
Structures de Données liées à X-FEM

Résumé

Ce document décrit les structures de données (SD) liées à la méthode X-FEM. Ces objets se trouvent dans plusieurs SD :

- 1) `sd_fiss_xfem`, produite par l'opérateur `DEFI_FISS_XFEM` [U4.82.08] et utilisée pour un calcul de mécanique de la rupture dans le cadre de la méthode X-FEM [R7.02.12]. Cette structure de donnée est aussi utilisée et produite par l'opérateur `PROPA_FISS` [U4.82.11],
- 2) `sd_modele_xfem`, produite par l'opérateur `MODI_MODELE_XFEM` [U4.41.11],
- 3) `sd_contact_xfem`, produite par l'opérateur `DEFI_CONTACT` [U4.44.01].

1 Généralités

Lors d'un calcul X-FEM, les informations concernant la fissure n'étant pas contenues dans le maillage, il est nécessaire de les stocker dans une structure de données (SD) spécifique. Ensuite, l'enrichissement des éléments conduit à de nouveaux éléments finis, dont certaines caractéristiques seront stockées dans le modèle. Ensuite, si le contact est défini sur les lèvres de la fissure, une charge de contact est alors créée, qui contient des informations spécifiques à X-FEM. Ainsi, les objets relatifs à la méthode X-FEM sont répartis dans 3 SD différentes : `sd_fiss_xfem`, `modele` et `charge`. Ces trois SD font l'objet des trois grandes parties de ce document.

Un objet de type `sd_fiss_xfem` décrit une fissure contenue dans un maillage 2D ou 3D, sans que ce maillage ne soit forcément conforme à la géométrie de la fissure. La structure de données `sd_fiss_xfem` contient la description de la fissure par le biais de level sets, les bases locales associées, des données liées à l'enrichissement des éléments finis autour de la fissure, des informations topologiques concernant le sous-découpage des éléments finis enrichis, et des données liées au contact entre les lèvres de la fissure. De plus, cette structure est enrichie par l'ajout de données nécessaires à la propagation de la fissure.

Le modèle enrichi permet de globaliser les informations locales à chaque fissure sur le maillage global. Il contient aussi des informations sur les fissures du modèle. Ce document ne décrit que les objets du modèle spécifiques à X-FEM (pour la description de la `sd_modele`, voir [D4.06.02]).

Si le contact est défini sur les lèvres, la SD de contact contient des informations spécifiques à X-FEM, notamment concernant l'algorithme de construction des multiplicateurs de Lagrange pour satisfaire la condition LBB : listes de relations à imposer,... Ce document ne décrit que les objets du contact spécifiques à X-FEM (pour la description des SD liées au contact frottement, voir [D4.06.14]).

2 Arborescence

```

sd_fiss_xfem (K8)  .:=record

  ◆  '.INFO'                OJB          S      V      K16
     '.MODELE'             OJB          S      V      K8

  ◇  '.CHAMPS.LVS'         OJB          S      V      L

  ◆  '.LTNO'               CHAM_NO
     '.LNNO'               CHAM_NO
     '.GRLTNO'             CHAM_NO
     '.GRLNNO'             CHAM_NO
     '.BASLOC'             CHAM_NO
     '.STNO'               CHAM_NO
     '.STNOR'              CHAM_NO

  ◆  '.GROUP_MA_ENRI'      OJB          S      V      I
     '.GROUP_NO_ENRI'     OJB          S      V      I
     '.CARAFOND'           OJB          S      V      R

  ◇  % si la structure contient un fond de fissure
     '.FONDFISS'           OJB          S      V      R
     '.BASEFOND'           OJB          S      V      R
     '.FONDMULT'           OJB          S      V      I
     '.LTNS'               OJB          S      V      K24
     '.LTNT'               OJB          S      V      K16
     '.FOND.TAILLE_R'      OJB          S      V      R

  ◇  % si des mailles sont entièrement coupées par la fissure
     '.MAILFISS.HEAV'      OJB          S      V      I

  ◇  % si des mailles contiennent le fond de fissure
     '.MAILFISS.CTIP'      OJB          S      V      I

  ◇  % si des mailles sont coupées par la fissure et contiennent le fond de fissure
     '.MAILFISS.HECT'      OJB          S      V      I

  ◇  % si du contact est défini sur certaines fissures du modèle
     '.MAILFISS.CONT'      OJB          S      V      I

  ◇  % si la fissure est issue d'une propagation par l'opérateur PROPA_FISS
     '.PRO.MES_EL'         CHAM_ELEM
     '.PRO.NORMAL'         CHAM_ELEM
     '.PRO.RAYON_TORE'     OJB          S      V      R
     '.PRO.NOEUD_TORE'     OJB          S      V      L
     '.PRO.NOEUD_PROJ'     OJB          S      V      L

  ◇  % si une grille est associée à la fissure par DEFI_FISS_XFEM
     '.GRI.MODELE'         OJB          S      V      K8
     '.GRI.LNNO'           CHAM_NO
     '.GRI.LTNO'           CHAM_NO
     '.GRI.GRLNNO'         CHAM_NO
     '.GRI.GRLTNO'         CHAM_NO

  ◇  % si la grille contient un fond de fissure
     '.FONDFISG'           OJB          S      V      R

