

Manuel de Validation**Fascicule V6.03 : Statique non linéaire des systèmes plans****Document : V6.03.015**

SSNP15 - Plaque en traction-cisaillement - Von Mises (écrouissage isotrope)

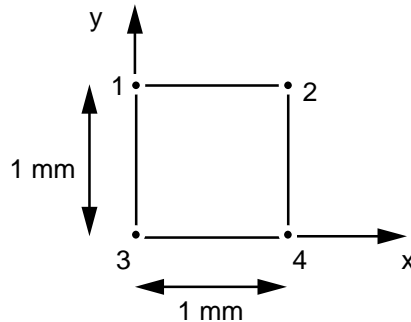
Résumé :

Ce test 2D contraintes planes quasi-statique, issu du guide VPCS, entre dans le cadre de la validation des relations de comportement élasto-plastique. Une plaque, constituée d'un matériau plastique à écrouissage isotrope linéaire, est soumise à un effort de traction et un de cisaillement.

L'intérêt principal de ce test réside dans le caractère non radial du chargement.

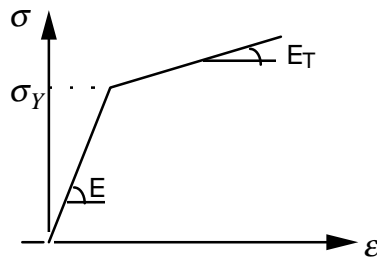
1 Problème de référence

1.1 Géométrie



1.2 Propriétés de matériaux

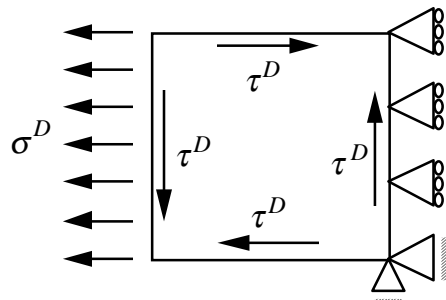
Loi de comportement élastoplastique à écrouissage cinématique linéaire.



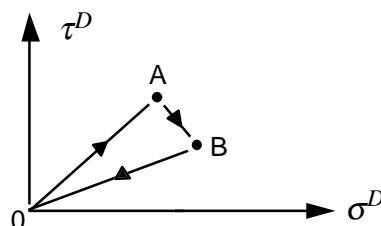
$E = 195\,000 \text{ MPa}$
 $\nu = 0.3$
 $\sigma_Y = 181 \text{ MPa}$
 $E_T = 1930 \text{ MPa}$

1.3 Conditions aux limites et chargements

La plaque est bloquée suivant Ox le long du côté [2,4] tout en étant soumise à une traction σ^D et un effort de cisaillement τ^D .



Le trajet de chargement est le suivant :

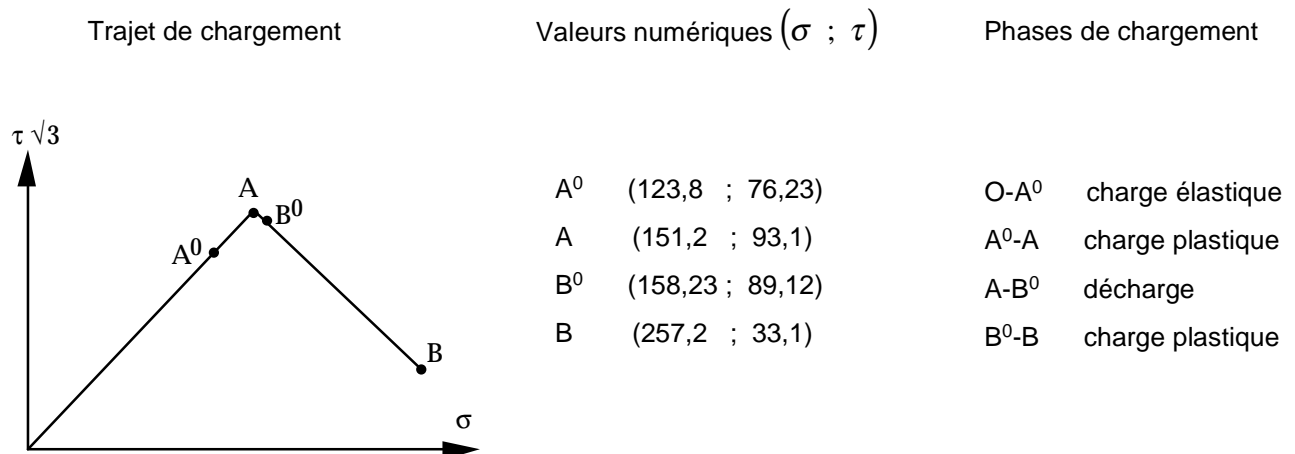


	σ^D (MPa)	τ^D (MPa)
A	151.2	93.1
B	257.2	33.1

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

Dans le plan $(\sigma, \tau, \sqrt{3})$, la norme de von Mises se traduit par la distance classique, si bien qu'on peut immédiatement prédire les phases de charge et de décharge lors du trajet de chargement, puisqu'il s'agit respectivement des phases où la norme croît ou bien décroît :



2.1.1 Démarche de résolution

Mécaniquement, il s'agit d'un test 0D piloté en contrainte, le matériau étant élastoplastique avec critère de von Mises et écrouissage isotrope linéaire. Pour un chargement piloté en contrainte, on détermine aisément la déformation plastique cumulée :

$$F(\sigma, p) = \sigma_{eq} - \sigma^y - R' p \leq 0 \quad \Rightarrow \quad p = \frac{\sigma_{eq} - \sigma^y}{R'} \quad \text{en charge} \quad \text{éq 2.1.1-1}$$

