SSNP143 – Validation du clavage/sciage pour la loi de joint de plot des barrages

Résumé :

Deux procédures industrielles sur les barrages sont testées : le clavage et le sciage.
Le clavage se présente comme une injection du béton sous pression entre les plots d'un barrage. C'est une étape intermédiaire de la construction d'un barrage-voûte, il sert à renforcer son étanchéité après la phase de construction de plots verticaux. Le sciage est une procédure similaire pendant laquelle le barrage est scié afin de relâcher les contraintes. Ceci peut intervenir avant ou après la mis en eau. Ce test permet de valider les deux procédures en effectuant le clavage/sciage entre les deux plots réguliers, qui sont soit encastrés au sol et soumis à la force gravitationnelle (modélisations A, B, E, F, G, H), soit comprimés sur les côtés (modélisations C et D). La procédure est définie via un mot-clef PRES_CLAVAGE et SCIAGE dans DEFI_MATERIAU pour le matériau JOINT_MECA_RUPT/FROT. Les lois correspondantes portent les mêmes noms. On teste le comportement des joints bidimensionnels et tridimensionnels, correspondants aux modélisations : PLAN_JOINT et 3D_JOINT.

Modélisation A : Clavage industriel 2D ; loi JOINT_MECA_RUPT
Modélisation B : Clavage industriel 3D ; loi JOINT_MECA_RUPT
Modélisation C : Sciage théorique 2D ; lois JOINT_MECA_RUPT/FROT
Modélisation D : Sciage théorique 3D ; lois JOINT_MECA_RUPT/FROT
Modélisation E : Sciage industriel 2D ; loi JOINT_MECA_RUPT
Modélisation F : Sciage industriel 3D ; loi JOINT_MECA_RUPT
Modélisation G : Sciage industriel 2D ; loi JOINT_MECA_FROT
Modélisation H : Sciage industriel 3D ; loi JOINT_MECA_FROT

Pour le clavage on compare le profil d'épaisseur des joints après le clavage avec les résultats fournis par un autre code de calcul (SOURCE_EXTERNE *GEFDYN)*. Pour le sciage on fait une comparaison avec une estimation théorique (modélisation C et D). Par ailleurs on fait des tests de NON_REGRESSION des valeurs de l'épaisseur du joint, ainsi que des efforts correspondants.

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

1 Problème de référence

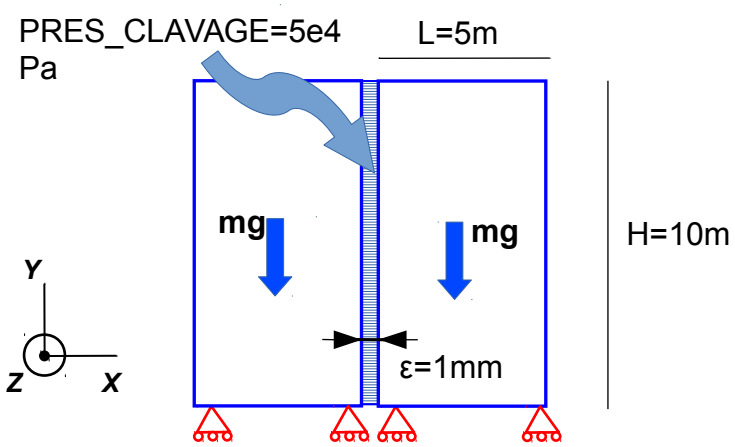
1.1 Géométrie et chargement

On considère deux plots de barrage, représentés par des cubes réguliers de longueur $L=5\mathrm{m}$, hauteur $H=10\mathrm{m}$ et profondeur $P=1\mathrm{m}$. La distance entre les plots est supposée non nulle pour simplifier la génération du maillage des joints ($\varepsilon=1\mathrm{mm}$). L'encastrement varie en fonction des modélisations.