```

- ◇ % si des relations d'égalité entre inconnues de contact sont imposées
' .LISEQ ' OJB S V I

- ◇ % si des relations d'égalité entre inconnues de contact sont imposées et si il y a des éléments multi-Heaviside
' .LISEQ_LAGR ' OJB S V I

- ◇ % si il y a des groupes d'arêtes vitales connectées
' .CNCTE ' OJB S V I

- ◇ % si le mot clé JONCTION a été utilisé
' .JONFISS ' OJB S V K8
' .JONCOEF ' OJB S V I

```
sd_modele_xfem (K8) ::=record

  ◆ '.TOPOSE.PIN'          CHAM_ELEM
    '.TOPOSE.CNS'         CHAM_ELEM
    '.TOPOSE.HEA'         CHAM_ELEM
    '.TOPOSE.LON'         CHAM_ELEM

  ◆ '.TOPOFAC.PI'         CHAM_ELEM
    '.TOPOFAC.AI'         CHAM_ELEM
    '.TOPOFAC.CF'         CHAM_ELEM
    '.TOPOFAC.LO'         CHAM_ELEM
    '.TOPOFAC.BA'         CHAM_ELEM
    '.TOPOFAC.OE'         CHAM_ELEM
    '.TOPOFAC.GE'         CHAM_ELEM
    '.TOPOFAC.GM'         CHAM_ELEM

  ◇ % si il y a des éléments multi-Heaviside
    '.TOPOFAC.HE'         CHAM_ELEM

  ◆ '.LTNO'               CHAM_ELNO
    '.LNNO'               CHAM_ELNO
    '.BASLOC'             CHAM_ELNO
    '.STNO'               CHAM_ELNO
    '.NOXFEM'             CHAM_ELNO

  ◇ % si des éléments stockent l'information de plusieurs fissures
    '.FISSNO'             CHAM_ELNO
    '.HEAVNO'             CHAM_ELNO

  ◆ '.XFEM_CONT'         OJB          S          V          I
  ◆ '.NFIS'              OJB          S          V          I
    '.FISS'              OJB          S          V          K8
    '.XMAFIS'            CHAM_ELEM

sd_contact_xfem (K16) ::=record

  ◆ '.CARACF'           OJB          S          V          R
    '.ECPDON'           OJB          S          V          I
    '.METHCO'           OJB          S          V          I

    '.XFIMAI'           OJB          S          V          K8
    '.XNRELL'           OJB          S          V          K24

  ◇ % cartes de contact pour l'approche grand glissement

    '.XFPO'             CARTE
    '.XFST'             CARTE
    '.XFPI'             CARTE
    '.XFAI'             CARTE
    '.XFCE'             CARTE
    '.XFHF'             CARTE
    '.XFPL'             CARTE
```

3 Contenu des objets de la sd_fiss_xfem

Remarque préliminaire sur la distinction entre 2D et 3D :

La présence de certains objets dans la structure de données `sd_fiss_xfem` dépend parfois de la dimension du maillage sur lequel est représenté la fissure. Ainsi, la distinction entre 2D et 3D se rapporte à la dimension du maillage contenu dans le modèle donné par l'utilisateur sous le mot-clé `MODELE` de la commande `DEFI_FISS_XFEM`.

