds à partir des déplacements. Repère utilisateur.
- `EPOT_ELEM_DEPL` : Calcul de l'énergie élastique linéaire de déformation par élément à partir des déplacements.
- `ECIN_ELEM_DEPL` : Calcul de l'énergie cinétique par élément.
- `VNOR_ELEM_DEPL` : Projection d'un champ de vitesse sur la normale des éléments coque.
- `SIEF_ELNO_ELGA` : Option d'activation du calcul du tenseur des efforts généralisés (voir paragraphe [§2.3.2]) par élément aux nœuds, dans le repère utilisateur, par intégration des contraintes `SIEF_ELGA`.
- `VARI_ELNO_ELGA` : Option d'activation du calcul du champ de variables internes (voir paragraphe [§2.3.2]) par élément et par couche aux nœuds. Pour chaque point d'intégration surfacique, on stocke les informations sur les couches en commençant par la première, niveau 'INF'. Le nombre de variables représentées vaut donc $3 \times \text{NCOU} \times \text{NBVARI}$ où `NBVARI` représente le nombre de variables internes.
- `SIGM_ELNO_COQU` : Extraction du champ de contraintes en un point dans l'épaisseur par élément et par couche (en peaux `SUP`, `MOY` et `INF`) aux nœuds. Repère défini par l'utilisateur avec `ANGL_REP`. Ce champs de contraintes surfacique peut alors être visualisé.
- `VARI_ELNO_COQU` : Calcul du champ de variables internes en un point de l'épaisseur (en peaux `SUP`, `MOY` et `INF`, voir les mot-clés `NUME_COUCHE` et `NIVE_COUCHE`). Repère défini par l'utilisateur avec le mot-clé `ANGL_REP` d'`AFFE_CARA_ELEM`.
- `NUME_COUCHE` : Dans le cas d'un matériau multicouche (composite ou coque en plasticité), valeur entière comprise entre 1 et le nombre de couches, nécessaire pour préciser la couche où l'on veut effectuer le calcul élémentaire.
- `NIVE_COUCHE` : Pour la couche `n`, on peut préciser l'ordonnée où l'on désire effectuer le calcul élémentaire. Un calcul en peau interne est indiqué par 'INF', en peau externe par 'SUP' et sur le feuillet moyen par 'MOY' (suivant le sens de la normale).
- `PLAN` : Pour l'option `EFGE_ELNO_DEPL` on peut préciser le plan dans lequel on désire avoir le calcul. Cette possibilité est intéressante en cas d'excentrement des éléments de plaque. Un calcul dans le plan du maillage est indiqué par 'MAIL' (défaut), un calcul en peau interne est indiqué par 'INF', en peau externe par 'SUP' et sur le feuillet moyen par 'MOY'.

2.4.3 Calculs aux nœuds : opérateur `CALC_NO`

OPTIONS	COQUE_3D	DKT	DST	Q4G	COQUE_C_PLAN COQUE_D_PLAN COQUE_AXIS	GRILLE
'FORC_NODA'
'REAC_NODA'
NOEU

Pour les éléments de plaques et coques, l'opérateur `CALC_NO` (documentation [U4.81.02]) permet uniquement le calcul des forces et réactions (calcul des champs aux nœuds par moyennation, option `_NOEU_`) :

- à partir des contraintes, l'équilibre : `FORC_NODA` (calcul des forces nodales à partir des contraintes aux points d'intégration, élément par élément),
- puis en enlevant le chargement appliqué : `REAC_NODA` (calcul des forces nodales de réaction aux nœuds, à partir des contraintes aux points d'intégration, élément par élément) :
- `REAC_NODA = FORC_NODA - chargements appliqués`,
- utiles pour vérification du chargement et pour calculs de résultantes, moments, etc.

2.4.4 Calculs des champs élémentaires : opérateur CALC_CHAM_ELEM

L'opérateur CALC_CHAM_ELEM (documentation [U4.81.03]) permet de calculer des champs élémentaires à partir de champs déjà calculés de type CHAM_NO_* ou CHAM_ELEM_*.

OPTIONS	COQUE_3D	DKT	DST	Q4G	COQUE_C_PLAN COQUE_D_PLAN COQUE_AXIS	GRILLE
'EFGE_ELNO_DEPL'

- EFGE_ELNO_DEPL : Calcul des efforts généralisés par élément aux nœuds à partir des déplacements. Repère utilisateur. Voir l'option PLAN pour la définition du plan de calcul.

Pour les modélisations de plaques et coques, seuls les efforts généralisés pour un champ de déplacement sont disponibles.

2.4.5 Calculs de quantités sur tout ou partie de la structure : opérateur POST_ELEM

L'opérateur POST_ELEM (documentation [U4.81.22]) permet de calculer des quantités sur tout ou partie de la structure. Les quantités calculées correspondent à des options de calcul particulières de la modélisation affectée.

OPTIONS	Opérateur	COQUE_3D	DKT	DST	Q4G	COQUE_C_PLAN COQUE_D_PLAN COQUE_AXIS	GRILLE
'MASS_INER'	POST_ELEM	.	.	.	.	.	.
'ENER_POT'	POST_ELEM	.	.	.	.	.	.
'ENER_CIN'	POST_ELEM	.	.	.	.	.	.

- MASS_INER : calcul des caractéristiques géométriques (volume, centre de gravité, matrice d'inertie) pour les éléments plaques et courbes.
- ENER_POT : calcul de l'énergie potentielle de déformation à l'équilibre à partir des déplacements en mécanique linéaire des milieux continus (2D et 3D) et en mécanique linéaire pour les éléments de structures, ou bien l'énergie dissipée thermiquement à l'équilibre en thermique linéaire à partir des températures (cham_no_TEMP_R).
- ENER_CIN : calcul de l'énergie cinétique à partir d'un champ de vitesse ou à partir d'un champ de déplacement et d'une fréquence (uniquement pour les éléments de structure et les éléments 3D).

2.4.6 Valeurs de composantes de champs de grandeurs : opérateur POST_RELEVE_T

L'opérateur POST_RELEVE_T (documentation [U4.81.21]) permet, sur un groupe de nœuds, d'extraire des valeurs ou effectuer des calculs :

- d'extraire des valeurs de composantes de champs de grandeurs ;
- d'effectuer des calculs de moyennes et d'invariants :
 - Moyennes,
 - Résultantes et moments de champs vectoriels,
 - Invariants de champs tensoriels,
 - Trace directionnelle de champs,
 - D'expression dans les repères GLOBAL, LOCAL, POLAIRE, UTILISATEUR ou CYLINDRIQUE

Le concept produit est de type table.

Pour utiliser `POST_RELEVE_T`, il est nécessaire de définir trois concepts :

- un **lieu** : l'option `NŒUD` (exemple : N01 N045) ou bien l'option `GROUP_NO` (exemple : APPUI) ;
- un **objet** : au choix, l'option `RESULTAT` (SD résultat : EVOL ELAS,...) ou bien l'option `CHAM_GD` (`CHAM_NO` : DEPL, ... ou `CHAM_ELEM` : SIGM_ELNO_DEPL, ...);
- une **nature** : au choix, l'option `'EXTRACTION'` (valeur, ...) ou bien l'option `'MOYENNE'` (moyenne, maxi, mini, ...).

Remarque importante :

Si on vient d'une interface avec un mailleur (`PRE_GIBI`, `PRE_IDEAS`, `PRE_GMSH`), les nœuds sont rangés par ordre numérique. Il faut réordonner les nœuds le long de la ligne de dépouillement. La solution est d'utiliser l'opérateur `DEFI_GROUP` avec l'option `NOEU_ORDO`. Cette option permet de créer un `GROUP_NO` ordonné contenant les nœuds d'un ensemble de mailles formés de segments (`SEG2` ou `SEG3`).

