

Manuel de Validation**Fascicule V6.01 : Statique non linéaire en axisymétrie****Document V6.01.100**

SSNA100 - Tube de Bree : Méthode Zarka-Casier (ZAC)

Résumé :

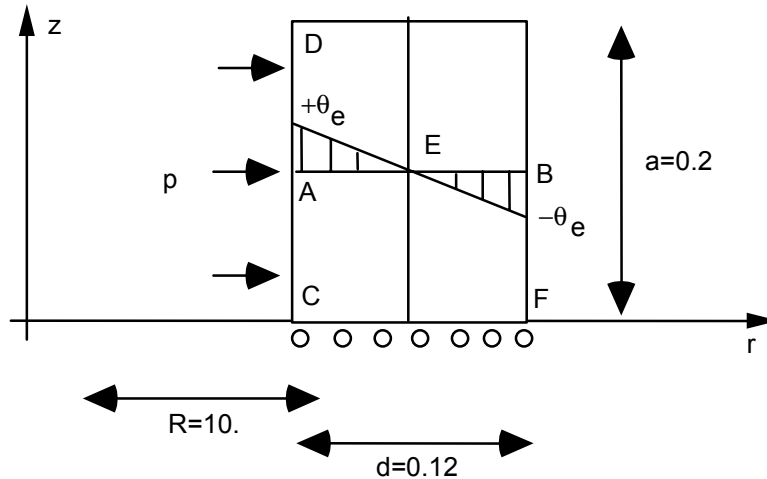
Ce test de mécanique quasi-statique non linéaire consiste à modéliser un cylindre infini soumis à une pression interne et un gradient de température dans l'épaisseur dépendant cycliquement du temps (tube de BREE). Le comportement est élasto-plastique avec un critère de Von Mises et un écrouissage cinématique linéaire. On valide ainsi la méthode simplifiée Zarka-Casier (ZAC) en axisymétrie pour un chargement radial dans un cas d'adaptation ($\Delta T=30^{\circ}\text{C}$) puis dans un cas d'accommodation ($\Delta T=120^{\circ}\text{C}$). Cette méthode est un post-traitement réalisé par la commande `POST_ZAC` [U4.83.21]. Pour plus de détails on se référera au document [R7.06.01]. Deux modélisations permettent de tester la méthode en 2D et 3D :

- dans la modélisation A : le cylindre est modélisé par des éléments 2D axisymétriques (QUAD8),
- dans la modélisation B : le cylindre est modélisé en 3D (mailles HEXA20).

Les résultats obtenus par le *Code_Aster* sont très proches de la solution de référence.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie



1.2 Propriétés de matériaux

$$E = 200\,000 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.3$$

$$\alpha = 1.e-4 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$T_{\text{réf}} = 0.$$

Relation de comportement élastoplastique avec critère de Von Mises et écrouissage cinématique linéaire :

$$E_T = 18181. \text{ MPa} \quad \sigma_y = 200. \text{ MPa}$$

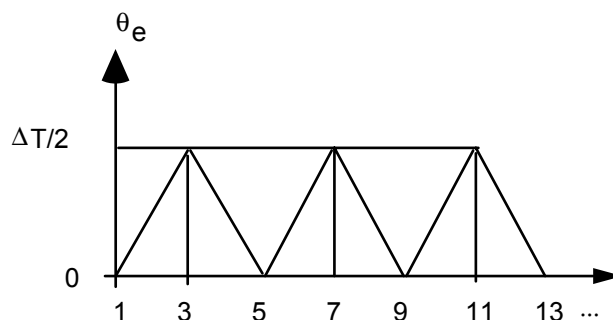
1.3 Conditions aux limites et chargements

Sur AB : $u_z = 0$

Chargement :

- pression uniforme constante $p = 2. \text{ MPa}$ sur CD.
- température linéaire dans l'épaisseur et variant en fonction du temps :

$$\theta(r) = -\frac{2(r-R)}{d}\theta_e(t) \quad \text{avec} \quad \theta_e(t) = \left(\frac{\Delta T}{2}\right)f(t)$$



2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

Calcul élastoplastique effectué avec le *Code Aster* sur vingt cycles dans le cas d'adaptation ($\Delta T = 30^\circ\text{C}$).