L'intégration de la déformation plastique est bien entendu plus délicat. L'équation d'écoulement s'écrit :

$$\dot{\epsilon}^p = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_{eq}} \quad \Rightarrow \quad \dot{\epsilon}^p = \frac{3}{2 R'} \frac{\dot{\sigma}_{eq}}{\sigma_{eq}} \tilde{\sigma} \quad \text{en charge} \quad \text{éq 2.1.1-2}$$

Enfin, on déduira la déformation via la relation d'état :

$$\epsilon = \epsilon^p + \mathbf{E}^{-1} : \sigma \quad \Rightarrow \quad \epsilon_{xx} = \epsilon_{xx}^p + \frac{\sigma}{E} \quad \text{et} \quad \epsilon_{xy} = \epsilon_{xy}^p + \frac{\tau}{2\mu} \quad \text{éq 2.1.1-3}$$

2.1.2 Traitement de la phase de chargement radial

Remarquons qu'en phase de chargement radial, la loi d'écoulement [éq 2.1.2-1] s'intègre directement :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^p = \frac{3}{2} p \frac{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}}{\sigma_{eq}} \quad \text{éq 2.1.2-1}$$

La déformation plastique cumulée est alors donnée par [éq 2.1.1-1], la déformation plastique par [éq 2.1.2-1] et la déformation totale par [éq 2.1.1-3]. Avec :

E	= 195 000 MPa	2μ	= 150 000 MPa	R'	= 1 949, 29 Mpa
On obtient :					
p (A)	= 2, 0547 10 ⁻²	ε ^p _{xx} (A)	= 1, 4054 10 ⁻²	ε _{xx} (A)	= 1, 4830 10 ⁻²
		ε ^p _{xy} (A)	= 1, 2981 10 ⁻²	ε _{xy} (A)	= 1, 3601 10 ⁻²

2.1.3 Traitement de la phase de chargement non radial

Dans la phase de chargement non radial B0 - B, on peut paramétrer le trajet de contrainte par :

$$\boldsymbol{\sigma}(q) = \boldsymbol{\sigma}^{B^0} + q \underbrace{(\boldsymbol{\sigma}^B - \boldsymbol{\sigma}^{B^0})}_{\text{direction fixe}} \quad \text{avec } 0 \leq q \leq 1 \quad \text{éq 2.1.3-1}$$

Comme le trajet de chargement reste confiné dans le plan traction-cisaillement (σ, τ), on aura intérêt à représenter l'état de contrainte par un nombre complexe :

$$\Sigma = \sigma + i\sqrt{3}\tau \quad \Rightarrow \quad \sigma_{eq} = |\Sigma| \quad \text{et} \quad \Sigma(q) = \Sigma^{B^0} + q \underbrace{(\Sigma^B - \Sigma^{B^0})}_{\text{direction fixe}} \quad \text{éq 2.1.3-2}$$

L'intégration de la loi d'écoulement [éq 2.1.1-2], suivie d'une intégration par partie, permet d'exprimer la déformation plastique :

$$\frac{2R'}{3} [\boldsymbol{\varepsilon}^p]_0^1 = \int_0^1 \frac{\dot{\sigma}_{eq}}{\sigma_{eq}} \tilde{\boldsymbol{\sigma}} dq = \left[\ln(\sigma_{eq}) \tilde{\boldsymbol{\sigma}} \right]_0^1 - \frac{1}{2} \underbrace{\frac{\dot{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}}}{\tilde{\boldsymbol{\sigma}} - \tilde{\boldsymbol{\sigma}}^{B^0}}}_{\text{direction fixe}} \int_0^1 \ln(\sigma_{eq}^2) dq$$

L'adoption du plan complexe permet un calcul aisé de la dernière intégrale :

$$\int_0^1 \ln(\sigma_{eq}^2) dq = \int_0^1 \ln(\Sigma \bar{\Sigma}) dq = \int_0^1 \ln(\Sigma) dq + \int_0^1 \ln(\bar{\Sigma}) dq = 2 \operatorname{Re} \left[\int_0^1 \ln(\Sigma) dq \right] = 2 \operatorname{Re} \left[\frac{\Sigma \ln(\Sigma) - \Sigma}{\Sigma^B - \Sigma^{B^0}} \right]_0^1$$

Finalement, l'incrément de déformation plastique sur le trajet B0 - B vaut :

$$[\boldsymbol{\varepsilon}^p]_{B^0}^B = \frac{3}{2R'} \left[\ln(\sigma_{eq}) \tilde{\boldsymbol{\sigma}} \right]_{B^0}^B - \frac{3}{2R'} \operatorname{Re} \left[\frac{\Sigma \ln(\Sigma) - \Sigma}{\Sigma^B - \Sigma^{B^0}} \right]_{B^0}^B (\tilde{\boldsymbol{\sigma}}^B - \tilde{\boldsymbol{\sigma}}^{B^0}) \quad \text{éq 2.1.3-4}$$

2.2 Résultats de référence

En calculant la déformation plastique cumulée par [éq 2.1.1-1], la déformation plastique par [éq 2.1.3-4] et la déformation totale par [éq 2.1.1-3], on obtient :

$$\begin{array}{llll} p(B) & = 4,2329 \cdot 10^{-2} & \varepsilon^{p_{xx}}(B) & = 3,3946 \cdot 10^{-2} & \varepsilon_{xx}(B) & = 3,5265 \cdot 10^{-2} \\ \text{On obtient :} & & \varepsilon^{p_{xy}}(B) & = 2,0250 \cdot 10^{-2} & \varepsilon_{xy}(B) & = 2,0471 \cdot 10^{-2} \end{array}$$

On s'intéressera aux valeurs des contraintes, des déformations et de la déformation plastique cumulée aux points A et B du trajet de chargement.

