SSNV110 – Loi de comportement dépendant du taux de mixité pour les éléments JOINT : CZM_TURON

Résumé :

L'objectif de ce test est de valider la loi de comportement CZM_TURON en D_PLAN et en 3D, en modes normal et tangent purs et en mode mixte.

En modes normal ou tangent purs, la loi CZM_TURON peut être équivalente à la loi CZM_LIN_REG sous-reserve d'une bonne définition des paramètres matériau. La loi CZM_LIN_REG, déjà testée analytiquement par ailleurs, [V6.03.118] servira donc de référence dans ces cas-là.

Les différentes modélisations correspondent à des configurations d'essais standards utilisés pour la caractérisation des interfaces collées :

- Essai DCB (« Double Cantilever Beam) pour le mode normal pur;
- Essai MMB (« Mixe-Mode Bending ») pour le mode mixte;
- Essai ENF (« Edge-Notched Flexure ») pour le mode tangent pur.

Il est constitué des modélisations suivantes :

- Modélisation A : modélisation de type D_PLAN en mode normal pur (DCB) et comparaison avec la loi CZM_LIN_REG ;
- Modélisation B : modélisation 3D en mode normal pur (DCB) avec CZM_LIN_REG (pour récupérer les valeurs de référence) ;
- M odélisation C : modélisation 3D en mode normal pur (DCB) avec CZM_TURON ;
- Modélisation D : modélisation D_PLAN en mode mixte (MMB) avec CZM_TURON ;
- Modélisation E : modélisation D_PLAN en mode tangent pur (ENF) avec CZM_LIN_REG (référence) et CZM_TURON .

Dans toutes les modélisations, un critère d'initiation de l'endommagement de type Benzeggagh_Kenane (CRIT_INIT = 'TURON') est choisi. La modélisation D propose de plus un calcul mettant en œuvre un critère d'initiation elliptique (CRIT_INIT = 'YE') (voir [R7.02.21]).

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Modélisations A et D

On considère un « sandwich » composé d'une interface entre deux couches d'adhérent. Les deux adhérents ne sont pas collés sur toute la longueur.
Chaque adhérent possède les dimensions de 20 x 2 mm².
L'interface possède les dimensions de de 15 x 0,1 mm².

La géométrie peut être visualisée sur la figure 1.1-a, avec le maillage qui sera utilisé pour les modélisations 2D. Le maillage 3D est une extrusion du maillage 2D.

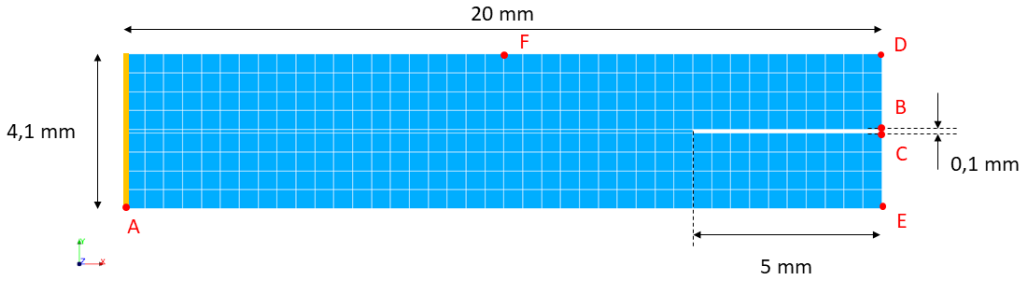


Figure 1.1-a: Géométrie et maillage des Modélisations A, B, C et D (structure sandwich)

Modélisation B et C

Pour ces modélisations, la géométrie totale est une extrusion (selon Z) de la géométrie 2D précédente sur 3 mm, correspondant à une demi-géométrie (on fera usage de la symétrie).

Modélisation E

On considère encore un « sandwich » similaire à la géométrie de la figure 1.1-a, mais dont les dimensions sont :
170 x 3,5 mm² pour chacun des deux adhérents
115 x 0,05 mm² pour l'interface.