Solution analytique pour le cas d'accommodation avec $\Delta T = 120^\circ\text{C}$ ([bib1]).

2.2 Résultats de référence

$\varepsilon_{zz\lim}^p$ et $\sigma_{zz\lim}^{moy}$ dans le cas d'adaptation ($\varepsilon_{zzmoy}^p, \sigma_{zzmoy}, \varepsilon_{zzinf}^p, \sigma_{zzinf}, \varepsilon_{zzsup}^p, \sigma_{zzsup}$ dans le cas d'accommodation) relevés aux points C (peau interne), E (surface moyenne) et F (peau externe).

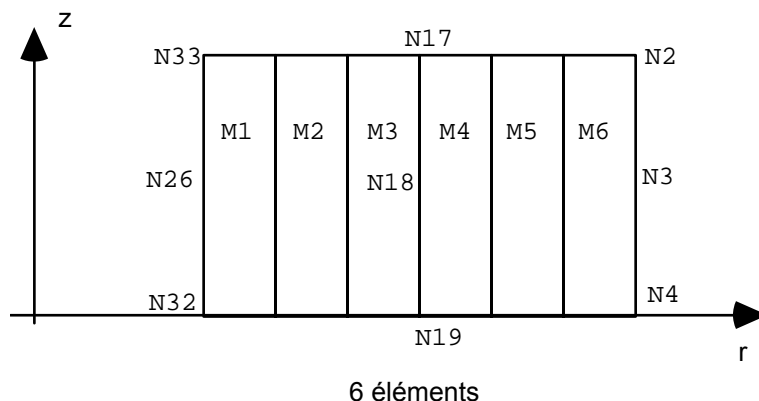
2.3 Références bibliographiques

- [1] Contrat EDF SEPTEN NC 4158. Etude relative au comportement des composants des réacteurs nucléaires. Laboratoire de mécanique des solides. Ecole Polytechnique, Palaiseau, juin 1985.
- [2] S.TAHERI : "Méthode ZAC". Note EDF/DER HI-71/6139 du 14 Juin 1989.

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Il s'agit d'une modélisation axisymétrique.



Le chargement et les conditions aux limites sont modélisés par :

DDL_IMPO : (NOEUD : (N26 N3) , DY : 0.)

TEMP_CALCULEE : tempe

où tempe est la fonction positive définie plus haut pour les instants $t=1$ et 3 [§1.3]

PRES_REP : (GROUP_MA : L4, PRES : 2.)

Deux calculs préalables sont réalisés :

- un calcul élastique pour les chargements min. et max. sur un cycle ($t_{\min} = 1$ et $t_{\max} = 3$)
- un calcul élastoplastique optionnel jusqu'au chargement maximum avant décharge ($t_A = 3$)

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 33

Nombre de mailles et type : 6 éléments QUAD8

3.3 Fonctionnalités testées

Commandes

AFFE_MODELE	AFFE	MODELISATION	AXIS
DEFI_MATERIAU	ECRO_LINE	D_SIGM_EPSI	
		SY	
AFFE_CHAR_MECA	PRES_REP	GROUP_MA	
	TEMP_CALCULEE		
STAT_NON_LINE	COMP_INCR	RELATION	VMIS_CINE_LINE
MECA_STATIQUE	OPTION	SIEF_ELGA_DEPL	
POST_ZAC	EVOL_ELAS		
	EVOL_NOLI		

4 Résultats de la modélisation A

4.1 Valeurs testées

- $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, cas d'adaptation.
Les résultats de référence proviennent d'un calcul élastoplastique Aster sur 20 cycles.

