

Manuel d'Utilisation**Fascicule U4.8- : Post-traitement et analyses dédiées****Document : U4.82.05**

Opérateur *POST_K1_K2_K3*

1 But

Calculer les facteurs d'intensité des contraintes en 2D et 3D pour des fissures planes.

Cet opérateur permet de calculer K_1 , K_2 en 2D (plan et axisymétrique) et K_3 en 3D par extrapolation des sauts de déplacements sur les lèvres de la fissure. Cette méthode n'est applicable qu'au cas des fissures planes, dans des matériaux homogènes et isotropes.

La méthode utilisée est théoriquement moins précise et plus sensible au maillage que le calcul à partir de la forme bilinéaire du taux de restitution de l'énergie et des déplacements singuliers, utilisable en 2D et en 3D avec l'option *CALC_K_G* de l'opérateur *CALC_G* [U4.82.03]. Elle permet cependant d'obtenir facilement une bonne estimation des facteurs d'intensité des contraintes. C'est par ailleurs pour le moment la seule méthode existante pour le calcul des facteurs d'intensité des contraintes dans le cas 2D-axisymétrique.

Produit un concept de type *table*.

2 Syntaxe

```

tk [table] = POST_K1_K2_K3      (

    ♦  MODELISATION =      /   '3D',
                               /   'AXIS',
                               /   'D_PLAN',
                               /   'C_PLAN',

    ♦  MATER =              mat ,                                [matériau]

    ♦  TYPE_MALLAGE =      /   'REGLE',                          [DEFAULT]
                               /   'LIBRE',

    ♦  /      RESULTAT =      resu,                               /   [evol_elas]
                                                    /   [evol_noli]

        /  ♦  TABL_DEPL_SUP =      tdsup,                        [table]
            ◇  TABL_DEPL_INF =      tdinf,                        [table]

    ◇  /  TOUT_ORDRE   =   'OUI',
        /  NUME_ORDRE  =   lnuor,                                [L_I]
        /  LIST_ORDRE  =   lnuor,                                [listis]
        /  INST        =   l_inst,                                [l_R]
            ◇  PRECISION =   1.E-6,                                [DEFAULT]
                               prec,
            ◇  CRITERE   =   /   'RELATIF',                        [DEFAULT]
                               /   'ABSOLU' ,
        /  LIST_INST   =   l_inst,                                [listR8]
            ◇  PRECISION =   1.E-6,                                [DEFAULT]
                               prec,
            ◇  CRITERE   =   /   'RELATIF',                        [DEFAULT]
                               /   'ABSOLU' ,

    ◇  ABSC_CURV_MAXI=      dmax,                                [R]

    ♦  VECT_K1 =            (y1, y2, y3),                          [R]

    ◇  /  FOND_FISS =      fond,                                  [fond_fiss]
        ◇  /  TOUT      =   'OUI',
            /  | NOEUD      =   noeu,                             [l_noeud]
            | GROUP_NO    =   gr_noeu,                             [l_gr_noeud]
            /  | SANS_NOEUD  =   noeu,                             [l_noeud]
            | SANS_GROUP_NO=   gr_noeu,                             [l_gr_noeud]

    ♦  MAILLAGE = ma,                                             [maillage]
        ◇  PREC_VIS_A_VIS =   /   1.E-1,                          [DEFAULT]
                               /   epsi,                            [R]

    ◇  NB_NOEUD_COUPE = /   5,                                    [DEFAULT]
                               /   n,                               [I]

    ◇  SYME_CHAR =      /   'SANS',                                [DEFAULT]
                               /   'SYME',

    ◇  TITRE = titre,                                             [l_Kn]

    ◇  INFO =      /   1,

```

3 Opérandes

3.1 Opérande MODELISATION

```

♦ MODELISATION = / '3D',
                  / 'AXIS',
                  / 'D_PLAN',
                  / 'C_PLAN',

```

Permet de définir le type de calcul à effectuer : 3D (auquel cas on calculera K3) ou 2D. Cette modélisation doit être cohérente avec le modèle utilisé pour le calcul des déplacements.

3.2 Opérandes TABL_DEPL_SUP / TABL_DEPL_INF / RESULTAT

```

♦ / RESULTAT = resu,
/ ♦ TABL_DEPL_SUP = tdsup, [table]
  ◊ TABL_DEPL_INF = tdinf, [table]

```

Concepts de type table issus de POST_RELEVE_T contenant les déplacements des nœuds de la lèvre supérieure (tdsup) et ceux de la lèvre inférieure (tdinf).