1.1.1 Modélisations A,B,E,F,G,H

Les parties inférieures des plots sont encastrées. Les plots sont soumis à leurs poids gravitationnels. Le chargement se déroule en deux étapes :

- Les plots s'équilibrent sous le chargement gravitationnel. Le joint s'ouvre dans la partie supérieure à cause de la compression des parties inférieures des plots. On applique par la suite une des deux procédures industrielles :
  - La procédure de clavage est activée : « le béton est injecté » entre les plots à PRES_CLAVAGE= $5\,10^4 Pa$. Le profil de l'épaisseur de joint est alors modifié de sorte à obtenir la pression de clavage sur les lèvres de la fissure. C'est ce profil qui est stocké ensuite par une des variables internes pour « mémoriser » la quantité de béton injecté.
  - La procédure de sciage est activée via mot clef SCIAGE. L'épaisseur de la scie δ_{scie} est choisie en sorte que la partie haute de plot ne soit sciée que partiellement.

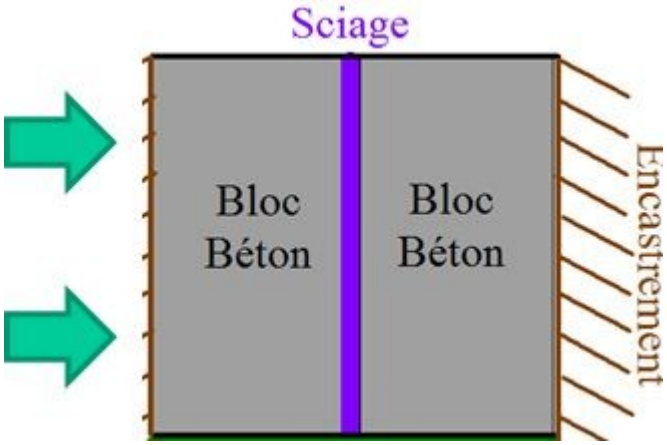


Dessin 1: Schéma des plots de barrage, conditions aux limites et chargement

1.1.2 Modélisations C,D

Le côté gauche du plot est encastré, tandis qu'on applique un déplacement imposé sur le côté droit du plot. La procédure de sciage est activée par la suite via le mot clef SCIAGE. L'épaisseur de la scie δ_{scie} est choisie de sorte que le joint ne soit scié que partiellement.

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



Dessin 2: Modélisations C et D, qui permettent la validation théorique du sciage

1.2 Propriétés du matériau

Les valeurs des paramètres mécaniques des plots (module de Young, coefficient de Poisson, densité volumique) sont choisies de la façon suivante :

$$E=3.10^2\ Pa \qquad \nu=0,25 \qquad \rho_b=2400\ kg/m^3$$

L'épaisseur de scie varie en fonction de la modélisation.

1.2.1 Matériau JOINT_MECA_RUPT

Pour le joint, on prend la raideur normale égale à la raideur tangentielle. Il n'y a pas de résistance à la traction. Le couplage entre l'ouverture normale et la raideur tangentielle est choisi de sorte à avoir la pente tangentielle nulle dès que le joint atteint le seuil d'endommagement normal complet. La pente d'adoucissement en rupture est cinq fois plus raide que la pente de chargement normale (voir document R7.01.25). On clave après le chargement mécanique gravitationnel à une pression de clavage non nulle :

$$K_N=K_T=10^{12}\ Pa/m \qquad \sigma_{max}=0\ Pa \qquad \text{pena_contact}=0.8$$
$$\alpha=1 \qquad \text{pena_rupt}=0.2 \qquad \text{pres_clav}=4.10^4\ Pa$$

(NB : valeurs « tests » qui ne correspondent à aucun matériau en particulier)

1.2.2 Matériau JOINT_MECA_FROT

Pour la loi de frottement associé au joint, on choisit des valeurs « tests » qui ne correspondent à aucun matériau en particulier.

$$K_N=K_T/2=10^{12}\ Pa/m \qquad \sigma_{max}=3\ MPa$$
$$\mu=0.35 \qquad \text{adhe}=1000 \qquad \text{ecrouissage}=0.1\ K_T$$

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

2 Solution de référence

2.1 Procédure de clavage

Nous prenons comme référence la solution donnée par le code de calcul *GEFDYN*. Cette procédure a été validée sur de nombreux ouvrages industriels. L'ouverture du joint après le clavage est testée.