- sans demi-cycle élastoplastique donné ($\alpha_0=0$)

Identification	Référence	ZAC - Aster	% différence
ε_{zz}^p au nœud N32 (peau interne)	$1.7898 \cdot 10^{-3}$	$2.7142 \cdot 10^{-3}$	+51.65%
σ_{zz}^{moy} au nœud N32 (peau interne)	86.55	72.27	-16.50%
ε_{zz}^p au nœud N4 (peau externe)	$3.1031 \cdot 10^{-3}$	$3.8715 \cdot 10^{-3}$	+24.76%
σ_{zz}^{moy} au nœud N4 (peau externe)	114.03	128.35	+12.56%

- avec demi-cycle élastoplastique donné ($\alpha_0=0$)

Identification	Référence	ZAC - Aster	% différence
ε_{zz}^p au nœud N32 (peau interne)	$1.7898 \cdot 10^{-3}$	$1.7872 \cdot 10^{-3}$	-0.14 %
σ_{zz}^{moy} au nœud N32 (peau interne)	86.55	89.09	+2.93%
ε_{zz}^p au nœud N4 (peau externe)	$3.1031 \cdot 10^{-3}$	$3.1053 \cdot 10^{-3}$	+0.07%
σ_{zz}^{moy} au nœud N4 (peau externe)	114.03	114.31	+0.24 %

- $\Delta T = 120^\circ\text{C}$, cas d'accommodation.
Les résultats de référence proviennent d'une solution analytique donnée dans [bib1]

- sans demi-cycle élastoplastique donné ($\alpha_0=0$)

Identification	Référence	ZAC - Aster	% différence
ε_{zz}^p au nœud N32 (peau interne)	$4.141 \cdot 10^{-3}$	$4.424 \cdot 10^{-3}$	+6.83%
σ_{zz}^{moy} au nœud N32 (peau interne)	91.82	87.52	-4.68%
ε_{zz}^p au nœud N4 (peau externe)	$9.59 \cdot 10^{-3}$	$9.75 \cdot 10^{-3}$	+1.64%
σ_{zz}^{moy} au nœud N4 (peau externe)	191.90	195.17	+1.70%
ε_{zz}^p au nœud N18 (surf.moyenne)	$5.96 \cdot 10^{-3}$	$6.20 \cdot 10^{-3}$	+4.06%
σ_{zz}^{moy} au nœud N18 (surf.moyenne)	319.18	320.45	+0.39%
$\Delta\varepsilon_{zz}^p$ au nœud N32 (peau interne)	$3.6363 \cdot 10^{-3}$	$3.6574 \cdot 10^{-3}$	+0.58%
$\Delta\sigma_{zz}^{moy}$ au nœud N32 (peau interne)	472.72	474.66	+0.41%
$\Delta\varepsilon_{zz}^p$ au nœud N4 (peau externe)	$3.6328 \cdot 10^{-3}$	$3.6098 \cdot 10^{-3}$	-0.63%
$\Delta\sigma_{zz}^{moy}$ au nœud N4 (peau externe)	472.72	473.97	+0.26%
$\Delta\varepsilon_{zz}^p$ au nœud N32 (peau interne)	$3.6363 \cdot 10^{-3}$	$3.6604 \cdot 10^{-3}$	+0.66%
$\Delta\sigma_{zz}^{moy}$ au nœud N32 (peau interne)	472.72	473.31	+0.12%
$\Delta\varepsilon_{zz}^p$ au nœud N4 (peau externe)	$3.6328 \cdot 10^{-3}$	$3.6097 \cdot 10^{-3}$	-0.63%
$\Delta\sigma_{zz}^{moy}$ au nœud N4 (peau externe)	472.72	473.18	+0.09%

- avec demi-cycle élastoplastique donné (α_0_0)