En 2D, ces lèvres sont des segments de droites. tdsup et tdinf contiennent donc les valeurs des deux composantes du déplacement sur chacune des lèvres supérieure et inférieure. Les nœuds des lèvres doivent être ordonnés (du fond de fissure vers la lèvre de la fissure).

En 3D, tdsup et tdinf contiennent les déplacements de tous les nœuds des plans représentant les lèvres supérieure et inférieure.

Les deux tables tdsup et tdinf doivent être présentes simultanément sauf si on ne modélise que la moitié du solide par rapport à la fissure (SYME_CHAR = 'SYME'), auquel cas seule la table de déplacement de la lèvre supérieure est requise.

En 2D aussi bien qu'en 3D, pour éviter d'extraire les déplacements par POST_RELEVE_T, il est possible de fournir directement un concept resultat (mot clé RESULTAT).

3.3 Opérande MATER

```

♦ MATER = mat, [matériau]

```

Concept de type matériau contenant les caractéristiques élastiques du matériau fissuré. Le matériau doit être homogène, isotrope et élastique linéaire.

Dans le cas où les propriétés matériaux dépendent de la température (mot-clé ELAS_FO de DEFI_MATERIAU), le traitement est différent selon le type de modélisation :

- si les déplacements sont fournis par les mots clés TABL_DEPL_SUP / TABL_DEPL_INF, les caractéristiques matériaux sont obtenues à la température de référence TEMP_DEF_ALPHA de DEFI_MATERIAU ;
- si les déplacements sont fournis directement sous le mot clé RESULTAT, alors les caractéristiques matériaux sont calculées à partir de la température des nœuds du fond de fissure.

Remarque :

Il est donc recommandé de renseigner le mot clé RESULTAT si les propriétés matériaux dépendent de la température.

3.4 Opérande TYPE_MAILLAGE

```

♦ TYPE_MAILLAGE = / 'REGLE', [défaut]
                  / 'LIBRE',

```

Si `TYPE_MALLAGE= 'REGLE'`, option à utiliser par défaut, le calcul se fait en supposant que les nœuds sur les lèvres de la fissure sont sur des directions normales au fond et exactement en vis-à-vis d'une lèvre à l'autre. Des messages d'alarme ou d'erreur sont émis si ce n'est pas le cas.

Si le maillage ne remplit pas ces conditions, on peut utiliser l'option `TYPE_MALLAGE= 'LIBRE'`. Le principe du calcul est alors le suivant :

- détermination des directions normales au fond de fissure pour chacun des nœuds du fond,
- définition sur chacune de ces directions de `NB_NOEUD_COUPE` points équirépartis entre le fond et la distance `ABSC_CURV_MAXI`,
- projection du déplacement de chaque lèvre sur ces nœuds,
- interpolation du saut de déplacement.

Le calcul avec `TYPE_MALLAGE= 'LIBRE'` peut être moins précis que le calcul par défaut. Par ailleurs dans ce cas, le champ de déplacement est obligatoirement fourni par l'opérande `RESULTAT`.

3.5 Opérandes TABL_DEPL_SUP / TABL_DEPL_INF / RESULTAT

```
♦ / RESULTAT = resu,  
/ ♦ TABL_DEPL_SUP = tdsup,                   [table]  
  ◇ TABL_DEPL_INF = tdinf,                   [table]
```

Concepts de type table issus de POST_RELEVE_T contenant les déplacements des nœuds de la lèvres supérieure (tdsup) et ceux de la lèvres inférieure (tdinf).

En 2D, ces lèvres sont des segments de droites. tdsup et tdinf contiennent donc les valeurs des deux composantes du déplacement sur chacune des lèvres supérieure et inférieure. Les nœuds des lèvres doivent être ordonnés (du fond de fissure vers la lèvre de la fissure).

En 3D, tdsup et tdinf contiennent les déplacements de tous les nœuds des plans représentant les lèvres supérieure et inférieure.

Les deux tables tdsup et tdinf doivent être présentes simultanément sauf si on ne modélise que la moitié du solide par rapport à la fissure (SYME_CHAR = 'SYME'), auquel cas seule la table de déplacement de la lèvre supérieure est requise.

En 2D aussi bien qu'en 3D, pour éviter d'extraire les déplacements par POST_RELEVE_T, il est possible de fournir directement un concept resultat (mot clé RESULTAT).