2.2 Procédure de sciage

Comme pour le sciage nous ne possédons pas de solution venant d'un code extérieur. Cette dernière est validée alors théoriquement dans les modélisations C et D, qui acceptent une solution $1D$.
D'abord on applique une compression homogène δ_{impo} sur le côté gauche du plot. Le chargement est quasi $1D$ et on a donc l'équivalence de contraintes dans le joint et dans le plot, ce qui nous permet d'estimer la valeur de la contrainte appliquée σ :

$$\delta_{plot}+\delta_{joint}=\delta_{impo} \qquad \sigma\, 2\, L/E+\sigma/\mathrm{pena_contact}/K_N=\delta_{impo}$$

Ce qui donne :

$$\sigma=\delta_{impo}/\left(\frac{1}{2\,L\,E}+\frac{1}{\mathrm{pena_contact}\,K_N}\right)$$

Une fois la contrainte connue, on peut appliquer la loi de comportement afin de trouver l'ouverture du joint : $\delta_{joint}=\sigma/\mathrm{pena_contact}/K_N$.
En cas de sciage la valeur de δ_{impo} est diminuée de l'épaisseur de la scie, qui paramétrise le sciage.
Ces valeurs de σ et δ_{joint} sont testées par la suite dans les modélisations C et D.

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

3 Modélisation A : clavage 2D JOINT_MECA_RUPT

3.1 Caractéristiques de la modélisation

La simulation est effectuée avec la modélisation PLAN_JOINT. Les éléments sont de type TRIA3 pour les plots et QUAD4 pour les éléments de joint. La loi de comportement correspondante est JOINT_MECA_RUPT, le matériau associé porte le même nom. Les éléments surfaciques sont élastiques.

3.2 Caractéristiques du maillage

On réalise un maillage linéaire de deux plots et de la fissure.
Éléments volumiques (plots) : 548 TRIA3
Éléments de joint : 20 QUAD4

3.3 Grandeurs testées et résultats

3.3.1 Comparaison source externe

Le premier test est effectué sur les valeurs de profil de l'épaisseur de joint après le clavage en le comparant avec les résultats de GEFDYN. On note δ_n ($V7$) l'ouverture normale de joint après le clavage :

Grandeur testée	*GEFDYN*	*tolérance*
δ_n à la hauteur : $2\,m$	6.38e-7	6 %
δ_n à la hauteur : $5\,m$	2.14e-6	7%
δ_n à la hauteur : $8\,m$	3.88e-6	7%

3.3.2 Tests de non régression

Les valeurs de l'ouverture normale de joint δ_n ($V7$), ainsi que les contraintes normales σ_n sont testées à différentes hauteurs ($2\,m, 4.5\,m, 8.5\,m$).

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

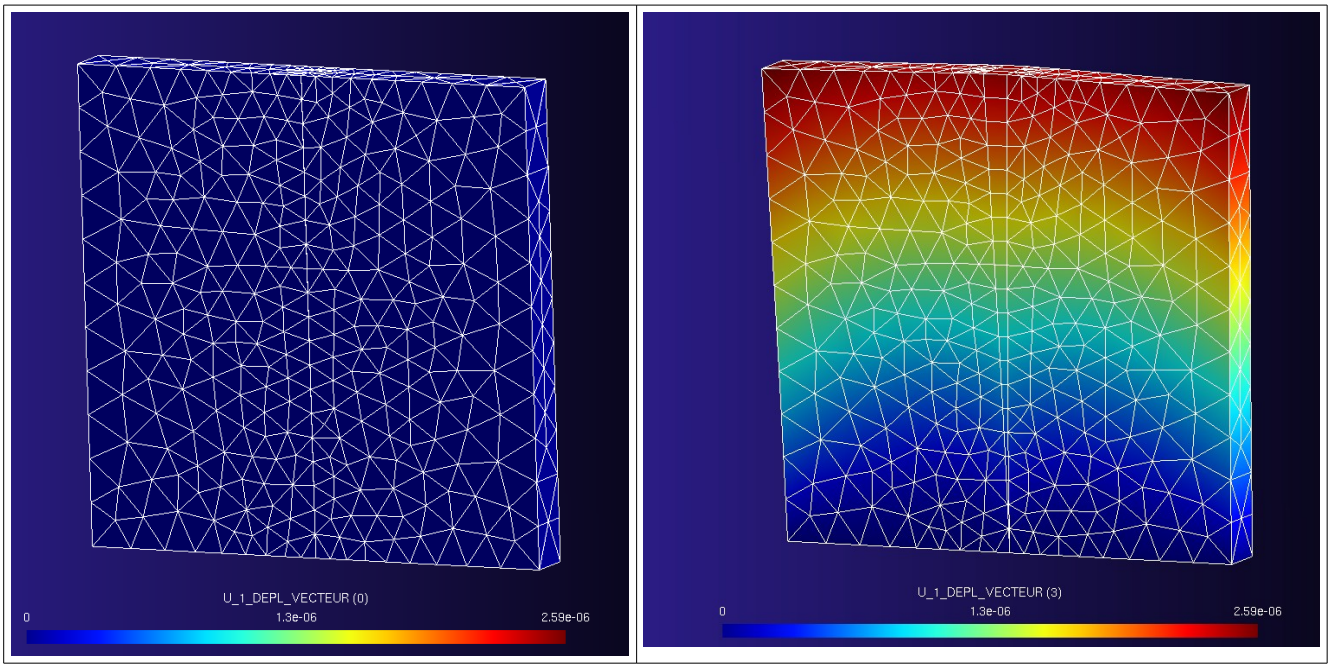
4 Modélisation B :clavage 3D JOINT_MECA_RUPT