Identification	Référence	ZAC - Aster	% différence
$\varepsilon_{zz\ moy}^p$ au nœud N32 (peau interne)	4.141 10 ⁻³	4.177 10 ⁻³	+0.89%
$\sigma_{zz\ moy}$ au nœud N32 (peau interne)	91.82	83.43	-9.13%
$\varepsilon_{zz\ moy}^p$ au nœud N4 (peau externe)	9.59 10 ⁻³	9.51 10 ⁻³	-0.87%
$\sigma_{zz\ moy}$ au nœud N4 (peau externe)	191.90	190.39	-0.79%
$\varepsilon_{zz\ moy}^p$ au nœud N18 (surf.moyenne)	5.959 10 ⁻³	5.963 10 ⁻³	+0.08%
$\sigma_{zz\ moy}$ au nœud N18 (surf.moyenne)	319.18	313.5	-1.78%
$\Delta\varepsilon_{zz\ inf}^p$ au nœud N32 (peau interne)	3.6363 10 ⁻³	3.6574 10 ⁻³	+0.58%
$\Delta\sigma_{zz\ inf}$ au nœud N32 (peau interne)	472.72	474.66	+0.41%
$\Delta\varepsilon_{zz\ inf}^p$ au nœud N4 (peau externe)	3.6328 10 ⁻³	3.6098 10 ⁻³	-0.63%
$\Delta\sigma_{zz\ inf}$ au nœud N4 (peau externe)	472.72	473.97	+0.26%
$\Delta\varepsilon_{zz\ sup}^p$ au nœud N32 (peau interne)	3.6363 10 ⁻³	3.6604 10 ⁻³	+0.66%
$\Delta\sigma_{zz\ sup}$ au nœud N32 (peau interne)	472.72	473.31	+0.12%
$\Delta\varepsilon_{zz\ sup}^p$ au nœud N4 (peau externe)	3.6328 10 ⁻³	3.6097 10 ⁻³	-0.63%
$\Delta\sigma_{zz\ sup}$ au nœud N4 (peau externe)	472.72	473.18	+0.09%

4.2 Remarques

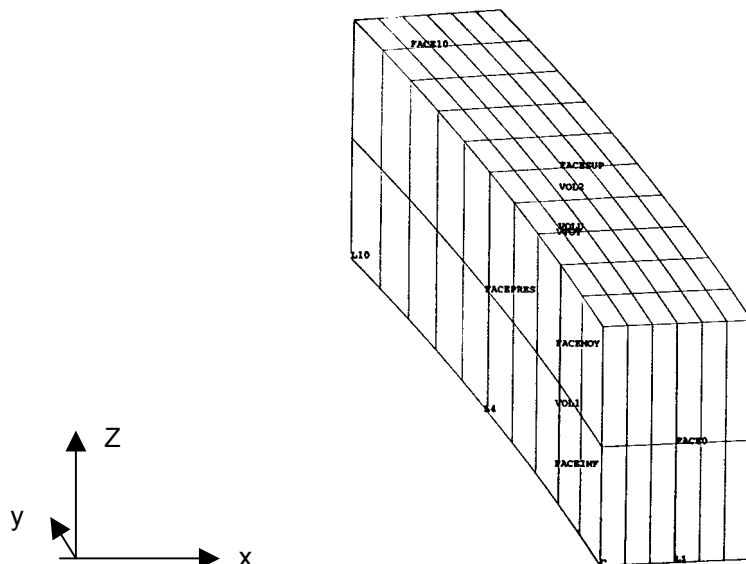
Dans le cas d'accommodation ($\Delta T=120^\circ\text{C}$), les mailles M1, M2, M5 et M6 forment une zone accommodée alors que la zone centrale (mailles M2 et M3) reste adaptée.