Cette modélisation simule une flexion 3-points. Les appuis sont modélisés. La distance entre appui-supports est de 100 mm, tandis que l'appui central est à mi-distance des supports. L'éprouvette n'est pas centrée par rapport aux appuis.

La géométrie peut être visualisée sur la figure 1.1-c.

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

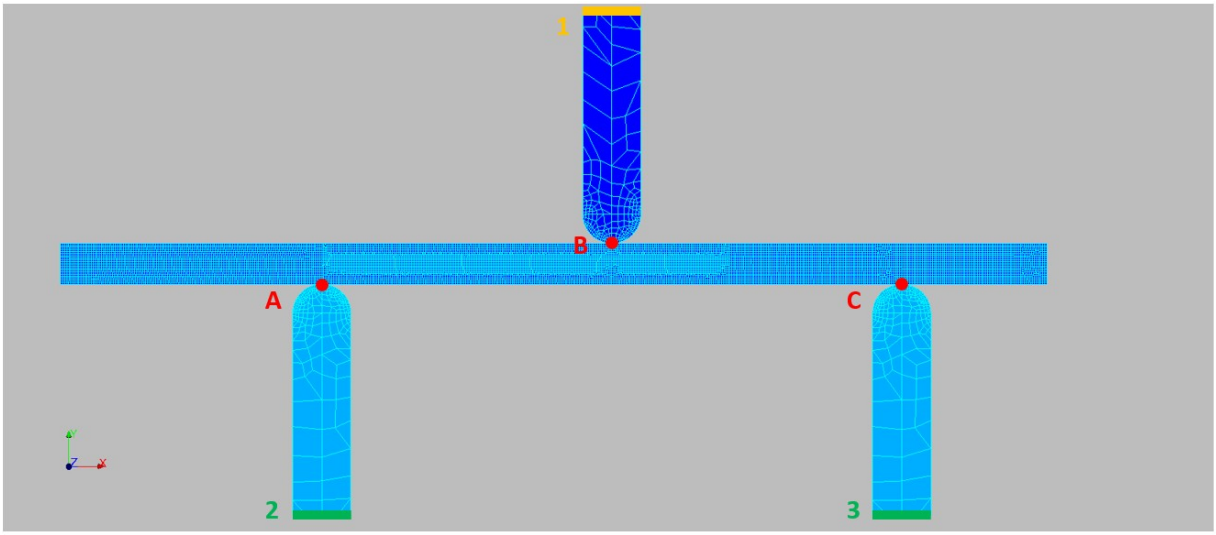


Figure 1.1-b: Géométrie de la modélisation E
(structure sandwich et appuis pour flexion 3-points)