4.1 Caractéristiques de la modélisation

La simulation est effectuée avec la modélisation 3D_JOINT. Les éléments sont de type TETRA4 pour les plots et PENTA6 pour les éléments de joint. La loi de comportement correspondante est JOINT_MECA_RUPT, le matériau associé porte le même nom. Les éléments volumiques sont élastiques.

4.2 Caractéristiques du maillage

On réalise un maillage non structuré linéaire par extrusion du maillage 2D (figure ci-dessous).
Éléments volumiques (plots) : 2761 TETRA4
Éléments joint : 92 PENTA6



Dessin 3: Maillage 3D, à gauche l'état initial, à droite l'état après le clavage

4.3 Grandeurs testées et résultats

4.3.1 Comparaison source externe

Le premier test est effectué sur les valeurs de profil de l'épaisseur de joint après le clavage en le comparant avec les résultats de *GEFDYN*. Les maillages de *GEFDYN* et de *Code_Aster* ne sont pas les mêmes ce qui explique la précision de comparaison assez élevée. On note δ_n ($V7$) l'ouverture normale de joint après le clavage :

Grandeur testée	*GEFDYN*	*tolérance*
δ_n à la hauteur : $2\,m$	6.38e-7	4%
δ_n à la hauteur : $5\,m$	2.14e-6	5%
δ_n à la hauteur : $8\,m$	3.88e-6	4%

4.3.2 Tests de non régression

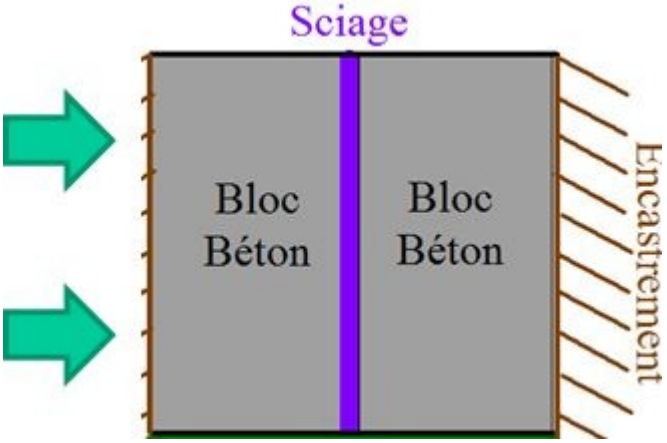
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les valeurs de l'ouverture normale de joint δ_n ($V7$), épaisseur du joint δ_{offset} ($V10$), ainsi que les contraintes normales σ_n sont testées à différentes hauteurs ($2\,m, 4.5\,m, 8.5\,m$).

5 Modélisation C : sciage théorique 2D

5.1 Caractéristiques de la modélisation

La simulation est effectuée avec la modélisation PLAN_JOINT. Les éléments sont de type TRIA3 pour les plots et QUAD4 pour les éléments de joint. On teste les deux lois de comportement JOINT_MECA_FROT et JOINT_MECA_RUPT, le matériau associé porte le même nom. Les éléments surfaciques sont élastiques.