3.1 Objets généraux

3.1.1 .INFO

Le concept `.INFO` est un vecteur de *K16* de longueur 3 contenant des informations générales.

La 1ère composante de ce vecteur renseigne sur le type de discontinuité relative à la `sd_fiss_xfem` : soit une fissure, soit une interface. La 2ème composante indique le champ discontinu : soit le champ de déplacement, soit le champ de contrainte. La 3ème composante précise si le fond est fermé ou ouvert.

`.INFO(1) = 'FISSURE' ou 'INTERFACE'`

`.INFO(2) = 'DEPL' ou 'SIGM'`

`.INFO(3) = 'OUVERT' ou 'FERME'`

On accède aux valeurs de ce vecteur uniquement par la routine `dismoif`.

Exemple :

```
CALL DISMOI('F', 'TYPE_DISCONTINUITE', FISS, 'FISS_XFEM', IBID, TYPDIS, IRET)
```

```
CALL DISMOI('F', 'CHAM_DISCONTINUITE', FISS, 'FISS_XFEM', IBID, TYPCHA, IRET)
```

```
CALL DISMOI('F', 'TYPE_FOND', FISS, 'FISS_XFEM', IBID, TYPFON, IRET)
```

3.1.2 .MODELE

Le concept `.MODELE` est un vecteur de *K8* de longueur 1 contenant le nom du modèle sur lequel est construite la fissure (valeur du mot-clé `MODELE` en entrée de `DEFI_FISS_XFEM`). En cas de propagation, ce vecteur est dupliqué de l'ancienne fissure à la nouvelle fissure.

On accède à ce vecteur uniquement par la routine `dismoif`.

Exemple :

```
CALL DISMOI('F', 'NOM_MODELE', FISS, 'FISS_XFEM', IBID, MODELE, IRET)
```

3.2 Objets relatifs aux level sets

3.2.1 .CHAMPS.LVS

Le concept `.CHAMPS.LVS` est un vecteur de booléens de longueur 1. Si ce vecteur est présent (et sa valeur est alors toujours égale à `TRUE`), les champs level set de la fissure courante ont été donnés directement par l'utilisateur (par `DEFI_FISS_XFEM` en utilisant les mots-clé `CHAMP_NO_LSN` et `CHAMP_NO_LST`) et ils n'ont pas été calculés.

Si les deux champs ont été extraits d'une fissure propagée par `PROPA_FISS`, les informations sur la localisation du domaine (`.PRO.RAYON_TORE` (§14) et `.PRO.NOEUD_TORE` (§14)) et sur l'utilisation d'une grille auxiliaire pour la fissure propagée (`.GRI.MODELE` (§14), `.GRI.L*NO` (§14) et `.GRI.GRL*NO` (§15)) ont été perdues et la SD de la fissure courante ne les contient pas. En effet ces informations sont stockées au niveau de la SD `fiss_xfem` et pas au niveau de la SD `champ_no`. Cela pose problème dans le cas où la fissure courante est propagée par `PROPA_FISS` parce que l'on pourrait obtenir des faux résultats. En effet dans les cas où la localisation du domaine ou la grille auxiliaire ont été utilisés, les level sets ont été mises à jours seulement dans un petit domaine autour du fond de la fissure: dans le premier cas cela est évident, et dans le deuxième cas les level sets ont été projetées sur le maillage physique avec un domaine de projection localisé indépendamment de l'utilisation de la localisation d'un domaine de calcul en fond de fissure sur la grille. En dehors du domaine de localisation/projection la valeur des levels set est la même que celle calculée pour