Un exemple d'extraction de composante est donné dans le cas-test SSNL503 (voir la description au paragraphe [§2.5.3] page 34) :

```
TAB_DRZ=POST_RELEVE_T( ACTION=_F(
                                GROUP_NO = 'D',
                                INTITULE = 'TB_DRZ',
                                RESULTAT = RESUL,
                                NOM_CHAM = 'DEPL',
                                NOM_CMP = 'DRZ',
                                TOUT_ORDRE = 'OUI',
                                OPERATION = 'EXTRACTION'
                                )
)
```

Cette syntaxe a pour but :

- d'extraire : `OPERATION = 'EXTRACTION'`
- sur le groupe de nœuds D : `GROUP_NO = 'D'`
- la composante DRZ du déplacement : `NOM_CHAM = 'DEPL', NOM_CMP = 'DRZ',`
- pour tous les instants de calcul : `TOUT_ORDRE = 'OUI'`

2.4.7 Impression des résultats : opérateur `IMPR_RESU`

L'opérateur `IMPR_RESU` permet d'écrire le maillage et/ou les résultats d'un calcul sur listing au format `'RESULTAT'` ou sur un fichier dans un format visualisable par des outils de post-traitement externes à Aster : format `RESULTAT` et `ASTER` (documentation [U4.91.01]), format `CASTEM` (documentation [U7.05.11]), format `ENSIGHT` documentation [U7.05.31]), format `IDEAS` (documentation [U7.05.01]), format `MED` (documentation [U7.05.21]) ou format `GMSH` (documentation [U7.05.32]).

Actuellement cette procédure permet d'écrire au choix :

- un maillage,
- des champs aux nœuds (de déplacements, de températures, de modes propres, de modes statiques, ...),
- des champs par éléments aux nœuds ou aux points de GAUSS (de contraintes, d'efforts généralisés, de variables internes...).

Les éléments de plaque et coque étant traités de la même manière que les autres éléments finis, nous renvoyons le lecteur aux notes d'utilisation correspondant au format de sortie qu'il souhaite utiliser.

2.5 Exemples

Les cas-tests retenus ici sont des cas-tests classiques issus de la littérature et qui sont couramment utilisés pour valider ce type d'éléments.

On rappelle que les modélisations DKT correspondent à la théorie de Love-Kirchhoff et les modélisations DST, Q4G à la théorie avec énergie de cisaillement transverse (Reissner). Les résultats pour la modélisation COQUE_3D ne sont présentés que pour une théorie avec énergie de cisaillement transverse.

2.5.1 Analyse statique linéaire

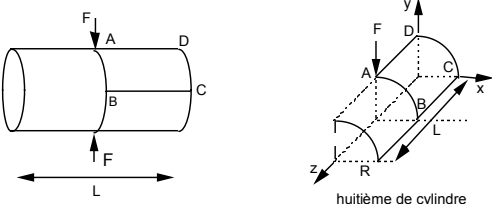
SSLS20

Titre :: Coque cylindrique pincée à bords libres

Documentation V : [V3.03.020]

Modélisations :

SSLS20A	DKT	
SSLS20B	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSLS20C	COQUE_3D	MEC3TR7H



Longueur L = 10.35 m
Rayon R = 4.953 m
Epaisseur t = 0.094 m

huitième de cylindre

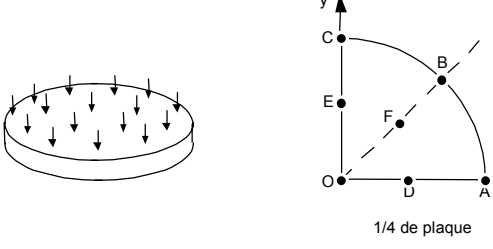
SSLS100

Titre : Plaque circulaire encastrée soumise à une pression uniforme.

Documentation V : [V3.03.100]

Modélisations :

SSLS100K	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSLS100L	COQUE_3D	MEC3TR7H
SSLS100B	DKT	
SSLS100E	DKQ	
SSLS100F	DST	
SSLS100G	DSQ	
SSLS100H	Q4G	
SSLS100I, J	COQU_AXIS	



Rayon R = 1 m
Epaisseur t = 0.1 m

1/4 de plaque

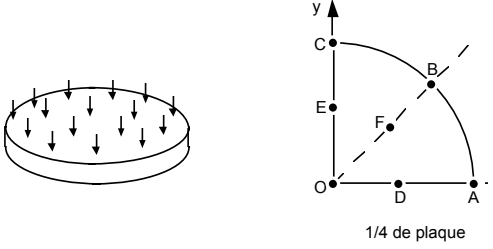
SSLS101

Titre : Plaque circulaire posée soumise à une pression uniforme.

Documentation V : [V3.03.101]

Modélisations :

SSLS101J	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSLS101I	COQUE_3D	MEC3TR7H
SSLS101B	DKT	
SSLS101E	DKQ	
SSLS101F	DST	
SSLS101G	DSQ	
SSLS101H	Q4G	



Rayon R = 1 m
Epaisseur t = 0.1 m

1/4 de plaque

Titre : Notice d'utilisation des éléments plaques et coques

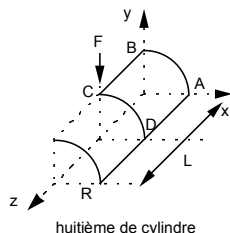
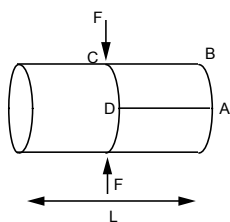
Date : 21/06/02

Auteur(s) : A. ASSIRE, P. MASSIN, F. LEBOUVIER

Clé : U2.02.01-A

Page : 31/50

SSLS104



Longueur $L = 600$
Rayon $R = 300$
Epaisseur $t = 3$

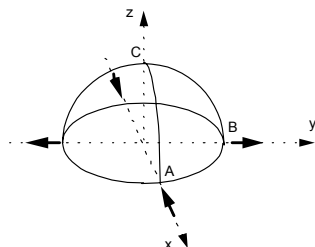
Titre : Coque cylindrique pincée avec diaphragme.

Documentation V : [V3.03.104]

Modélisations :

SSLS104B	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSLS104C	COQUE_3D	MEC3TR7H
SSLS104A	DKT	

SSLS105



Rayon $R = 10. \text{ m}$
Epaisseur $t = 0.04 \text{ m}$

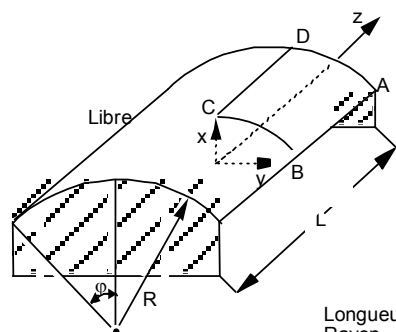
Titre : Hémisphère doublement pincé.

Documentation V : [V3.03.105]

Modélisations :

SSLS105B	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSLS105?	COQUE_3D	MEC3TR7H
SSLS105A	DKT	

SSLS107



Longueur $L = 6. \text{ m}$
Rayon $R = 3. \text{ m}$
Epaisseur $t = 0.03 \text{ m}$
Section angulaire $\varphi = 40^\circ$

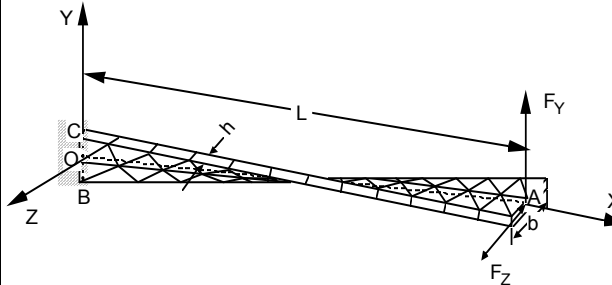
Titre : Panneau cylindrique soumis à son propre poids.

Documentation V : [V3.03.107]

Modélisations :

SSLS107A	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSLS107B	COQUE_3D	MEC3TR7H

SSLS108



Titre : Coque hélicoïdale sous charges concentrées.

Documentation V : [V3.03.108]

Modélisations :

SSLS108A	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSLS108B	COQUE_3D	MEC3TR7H

Remarques :

Utilisation déconseillée avec des DKT/DKQ, sans cisaillements transverses.