3.6 Opérandes INST, LIST_INST, TOUT_ORDRE, NUME_ORDRE, LIST_ORDRE

Cf. [U4.71.00].

3.7 Opérande ABSC_CURV_MAXI

```
◇ ABSC_CURV_MAXI= dmax                   [R]
```

Distance maximum de calcul des facteurs d'intensité des contraintes à partir du fond de fissure. En pratique, la précision des résultats est moins bonne si on se situe très loin du fond de fissure [R7.02.08]. Il est donc conseillé de choisir dmax la plus petite possible (de l'ordre de 3 à 4 éléments, ou encore de l'ordre du rayon du maillage rayonnant, le cas échéant).

3.8 Opérande VECT_K1

- ♦ $\text{VECT_K1} = (y1, y2, y3)$ [R]

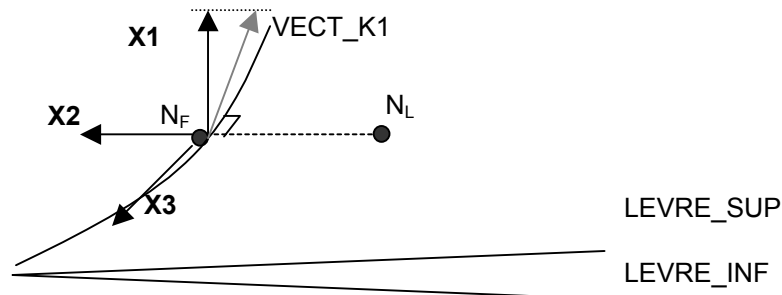
POST_K1_K2_K3 fonctionne pour une fissure plane et effectue le calcul des facteurs d'intensité des contraintes dans le plan normal à chaque nœud du fond de fissure.

Pour le calcul des facteurs d'intensité des contraintes, on définit un repère local pour chaque nœud du fond de fissure de la façon suivante :

- axe X1 : vecteur normal au plan de la fissure ;
- axe X2 : vecteur normal au fond de fissure ;
- axe X3 : vecteur tangent au fond de fissure.

Ces axes sont déterminés de la façon suivante :

- l'axe X2 est déterminé par l'orientation du vecteur reliant un nœud (N_L) situé sur une des faces de la fissure vers le nœud du fond de fissure, dans le plan normal à ce nœud (N_F) ;
- l'axe X1 est déduit de l'axe fourni par l'utilisateur par le mot clé VECT_K1. X1 doit être l'axe normal au plan de la fissure. L'utilisateur pouvant ne pas connaître très précisément la normale au plan de fissure, l'axe X1 est calculé en projetant le vecteur VECT_K1 sur le plan orthogonal à l'axe X2 :
$$X1 = \text{VECT_K1} - (\text{VECT_K1} \cdot X2) X2 ;$$
- l'axe X3 est déterminé par le produit vectoriel (axe X1, axe X2).



Le vecteur VECT_K1 permet donc d'orienter l'axe X1, normal au plan de la fissure, en cohérence avec la définition des lèvres de la fissure LEVRE_INF et LEVRE_SUP.

Les déplacements dans ce repère local nous permettent de calculer :

- K1 : mode I d'ouverture, discontinuité de déplacement suivant l'axe X1 ;
- K2 : mode II de cisaillement plan, discontinuité de déplacement suivant l'axe X2 ;
- K3 : mode III de cisaillement antiplan, discontinuité de déplacement suivant l'axe X3.

3.9 Opérandes FOND_FISS / MAILLAGE / PREC_VIS_A_VIS / NOEUD / GROUP_NO / SANS_NOEUD / SANS_GROUP_NO

```

◇ /      FOND_FISS=      fond,      [fond_fiss]
◆    MAILLAGE =      ma,      [maillage]
◇    PREC_VIS_A_VIS    =    /    1.D-1,      [DEFAULT]
                                         /    epsi,      [R]
◇    /      TOUT      =    'OUI',
         /    | NOEUD      =    noeu,      [l_noeud]
         |    | GROUP_NO    =    gr_noeu,      [l_gr_noeud]
         /    | SANS_NOEUD    =    noeu,      [l_noeud]
         |    | SANS_GROUP_NO =    gr_noeu,      [l_gr_noeud]

```

En 2D aussi bien qu'en 3D, il est possible d'automatiser pour chaque nœud du fond de fissure la recherche des nœuds situés sur des segments normaux au fond de fissure et appartenant aux lèvres supérieure et inférieure, puis d'effectuer le calcul des facteurs d'intensité des contraintes.