définir la fissure: les level sets ne sont donc pas continues à la limite du domaine de localisation/projection et la description de la fissure n'est donc pas correcte sur tout le maillage. Si les informations sur le domaine de localisation et sur la grille auxiliaire ne sont pas stockées dans la SD de la nouvelle fissure, `PROPA_FISS` propage la fissure en considérant que les level sets sont correctes sur tout le maillage. Quand le fond de la fissure propagé sort du domaine de localisation/projection utilisé pour la fissure initiale avant propagation, on obtient des résultats faux et on a des problèmes de convergence dans la réinitialisation et la réorthogonalisation des level set. Dans le cas où les level sets données pour définir la nouvelle fissure n'ont pas été extraites d'une fissure propagée par `PROPA_FISS`, ou bien que la localisation du domaine ou de la grille auxiliaire n'ont pas été utilisées avec `PROPA_FISS`, les champs level sets donnés représentent correctement la fissure sur tout le maillage et la propagation de la nouvelle fissure peut être calculée sans problème par `PROPA_FISS`.

Si ce vecteur est présent dans la SD de la fissure, `PROPA_FISS` émet une alarme pour que l'utilisateur vérifie s'il n'est pas en présence d'un champ extrait d'une fissure propagée avec `PROPA_FISS` qu'il utiliserait avec localisation du domaine de calcul ou bien avec une grille auxiliaire.

3.2.2 .LTNO et .LNNO

Le concept `.LTNO` (resp. `.LNNO`) est un champ aux nœuds (`CHAM_NO`) scalaire qui contient pour chaque nœud du maillage la valeur réelle de la level set tangente (resp. normale) à la fissure.

3.2.3 .GRLTNO et .GRLNNO

Le concept `.GRLTNO` (resp. `.GRLNNO`) est un champ aux nœuds (`CHAM_NO`) à 3 composantes réelles. Il contient pour chaque nœud du maillage les valeurs du gradient de la level set tangente (resp. normale) dans les 3 directions de l'espace.

Soit i le $i^{\text{ème}}$ nœud du maillage,

$$V = .GRLTNO(i);$$

$V(1)$	Valeur du gradient suivant x de la level set tangente, calculé au $i^{\text{ème}}$ nœud
$V(2)$	Valeur du gradient suivant y de la level set tangente, calculé au $i^{\text{ème}}$ nœud
$V(3)$	Valeur du gradient suivant z de la level set tangente, calculé au $i^{\text{ème}}$ nœud

En 2D, on a seulement 2 composantes suivant x et y .

3.2.4 .BASLOC

Le concept `.BASLOC` est un champ aux nœuds (`CHAM_NO`) à 9 composantes réelles (en 3D). Il contient l'origine et les vecteurs de la BASE LOCALE au fond de fissure. Pour chaque nœud, les trois premières composantes sont les coordonnées du projeté du nœud sur le fond, qui correspond à l'origine de la base locale. Les trois composantes suivantes sont les coordonnées du 1^{er} vecteur (`GRLT`) de la base. Les trois dernières composantes sont les coordonnées du 2^{ème} vecteur (`GRLN`) de la base. Le 3^{ème} vecteur de la base n'est pas stocké, car il se détermine facilement comme étant le produit vectoriel des 2 premiers vecteurs.

Soit i le $i^{\text{ème}}$ nœud du maillage,

$$V = .BASLOC(i);$$

$V(1)$	Coordonnée suivant x du projeté du nœud i sur le fond
$V(2)$	Coordonnée suivant y du projeté du nœud i sur le fond
$V(3)$	Coordonnée suivant z du projeté du nœud i sur le fond
$V(4)$	Coordonnée suivant x du 1 ^{er} vecteur de la base locale
$V(5)$	Coordonnée suivant y du 1 ^{er} vecteur de la base locale
$V(6)$	Coordonnée suivant z du 1 ^{er} vecteur de la base locale