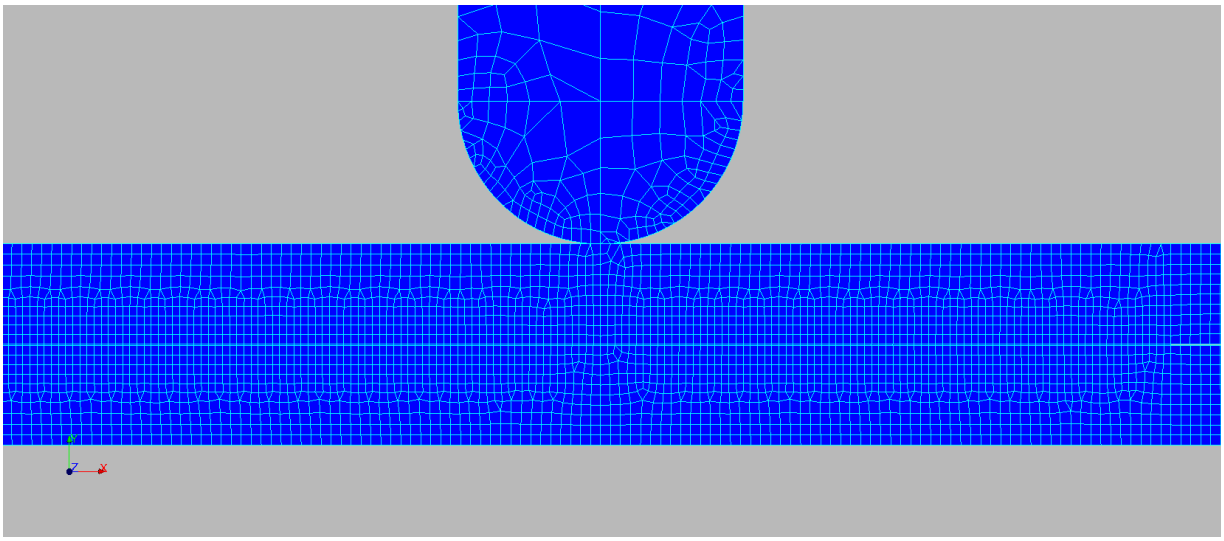


Figure 1.1-c: Détail de la géométrie et du maillage de la modélisation E
au niveau de l'appui central

1.2 Propriétés du matériau

L'adhérent est composé d'un matériau purement élastique de module d'Young $E = 100\,MPa$ et de coefficient de Poisson nul.

L'interface est modélisée par une zone cohésive, soit avec la loi CZM_TURON, soit avec la loi CZM_LIN_REG. Les propriétés matériau de la loi CZM_TURON sont définies à partir de celles de la loi CZM_LIN_REG de sorte que les deux modèles donnent des résultats comparables dans le cas des modélisations en mode pur où ils sont équivalents.

La loi CZM_TURON propose deux critères d'initiation de l'endommagement : un critère purement elliptique qui est activé par le mot-clé CRIT_INIT = 'YE' et un critère elliptique modulé par le taux de mixité de chargement qui s'active via CRIT_INIT = 'TURON'.

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

Modélisations A, B et C

Les propriétés du matériau RUPT_FRAG pour la loi CZM_LIN_REG sont :

- Contrainte maximale : $sigc = 3\,MPa$
- Taux de restitution d'énergie critique : $Gc = 0.9\,N/mm$
- Coefficient de pénalisation de l'adhérence : $pen = 0{,}00001$

Compte-tenu de la formulation qui est légèrement différente pour les deux lois, on obtient l'équivalence entre les deux lois en assignant les propriétés du matériau RUPT_TURON suivantes pour la loi CZM_TURON :

- Contrainte maximale en mode normal : $sigc1 = sigc \times (1 - pen)$
- Contrainte maximale en mode tangent : $sigc2 = 0{,}5 \times sigc1$
- Taux de restitution d'énergie critique en mode normal : $Gc1 = Gc \times (1 - pen)$
- Taux de restitution d'énergie critique en mode normal : $Gc2 = 0{,}8 \times Gc1$
- Raideur initiale de l'interface (en MPa/mm) : $K = sigc^2 \times (1 - pen) / (2 \times Gc \times pen)$
- Coefficient de rigidité résiduelle (valeur par défaut) : $C_{RUPT} = 0{,}001$
- Coefficient de la loi puissance de type Benzeggagh-Kenane : $eta = 2$

Modélisation D

Cette modélisation ne met pas en jeu la loi CZM_LIN_REG . Les propriétés de la loi CZM_TURON restent cependant définies à partir de :

- Contrainte maximale : $sigc = 1\,MPa$
- Taux de restitution d'énergie critique : $Gc = 0.2\,N/mm$
- Coefficient de pénalisation de l'adhérence : $pen = 0{,}00001$

Les propriétés sont les suivantes :