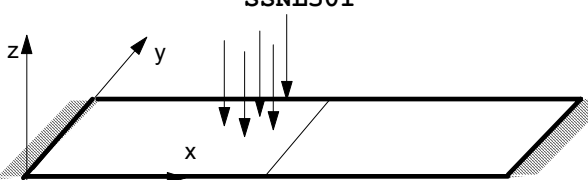
D'autres cas-tests sont décrits plus brièvement dans le tableau suivant :

Nom	Modélisation	Remarques
hpla100a	2D_AXIS	Titre : Cylindre creux thermoélastique pesant en rotation uniforme.
hpla100b	COQUE_AXIS	Documentation V : [V7.01.100]
hpla100c	COQUE_3D	Ce test a pour but d'éprouver les seconds membres correspondants aux effets de pesanteur et à une accélération due à une rotation uniforme.
hpla100d	COQUE_3D	
hpla100e	COQUE	Les solutions analytiques pour les COQUE_3D incluent la variation de métrique dans l'épaisseur de la coque. Les solutions analytiques pour les plaques sont sans correction de métrique
hpla100f	COQUE	
hsls01a	DKT/DST/Q4G	Titre : Plaque mince encastrée soumise à un gradient thermique dans l'épaisseur.
hsls01b	COQUE_3D	Documentation V : [V7.11.001]
hsns100a	COQUE_3D/DKT	Titre : Plaque soumise à un gradient de température dans l'épaisseur.
hsns100b	COQUE_3D/DKT	Documentation V : [V7.23.100] Ce cas-test permet de tester deux façons d'imposer le champ thermique. Les résultats obtenus en a et b doivent être identiques, mais les solutions de référence obtenues sont numériques.
ssls1102a	COQUE_C_PLAN	Titre : Poutre encastrée soumise à des efforts unitaires Documentation V : [V3.01.102]
ssls501a	COQUE_D_PLAN	Titre : Cylindre infiniment long soumis à deux lignes de charges. Documentation V : [V3.03.501]
ssls114a	COQUE_3D	Titre : Mise sous pression d'un quart de virole cylindrique.
ssls114b	COQUE_3D	Documentation V : [V3.03.114]
ssls114c	DKT/DST	Solution de référence analytique. Permet de tester le terme de pression et l'orientation des normales. On teste les résultats en déplacement radial et en contraintes radiales.
ssls114d	DKQ/DSQ	
ssls114i	COQUE_AXI	
ssls114j	COQUE_C_PLAN	
ssls114k	COQUE_D_PLAN	

2.5.2 Analyse modale en dynamique

Nom	Modélisation	Remarques
		<p>Titre : Plaque carrée mince libre ou encastree sur un bord</p> <p>Documentation V : [V2.03.001]</p>
sdls01a	DKT	Il s'agit d'un calcul modal et d'un calcul de réponse harmonique. Pour le calcul modal, il s'agit de calculer les modes propres de flexion d'une plaque carrée mince libre ou encastree sur un bord.
sdls01b	DKT	a - Arêtes de la plaque orientées selon les axes du repère. b - Orientation quelconque de la plaque et réponse harmonique pour la plaque encastree.
sdls01c	DKT	c - Calcul modal par sous-structuration dynamique classique et cyclique. d - Calcul modal suite à une sous-structuration de Guyan.
sdls01d	DKT	e - Arêtes de la plaque orientées selon les axes du repère. f - Arêtes de la plaque orientées selon les axes du repère. g - Orientation quelconque de la plaque et réponse harmonique pour la plaque encastree.
sdls01e	COQUE_3D	h - Orientation quelconque de la plaque et réponse harmonique pour la plaque encastree.
sdls01f	COQUE_3D	<ul style="list-style-type: none"> Pour a et b la précision sur les fréquences propres est inférieure à 1% jusqu'au sixième mode de flexion Pour c en sous-structuration, la qualité des résultats peut être améliorée par l'utilisation d'un maillage de sous-structure plus fin. Pour d, il est nécessaire afin d'obtenir une précision de 1% sur les fréquences propres de condenser aussi sur les nœuds milieu des bords. Pour e, f, g et h, la précision sur les fréquences propres est inférieure à 1% jusqu'au sixième mode de flexion pour les éléments quadrangle et inférieure à 2% pour les éléments triangle.
sdls01g	COQUE_3D	
sdls01h	COQUE_3D	
		<p>L'élément de coque MEC3QU9H est performant comparé à l'élément DKT qui est lui-même plus performant que l'élément MEC3TR7H.</p>

2.5.3 Analyse statique non linéaire matériau



Titre : Poutre encastée soumise à une pression uniforme.

Documentation V : [V6.02.501]

Modélisations :

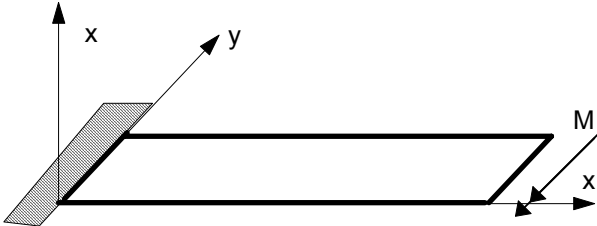
SSNL501E	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSNL501D	COQUE_3D	MEC3TR7H
SSNL501B	DKT	
SSNL501C	DKQ	
SSNL501A	COQUE_C_PLAN	

D'autres cas-tests sont décrits plus brièvement dans le tableau suivant :

Nom	Modélisation	Remarques
ssnp15a	3D	Titre : Plaque carrée en traction-cisaillement - Von Misès (écrouissage isotrope).
ssnp15b	C_PLAN	Documentation V : [V6.03.015]
ssnp15c	DKT	Une plaque, constituée d'un matériau plastique à écrouissage isotrope linéaire, est soumise à un effort de traction et un effort de cisaillement. Même si le test valide plutôt la loi de comportement que les éléments sur lesquels elle s'applique, il permet de tester les valeurs des contraintes, des efforts et des déformations dans le repère défini par l'utilisateur (ANGL_REP).
ssnp15d	COQUE_3D	
ssnv115a	D_PLAN	Titre : Tôle ondulée en comportement non linéaire.
ssnv115b	DKT	Documentation V : [V6.04.115]
ssnv115c	DKT	Ce test valide les comportements non linéaires dans les modélisations de plaques ou de coques minces. La modélisation A (2D D_PLAN) sert de référence. Les valeurs des déplacements sont testées.
ssnv115d	COQUE_3D	
ssnv115e	COQUE_3D	La modélisation COQUE_D_PLAN fait apparaître des écarts sur les déplacements latéraux de la tôle de l'ordre de 13% par rapport aux autres modélisations. Ceci est dû à la méthode d'intégration dans l'épaisseur qui ne fait intervenir que 5 points de Gauss pour cette modélisation, comparés à 19 points pour les éléments DKT et DKQ et 8 points pour la modélisation D_PLAN.
ssnv115f	COQUE_D_PLAN	

2.5.4 Analyse statique non linéaire géométrique

SSNV138



Titre : Plaque cantilever en grandes rotations soumise à un moment.

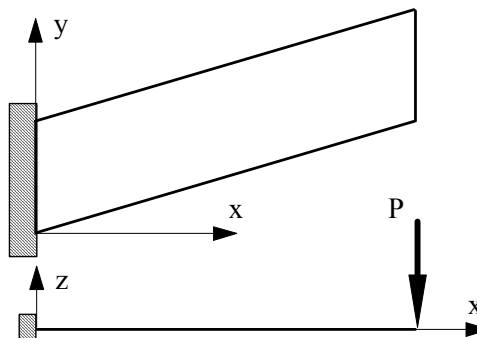
Documentation V : [V6.04.138]

Modélisations :

SSNV138	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSNV138	COQUE_3D	MEC3TR7H

Remarque :
La plus grande rotation atteinte est légèrement inférieure à π . Les résultats obtenus sont très satisfaisants, l'écart maximum est inférieur à 0.01%. Il est nécessaire d'augmenter la valeur de COEF_RIGI_DRZ (10E-5 par défaut) à 0.001 de façon à pouvoir augmenter la valeur de l'angle de rotation que l'on peut atteindre.