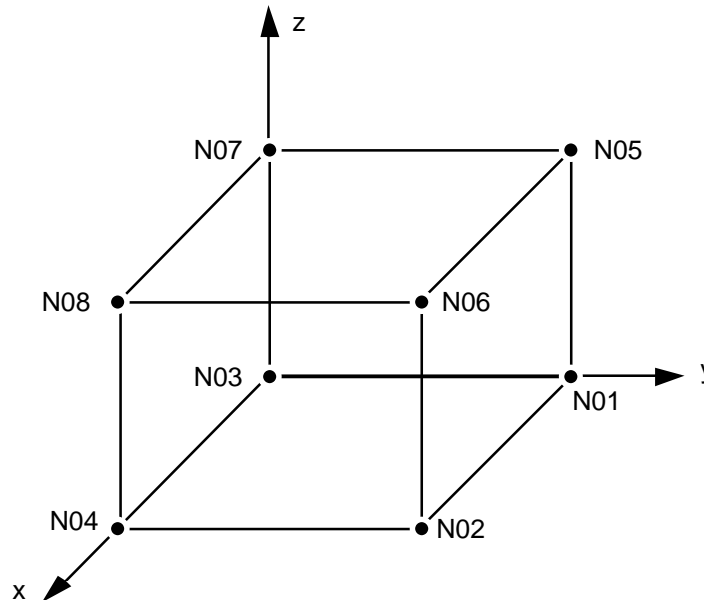
2.3 Références bibliographiques

- [1] Société Française des Mécaniciens. Guide de validation des progiciels de calcul de structures (VPCS). AFNOR Technique, 1990.

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

HEXA8



Le chargement et les conditions aux limites sont modélisés par :

```
DDL_IMPO: (NOEUD: N04, DX: 0., DY:0.)
DDL_IMPO: (NOEUD: N08, DX: 0., DY:0., DZ:0.)
DDL_IMPO: (NOEUD: N02, DX: 0.)
DDL_IMPO: (NOEUD: N06, DX: 0.)
```

des forces surfaciques imposées (mot clé `FORCE_FACE`) sur les faces (mailles de peau) (1, 5, 6, 2), (1, 5, 7, 3), (3, 4, 8, 7) et (4, 8, 6, 2).

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 8

Nombre de mailles et types : 1 HEXA8, 4 QUAD4

3.3 Fonctionnalités testées

Commandes				Clés
DEFI_MATERIAU	ECRO_LINE	D_SIGM_EPSI		[U4.23.01]
		SY		
STAT_NON_LINE	COMP_INCR	RELATION	VMIS_ISOT_LINE	[U4.32.01]
CALC_ELEM	OPTION	EPSI_ELNO_DEPL		[U4.61.02]
RECU_CHAMP		NOM_CHAM	VARI_ELNO_ELGA	[U4.62.01]
CALC_ELEM	OPTION	RADI_ELNO_SIGM		[U4.61.02]
		DCHA_ELNO_SIGM		

4 Résultats de la modélisation A

4.1 Valeurs testées

Identification	Instants	Référence	Aster	% différence
σ_{xx}	A	151.2	151.2	0
σ_{xy}	A	93.1	93.1	0
ε_{xx}	A	1.4830 10 ⁻²	1.4830 10 ⁻²	-0.002
ε_{xy}	A	1.3601 10 ⁻²	1.3601 10 ⁻²	0.003
p	A	2.055 10 ⁻²	2.055 10 ⁻²	0.001
ε_{xx}^p	A	1.4054 10 ⁻²	1.4054 10 ⁻²	0.002
ε_{xy}^p	A	1.2981 10 ⁻²	1.2981 10 ⁻²	-0.002
ε_{xx}	B	3.5265 10 ⁻²	3.5325 10 ⁻²	0.170
ε_{xy}	B	2.0471 10 ⁻²	2.0351 10 ⁻²	-0.584
p	B	4.2329 10 ⁻²	4.2329 10 ⁻²	0.001
ε_{xx}^p	B	3.3946 10 ⁻²	3.4006 10 ⁻²	0.176
ε_{xy}^p	B	2.0250 10 ⁻²	2.0131 10 ⁻²	-0.589

ainsi que les indicateurs de charge-décharge :

Identification	Instants	Référence	Aster	% différence
IND_ENER	A	0.	0	0
IND_SEUIL	A	0.	0	0
IND_ENER	B	3.26 10 ⁻²	3.33 10 ⁻²	2.5
IND_SEUIL	B	9.71 10 ⁻²	9.64 10 ⁻²	0.7

4.2 Remarque

Les phases A et B sont testées. 41 incréments de chargement sont utilisés :

- 1 pour la phase A,
- 40 pour la phase B.