- Contrainte maximale en mode normal : $sigc1 = sigc \times (1 - pen)$
- Contrainte maximale en mode tangent : $sigc2 = 1{,}5 \times sigc1$
- Taux de restitution d'énergie critique en mode normal : $Gc1 = Gc \times (1 - pen)$
- Taux de restitution d'énergie critique en mode normal : $Gc2 = 1{,}2 \times Gc1$
- Raideur initiale de l'interface (en MPa/mm) : $K = sigc^2 \times (1 - pen) / (2 \times Gc \times pen)$
- Coefficient de rigidité résiduelle (valeur par défaut) : $C_{RUPT} = 0{,}001$
- Coefficient de la loi puissance de type Benzeggagh-Kenane : $eta = 2$

On constate dans cette modélisation que les propriétés de l'interface en mode tangent sont supérieures à celle en mode normal, ce qui est plus réaliste. C'est en effet généralement le cas pour une interface collée, la sollicitation en mode normal (« pelage ») étant plus critique que les sollicitations en cisaillement.

Modélisation E

Propriétés de la loi CZM_LIN_REG :

- Contrainte maximale : $sigc = 30\,MPa$
- Taux de restitution d'énergie critique : $Gc = 1{,}0\,N/mm$
- Coefficient de pénalisation de l'adhérence : $pen = 0{,}077$

Propriétés de la loi CZM_TURON comme précédemment sauf :

- Contrainte maximale en mode normal : $sigc1 = 10\,MPa$
- Contrainte maximale en mode tangent : $sigc2 = sigc \times (1 - pen)$
- Taux de restitution d'énergie critique en mode normal : $Gc1 = 0{,}1\,N/mm$
- Taux de restitution d'énergie critique en mode normal : $Gc2 = Gc \times (1 - pen)$
- Raideur initiale de l'interface (en MPa/mm) : $K = sigc^2 \times (1 - pen) / (2 \times Gc \times pen)$

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

- Coefficient de rigidité résiduelle (valeur par défaut) : $C_{RUPT}=0,001$
- Coefficient de la loi puissance de type Benzeggagh-Kenane : $eta=2$

1.3 Conditions aux limites et chargements

Modélisations A et D

Les déplacements selon X et Y sont bloqués en A (voir figure 1.1-a).

- Pour le mode normal pur (Modélisation A) : le chargement est appliqué symétriquement en déplacement imposé au niveau des points B et C, avec respectivement 2,5 mm et – 2,5 mm en déplacement selon Y imposé ;
- Pour le mode mixte (Modélisation D) : le déplacement est bloqué selon Y en C. Le point B est chargé avec un déplacement imposé selon Y de 1,25 mm. Le point F est chargé avec un déplacement imposé selon Y de -1,25 mm.

Modélisations B et C

On fait usage de la symétrie en bloquant le déplacement selon z sur une des deux faces dans le plan (X,Y).
On bloque les mouvements selon X et Y sur la face dans le plan (Y, Z) opposée au chargement (dont l'arête est affichée en jaune sur la Figure 1.1-a.
On charge en mode normal pur : les arêtes correspondant à l'extrusion des points B et C sont chargés en déplacement symétriquement, avec respectivement 2,5 mm et – 2,5 mm en déplacement selon Y imposé.

Modélisation E

On bloque les deux déplacements selon X et Y au niveau de arêtes 2 et 3, et le déplacement selon X au niveau de l'arête 1.
On a des nœuds doubles aux points A, B et C, dont les déplacements selon Y sont égalisées (avec LIAISON_DDL). De plus, pour les points A et B, les déplacements des nœuds double selon X sont opposés.
Le chargement est appliqué au niveau de l'appui central en imposant un déplacement selon Y de – 4 mm au niveau de l'arête 1.

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

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul

Tous les résultats sont testés en non-regression.

Par ailleurs, les résultats obtenus avec la loi CZM_LIN_REG servent de référence pour la loi CZM_TURON (REFERENCE = 'AUTRE_ASTER) dans les modélisations en mode pur (A, B, C et E)

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

On teste en mode normal pur (DCB), en 2D.
La géométrie est 2D, on utilise donc les modélisations D_PLAN et PLAN_JOINT .