SSNV139



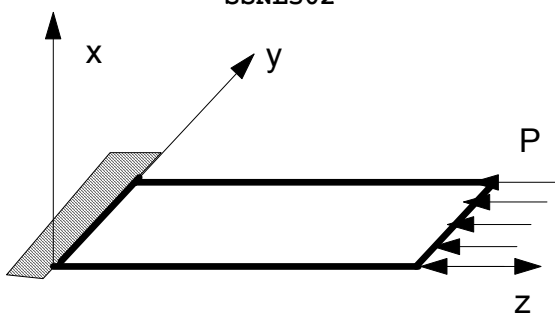
Titre : Plaque biaise.

Documentation V : [V6.04.139]

Modélisations :

SSNV139	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSNV139	COQUE_3D	MEC3TR7H

SSNL502



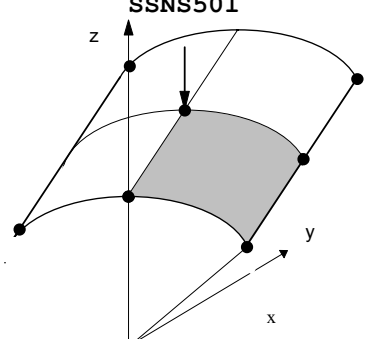
Titre : Poutre en flambement.

Documentation V : [V6.02.502]

Modélisations :

SSNL502	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSNL502	COQUE_3D	MEC3TR7H

SSNS501



Titre : Grands déplacements d'un panneau cylindrique.

Documentation V : [V6.05.501]

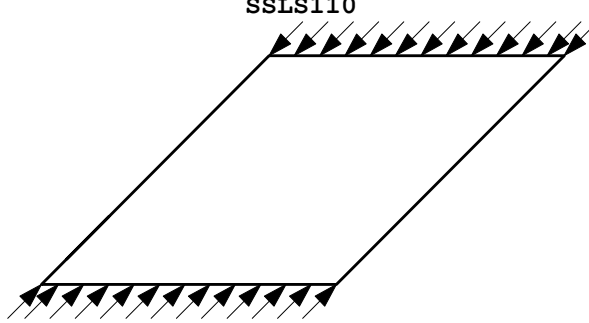
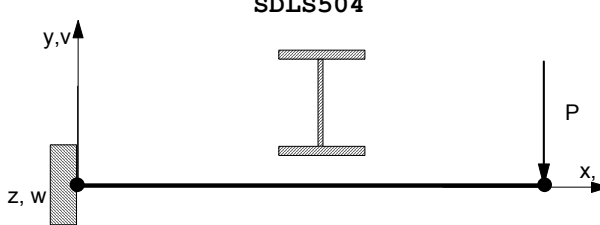
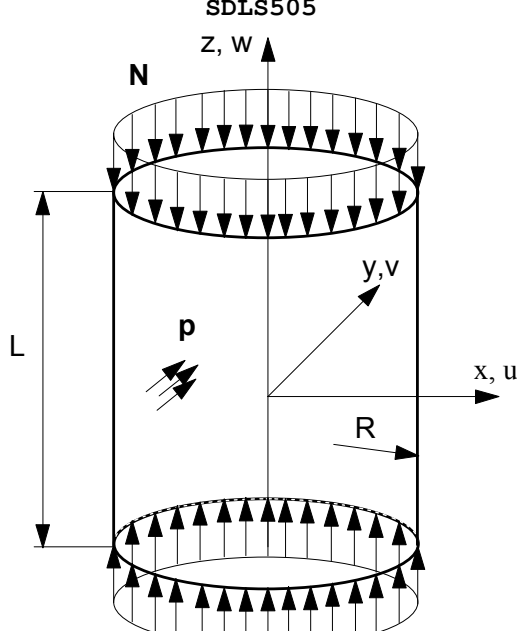
Modélisations :

SSNS501	COQUE_3D	MEC3QU9H
SSNS501	COQUE_3D	MEC3TR7H

D'autres cas-tests sont décrits plus brièvement dans le tableau suivant :

Nom	Modélisation	Remarques
ssnv140a	COQUE_3D	Titre : Panneau cylindrique encastré soumis à une force surfacique. Documentation V : [V6.04.140]
ssnv140b	COQUE_3D	<p>Cette force est constante pour la modélisation a et suivieuse dans la modélisation b. Le but de ce cas-test est de vérifier la modélisation COQUE_3D non-linéaire géométrique en utilisant l'algorithme de mise à jour des grande rotations 3D GREEN_GR de STAT_NON_LINE et de vérifier le traitement des pressions suivieuses. Les données de ce problème correspondent à une coque mince $h/L=0.625\%$ ce qui est sévère pour l'élément fini triangle MECQTR7H (cas de blocage au cisaillement transverse).</p>
ssnv141a	COQUE_3D	Titre : Calotte sphérique pincée. Documentation V : [V6.04.141] <p>Les données de ce problème correspondent à une coque mince $h/L=0.4\%$ ce qui est sévère pour l'élément fini triangle MECQTR7H (cas de blocage au cisaillement transverse). Il est nécessaire d'augmenter la valeur du COEF_RIGI_DRZ qui attribue une rigidité autour de la normale des éléments de coque qui vaut par défaut 10^{-5} la plus petite rigidité de flexion autour des directions dans le plan de la coque de façon à pouvoir augmenter la valeur de l'angle de rotation que l'on peut atteindre. Des valeurs de ce coefficient jusqu'à 10^{-3} restent licites.</p>
ssnv144a	COQUE_3D	Titre : Coude en flexion plane, élastique, encastré sur un coté et soumis à une force linéique équivalente à un moment de flexion. Documentation V : [V6.04.144] <p>Le but de ce cas-test est de vérifier que, pour les éléments COQUE_3D, les solutions quasi-statiques en linéaire géométrique (VMIS_ISOT_LINE dans STAT_NON_LINE) et en non linéaire géométrique (GREEN_GR dans STAT_NON_LINE) sont proches de la solution statique linéaire (MECA_STATIQUE) dans le domaine des petites perturbations.</p>
ssnv145a	COQUE_3D	Titre : Plaque cantilever en grandes rotations soumise a une pression suivieuse. Documentation V : [V6.04.145]
ssnv145b	COQUE_3D	<p>Le but de ce cas-test est de vérifier la modélisation COQUE_3D (maille TRIA7, QUAD9) en présence d'une pression de type suivieuse.</p>

2.5.5 Analyse en flambement d'Euler

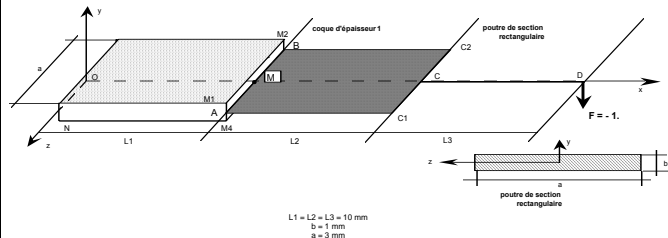
	<p>Titre : Stabilité d'une plaque carrée comprimée.</p> <p>Documentation V : [V3.03.110]</p> <p>Modélisations :</p> <table><tr><td>SSL110</td><td>COQUE_3D</td><td>MEC3QU9H</td></tr><tr><td>SSL110</td><td>COQUE_3D</td><td>MEC3TR7H</td></tr></table>	SSL110	COQUE_3D	MEC3QU9H	SSL110	COQUE_3D	MEC3TR7H
SSL110	COQUE_3D	MEC3QU9H					
SSL110	COQUE_3D	MEC3TR7H					
	<p>Titre : Flambement latéral d'une poutre (déversement).</p> <p>Documentation V : [V2.03.504]</p> <p>Modélisations :</p> <table><tr><td>SDLS504</td><td>COQUE_3D</td><td>MEC3QU9H</td></tr><tr><td>SDLS504</td><td>COQUE_3D</td><td>MEC3TR7H</td></tr></table>	SDLS504	COQUE_3D	MEC3QU9H	SDLS504	COQUE_3D	MEC3TR7H
SDLS504	COQUE_3D	MEC3QU9H					
SDLS504	COQUE_3D	MEC3TR7H					
	<p>Titre : Flambement d'une enveloppe cylindrique sous pression externe.</p> <p>Documentation V : [V2.03.505]</p> <p>Modélisations :</p> <table><tr><td>SDLS505</td><td>COQUE_3D</td><td>MEC3QU9H</td></tr><tr><td>SDLS505</td><td>COQUE_3D</td><td>MEC3TR7H</td></tr></table>	SDLS505	COQUE_3D	MEC3QU9H	SDLS505	COQUE_3D	MEC3TR7H
SDLS505	COQUE_3D	MEC3QU9H					
SDLS505	COQUE_3D	MEC3TR7H					

Titre : Notice d'utilisation des éléments plaques et coques
Auteur(s) : A. ASSIRE, P. MASSIN, F. LEBOUVIER

Date : 21/06/02
Clé : U2.02.01-A Page : 38/50

2.5.6 Raccords coques et autres éléments mécaniques

SSLX100



Titre : Mélange 3D-Coque-Poutre en flexion.