5 Modélisation B

5.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D

Angle maille : 5°



Le chargement et les conditions aux limites sont modélisés par :

```
DDL_IMPO : (GROUP_NO : facemoy, DZ : 0.)
           : (GROUP_NO : face0, DY : 0)
FACE_IMPO : (GROUP_MA : face10, DNOR : 0)
```

TEMP_CALCULEE : tempe

où tempe est la fonction positive définie plus haut pour les instants $t=1$ et 3 [§1.3]

```
PRES_REP : (GROUP_MA : facepres, PRES : 2.)
```

Deux calculs préalables sont réalisés :

- un calcul élastique pour les chargements min. et max. sur un cycle ($t_{\min} = 1$ et $t_{\max} = 3$)
- un calcul élastoplastique optionnel jusqu'au chargement maximum avant décharge ($t_A = 3$)

5.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 793

Nombre de mailles et type : 120 éléments HEXA20

5.3 Fonctionnalités testées

Commandes

AFFE_MODELE	AFFE	MODELISATION	AXIS
DEFI_MATERIAU	ECRO_LINE	D_SIGM_EPSI	
		SY	
AFFE_CHAR_MECA	PRES_REP	GROUP_MA	
	TEMP_CALCULEE		
STAT_NON_LINE	COMP_INCR	RELATION	VMIS_CINE_LINE
MECA_STATIQUE	OPTION	SIEF_ELGA_DEPL	
POST_ZAC	EVOL_ELAS		
	EVOL_NOLI		

6 Résultats de la modélisation B

6.1 Valeurs testées

- $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, cas d'adaptation.
Les résultats de référence proviennent d'un calcul élastoplastique Aster sur 20 cycles.

- sans demi-cycle élastoplastique donné ($\alpha_0=0$)

Identification	Référence	ZAC - Aster	% différence
$\varepsilon_{zz\text{ lim}}^p$ au point C (peau interne)	$1.7898 \cdot 10^{-3}$	$2.7151 \cdot 10^{-3}$	51.700
$\varepsilon_{zz\text{ lim}}^p$ au point F (peau externe)	$3.1031 \cdot 10^{-3}$	$3.8794 \cdot 10^{-3}$	25.014

- avec demi-cycle élastoplastique donné ($\alpha_0=0$)

Identification	Référence	ZAC - Aster	% différence
$\varepsilon_{zz\text{ lim}}^p$ au point C (peau interne)	$1.7898 \cdot 10^{-3}$	$1.7911 \cdot 10^{-3}$	0.075
$\varepsilon_{zz\text{ lim}}^p$ au point F (peau externe)	$3.1031 \cdot 10^{-3}$	$3.1133 \cdot 10^{-3}$	0.327

- $\Delta T = 120^\circ\text{C}$, cas d'accommodation.
Les résultats de référence proviennent d'une solution analytique donnée dans [bib1]

- sans demi-cycle élastoplastique donné ($\alpha_0=0$)

Identification	Référence	ZAC - Aster	% différence
$\varepsilon_{zz\text{ moy}}^p$ au point C (peau interne)	$4.141 \cdot 10^{-3}$	$4.4393 \cdot 10^{-3}$	7.203
$\sigma_{zz\text{ moy}}$ au point C (peau interne)	91.82	$8.782\text{E}+01$	-4.345
$\varepsilon_{zz\text{ moy}}^p$ au point F (peau externe)	$9.59 \cdot 10^{-3}$	$9.766 \cdot 10^{-3}$	1.803
$\sigma_{zz\text{ moy}}$ au point F (peau externe)	191.90	$1.9537\text{E}+02$	1.803
$\Delta\varepsilon_{zz\text{ inf}}^p$ au point C (peau interne)	$3.6363 \cdot 10^{-3}$	$3.6299 \cdot 10^{-3}$	-0.176
$\Delta\sigma_{zz\text{ inf}}$ au point C (peau interne)	472.72	$4.7328\text{E}+02$	0.117
$\Delta\varepsilon_{zz\text{ inf}}^p$ au point F (peau externe)	$3.6328 \cdot 10^{-3}$	$3.6401 \cdot 10^{-3}$	0.202
$\Delta\sigma_{zz\text{ inf}}$ au point F (peau externe)	472.72	$4.7367\text{E}+02$	0.200
$\Delta\varepsilon_{zz\text{ sup}}^p$ au point C (peau interne)	$3.6363 \cdot 10^{-3}$	$3.632 \cdot 10^{-3}$	-0.119
$\Delta\sigma_{zz\text{ sup}}$ au point C (peau interne)	472.72	$4.7205\text{E}+02$	-0.142
$\Delta\varepsilon_{zz\text{ sup}}^p$ au point F (peau externe)	$3.6328 \cdot 10^{-3}$	$3.6405 \cdot 10^{-3}$	0.212
$\Delta\sigma_{zz\text{ sup}}$ au point F (peau externe)	472.72	$4.7323\text{E}+02$	0.106