4.3 Paramètres d'exécution

Version : 5.00.09

Machine :

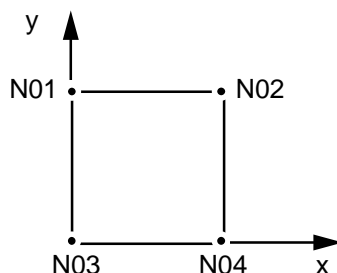
Encombrement mémoire : 8 MW

Temps CPU User : 84 secondes

5 Modélisation B

5.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation en contraintes planes : C_PLAN



Le chargement et les conditions aux limites sont modélisés par :

```
DDL_IMPO: (NOEUD: N04, DX: 0., DY:0.)
           (NOEUD: N02, DX: 0.      )
```

des forces surfaciques imposées (mot clé FORCE_CONTOUR) sur les faces (mailles de peau SEG2) (1, 2), (2, 4), (4, 3) et (3, 1).

5.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 4

Nombre de mailles et types : 1 QUAD4, 4 SEG2

5.3 Fonctionnalités testées

Commandes				Clés
DEFI_MATERIAU	ECRO_LINE	D_SIGM_EPSI		[U4.23.01]
		SY		
STAT_NON_LINE	COMP_INCR	RELATION	VMIS_ISOT_LINE	[U4.32.01]
CALC_ELEM	OPTION	EPSI_ELNO_DEPL		[U4.61.02]
RECU_CHAMP		NOM_CHAM	VARI_ELNO_ELGA	[U4.62.01]
CALC_ELEM	OPTION	RADI_ELNO_SIGM		[U4.61.02]
		DCHA_ELNO_SIGM		

6 Résultats de la modélisation B

6.1 Valeurs testées

Identification	Instants	Référence	Aster	% différence
σ_{xx}	A	151.2	151.2	0
σ_{xy}	A	93.1	93.1	0
ε_{xx}	A	1.4830 10 ⁻²	1.4830 10 ⁻²	-0.002
ε_{xy}	A	1.3601 10 ⁻²	1.3601 10 ⁻²	0.003
p	A	2.055 10 ⁻²	2.055 10 ⁻²	0.001
ε_{xx}^p	A	1.4054 10 ⁻²	1.4054 10 ⁻²	0.002
ε_{xy}^p	A	1.2981 10 ⁻²	1.2981 10 ⁻²	-0.002
ε_{xx}	B	3.5265 10 ⁻²	3.5325 10 ⁻²	0.170
ε_{xy}	B	2.0471 10 ⁻²	2.0351 10 ⁻²	-0.584
p	B	4.2329 10 ⁻²	4.2329 10 ⁻²	0.001
ε_{xx}^p	B	3.3946 10 ⁻²	3.4006 10 ⁻²	0.176
ε_{xy}^p	B	2.0250 10 ⁻²	2.0131 10 ⁻²	-0.589

ainsi que les indicateurs de charge-décharge :

Identification	Instants	Référence	Aster	% différence
IND_ENER	A	0.	0	0
IND_SEUIL	A	0.	0	0
IND_ENER	B	3.26 10 ⁻²	3.33 10 ⁻²	2.5
IND_SEUIL	B	9.71 10 ⁻²	9.64 10 ⁻²	0.7

6.2 Remarque

Les phases A et B sont testées. 41 incréments de chargement sont utilisés :

- 1 pour la phase A,
- 40 pour la phase B.

6.3 Paramètres d'exécution

Version : 5.00.09

Machine :

Encombrement mémoire : 8 MW

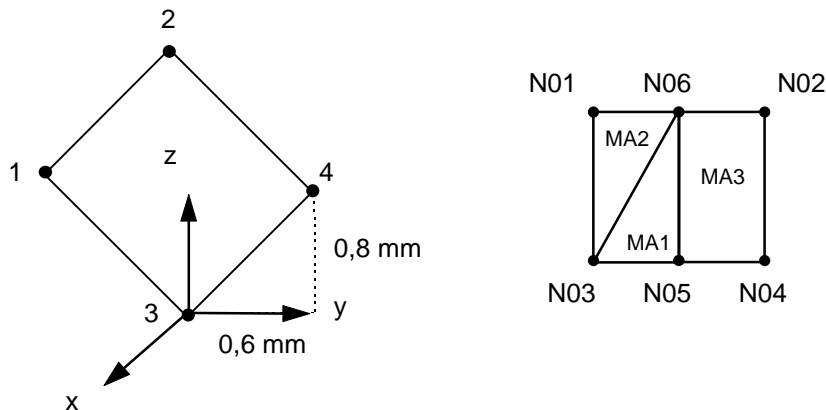
Temps CPU User : 84 secondes

7 Modélisation C

7.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation coque DKT-DKQ

7.2 Géométrie



Les dimensions de la structure ne changent pas par rapport au problème de référence, seule diffère son orientation.

Coordonnées des nœuds:

Nœuds	x	y	z
N01	0	-0.8	0.6
N02	0	-0.2	1.4
N03	0	0	0
N04	0	0.6	0.8
N05	0	0.3	0.4
N06	0	-0.5	1

Conditions aux limites:

```
DDL_IMPO: (NOEUD: N04, DY: 0., DZ:0.)
          (TOUT : OUI DX: 0.)
LIAISON_DDL : (NOEUD:(N02 N02) DDL:('DY' 'DZ'))
               COEF_MULT: (0.75 1.) COEF_IMP: 0. )
```

Chargement :

On impose des forces surfaciques (mot clé `FORCE_ARETE`) sur les faces (mailles de peau SEG2) (1,2), (2,4), (4,3) et (3,1).