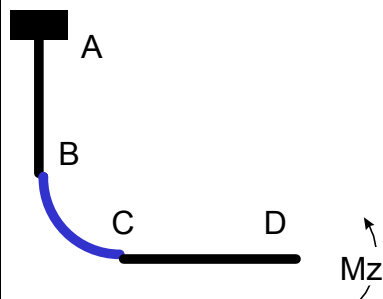
Documentation V : [V3.05.100]

Modélisations :

SSLX100A	3D	1	MECA_HEX20
	DKT	4	MEDKTR3
	POU_D_E	2	POU_D_E
SSLX100B	3D	1	MECA_HEX20
	DKT	4	MEDKTR3
	POU_D_E	2	POU_D_E
SSLX100C	3D	1	MECA_HEX20
	DKT	4	MEDKTR3
	COQUE_C_PLAN	1	MECPSE3

On teste les flèches, contraintes, déformations axiales et moments fléchissants en 4 points de l'axe de la poutre.

SSLX102



Titre : Tuyauterie coudée en flexion.

Documentation V : [V3.05.102]

Modélisations :

SSLX102A	DKT et TUYAU
	(liaison COQUE_TUYAU)
SSLX102D	COQUE et POUTRE

Titre : Notice d'utilisation des éléments plaques et coques

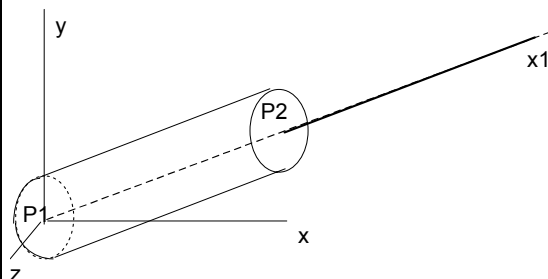
Date : 21/06/02

Auteur(s) : A. ASSIRE, P. MASSIN, F. LEBOUVIER

Clé : U2.02.01-A

Page : 39/50

SSLX101A


Titre : Tuyau droit modélisé en coques et en poutres [V3.05.101].

Documentation V : [V3.05.101]

Modélisations :

SSLX101A	DIS_TR	POI1
	DKT	MEDKQU4
	POU_D_E	2 SEG2

Encastrement de la coque sur le bord P1. Flexion et traction en x1. Ecart de 3 à 5% sur les déplacements et rotations en P2 avec la solution analytique, dû au maillage coque avec des éléments plans.

SSLX101B	DKT	MEDKQU4, METUSEG3
	TUYAU	METUSEG3, MEDKQU4
	DIS_TR	POI1

Cette modélisation a pour objectif de tester la liaison coque tuyau en présence de chargements unitaires : traction, flexion et de torsion. La solution de référence est analytique (RDM). L'écart avec la solution numérique s'explique par le fait que le maillage en coques est en réalité constitué d'éléments plans (facettes). La géométrie du tuyau est donc elle-même approchée.

SSLX102A	DKT	MEDKQU4, METUSEG3
	TUYAU	MEDKQU4, METUSEG3

La modélisation A fait intervenir la liaison coque_tuyau, la solution obtenue (2.7% d'écart en flexion plane, et 0.4% en flexion hors plan, par rapport à la référence: maillage tout coques (modélisation D) permet de tester le bon fonctionnement du raccordement coque_tuyau.

3 Thermique

Pour la résolution de problèmes thermomécaniques chaînés, on doit utiliser pour le calcul thermique des éléments finis de coque thermique [R3.11.01]. Ces éléments sont des éléments plaques, ou linéiques dans le cas de structures de révolution ou de structures invariantes suivant un axe. La courbure de la structure n'est pas prise en compte en elle-même. La métrique du plan tangent de chaque élément est calculée en supposant que tous les sommets sont coplanaires. Ces éléments supposent une répartition a priori parabolique de température dans l'épaisseur, qui résulte d'un développement asymptotique en thermique linéaire pour une épaisseur de coque faible, lorsque les variations de températures ne sont pas trop importantes. Il est à noter qu'un modèle basé sur un développement du champ de température plus riche dans l'épaisseur voit ses termes d'ordre supérieur à deux converger vers zéro lorsque la coque est mince. On ne peut donc pas traiter les problèmes de chocs thermiques avec forte variation du profil de température dans l'épaisseur avec ces coques. Les modalités d'utilisation de ces éléments sont présentées en [U1.22.01].

3.1 Définition du problème

3.1.1 Discrétisation spatiale et affectation d'une modélisation : opérateur `AFFE_MODELE`

3.1.1.1 Degrés de liberté

Les degrés de liberté sont les températures `TEMP` (température sur la surface moyenne de la coque), `TEMP_INF` (température sur la surface inférieure de la coque), et `TEMP_SUP` (température sur la surface supérieure de la coque).

3.1.1.2 Mailles support des matrices de rigidité

Modélisation	Maille	Nature de la maille	Élément fini	Remarques
COQUE	QUAD9	plane	THCOQU9	nœuds à 3 coordonnées x, y, z
	QUAD8	plane	THCOQU8	
	QUAD4	plane	THCOQU4	
	TRIA7	plane	THCOTR7	
	TRIA6	plane	THCOTR6	
	TRIA3	plane	THCOTR3	
COQUE_PLAN	SEG3	non supposée plane	THCPSE3	nœuds à 2 coordonnées x, y
COQUE_AXIS	SEG3	non supposée plane	THCASE3	nœuds à 2 coordonnées x, y

Pour les `THCOTRi`, seuls les 3 sommets sont exploités pour définir la géométrie locale (plan tangent, normale). Pour les `THCOQUi`, on considère que l'élément est plan et son plan tangent est défini par défaut par 3 des 4 sommets de l'élément.

3.1.1.3 Mailles support des chargements

Modélisation	Maille	Elément fini	Remarques
COQUE	SEG2	THCOSE2	avec TRIA3 et QUAD4
COQUE	SEG3	THCOSE3	avec TRIA6,7 et QUAD8 ,9

Tous les chargements applicables aux facettes des éléments de coque sont traités par discrétisation directe sur la maille support de l'élément en formulation température. Aucune maille de chargement n'est donc nécessaire pour les faces des éléments de coques.

Pour les chargements applicables sur les bords des éléments de coque, une maille support de type SEG2 (élément THCOSE2) ou SEG3 (élément THCOSE3) doit être utilisée.

Pour les températures imposées les mailles support sont des mailles réduites à un point.

3.1.1.4 Modèle : AFFE_MODELE

L'affectation de la modélisation passe par l'opérateur AFFE_MODELE [U4.41.01].

AFFE_MODELE	Remarques
AFFE	
PHENOMENE :	'THERMIQUE'
MODELISATION	'COQUE_3D'
	'COQUE_C_PLAN'
	'COQUE_D_PLAN'
	'COQUE_AXIS'

3.1.2 Caractéristiques élémentaires : AFFE_CARA_ELEM

Dans cette partie, les opérandes caractéristiques des éléments de plaques et de coques en thermique sont décrites. La documentation d'utilisation de l'opérateur AFFE_CARA_ELEM est [U4.42.01].