Il faut pour cela fournir un concept `fond_fiss` créé par la commande `DEFI_FOND_FISS`, ainsi qu'une précision `PREC_VIS_A_VIS` pour la recherche géométrique des nœuds situés sur les normales aux différents nœuds du fond de fissure. Il faut également fournir le nom du maillage sur lequel on effectue le post traitement.

En 3D, par défaut, le calcul des facteurs d'intensité de contraintes se fait uniquement sur les nœuds extrémités des mailles composant le fond de fissure (donc tous les nœuds pour les éléments linéaires, et un nœud sur deux pour les éléments quadratiques). L'utilisateur a la possibilité de :

- sélectionner certains nœuds extrémités du fond de fissure (mots clés `NOEUD` et `GROUP_NO`) ;
- d'exclure des nœuds du fond de fissure (mots clés `SANS_NOEUD` et `SANS_GROUP_NO`) ;
- de faire le calcul sur tous les nœuds milieux et extrémités du fond de fissure (mot clé `TOUT`).

Lors de la recherche automatique pour chaque nœud du fond de fissure, l'opérateur sélectionne les nœuds vérifiant les deux conditions suivantes :

- distance R par rapport au fond de fissure : $R < \text{ABSC_CURV_MAXI}$,
- distance L par rapport à son vis-à-vis sur l'autre lèvre :
 $L < \text{epsi} \cdot \text{ABSC_CURV_MAXI}$,
- et en 3D distance D d'un nœud des lèvres à la droite perpendiculaire au fond de fissure : $D < \text{epsi_fond} \cdot d$, où d est la distance minimale entre deux nœuds successifs du fond de fissure,

où `epsi` est la valeur de la précision fournie (mot clé `PREC_VIS_A_VIS`) et `epsi_fond` la valeur de la précision fournie dans le mot-clé `PREC_NORM` de `DEFI_FOND_FISS`.

Par défaut `epsi` vaut 0,1. Augmenter la valeur de `PREC_VIS_A_VIS` (et/ou de `PREC_NORM` dans `DEFI_FOND_FISS`) revient à augmenter le nombre de nœuds potentiellement retenus pour le calcul.

Le mot-clé `PREC_VIS_A_VIS` n'intervient pas si `TYPE_MAILLAGE='REGLE'`.

3.10 Opérande SYME_CHAR

```
◇ SYME_CHAR = / 'SANS' , [ DEFAULT ]
               / 'SYME' ,
```

Ce mot clé permet d'indiquer si le chargement est symétrique dans le cas où on ne modélise que la moitié du solide par rapport à la fissure. Les déplacements normaux des lèvres sont alors supposés opposés ($K1 \neq 0$) et les déplacements tangents égaux (soit $K2 = K3 = 0$).

3.11 Opérande NB_NOEUD_COUPE

```

◇   NB_NOEUD_COUPE=  /  5,          [ DEFAULT ]
                        /  n,          [ I ]

```

Cette opérande n'intervient que si `TYPE_MAIILLAGE='LIBRE'`. Elle permet de définir le nombre de nœuds de projection du déplacement des lèvres sur chacune des directions normales. Les nœuds de projection sont équi-répartis entre le fond de fissure et la distance `ABSC_CURV_MAXI`.

Remarque :

La projection du déplacement des lèvres sur les NB_NOEUD_COUPE points de projection ne prend pas correctement en compte le déplacement des nœuds au quart (éléments de Barsoum). Il est donc recommandé de ne pas utiliser ces éléments si TYPE_MALLAGE= 'LIBRE' .

3.12 Opérande INFO

```
◇   INFO =      /    1 ,                      [ DEFAULT ]
               /    2 ,
```

Niveau de messages dans le fichier message : si `INFO` vaut 2, on fournit la liste de toutes les valeurs calculées pour tous les nœuds traités.

3.13 Opérande TITRE

◇ TITRE = titre,
Titre que l'on veut donner au résultat de la commande.