Spécificité DKT et DKQ :

Deux couches dans l'épaisseur pour la plasticité.

7.3 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 6
Nombre de mailles et types : 2 TRIA3 et 1 QUAD4

7.4 Valeurs testées

Les déplacements testés sont ceux du problème de référence en tenant compte de la rotation de la structure.

Les déformations, les contraintes et les efforts généralisés sont testés dans le repère utilisateur défini par la commande ANGL_REP. Les valeurs sont donc celles données par le problème de référence.

7.5 Fonctionnalités testées

Commandes			Clés
DEFI_MATERIAU	ECRO_LINE	D_SIGM_EPSI SY	[U4.23.01]
AFFE_CARA_ELEM	COQUE	EPAIS ANGL_REP	[U4.24.01]
AFFE_CHAR_MECA	LIAISON_DDL FORCE_ARETE		[U4.25.01]
STAT_NON_LINE	COMP_INCR	VMIS_ISOT_LINE COQUE_NCOU	[U4.32.01]

8 Résultats de la modélisation C

8.1 Valeurs testées

Les valeurs sont testées au point A du trajet de chargement OA. On teste ainsi :

Les déplacements (DEPL). Il se déduisent aisément de la solution de référence puisque la déformation est homogène.

Identification	Référence	Aster	% différence
DY N01	$1.86722 \cdot 10^{-2}$	$1.86722 \cdot 10^{-2}$	0
DZ N01	$-3.25413 \cdot 10^{-2}$	$-3.25413 \cdot 10^{-2}$	0
DY N06	$1.224 \cdot 10^{-2}$	$1.224 \cdot 10^{-2}$	0
DZ N06	$-1.88485 \cdot 10^{-2}$	$-1.84485 \cdot 10^{-2}$	0
DY N02	$5.80782 \cdot 10^{-3}$	$5.80782 \cdot 10^{-3}$	0
DZ N02	$-4.35586 \cdot 10^{-3}$	$-4.35586 \cdot 10^{-3}$	0

Les contraintes (SIGM_ELNO_VARI).

Identification	Référence	Aster	% différence
SIXX MA2 N01	$1.512 \cdot 10^2$	$1.51199 \cdot 10^2$	$-2.27 \cdot 10^{-6}$
SIXY MA2 N01	93.1	93.1002	$2.82 \cdot 10^{-6}$
SIXX MA1 N03	$1.512 \cdot 10^2$	$1.51199 \cdot 10^2$	$-2.27 \cdot 10^{-6}$
SIXY MA1 N03	93.1	93.1002	$2.82 \cdot 10^{-6}$
SIXX MA2 N03	$1.512 \cdot 10^2$	$1.51199 \cdot 10^2$	$-2.27 \cdot 10^{-6}$
SIXY MA2 N03	93.1	93.1002	$2.82 \cdot 10^{-6}$
SIXX MA3 N02	$1.512 \cdot 10^2$	$1.51199 \cdot 10^2$	$-2.27 \cdot 10^{-6}$
SIXY MA3 N02	93.1	93.1002	$2.82 \cdot 10^{-6}$

Les efforts généralisés par éléments aux nœuds (SIEF_ELNO_ELGA).

Identification	Référence	Aster	% différence
NXX MA2 N01	$3.024 \cdot 10^2$	$3.02399 \cdot 10^2$	$-2.27 \cdot 10^{-6}$
NXY MA2 N01	$1.862 \cdot 10^2$	$1.862005 \cdot 10^2$	$2.82 \cdot 10^{-6}$
NXX MA1 N03	$3.024 \cdot 10^2$	$3.02399 \cdot 10^2$	$-2.27 \cdot 10^{-6}$
NXY MA1 N03	$1.862 \cdot 10^2$	$1.862005 \cdot 10^2$	$2.82 \cdot 10^{-6}$
NXX MA2 N03	$3.024 \cdot 10^2$	$3.02399 \cdot 10^2$	$-2.27 \cdot 10^{-6}$
NXY MA2 N03	$1.862 \cdot 10^2$	$1.862005 \cdot 10^2$	$2.82 \cdot 10^{-6}$
NXX MA3 N02	$3.024 \cdot 10^2$	$3.02399 \cdot 10^2$	$-2.27 \cdot 10^{-6}$
NXY MA3 N02	$1.862 \cdot 10^2$	$1.862005 \cdot 10^2$	$2.82 \cdot 10^{-6}$

Les déformations par élément aux nœuds à partir des déplacements (EPSI_ELNO_DEPL).