3.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est constitué de mailles de type QUAD8 (quadrangle quadratique), avec un total de 537 éléments.

3.3 Grandeurs testées et résultats

Les valeurs de référence sont issues du calcul avec la loi CZM_LIN_REG.

Lieu	Instant	Composante (DEPL)	VALE_REFE	Precision
Nœud D en $(20,2)$	$t=5s$	DY	$2.443483165\,mm$	1.0E-6

Tableau 3.3-1

Lieu	Instant	Composante (FORC_NODA)	VALE_REFE	Precision
Nœud B en $(20,0)$	$t=5s$	FY	$0.971274176\,mm$	1.0E-6

Tableau 3.3-2

Identification	Type de référence
Nœud D – DEPL/D Y	NON_REGRESSION
Nœud B – FORC_NODA / F Y	NON_REGRESSION

Tableau 3.3-3

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

On teste en mode normal pur (DCB), en 3D.
L a géométrie est 3D, on utilise donc les modélisations 3D et 3D_JOINT .

4.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est constitué de mailles de type HEXA20 (hexaèdres quadratiques), avec un total de 4380 éléments.

4.3 Grandeurs testées et résultats

Ces résultats, obtenus avec la loi CZM_LIN_REG, servent de référence pour le calcul de la Modélisation C réalisé avec la loi CZM_TURON. Dans cette modélisation, on ne fait donc que des tests de non-régression.

Identification	Type de référence
Nœud D – DEPL/D Y	NON_REGRESSION
Nœud B – FORC_NODA / F Y	NON_REGRESSION

Tableau 4.3-1

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

On teste en mode normal pur (DCB), en 3D.
L a géométrie est 3D, on utilise donc les modélisations 3D et 3D_JOINT .

5.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est constitué de mailles de type HEXA20 (hexaèdres quadratiques), avec un total de 4380 éléments.

5.3 Grandeurs testées et résultats

Les valeurs de référence sont issues du calcul de la Modélisation B avec la loi CZM_LIN_REG.

Lieu	Instant	Composante (DEPL)	VALE_REFE	Precision
Nœud D en $(20,2)$	$t=5s$	DY	$2.443500322\,mm$	1.0E-6

Tableau 5.3-1

Lieu	Instant	Composante (FORC_NODA)	VALE_REFE	Precision
Nœud B en $(20,0)$	$t=5s$	FY	$0.080914942\,mm$	1.0E-6

Tableau 5.3-2

Identification	Type de référence
Nœud D – DEPL/D Y	NON_REGRESSION
Nœud B – FORC_NODA / F Y	NON_REGRESSION

Tableau 5.3-3

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

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

On teste en mode mixte (MMB), en 2D.
La géométrie est 2D, on utilise donc les modélisations D_PLAN et PLAN_JOINT .
Dans cette modélisation, on effectue deux calculs : le premier avec le critère d'initiation de l'endommagement prenant en compte la mixité du chargement, dit critère de Benzegaggh – Kenane (activé par CRIT_INIT = 'TURON' sous DEFI_MATERIAU / RUPT_TURON), le second avec le critère d'initiation elliptique dit critère de Ye (CRIT_INIT = 'YE'). Pour plus de précisions, on renvoie le lecteur à la documentation [R7.02.21].

O n peut comparer les surfaces seuil d'initiation de l'endommagement dans l'espace des sauts de déplacement sur la figure 6.1-a . On visualise bien le critère de type circulaire (isotrope car les propriétés normal et tangente sont égales et sont ici choisies à la valeur des propriétés du mode normal de CZM_TURON) correspond à la loi CZM_LIN_REG , le critère elliptique de Ye (anisotrope car les propriétés normal et tangente sont différentes) et le critère de Benzeggagh – Kenane qui est un critère elliptique modulé par le taux de mixité du chargement (qui se visualise par l'angle dans l'espace des sauts de déplacement).
On constate que le critère de Benzeggagh - Kenane s'écarte plus ou moins du critère elliptique suivant la mixité du chargement. L'écart entre les deux critères, s'il est relativement modéré avec les présentes propriétés, augmente à mesure que la différence entre les propriétés normale et tangente est importante et dépend de la propriété puissance de la loi de Benzeggagh – Kenane, donnée dans ETA_BK .