4 Précautions et conseils d'utilisation

4.1 Table produite

Trois méthodes différentes sont systématiquement utilisées pour réaliser le calcul de K en chaque nœud du fond de fissure [R7.02.08] :

- Méthode 1 : pour chaque nœud du segment d'interpolation, on calcule le saut du champ de déplacements au carré et on le divise par r. Différentes valeurs de K1 (resp. K2, K3) sont obtenues (à un facteur multiplicatif près) par extrapolation en $r = 0$ des segments de droites ainsi obtenus.
- Méthode 2 : on trace le saut du champ de déplacements au carré en fonction de r. Les approximations de K1 sont (toujours à un facteur multiplicatif près) égales à la pente des segments reliant l'origine aux différents points de la courbe.
- Méthode 3 : on identifie le facteur d'intensité de contrainte K1 (resp. K2, K3) à partir du saut de déplacement par une méthode des moindres carrés. On obtient une unique valeur de K1, K2 et K3 pour chaque nœud du fond de fissure.

La commande `POST_K1_K2_K3` produit un concept de type `table`. Cette table contient, pour chaque nœud du fond de fissure et pour chacune des 3 méthodes :

- la valeur maximale `K1_MAX` et la valeur minimale `K1_MIN` des facteurs d'intensité des contraintes en mode I calculés pour chaque nœud du segment d'interpolation;
- `K2_MAX` et `K2_MIN` pour le mode II ;
- `K3_MAX` et `K3_MIN` pour le mode III en 3D ;
- Le taux de restitution de l'énergie G (valeur maximale `G_MAX` et minimale `G_MIN`) calculé à partir des facteurs d'intensité des contraintes par la formule d'Irwin.

La table peut être imprimée par `IMPR_TABLE` [U4.91.03]. La méthode 3 ne produit qu'une seule valeur de K1, K2, K3 et G, les valeurs minimales et maximales correspondantes sont donc égales dans le tableau résultat.

Si `INFO` vaut 2, tous les calculs intermédiaires sont affichés dans le fichier message. On signale que la colonne intitulée `SAUT_DX` (resp. `SAUT_DY` et `SAUT_DZ`) dans les tableaux du fichier message correspond au saut de déplacement suivant l'axe X1 (resp. X2 et X3), multiplié par un coefficient dépendant du matériau (en 3D : $E\sqrt{(2\pi) / 8(1-\nu^2)}$), le tout au carré.

4.2 Précautions et conseils

Les hypothèses nécessaires à la validité de cette méthode sont :

- 1) la fissure est plane,
- 2) le comportement est élastique, linéaire, isotrope et homogène et la structure est isotherme,
- 3) on se place dans un plan normal au fond de fissure, supposé suffisamment régulier.

En pratique, le maillage devra comporter suffisamment de nœuds perpendiculairement au fond de fissure. D'autre part, les résultats sont nettement améliorés si dans le cas où le maillage est composé d'éléments quadratiques, on déplace les nœuds milieux (des arêtes qui touchent le fond de fissure), au quart de ces arêtes en les rapprochant du fond de fissure. Ceci est possible grâce au mot clé `MODI_MAILLE` (option '`NOEUD_QUART`') de la commande `MODI_MAILLAGE` [U4.23.04].

La méthode utilisée est théoriquement moins précise et plus sensible au maillage que la méthode des déplacements singuliers [R7.02.05]. De manière générale, on peut conseiller de comparer dans les études les résultats de `POST_K1_K2_K3` et ceux de `CALC_G` [U4.82.03], ce qui est un bon indicateur de la qualité du résultat obtenu.

En 2D, les lèvres sont des segments de droites, et les nœuds doivent être ordonnés (du fond de fissure vers la lèvre de fissure) si le déplacement est fourni par les tableaux `TABL_DEPL_SUP` / `TABL_DEPL_INF`.

Le calcul par interpolation des sauts de déplacement nécessite d'avoir au moins 3 nœuds sur la normale au fond de fissure. Si le nombre de nœuds n'est pas suffisant, une alarme est émise et le calcul se poursuit, le cas échéant, pour le nœud suivant du fond de fissure. On peut dans ce cas :

- soit augmenter l'abscisse curviligne maximale `ABSC_CURV_MAXI` pour aller chercher des nœuds plus éloignés du fond de fissure ;
- soit augmenter le paramètre `PREC_VIS_A_VIS` (et éventuellement `PREC_NORM` dans `DEFI_FOND_FISS`), ce qui revient à être moins exigeant dans la sélection des nœuds pour le calcul.