Identification	Référence	Aster	% différence
EPXX MA2 N01	$1.48297 \cdot 10^{-2}$	$1.48296 \cdot 10^{-2}$	$-3.65 \cdot 10^{-6}$
EPYY MA2 N01	$-7.25977 \cdot 10^{-3}$	$-7.25972 \cdot 10^{-3}$	$-7.14 \cdot 10^{-6}$
EPXY MA2 N01	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$2.48 \cdot 10^{-6}$
EPXX MA1 N03	$1.48297 \cdot 10^{-2}$	$1.48296 \cdot 10^{-2}$	$-3.65 \cdot 10^{-6}$
EPYY MA1 N03	$-7.25977 \cdot 10^{-3}$	$-7.25972 \cdot 10^{-3}$	$-7.14 \cdot 10^{-6}$
EPXY MA1 N03	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$2.48 \cdot 10^{-6}$
EPXX MA2 N03	$1.48297 \cdot 10^{-2}$	$1.48296 \cdot 10^{-2}$	$-3.65 \cdot 10^{-6}$
EPYY MA2 N03	$-7.25977 \cdot 10^{-3}$	$-7.25972 \cdot 10^{-3}$	$-7.14 \cdot 10^{-6}$
EPXY MA2 N03	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$2.48 \cdot 10^{-6}$
EPXX MA3 N02	$1.48297 \cdot 10^{-2}$	$1.48296 \cdot 10^{-2}$	$-3.65 \cdot 10^{-6}$
EPYY MA3 N02	$-7.25977 \cdot 10^{-3}$	$-7.25972 \cdot 10^{-3}$	$-7.14 \cdot 10^{-6}$
EPXY MA3 N02	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$2.48 \cdot 10^{-6}$
EPXX MA3 N04	$1.48297 \cdot 10^{-2}$	$1.48296 \cdot 10^{-2}$	$-3.65 \cdot 10^{-6}$
EPYY MA3 N04	$-7.25977 \cdot 10^{-3}$	$-7.25972 \cdot 10^{-3}$	$-7.14 \cdot 10^{-6}$
EPXY MA3 N04	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$2.48 \cdot 10^{-6}$

Les contraintes élastiques par élément aux nœuds à partir des déplacements (utilisation en élasticité) (SIGM_ELNO_DEPL)

Identification	Référence	Aster	% différence
SIXX MA2 N01	$2.71109 \cdot 10^3$	$2.71108 \cdot 10^3$	$-3.05 \cdot 10^{-6}$
SIYY MA2 N01	$-6.02328 \cdot 10^2$	$-6.02320 \cdot 10^2$	-10^{-3}
SIXY MA2 N01	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.48 \cdot 10^{-6}$
SIXX MA1 N03	$2.71109 \cdot 10^3$	$2.71108 \cdot 10^3$	$-3.05 \cdot 10^{-6}$
SIYY MA1 N03	$-6.02328 \cdot 10^2$	$-6.02320 \cdot 10^2$	-10^{-3}
SIXY MA1 N03	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.48 \cdot 10^{-6}$
SIXX MA2 N03	$2.71109 \cdot 10^3$	$2.71108 \cdot 10^3$	$-3.05 \cdot 10^{-6}$
SIYY MA2 N03	$-6.02328 \cdot 10^2$	$-6.02320 \cdot 10^2$	-10^{-3}
SIXY MA2 N03	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.48 \cdot 10^{-6}$
SIXX MA3 N02	$2.71109 \cdot 10^3$	$2.71108 \cdot 10^3$	$-3.05 \cdot 10^{-6}$
SIYY MA3 N02	$-6.02328 \cdot 10^2$	$-6.02320 \cdot 10^2$	-10^{-3}
SIXY MA3 N02	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.48 \cdot 10^{-6}$

8.2 Paramètres d'exécution

Version : 4.02.31

Machine : CRAY C90

Encombrement mémoire : 15.32 MW

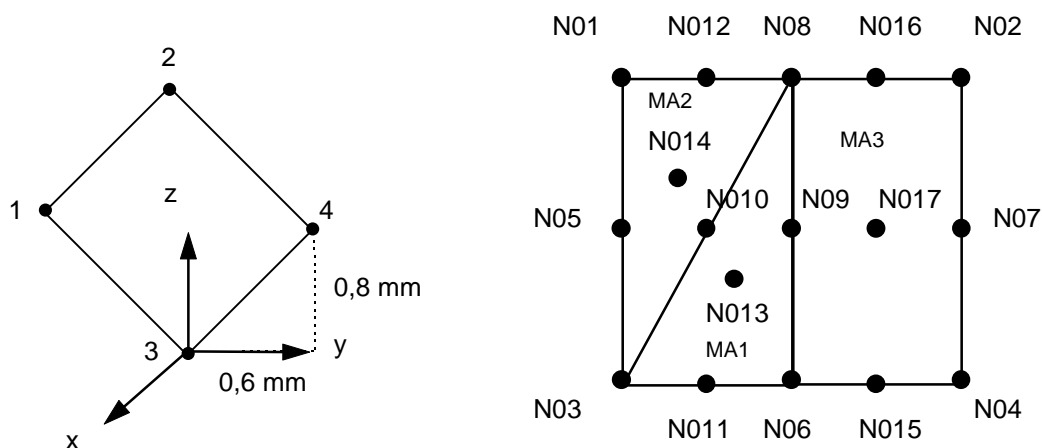
Temps CPU User : 26.93 secondes

9 Modélisation D

9.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation coque COQUE_3D

9.2 Géométrie



Les dimensions de la structure ne changent pas par rapport au problème de référence, seule diffère son orientation.