5.2 Caractéristiques du maillage

On réalise un maillage linéaire de deux plots et de la fissure.
Éléments volumiques (plots) : 548 TRIA3
Éléments de joint : 20 QUAD4

5.3 Grandeurs testées et résultats

Les premiers tests sont effectués juste avant le sciage en état où le joint et les plots sont comprimés d'une manière homogène. Ensuite on fait la même série de tests après le sciage. Les valeurs testées sont les profils d'épaisseur de joint, ainsi que son ouverture et la contrainte. On note δ_n ($V7$) l'ouverture normale de joint, épaisseur du joint δ_{offset} ($V10$), ainsi que les contraintes normales σ_n . Le degré de liberté imposé est égale à $\delta_{impo}=-3e\text{-}6$, l'épaisseur de scie est égale $\delta_{scie}=\delta_{impo}/3$

5.3.1 Avant le sciage, loi JOINT_MECA_RUPT

La solution est donnée par la résolution du problème $1D$:

Grandeur testée	'ANALYTIQUE'	tolérance
σ_n à la hauteur : $5\,m$	$\delta_{impo}/(\frac{1}{2\,L\,E}+\frac{1}{\text{pena_contact}\,K_N})=-6.5454545e5$	0.1 %
δ_n à la hauteur : $2\,m$	$\frac{\sigma_n}{\text{pena_contact}\,K_N}=-8.181818181e\text{-}7$	0.1 %

5.3.2 Après le sciage, loi JOINT_MECA_RUPT

La solution est donnée par la résolution du problème $1D$:

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

Grandeur testée	'ANALYTIQUE'	tolérance
σ_n à la hauteur : $5\,m$	$(\delta_{impo}+\delta_{scie})/(\frac{1}{2LE}+\frac{1}{\text{pena_contact}\,K_N})=-4.36364e5$	0.1 %
δ_{offset} à la hauteur : $8\,m$	$-\delta_{scie}=-1e\text{-}6$	0.1 %
δ_n à la hauteur : $2\,m$	$\frac{\sigma_n}{\text{pena_contact}\,K_N}-\delta_{offset}=-1.5454545e\text{-}6$	0.1 %

5.3.3 Avant le sciage, loi JOINT_MECA_FROT

La solution est donnée par la résolution du problème $1D$:

Grandeur testée	'ANALYTIQUE'	tolérance
σ_n à la hauteur : $5\,m$	$\delta_{impo}/(\frac{1}{2LE}+\frac{1}{K_N})=-6.923076923e5$	0.1 %
δ_n à la hauteur : $2\,m$	$\frac{\sigma_n}{K_N}=-6.923076923e\text{-}7$	0.1 %

5.3.4 Après le sciage, loi JOINT_MECA_FROT

La solution est donnée par la résolution du problème $1D$:

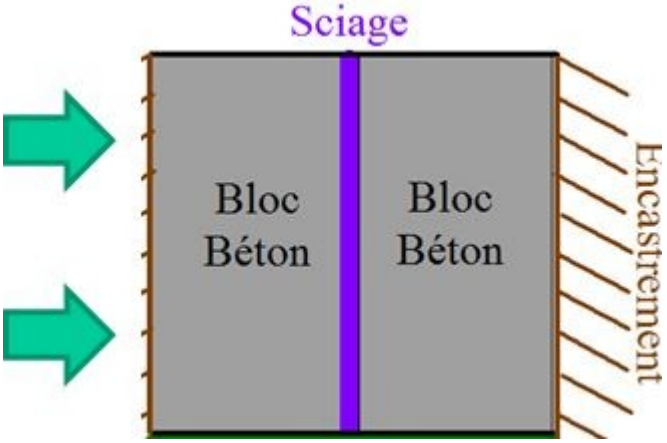
Grandeur testée	'ANALYTIQUE'	tolérance
σ_n à la hauteur : $5\,m$	$(\delta_{impo}+\delta_{scie})/(\frac{1}{2LE}+\frac{1}{K_N})=-4.6153846e5$	0.1 %
δ_{offset} à la hauteur : $8\,m$	$-\delta_{scie}=-1e\text{-}6$	0.1%
δ_n à la hauteur : $2\,m$	$\frac{\sigma_n}{K_N}-\delta_{offset}=-1.46153846e\text{-}6$	0.1 %