AFFE_CARA_ELEM	COQUE	COQUE_PLAN	COQUE_AXIS	Remarques
COQUE				
EPAIS	.	.	.	

Les caractéristiques affectées aux matériaux sont les mêmes que pour un calcul mécanique. Il est à noter qu'il n'est pas utile de définir un repère particulier pour l'exploitation des résultats du calcul thermique car ceux-ci se limitent aux champs de température, grandeur scalaire, indépendante du référentiel utilisé.

3.1.3 Matériaux : DEFI_MATERIAU

DEFI_MATERIAU	COQUE	COQUE_PLAN	COQUE_AXIS	Remarques
THER	.	.	.	
THER_FO	.	.	.	

Les matériaux utilisés avec des éléments plaques ou coques en thermique peuvent avoir des caractéristiques thermiques linéaires constantes ou dépendantes de l'incrément de chargement.

3.1.4 Chargements et conditions limites : AFFE_CHAR_THER et AFFE_CHAR_THER_F

L'affectation des chargements et des conditions aux limites sur un modèle thermique s'effectue à l'aide de l'opérateur `AFFE_CHAR_THER`, si les chargements et les conditions aux limites mécaniques sur un système sont des valeurs réelles ne dépendant d'aucun paramètre, ou bien `AFFE_CHAR_THER_F`, si ces valeurs sont fonctions de la position ou de l'incrément de chargement.

La documentation d'utilisation d'`AFFE_CHAR_THER` et `AFFE_CHAR_THER_F` est [U4.44.02].

3.1.4.1 Liste des mot-clés facteur d'`AFFE_CHAR_THER`

Les valeurs des chargements affectées sont réelles et ne dépendent d'aucun paramètre.

AFFE_CHAR_THER généraux	COQUE	COQUE_PLAN	COQUE_AXIS	Remarques
TEMP_IMPO	.	.	.	
AFFE_CHAR_THER particuliers	COQUE	COQUE_PLAN	COQUE_AXIS	Remarques
FLUX_REP	.	.	.	sur les faces et les bords des éléments surfaciques
ECHANGE	.	.	.	sur les faces et les bords des éléments surfaciques

- `TEMP_IMPO` : Mot clé facteur utilisable pour imposer, sur des nœuds ou des groupes de nœuds, une température.
- `FLUX_REP` : Mot clé facteur utilisable pour appliquer des flux normaux à une face de coque thermique définie par une ou plusieurs mailles ou des groupes de mailles de type triangle ou quadrangle.
- `ECHANGE` : Mot clé facteur utilisable pour appliquer des conditions d'échange avec une température extérieure à une face de coque, définie par une ou plusieurs mailles ou groupes de mailles de type triangle ou quadrangle.

3.1.4.2 Liste des mot-clés facteur d'`AFFE_CHAR_THER_F`

Les valeurs des chargements affectées peuvent être fonction des coordonnées globales et du temps, ou de la température en thermique non linéaire (sauf en coques).

AFFE_CHAR_THER_F généraux	COQUE	COQUE_PLAN	COQUE_AXIS	Remarques
TEMP_IMPO	.	.	.	
AFFE_CHAR_THER_F particuliers	COQUE	COQUE_PLAN	COQUE_AXIS	Remarques
FLUX_REP	.	.	.	sur les faces et les bords des éléments surfaciques
ECHANGE	.	.	.	sur les faces et les bords des éléments surfaciques

3.2 Résolution

3.2.1 Calculs transitoires : opérateur THER_LINEAIRE

Option de calcul transitoire	COQUE	COQUE_PLAN	COQUE_AXIS	Remarques
CHAR_THER_EVOL	•			

Il s'agit ici du traitement des problèmes de thermique évolutive.

3.3 Calculs supplémentaires et post-traitements

3.3.1 Calculs en post-traitement

On présente ci-après les options de post-traitement pour les éléments de plaques et de coques

OPTIONS élémentaires	COQUE	COQUE_PLAN	COQUE_AXIS	Remarques
`FLUX_ELNO_TEMP`	•			
`FLUX_ELGA_TEMP`	•			
`NIVE_COUCHE`	•			

- **FLUX_ELNO_TEMP** : Cette option effectue le calcul de flux de chaleur aux nœuds à partir de la température.
- **FLUX_ELGA_TEMP** : Cette option effectue le calcul de flux de chaleur aux points d'intégration à partir de la température.
- **NIVE_COUCHE** : Option qui précise pour la couche n l'ordonnée où l'on désire avoir le champ de température. Un calcul en peau interne est indiqué par **`INF`**, en peau externe par **`SUP`** et sur le feuillet moyen par **`MOY`**.

3.4 Exemples

On donne ici la liste des cas-tests disponibles pour les coques thermiques. Ce sont des cas-tests de thermique stationnaire. Les résultats sont corrects pour l'ensemble de ces cas-tests, quel que soit l'élément utilisé.

Nom	Modélisation	Élément	Remarques
tplp301a	COQUE	THCOTR3	Titre : Plaque avec température imposée répartie sinusoïdalement sur un côté. Documentation : [V4.05.301]
tplp302a	COQUE	THCOTR6	Titre : Plaque rectangulaire avec température imposée sur les côtés. Documentation : [V4.05.302]
tp1s100a tp1s100b	COQUE COQUE_PLAN	THCOTR6/THCOTR3 THCPSE3	Titre : Plaque infinie soumise à un couple de flux de chaleur antisymétriques stationnaires sur ses deux demi-faces. Documentation : [V4.03.100] La conduction est linéaire, homogène et isotrope.
tp1s101a tp1s101b tp1s101c tp1s101d tp1s101e	COQUE	THCOTR6/THCOSE3 THCOQU4/THCOSE2 THCOQU8/THCOSE3 THCOQU9/THCOSE3 THCOTR7/THCOSE3	Titre : Plaque infinie soumise à un couple de conditions thermiques avec l'extérieur, symétriques par rapport au feuillet moyen. Documentation : [V4.03.101] La conduction est linéaire, homogène et isotrope.
tp1s302a tp1s302b tp1s302c tp1s302d	COQUE	THCOQU8/THCOSE3 THCOQU4/THCOSE2 THCOQU9/THCOSE3 THCOTR7/THCOSE3	Titre : Plaque rectangulaire avec convection et température imposée Documentation : [V4.03.302]

4 Chaînage thermomécanique

4.1 Formalisme

Pour la résolution de problèmes thermomécaniques chaînés, on doit utiliser pour le calcul thermique des éléments finis de coque thermique [R3.11.01] dont le champ de température est récupéré comme donnée d'entrée du Code_Aster pour le calcul mécanique. Il faut donc qu'il y ait compatibilité entre le champ thermique donné par les coques thermiques et celui récupéré par les coques mécaniques. Ce dernier est défini par la connaissance des 3 champs TEMP_SUP, TEMP et TEMP_INF donnés en peaux inférieure, milieu et supérieure de coque. Le tableau ci-dessous indique ces compatibilités:

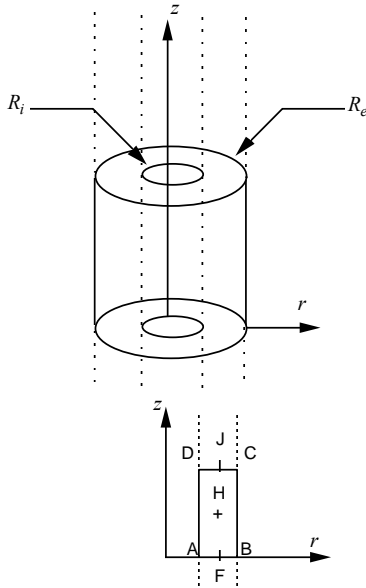
Modélisation THERMIQUE	Maille	Elément	Maille	Elément	Modélisation MECANIQUE
COQUE	QUAD9	THCOQU9	QUAD9	MEC3QU9H	COQUE 3D
COQUE	QUAD8	THCOQU8			
COQUE	QUAD4	THCOQU4	QUAD4	MEDKQU4 MEDSQU4 MEQ4QU4	DKT DST Q4G
COQUE	TRIA7	THCOTR7	TRIA7	MEC3TR7H	COQUE 3D
COQUE	TRIA6	THCOTR6			
COQUE	TRIA3	THCOTR3	TRIA3	MEDKTR3 MEDSTR3	DKT DST
COQUE_PLAN	SEG3	THCPSE3	SEG3 SEG3	METDSE3 METCSE3	COQUE_D_PLAN COQUE_C_PLAN
COQUE_AXIS	SEG3	THCASE3	SEG3	MECXSE3	COQUE_AXIS