Coordonnées des nœuds :

Nœuds	x	y	z
N01	0	-0.8	0.6
N02	0	-0.2	1.4
N03	0	0	0
N04	0	0.6	0.8
N05	0	-0.4	0.3
N06	0	0.3	0.4
N07	0	0.2	1.1
N08	0	-0.5	1
N09	0	-0.1	0.7
N010	0	-0.25	0.5
N011	0	0.15	0.2
N012	0	-0.65	0.8
N013	0	-0.06666	0.466666
N014	0	-0.433333	0.533333
N015	0	0.45	0.6
N016	0	-0.35	1.2
N017	0	0.05	0.9

Conditions aux limites :

```
DDL_IMPO: (NOEUD: N04, DY: 0., DZ:0.)  
          (TOUT : OUI DX: 0.)  
LIAISON_DDL : (NOEUD:(N02 N02)          DDL:('DY' 'DZ')  
               COEF_MULT: (0.75 1.) COEF_IMP: 0. )  
LIAISON_DDL : (NOEUD:(N07 N07)          DDL:('DY' 'DZ')  
               COEF_MULT: (0.75 1.) COEF_IMP: 0. )
```

Chargement:

On impose des forces surfaciques (mot clé `FORCE_ARETE`) sur les faces (mailles de peau SEG3) (1,2), (2,4), (4,3) et (3,1).

9.3 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 17
Nombre de mailles et types : 2 TRIA7 et 1 QUAD9

9.4 Valeurs testées

Les déplacements testés sont ceux du problème de référence en tenant compte de la rotation de la structure.

Les déformations, les contraintes et les efforts généralisés sont testés dans le repère utilisateur défini par la commande `ANGL_REP`. Les valeurs sont donc celles données par le problème de référence.

9.5 Fonctionnalités testées

Commandes			Clés
DEFI_MATERIAU	ECRO_LINE	D_SIGM_EPSI SY	[U4.23.01]
AFFE_CARA_ELEM	COQUE	EPAIS ANGL_REP	[U4.24.01]
AFFE_CHAR_MECA	LIAISON_DDL FORCE_ARETE		[U4.25.01]
STAT_NON_LINE	COMP_INCR	VMIS_ISOT_LINE	[U4.32.01]

10 Résultats de la modélisation D

10.1 Valeurs testées

Les valeurs sont testées au point A du trajet de chargement OA. On teste ainsi :

Les déplacements (DEPL). Il se déduisent aisément de la solution de référence puisque la déformation est homogène.

Identification	Référence	Aster	% différence
DY N01	$1.86722 \cdot 10^{-2}$	$1.86722 \cdot 10^{-2}$	0
DZ N01	$-3.25413 \cdot 10^{-2}$	$-3.25413 \cdot 10^{-2}$	0
DY N08	$1.224 \cdot 10^{-2}$	$1.224 \cdot 10^{-2}$	0
DZ N08	$-1.84485 \cdot 10^{-2}$	$-1.84485 \cdot 10^{-2}$	0
DY N02	$5.80782 \cdot 10^{-3}$	$5.80782 \cdot 10^{-3}$	0
DZ N02	$-4.35586 \cdot 10^{-3}$	$-4.35586 \cdot 10^{-3}$	0

Les efforts généralisés par éléments aux nœuds (SIEF_ELNO_ELGA).

Identification	Référence	Aster	% différence
NXX MA1 N01	$3.024 \cdot 10^2$	$3.02399 \cdot 10^2$	$-2.2 \cdot 10^{-6}$
NXY MA1 N01	$1.862 \cdot 10^2$	$1.862005 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^{-6}$
NXX MA1 N03	$3.024 \cdot 10^2$	$3.02399 \cdot 10^2$	$-2.2 \cdot 10^{-6}$
NXY MA1 N03	$1.862 \cdot 10^2$	$1.862005 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^{-6}$
NXX MA2 N03	$3.024 \cdot 10^2$	$3.02399 \cdot 10^2$	$-2.2 \cdot 10^{-6}$
NXY MA2 N03	$1.862 \cdot 10^2$	$1.862005 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^{-6}$
NXX MA3 N02	$3.024 \cdot 10^2$	$3.02399 \cdot 10^2$	$-2.2 \cdot 10^{-6}$
NXY MA3 N02	$1.862 \cdot 10^2$	$1.862005 \cdot 10^2$	$2.9 \cdot 10^{-6}$

Les déformations par élément aux nœuds à partir des déplacements (EPSI_ELNO_DEPL).

Identification	Référence	Aster	% différence
EPXX MA1 N01	$1.48297 \cdot 10^{-2}$	$1.48296 \cdot 10^{-2}$	$-3.24 \cdot 10^{-6}$
EPYY MA1 N01	$-7.25977 \cdot 10^{-3}$	$-7.25973 \cdot 10^{-3}$	$-6.69 \cdot 10^{-6}$
EPXY MA1 N01	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$2.91 \cdot 10^{-6}$
EPXX MA1 N03	$1.48297 \cdot 10^{-2}$	$1.48296 \cdot 10^{-2}$	$-3.24 \cdot 10^{-6}$
EPYY MA1 N03	$-7.25977 \cdot 10^{-3}$	$-7.25973 \cdot 10^{-3}$	$-6.69 \cdot 10^{-6}$
EPXY MA1 N03	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$2.91 \cdot 10^{-6}$
EPXX MA2 N03	$1.48297 \cdot 10^{-2}$	$1.48296 \cdot 10^{-2}$	$-3.24 \cdot 10^{-6}$
EPYY MA2 N03	$-7.25977 \cdot 10^{-3}$	$-7.25973 \cdot 10^{-3}$	$-6.69 \cdot 10^{-6}$
EPXY MA2 N03	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$2.91 \cdot 10^{-6}$
EPXX MA3 N02	$1.48297 \cdot 10^{-2}$	$1.48296 \cdot 10^{-2}$	$-3.24 \cdot 10^{-6}$
EPYY MA3 N02	$-7.25977 \cdot 10^{-3}$	$-7.25973 \cdot 10^{-3}$	$-6.69 \cdot 10^{-6}$
EPXY MA3 N02	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$2.91 \cdot 10^{-6}$
EPXX MA3 N04	$1.48297 \cdot 10^{-2}$	$1.48296 \cdot 10^{-2}$	$-3.24 \cdot 10^{-6}$
EPYY MA3 N04	$-7.25977 \cdot 10^{-3}$	$-7.25973 \cdot 10^{-3}$	$-6.69 \cdot 10^{-6}$
EPXY MA3 N04	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$1.36014 \cdot 10^{-2}$	$2.91 \cdot 10^{-6}$