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

6 Modélisation D : sciage théorique 3D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

La simulation est effectuée avec la modélisation 3D_JOINT. Les éléments sont de type TETRA4 pour les plots et PENTA6 pour les éléments de joint. On teste les deux lois de comportement JOINT_MECA_FROT et JOINT_MECA_RUPT, le matériau associé porte le même nom. Les éléments surfaciques sont élastiques.



6.2 Caractéristiques du maillage

On réalise un maillage non structuré linéaire par extrusion du maillage $2D$ (figure ci-dessous).
Éléments volumiques (plots) : 2761 TETRA4
Éléments joint : 92 PENTA6

6.3 Grandeurs testées et résultats

Les premiers tests sont effectués juste avant le sciage en état où le joint et les plots sont comprimés d'une manière homogène. Ensuit on fait la même série de tests après le sciage. Les valeurs testées sont de profils de l'épaisseur de joint, ainsi que son ouverture et la contrainte. On note δ_n ($V7$) l'ouverture normale de joint, épaisseur du joint δ_{offset} ($V10$), ainsi que les contraintes normales σ_n . Le degré de liberté imposé est égal à $\delta_{impo}=-3e\text{-}6$, l'épaisseur de scie est égale $\delta_{scie}=\delta_{impo}/3$

6.3.1 Avant le sciage, loi JOINT_MECA_RUPT

La solution est donnée par la résolution du problème $1D$:

Grandeur testée	'ANALYTIQUE'	tolérance
σ_n à la hauteur : $5\,m$	$\delta_{impo}/(\frac{1}{2\,L\,E}+\frac{1}{\text{pena_contact}\,K_N})=-6.54545e5$	0.1 %
δ_n à la hauteur : $2\,m$	$\frac{\sigma_n}{\text{pena_contact}\,K_N}=-8.1818182e\text{-}7$	0.1 %

6.3.2 Après le sciage, loi JOINT_MECA_RUPT

La solution est donnée par la résolution du problème $1D$:

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

Grandeur testée	'ANALYTIQUE'	tolérance
σ_n à la hauteur : $5\,m$	$(\delta_{impo}+\delta_{scie})/(\frac{1}{2LE}+\frac{1}{\text{pena_contact}\,K_N})=-4.363636e5$	0.1 %
δ_{offset} à la hauteur : $8\,m$	$-\delta_{scie}=-1e-6$	0.1 %
δ_n à la hauteur : $2\,m$	$\frac{\sigma_n}{\text{pena_contact}\,K_N}-\delta_{offset}=-1.5454545e-6$	0.1 %

6.3.3 Avant le sciage, loi JOINT_MECA_FROT

La solution est donnée par la résolution du problème 1D :

Grandeur testée	'ANALYTIQUE'	tolérance
σ_n à la hauteur : $5\,m$	$\delta_{impo}/(\frac{1}{2LE}+\frac{1}{K_N})=-6.923076923e-7$	0.1 %
δ_n à la hauteur : $2\,m$	$\frac{\sigma_n}{K_N}=-6.923076923e-7$	0.1 %

6.3.4 Après le sciage, loi JOINT_MECA_FROT

La solution est donnée par la résolution du problème 1D :

Grandeur testée	'ANALYTIQUE'	tolérance
σ_n à la hauteur : $5\,m$	$(\delta_{impo}+\delta_{scie})/(\frac{1}{2LE}+\frac{1}{K_N})=-4.6153846e5$	0.1 %
δ_{offset} à la hauteur : $8\,m$	$-\delta_{scie}=-1e-6$	0.1 %
δ_n à la hauteur : $2\,m$	$\frac{\sigma_n}{K_N}-\delta_{offset}=-1.46153846e-6$	0.1 %

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

7 Modélisation E :sciage 2D JOINT_MECA_RUPT

7.1 Caractéristiques de la modélisation

La simulation est effectuée avec la modélisation PLAN_JOINT. Les éléments sont de type TRIA3 pour les plots et QUAD4 pour les éléments de joint. La loi de comportement correspondante est JOINT_MECA_RUPT, le matériau associé porte le même nom. Les éléments surfaciques sont élastiques.