V(7)	Coordonnée suivant x du 2 ^{ème} vecteur de la base locale
V(8)	Coordonnée suivant y du 2 ^{ème} vecteur de la base locale
V(9)	Coordonnée suivant z du 2 ^{ème} vecteur de la base locale

En 2D, on a seulement 2 composantes suivant x et y , soient 6 composantes pour `BASLOC`. Rappelons qu'en 2D, soit il n'y a qu'un seul fond de fissure, qui est alors un point (cas des fissures 2D débouchantes) et dans ce cas tous les nœuds du maillage possèdent le même projeté sur le fond de fissure, soit il y a deux fonds de fissure, donc deux points (cas des fissures 2D non débouchantes) et dans ce cas, une partie des nœuds du maillage se projette sur le 1^{er} fond de fissure et une autre partie des nœuds du maillage se projète sur le 2^{ème} fond de fissure.

3.2.5 . FONDFISS

Le vecteur `.FONDFISS` est un vecteur de réels contenant les coordonnées des points du fond de fissure. Les points sont ordonnés suivant la méthode décrite dans le document [R7.02.12], de manière à ce qu'une abscisse curviligne puisse être définie.

Si `NFON` est le nombre de points du fond de fissure, alors la longueur du vecteur `.FONDFISS` est $4 \times \text{NFON}$. Pour chaque point du fond de fissure, les 3 premières composantes correspondent aux 3 coordonnées (en 3D) du point, et la quatrième composante est son abscisse curviligne.

Lorsque le fond est fermé, le dernier point est égal au premier. Les 4 derniers termes du vecteur `.FONDFISS` sont alors identiques aux 4 premiers.

Cette structure n'est pas modifiée en 2D. Cependant on utilise uniquement les 2 premières composantes, car ni l'abscisse curviligne ni la dernière composante géométrique ne sont pertinentes en 2D.

Cet objet n'est créé que si il existe au moins un point du fond de fissure.

3.2.6 . BASEFOND

Le vecteur `.BASEFOND` est un vecteur de réels contenant la base locale associée à chaque point du fond de fissure.

Si `NFON` est le nombre de points du fond de fissure et si `NDIM` est la dimension du modèle (2 en 2D et 3 en 3D), alors la longueur du vecteur `.BASEFOND` est $2 \times \text{NDIM} \times \text{NFON}$. En fait ce vecteur contient, successivement pour tous les points du fond, les composantes (2 en 2D et 3 en 3D) du vecteur normal au plan de la fissure et de la direction de propagation (vecteur tangent au plan de la fissure).

En 3D, lorsque le fond est fermé, le dernier point est égal au premier. Les 4 derniers termes du vecteur `.BASEFOND` sont alors identiques aux 4 premiers.

3.2.7 . FONDMULT

En 3D, le fond de fissure est une ligne soit fermée (fissure non débouchante), soit ouverte (fissure débouchante). Dans la plupart des cas, le fond de fissure est une ligne continue, comme celui de la fissure circulaire représentée sur la Figure 3.2.7-a.

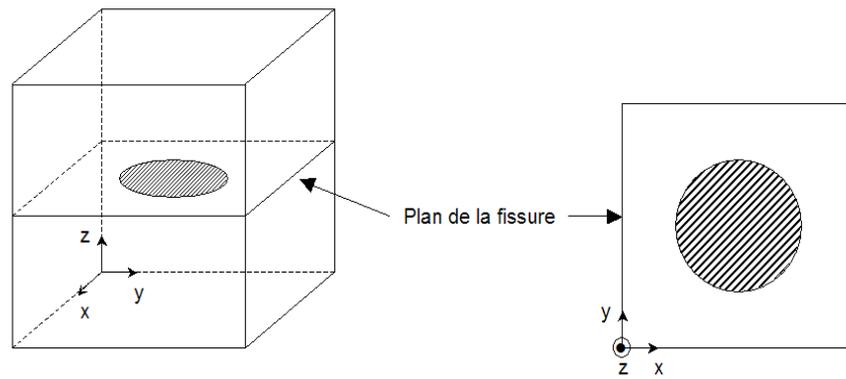


Figure 3.2.7-ã Cas d'un fond de fissure continu.