Les contraintes élastiques par élément aux nœuds à partir des déplacements (utilisation en élasticité)
(SIGM_ELNO_DEPL)

Identification	Référence	Aster	% différence
SIXX MA1 N01	$2.71109 \cdot 10^3$	$2.71108 \cdot 10^3$	$-2.64 \cdot 10^{-6}$
SIYY MA1 N01	$-6.02328 \cdot 10^2$	$-6.02321 \cdot 10^2$	-10^{-3}
SIXY MA1 N01	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.91 \cdot 10^{-6}$
SIXX MA1 N03	$2.71109 \cdot 10^3$	$2.71108 \cdot 10^3$	$-2.64 \cdot 10^{-6}$
SIYY MA1 N03	$-6.02328 \cdot 10^2$	$-6.02321 \cdot 10^2$	-10^{-3}
SIXY MA1 N03	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.91 \cdot 10^{-6}$
SIXX MA2 N03	$2.71109 \cdot 10^3$	$2.71108 \cdot 10^3$	$-2.64 \cdot 10^{-6}$
SIYY MA2 N03	$-6.02328 \cdot 10^2$	$-6.02321 \cdot 10^2$	-10^{-3}
SIXY MA2 N03	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.91 \cdot 10^{-6}$
SIXX MA3 N02	$2.71109 \cdot 10^3$	$2.71108 \cdot 10^3$	$-2.64 \cdot 10^{-6}$
SIYY MA3 N02	$-6.02328 \cdot 10^2$	$-6.02321 \cdot 10^2$	-10^{-3}
SIXY MA3 N02	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.04021 \cdot 10^3$	$2.91 \cdot 10^{-6}$

10.2 Paramètres d'exécution

Version : 4.02.31

Machine : CRAY C90

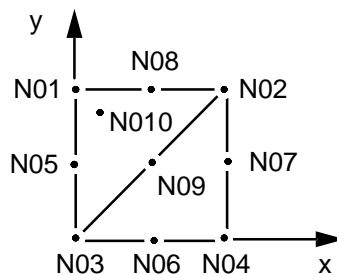
Encombrement mémoire : 15.32 MW

Temps CPU User : 10.11 secondes

11 Modélisation E

11.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation coque 3D (MEC3TR7H)



Conditions aux limites :

```
DDL_IMPO : (NOEUD: N04, DX: 0., DY:0.)
            (NOEUD: N02, DX: 0. )
            (NOEUD : N07, DX :0.)
            (NOEUD: (N01, N02, N03)DZ:0.)
```

Chargement

```
FORCE_NODALE : (NOEUD: N01, FX: -9.683333, FY:-15.516666)
                (NOEUD: N02, FX: 15.516666, FY: 15.516666)
                (NOEUD: N03, FX:-40.716666, FY:-15.516666)
                (NOEUD: N04, FX:-15.516666, FY: 15.516666)
                (NOEUD: N05, FX:-100.8, FY:-62.066666)
                (NOEUD: N06, FX:-62.066666)
                (NOEUD: N07, FX: 62.066666)
                (NOEUD: N08, FX: 62.066666)
```

11.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 11

Nombre de mailles et types : 2 TRIA7

11.3 Fonctionnalités testées

Commandes			Clés
DEFI_MATERIAU	ECRO_LINE	D_SIGM_EPSI SY	[U4.23.01]
AFFE_CARA_ELEM	COQUE	EPAIS	[U4.24.01]
STAT_NON_LINE	COMP_INCR	VMIS_ISOT_LINE	[U4.32.01]

12 Résultats de la modélisation E

12.1 Valeurs testées

Le déplacement du nœud N01 se déduit aisément de la solution de référence puisque la déformation est homogène. Il est testé non en A mais aussi en un point O' ($\sigma^D = 123.8$ $\tau^D = 76.2$) du trajet OA. La déformation plastique cumulée est également testée.

Identification	Instants	Référence	Aster	% différence
DX N01	O'	$-6.349 \cdot 10^{-4}$	$-6.349 \cdot 10^{-4}$	0
DY N01	O'	$-1.207 \cdot 10^{-3}$	$-1.207 \cdot 10^{-3}$	0
DY N01	A	$-3.431 \cdot 10^{-2}$	$-3.446 \cdot 10^{-2}$	0.4
p	A	$2.055 \cdot 10^{-2}$	$2.055 \cdot 10^{-2}$	0.

12.2 Remarque

Seule la portion OA du trajet du chargement est effectivement testée.

12.3 Paramètres d'exécution

Version : 4.01.05

Machine : CRAY C98

Encombrement mémoire : 8 MW

Temps CPU User : 8.5 secondes

13 Synthèse des résultats

Les résultats sont identiques quelle que soit la modélisation choisie. Les résultats sont proches de la solution de référence puisque les écarts sont globalement inférieurs à 0.6%.