7.2 Caractéristiques du maillage

On réalise un maillage linéaire de deux plots et de la fissure.
Éléments volumiques (plots) : 548 TRIA3
Éléments de joint : 20 QUAD4

7.3 Grandeurs testées et résultats

On valide par la non-regression la procédure proche du procédé industriel. Les valeurs de l'ouverture normale de joint δ_n ($V7$), épaisseur du joint δ_{offset} ($V10$), ainsi que les contraintes normales σ_n et tangentielles σ_t sont testées à différentes hauteurs.

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

8 Modélisation F :sciage 3D JOINT_MECA_RUPT

8.1 Caractéristiques de la modélisation

La simulation est effectuée avec la modélisation 3D_JOINT. Les éléments sont de type TETRA4 pour les plots et PENTA6 pour les éléments de joint. La loi de comportement correspondante est JOINT_MECA_RUPT, le matériau associé porte le même nom. Les éléments volumiques sont élastiques.

8.2 Caractéristiques du maillage

On réalise un maillage non structuré linéaire par extrusion du maillage 2D (figure ci-dessous).
Éléments volumiques (plots) : 2761 TETRA4
Éléments joint : 92 PENTA6

8.3 Grandeurs testées et résultats

On valide par la non-regression la procédure proche du procédé industriel. Les valeurs de l'ouverture normale de joint δ_n ($V7$), épaisseur du joint δ_{offset} ($V10$), ainsi que les contraintes normales σ_n et tangentielles σ_t sont testées à différentes hauteurs.

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

9 Modélisation G :sciage 2D JOINT_MECA_FROT

9.1 Caractéristiques de la modélisation

La simulation est effectuée avec la modélisation PLAN_JOINT. Les éléments sont de type TRIA3 pour les plots et QUAD4 pour les éléments de joint. La loi de comportement correspondante est JOINT_MECA_FROT, le matériau associé porte le même nom. Les éléments surfaciques sont élastiques.

9.2 Caractéristiques du maillage

On réalise un maillage linéaire de deux plots et de la fissure.
Éléments volumiques (plots) : 548 TRIA3
Éléments de joint : 20 QUAD4

9.3 Grandeurs testées et résultats

On valide par la non-regression la procédure proche du procédé industriel. Les valeurs de l'ouverture normale de joint δ_n ($V7$), épaisseur du joint δ_{offset} ($V10$), ainsi que les contraintes normales σ_n et tangentielles σ_t sont testées à différentes hauteurs.

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

10 Modélisation H :sciage 3D JOINT_MECA_FROT

10.1 Caractéristiques de la modélisation

La simulation est effectuée avec la modélisation 3D_JOINT. Les éléments sont de type TETRA4 pour les plots et PENTA6 pour les éléments de joint. La loi de comportement correspondante est JOINT_MECA_FROT, le matériau associé porte le même nom. Les éléments volumiques sont élastiques.

10.2 Caractéristiques du maillage

On réalise un maillage non structuré linéaire par extrusion du maillage 2D (figure ci-dessous).
Éléments volumiques (plots) : 2761 TETRA4
Éléments joint : 92 PENTA6

10.3 Grandeurs testées et résultats

On valide par la non-regression la procédure proche du procédé industriel. Les valeurs de l'ouverture normale de joint δ_n ($V7$), épaisseur du joint δ_{offset} ($V10$), ainsi que les contraintes normales σ_n et tangentielles σ_t sont testées à différentes hauteurs.

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

11 Synthèse des résultats

La procédure de clavage implémentée dans *Code_Aster* via la loi JOINT_MECA_RUPT et le mot clé PRES_CLAVAGE coïncide avec les résultats du code *GEFDYN*.

La procédure de sciage implémentée dans *Code_Aster* pour les lois JOINT_MECA_RUPT et JOINT_MECA_FROT via le mot clé SCIAGE est validé sur un test théorique $1D$, elle donne des bons résultats sur des tests proches des situations réelles sur les barrages.

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