5 Exemple 1 : maillage réglé

Fissure circulaire dans un bloc 3D (test SSLV134D).

```
MA = LIRE_MALLAGE( )
```

LEVINF1, LEVINFS sont les groupes contenant les mailles surfaciques situées sur les lèvres supérieure et inférieure de la fissure. On crée les groupes de nœuds associés :

```
MA = DEFI_GROUP ( MAILLAGE = MA,  
                  CREA_GROUP_NO = _F( GROUP_MA= ( 'LEVINF1','LEVINFS', ) ) )
```

Déplacement des nœuds au quart des arêtes :

```
MA = MODI_MALLAGE ( MAILLAGE = MA, reuse = MA,  
                   MODI_MAILLE = _F( OPTION = 'NOEUD_QUART',  
                                     GROUP_MA_FOND = 'LFF1' )  
                   )
```

calcul avec MECA_STATIQUE....

```
FISS = DEFI_FOND_FISS ( MAILLAGE = MA,  
                        FOND_FISS = _F ( GROUP_MA = 'LFF1',  
                                         GROUP_NO_ORIG = 'NFF1',  
                                         GROUP_NO_EXTR = 'NFF2',  
                                         ),  
                        LEVRE_SUP = _F ( GROUP_MA = 'LEVINFS' ),  
                        LEVRE_INF = _F ( GROUP_MA = 'LEVINF1' ),  
                        DTAN_ORIG = ( 1. , 0. , 0. ),  
                        DTAN_EXTR = ( 0. , 1. , 0. ),  
                        PREC_NORM = 0.1 ,  
                        )  
  
TABK1K3 = POST_K1_K2_K3 ( MODELISATION = '3D', INFO=2,  
                          FOND_FISS = FISS,  
                          MAILLAGE = MA,  
                          MATER = MAT,  
                          RESULTAT = RESU1,  
                          ABSC_CURV_MAXI = 0.539,  
                          VECT_K1 = ( 0. 0. 1. ),  
                          PREC_VIS_A_VIS = 0.1 ,  
                          )
```

6 Exemple 2 : maillage libre

En 3D, si le maillage n'est pas réglé en fond de fissure, il peut ne pas y avoir suffisamment de nœuds sur des directions normales au fond pour l'interpolation. Dans ce cas, on doit utiliser l'option `TYPE_MALLAGE='LIBRE'`.

Avec cette option, le principe de calcul est le suivant

- détermination des directions normales au fond de fissure pour chaque nœud du fond,
- définition sur chacune de ces directions de `NB_NOEUD_COUPE` points, équirépartis entre le fond et la distance `ABSC_CURV_MAXI`,
- projection du déplacement de chaque lèvres sur ces nœuds et interpolation du saut de déplacement.

L'option `TYPE_MALLAGE='LIBRE'` est aussi utilisable en 2D (cas des nœuds non coïncidents entre les deux lèvres).

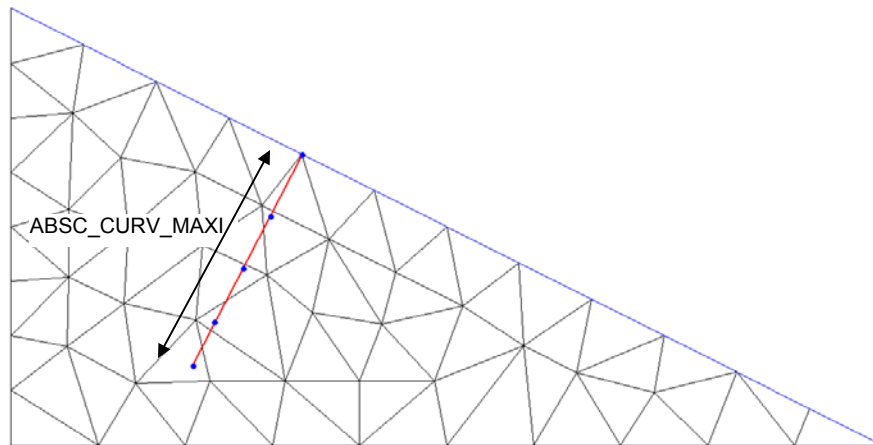


Figure : Maillage libre des lèvres de la fissure – Définition des points de projection

```
TABK = POST_K1_K2_K3 ( MODELISATION = '3D', INFO=2,  
                        TYPE_MALLAGE = 'LIBRE',  
                        FOND_FISS     = FISS,  
                        MALLAGE       = MA,  
                        MATER          = MAT,  
                        RESULTAT      = RESU_MECA,  
                        ABSC_CURV_MAXI = 0.539,  
                        NB_NOEUD_COUPE = 5 ,  
                      )
```

Page laissée intentionnellement blanche