Cependant, il peut arriver que le fond de fissure soit en fait composé de plusieurs morceaux discontinus. C'est le cas par exemple de la fissure circulaire représentée sur la Figure 3.2.7-b. Dans ce cas, on parle toujours du fond de fissure, comme l'ensemble des morceaux du fond. On dit que le fond de fissure est un fond multiple. Sur l'exemple de la Figure 3.2.7-b, le fond de fissure est composé des lignes courbes (BC) , (DE) , (FG) et (HA) .

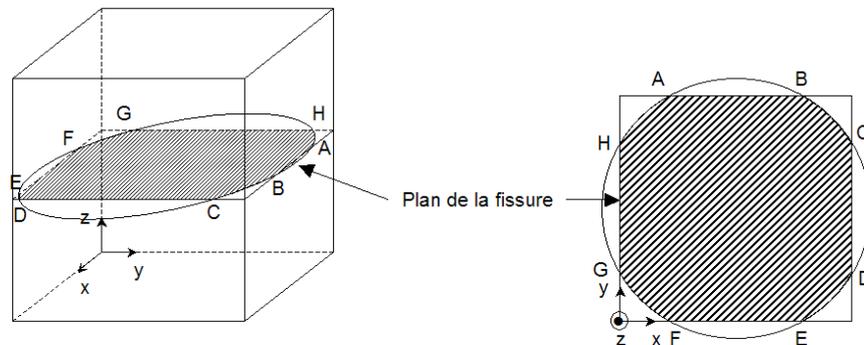


Figure 3.2.7-b Cas d'un fond de fissure multiple.

Le vecteur `.FONDMULT` est un vecteur d'entiers contenant les indices des points de départ et d'arrivée des différents morceaux du fond de fissure dans le `.FONDFISS`. Si `NFONFI` est le nombre de morceaux du fond de fissure, alors le vecteur `.FONDMULT` est de dimension $2 \times NFONFI$.

Par exemple :

Si `.FONDMULT = (1 ; 8 ; 9 ; 12)`

Alors Morceau n°1 du fond de fissure : du point 1 au point 8 du `.FONDFISS`

Morceau n°2 du fond de fissure : du point 9 au point 12 du `.FONDFISS`

En 2D, chaque point du fond de fissure constitue à lui seul un fond, le vecteur `.FONDMULT` est néanmoins créé. Par exemple pour 2 fonds de fissures, il vaudra : `.FONDMULT = (1; 1; 2; 2)`

L'objet est créé sous réserve qu'il existe au moins un point du fond de fissure.

3.2.8 .CARAFOND

Le vecteur `.CARAFOND` est un vecteur de réels de dimension 2. Il contient les paramètres utilisateurs concernant le fond de fissure. La première composante est le rayon d'enrichissement des éléments et la deuxième composante est le nombre de couches d'éléments à enrichir.

Ainsi :

```
CARAFOND(1)= RAYON_ENRI    si RAYON_ENRI est fourni par l'utilisateur,
              0            sinon.
CARAFOND(2)= NB_COUCHES   si NB_COUCHES est fourni par l'utilisateur,
              0            sinon.
```

Ces données sont celles fournies par l'utilisateur dans la commande `DEFI_FISS_XFEM`. Elles sont stockées car elles servent de nouveau dans la commande `PROPA_FISS` pour générer une fissure propagée.

3.2.9 .LTNS

Le vecteur `.LTNS` est un vecteur de chaînes de caractères contenant les deux tables associées à la fissure. Ces tables sont accessibles via la commande `RECU_TABLE`.