Remarques :

- Les nœuds des éléments de coques thermiques et de plaques ou de coques mécaniques doivent se correspondre. Les maillages pour la thermique et la mécanique auront donc le même nombre et le même type de mailles.
- Les éléments de coques thermiques surfaciques sont traités comme des éléments plans par projection de la géométrie initiale sur le plan défini par les 3 premiers sommets. Pour le chaînage de calculs avec des éléments courbes mécaniques il est donc nécessaire que la géométrie de la plaque ne soit pas trop éloignée de celle de la coque. Lorsque la structure est courbe, cela nécessite donc pour le calcul thermique de la mailler de façon suffisamment fine de façon à avoir des résultats corrects en prévision de la partie mécanique. Seuls les éléments linéiques de thermique sont parfaitement associés aux éléments linéiques correspondants en mécanique car prenant en compte la courbure de la structure maillée.
- Le chaînage avec des matériaux multicouches n'est pas disponible pour l'instant.
- Le chaînage thermomécanique est aussi possible si l'on connaît, analytiquement ou par des mesures expérimentales, la variation du champ de température dans l'épaisseur de la structure ou de certaines parties de la structure. Dans ce cas on travaille avec une carte de température définie a priori ; le champ de température n'est plus donné par les trois valeurs TEMP_INF, TEMP et TEMP_SUP du calcul thermique obtenues par EVOL_THER. L'opérateur DEFI_NAPPE permet de créer de tels profils de températures à partir des données fournies par l'utilisateur. Ces profils sont affectés par la commande CREA_CHAMPS et CREA_RESU (cf. le cas-test hsns100b). On notera qu'il n'est pas nécessaire pour le calcul mécanique que le nombre de points d'intégration dans l'épaisseur soit égal au nombre de points de discrétisation du champ de température dans l'épaisseur. Le champ de température est automatiquement interpolé aux points d'intégration dans l'épaisseur des éléments de plaques ou de coques.

4.2 Exemples

HPLA100



Rayon intérieur $R_i = 19.5 \text{ mm}$
Rayon extérieur $R_e = 20.5 \text{ mm}$
Point F $R = 20.0 \text{ mm}$
Epaisseur $h = 1.0 \text{ mm}$
Hauteur $L = 10.0 \text{ mm}$

Titre : Cylindre creux thermoélastique pesant en rotation uniforme

Documentation : [V7.01.100]

Modélisations :

HPLA100A			
Thermique	PLAN	32	THPLQU8
Mécanique	AXIS	32	MEAXQU8
HPLA100B			
Thermique	COQUE_PLAN	10	THCPSE3
Mécanique	COQUE_AXIS	10	MECXSE3
HPLA100C			
Thermique	COQUE	32	THCOQU9
Mécanique	COQUE_3D	32	MEC3QU9H
HPLA100D			
Thermique	COQUE	64	THCOTR7
Mécanique	COQUE_3D	64	MEC3TR7H
HPLA100E			
Thermique	COQUE	200	THCOQU4
Mécanique	COQUE	200	MEDKQU4
HPLA100F			
Thermique	COQUE	400	THCOTR3
Mécanique	COQUE	400	MEDKTR3

Il s'agit d'étudier un phénomène de dilatation thermique où les champs de température sont calculés avec THER_LINEAIRE par un calcul stationnaire :

- dilatation thermique :

$$T(\rho) - T_{ref}(\rho) = 0.5(T_s + T_i) + 2(T_s + T_i)(r - R) / h$$

avec : $T_s = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_i = -0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{ref} = 0. \text{ } ^\circ\text{C}$
 $T_s = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_i = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{ref} = 0. \text{ } ^\circ\text{C}$

On teste les contraintes, les efforts et moments fléchissants en L et M. Les résultats de référence sont analytiques. Pour les modélisations COQUE_3D on prend en compte la variation de métrique avec l'épaisseur de la coque. Très bons résultats quel que soit le type d'élément considéré.

5 Conclusion et conseils d'utilisation

Dans le tableau suivant, un récapitulatif des possibilités offertes par les modélisations plaques et coques est décrit.

Modélisation	→	DKT	DST	Q4G	COQUE_3D	COQUE_AXIS
Domaine d'application						COQUE_D_PLAN COQUE_C_PLAN
↓						
Statique linéaire : Matériau isotrope		X	X	X	X	X
Matériau orthotrope, composite		X	X			
Statique non-linéaire matériau		X			X	X
Statique non-linéaire géométrique					X	
Analyse dynamique		X	X	X	X	X
Flambement d'Euler					X	

Sur la figure ci-dessous le domaine d'utilisation des plaques et des coques est schématisé.

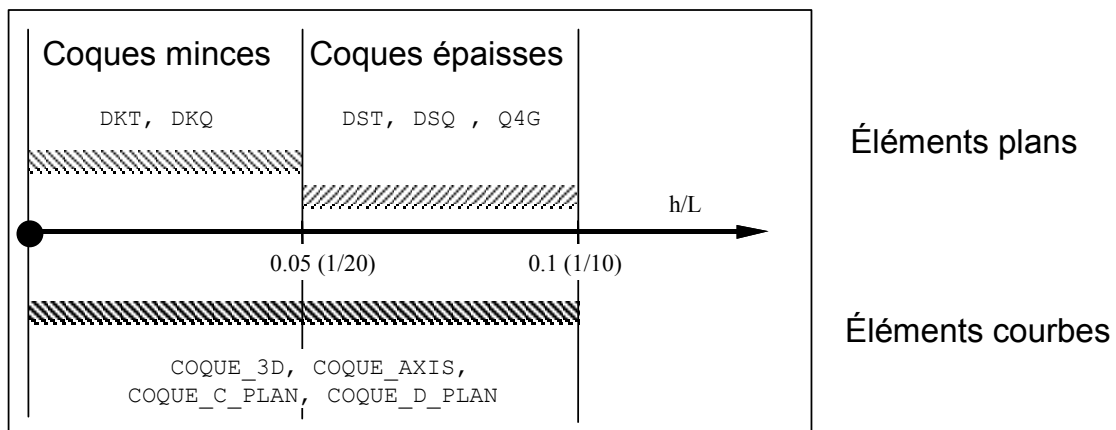


Figure 5-a : Domaines d'utilisation des plaques et des coques

Quelques recommandations concernant le domaine d'utilisation de ces éléments :

- **Structures minces** : pour ces structures, dont le rapport h/L est inférieur à 1/20, les effets de cisaillement transverse peuvent être négligés et la théorie de Kirchhoff s'applique. On conseille d'utiliser pour ce type de structure des éléments plaques DKT-DKQ ou des éléments de coque courbe (COQUE_3D, COQUE_AXIS, COQUE_C_PLAN, COQUE_D_PLAN). **Il est conseillé d'utiliser de préférence les éléments DKT et DKQ** qui donnent de très bons résultats sur les déplacements et plus approximatifs sur les contraintes (à recommander pour les analyses vibratoires). Même si on doit utiliser un grand nombre de ces éléments, les temps d'exécution restent raisonnables comparés à ceux des éléments courbes.
- **Structures épaisses** : pour ces structures, on utilisera des éléments de plaque DST, DSQ et Q4G qui tiennent compte du cisaillement transverse avec un facteur de correction de cisaillement $k = 5/6$ (théorie de Reissner) ou **de préférence des éléments de coque courbe**. Il permet de passer d'une théorie de Hencky-Mindlin-Naghdi pour $k=1$, à une théorie de Reissner pour $k=5/6$. Une valeur de $k = 5/6$ est conseillée. Par défaut le coefficient de cisaillement est mis à 5/6. Cette préférence repose sur le fait que les éléments DST, DSQ et Q4G estiment relativement mal les efforts par rapport aux éléments de coque courbes, comme on a pu le remarquer sur certains cas-tests du paragraphe [§2.5].