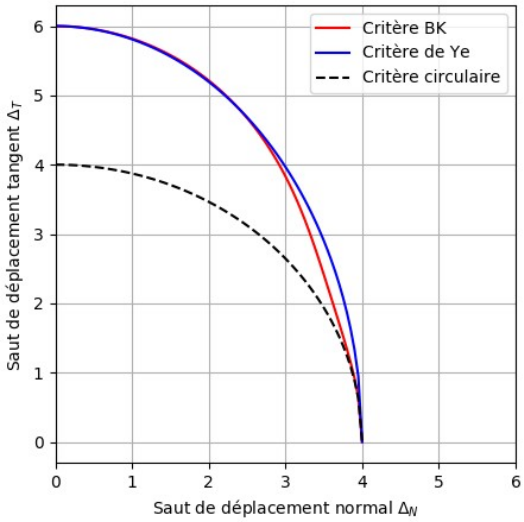


Figure 6.1-a: Comparaison des différents critères d'initiation de l'endommagement dans l'espace des sauts de déplacement

6.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est constitué de mailles de type QUAD 8 (quadrangle quadratique) , avec un total de 537 éléments.

6.3 Grandeurs testées et résultats

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

Dans cette modélisation, on ne fait donc que des tests de non-régression, aux mêmes points pour les deux calculs.

Identification	Type de référence
Nœud D – DEPL/D Y	NON_REGRESSION
Nœud B – FORC_NODA / F Y	NON_REGRESSION

Tableau 6.3-1

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

7 Modélisation E

7.1 Caractéristiques de la modélisation

On teste en mode tangent pur, en 2D.
La géométrie est 2D, on utilise donc les modélisations D_PLAN et PLAN_JOINT .

7.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage est constitué majoritairement de mailles de type QUAD 4 (quadrangle linéaire) et de quelques mailles TRIA1 (triangle linéaire) , avec un total de 14384 éléments. Il peut être visualisé sur les figures 1.1-b et 1.1-c .

7.3 Grandeurs testées et résultats

Un premier calcul est effectué avec la loi CZM_LIN_REG. Ses résultats sont testés en non-regression aux instants 0,3 s, 0,4 s et 0,5 s :

Identification	Type de référence
Arête 1, 1 er nœud – DEPL/D Y	NON_REGRESSION
Arête 1, résultante – REAC _NODA / D Y	NON_REGRESSION

Tableau 7.3-1

La loi CZM_TURON est utilisée dans le second calcul. Ses résultats sont comparés aux valeurs de référence issues du calcul précédent avec la loi CZM_LIN_REG.

Lieu	Instant	Composante (DEPL)	VALE_REFE	Precision
Arête 1, 1 er nœud	$t=0,3\,s$	DY	$-0,0012\,mm$	0,001
Arête 1, 1 er nœud	$t=0,4\,s$	DY	$-0,0016\,mm$	0,002
Arête 1, 1 er nœud	$t=0,5\,s$	DY	$-0.0020\,mm$	0,001

Tableau 7.3-2

Lieu	Instant	Résultante (REAC _NODA)	VALE_REFE	Precision
Arête 1, résultante	$t=0,3\,s$	DY	$-45633.76400670127\,N$	0,001
Arête 1, 1 er nœud	$t=0,4\,s$	DY	$-46108.35645711704\,N$	0,002
Arête 1, 1 er nœud	$t=0,5\,s$	DY	$-46463.08275406287\,N$	0,001

Tableau 7.3-3

Identification	Type de référence
Arête 1, 1 er nœud – DEPL/D Y	NON_REGRESSION

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

Arête 1, résultante – REAC _NODA / D Y	NON_REGRESSION

Tableau 7.3-4

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