- avec demi-cycle élastoplastique donné (α_0_0)

Identification	Référence	ZAC - Aster	% différence
$\varepsilon_{zz\ moy}^p$ au point C (peau interne)	$4.141\ 10^{-3}$	$4.1905\ 10^{-3}$	1.195
$\sigma_{zz\ moy}$ au point C (peau interne)	$9.182\ 10^{+1}$	$8.305\ 10^{+1}$	-9.552
$\varepsilon_{zz\ moy}^p$ au point F (peau externe)	$9.59\ 10^{-3}$	$9.5225\ 10^{-3}$	-0.741
$\sigma_{zz\ moy}$ au point F (peau externe)	$1.9190\ 10^{+2}$	$1.9031\ 10^{+2}$	-0.832
$\Delta\varepsilon_{zz\ inf}^p$ au point C (peau interne)	$3.6363\ 10^{-3}$	$3.6299\ 10^{-3}$	-0.176
$\Delta\sigma_{zz\ inf}$ au point C (peau interne)	$4.7272\ 10^{+2}$	$4.7328\ 10^{+2}$	0.117
$\Delta\varepsilon_{zz\ inf}^p$ au point F (peau externe)	$3.6328\ 10^{-3}$	$3.64041\ 10^{-3}$	0.202
$\Delta\sigma_{zz\ inf}$ au point F (peau externe)	$4.7272\ 10^{+2}$	$4.7367\ 10^{+2}$	0.200
$\Delta\varepsilon_{zz\ sup}^p$ au point C (peau interne)	$3.6363\ 10^{-3}$	$3.632\ 10^{-3}$	-0.119
$\Delta\sigma_{zz\ sup}$ au point C (peau interne)	$4.7272\ 10^{+2}$	$4.7205\ 10^{+2}$	-0.142
$\Delta\varepsilon_{zz\ sup}^p$ au point F (peau externe)	$3.6328\ 10^{-3}$	$3.6405\ 10^{-3}$	0.212
$\Delta\sigma_{zz\ sup}$ au point F (peau externe)	$4.7272\ 10^{+2}$	$4.7323\ 10^{+2}$	0.106

6.2 Remarques

Dans le cas d'accommodation ($\Delta T=120^\circ\text{C}$), les mailles M1, M2, M5 et M6 forment une zone accommodée alors que la zone centrale (mailles M2 et M3) reste adaptée.

7 Synthèse des résultats

Il apparaît à l'issue de ce test que les résultats obtenus sont en bon accord avec les solutions de référence. Toutefois, dans le cas de l'adaptation ($\Delta T=30^{\circ}\text{C}$) la projection à partir d'un état initial correspondant au calcul préalable d'un demi-cycle élastoplastique est nécessaire pour approcher fidèlement les solutions. A l'inverse, le cas d'accommodation ($\Delta T=120^{\circ}\text{C}$) possède déjà des résultats correctement approchés à partir d'un état initial nul.

On trouvera dans [bib1] et [bib2] d'autres résultats relatifs à ce test comme le calcul incrémental réalisé avec COCAINE ou bien les solutions numériques obtenus avec la méthode ZAC programmée dans le code INCA.