Les éléments DKT, DKQ, DST, DSQ et Q4G sont des éléments plans, ils ne prennent pas en compte la courbure des structures, il est donc nécessaire de raffiner le maillage dans le cas où la courbure est importante si on veut éviter les flexions parasites.

La variation de métrique de la géométrie (c'est-à-dire son rayon de courbure) en fonction de son épaisseur est prise en compte :

- automatiquement pour la modélisation COQUE_3D
- défini par l'utilisateur pour les modélisations COQUE_AXIS, COQUE_D_PLAN et COQUE_C_PLAN.

L'élément mécanique optimal en statique d'après l'ensemble des cas-tests du paragraphe [§2.5] est l'élément de coque à 9 nœuds MEC3QU9H, qui permet d'obtenir de bons déplacements et de bonnes contraintes grâce à son interpolation P2 en membrane. C'est un élément polyvalent qui peut être à la fois utilisé pour représenter des structures très minces ($h/L \leq 1/100$) ou plus épaisses. Comme, par ailleurs, l'élément de coque à 7 nœuds MEC3TR7H est moins performant, il est conseillé à l'utilisateur de mailler sa structure en coques avec le plus grand nombre possible de quadrangles.

- **Non-linéarité matériau** : les comportements non linéaires (plasticité, etc.) en contraintes planes sont disponibles pour les éléments de coque courbe (COQUE_3D, COQUE_AXIS, COQUE_C_PLAN, COQUE_D_PLAN) et les éléments plaques DKT-DKQ uniquement. Le comportement plastique ne prend pas les termes de cisaillement transverse qui sont traité de façon élastique, car le cisaillement transverse est découplé du comportement plastique. Pour une bonne représentation de la progression de la plasticité à travers l'épaisseur, on conseille d'utiliser pour l'intégration numérique 3 à 5 couches dans l'épaisseur pour un nombre de points de gauss valant respectivement 3, 5 et 11.
- **Non-linéarité géométrique** : les comportements non linéaires (grands déplacements grandes rotations) en contraintes planes sont disponibles pour les éléments de coque courbe COQUE_3D uniquement.
- **Flambement d'Euler** : ce type d'analyse est disponible avec les éléments de coque courbe COQUE_3D uniquement.

Des éléments correspondant aux éléments mécaniques existent en thermique; les couplages thermomécaniques sont donc disponibles à la fois pour les éléments de plaques et de coques. Pour l'instant ces couplages ne sont pas possibles pour des matériaux multicouches.

6 Bibliographie

- [1] J.L. Batoz, G. Dhatt "Modélisation des structures par éléments finis: poutres et plaques" Hermès, Paris (1990)
- [2] J.L. Batoz, G. Dhatt "Modélisation des structures par éléments finis: coques" Hermès, Paris (1992)
- [3] D. Bui "Evolution de AFFE_CARA_ELEM " CR MMN/97/004.
- [4] S. Andrieux "Raccords 3D/poutre, 3D/coques et autres fantaisies". Note à paraître.
- [5] E. Lorentz "Grandes déformations plastiques. Modélisation dans Aster par PETIT_REAC". EDF/DER CRMMN 1536/07.
- [6] P. Jetteur "Cinématique non-linéaire des coques". Rapport SAMTECH issu du contrat PP/GC-134/96.
- [7] J. Argyris, P. Dunne, C. Malejannakis, E. Schelkie "A simple triangular facet shell element with application to linear and non linear equilibrium and elastic stability problem ". Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., vol 11, 1977.
- [8] F. Frey "L'analyse statique non-linéaire des structures par la méthode des éléments finis et son application à la construction métallique ". Thèse de Doctorat, Liège, 1978.
- [9] A. B. Sabir and A. C. Lock "The application of finite elements to the large deflection geometrically and non linear behavior of cylindrical shells " Variational methods in Engineering, edited by Brebbia and Tottenham, Southampton, 1972.
- [10] G.S. Dhatt "Instability of thin shells by the finite elements method ". Proc. IASS Symp. , Vol1, Vienna 1970, pp1-36.
- [11] J. Pellet "Raccord 3D-Poutre ". Manuel de référence du Code_Aster [R3.03.03].
- [12] P. Massin, M. Al Mikdad "Pression suivieuse pour les éléments de coques volumiques ". Manuel de référence du Code_Aster [R3.03.07].
- [13] F. Voldoire, C. Sevin "Coques thermoélastiques axisymétriques et 1D". Manuel de référence du Code_Aster [R3.07.02].
- [14] P. Massin, "Eléments de plaque DKT, DST, DKQ, DSQ et Q4 γ ". Manuel de référence du Code_Aster [R3.07.03].
- [15] P. Massin, A. Laulusa*, M. Al Mikdad*, D. Bui, F. Voldoire "Eléments finis de coques volumiques". Manuel de référence du Code_Aster [R3.07.04].
- [16] P. Massin, M. Al Mikdad " Eléments de coques volumiques en non linéaire géométrique". Manuel de référence du Code_Aster [R3.07.05].
- [17] P. Massin, F. Voldoire, S. Andrieux "Modèle de thermique pour les coques minces ". Manuel de référence du Code_Aster [R3.07.11].
- [18] P. Massin, J.M. Proix, A. Ben Haj Yedder " Eléments finis de tuyau droit et courbe avec ovalisation, gonflement et gauchissement en élasto-plasticité". Manuel de référence du Code_Aster [R3.08.06].
- [19] F. Voldoire, S. Andrieux "Modèle de thermique pour les coques minces", Manuel de référence du Code_Aster [R3.11.01].
- [20] P. Mialon, J.M. Proix, E. Lorentz "Intégration des relations élasto-plastiques". Manuel de référence du Code_Aster [R5.03.02].

Titre : Notice d'utilisation des éléments plaques et coques

Date : 21/06/02

Auteur(s) : A. ASSIRE, P. MASSIN, F. LEBOUVIER

Clé : U2.02.01-A

Page : 50/50

- [21] E. Lorentz "Relation de comportement élastique non linéaire ". Manuel de référence du *Code_Aster* [R5.03.20].
- [22] M. Aupaix "Modélisation statique et dynamique des poutres en grandes rotations". Manuel de référence du *Code_Aster* [R5.03.40].
- [23] P. Massin, F. Voldoire "Modélisations DKT-DST-Q4G". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U1.12.01].
- [24] P. Massin, F. Voldoire "Modélisations COQUE_C_PLAN, _D_PLAN, _AXIS". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U1.12.02].
- [25] P. Massin, D. Bui "Modélisation COQUE_3D". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U1.12.03].
- [26] P. Massin, F. Voldoire "Modélisations COQUE, COQUE_PLAN, COQUE_AXIS, phénomène THERMIQUE". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U1.22.01].
- [27] J.P. Lefebvre "Opérateur DEFI_MATERIAU". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U4.23.01].
- [28] A-M. Donore "Opérateur DEFI_COQU_MULT". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U4.23.03].
- [29] J.M. Proix, L. Vivan "Opérateur AFFE_CARA_ELEM". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U4.24.01].
- [30] X. Desroches "Opérateur AFFE_CHAR_MECA et AFFE_CHAR_MECA_F". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U4.25.01].
- [31] X. Desroches "Opérateur AFFE_CHAR_THER et AFFE_CHAR_THER_F". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U4.25.02].
- [32] I. Vautier "Opérateur STAT_NON_LINE". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U4.32.01].
- [33] J. Pellet "Opérateur CALC_MATR_ELEM". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U4.41.01].
- [34] J. Pellet "Opérateur CALC_ELEM". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U4.61.02].
- [35] X. Desroches "Opérateur CALC_NO". Manuel d'utilisation du *Code_Aster* [U4.61.03].