La première table nommée `FOND_FISS` contient les coordonnées des points de fonds de fissure. En 2D, celle-ci est constituée du numéro de fond de fissure et des coordonnées x et y . Ainsi, l'affichage de la table sera :

```
NUME_FOND      COOR_X      COOR_Y
```

En 3D, celle-ci décrit chaque fond de fissure. Ainsi, pour chaque fond de fissure i , la table fournira l'abscisse curviligne et les coordonnées des points en fond de fissure i . L'affichage de la table sera :

```
NUME_FOND      NUME_PT      ABS_CURV      COOR_X      COOR_Y      COOR_Z
```

La seconde table nommée `NB_FOND_FISS` contient le nombre de fonds de fissure.

La construction de ces tables repose sur l'utilisation des vecteurs `.FOND_FISS` et `.FOND_MULT`.

3.2.10. LTNT

Le vecteur `.LTNT` est un vecteur de chaînes de caractères contenant les noms des deux tables associées à la fissure à fournir à la commande `RECU_TABLE`. Il s'agit de `FOND_FISS` et de `NB_FOND_FISS`.

3.2.11. FOND.TAILLE_R

Ce vecteur contient pour chacun des nœuds du fond, une estimation de la taille maximale suivant la direction de propagation, des mailles qui leur sont connectées. Ces tailles sont ordonnées suivant l'ordre des nœuds donné dans le vecteur `.FOND_FISS`.

On note \vec{V}_{P_i} le vecteur de propagation de la base locale au nœud du fond N_i et a_{ijk} la $k^{\text{ème}}$ arête de la $j^{\text{ème}}$ maille à laquelle appartient le nœud N_i .

Pour chaque nœud du fond N_i , on projette les arêtes a_{ijk} sur le vecteur de direction de propagation \vec{V}_{P_i} . La taille maximale T_i des mailles connectées à N_i est la valeur maximale des valeurs absolues de ses projections. Autrement dit, la taille T_i est égale à

$$T_i = \max_{\substack{1 \leq j \leq Nb_{\text{mailles},i} \\ 1 \leq k \leq Nb_{\text{arêtes},j}}} \left(\left| a_{ijk} \cdot \vec{V}_{P_i} \right| \right),$$

où $Nb_{\text{mailles},i}$ est le nombre de mailles connectées au nœud N_i et $Nb_{\text{arêtes},j}$ est le nombre d'arêtes de la $j^{\text{ème}}$ maille connectée au nœud N_i .

3.3 Objets relatifs à l'enrichissement

3.3.1 .GROUP_MA_ENRI

Le vecteur `.GROUP_MA_ENRI` contient la liste des numéros de mailles de la zone à enrichir.

3.3.2 .GROUP_NO_ENRI

Le vecteur `.GROUP_NO_ENRI` contient la liste des numéros de nœuds de la zone à enrichir. Notons que ce vecteur peut se déduire de `.GROUP_MA_ENRI`.

Remarque :

Ces deux derniers vecteurs sont stockés car on souhaite réutiliser dans `PROPA_FISS` les informations liées au mot-clé `GROUP_MA_ENRI` de `DEFI_FISS_XFEM`. Et la seule possibilité de transmettre l'information est de stocker les numéros des mailles et des nœuds des mailles de `GROUP_MA_ENRI`.

3.3.3 .STNO

Le concept `.STNO` est un champ aux nœuds (`CHAM_NO`) à une composante entière, correspondant au statut du nœud en question.

- Si le nœud a son support entièrement coupé par la fissure, son statut vaut 1.
- Si le nœud est dans une zone « proche » (cette notion est définie suivant un critère défini par l'utilisateur) du fond de fissure, son statut vaut 2.
- Si le nœud satisfait les deux conditions précédentes, son statut vaut 3.
- Dans tous les autres cas, le statut vaut 0.

3.3.4 .STNOR

Le concept `.STNOR` est exactement le même champ que `.STNO` mais avec des composantes réelles. Il pourra donc être utilisé pour la visualisation avec `salome` par exemple.

3.3.5 .MAILFISS.HEAV

Le vecteur `.MAILFISS.HEAV` est un vecteur d'entiers contenant la liste des numéros des mailles enrichies de type Heaviside (maille « RONDE »).

3.3.6 .MAILFISS.CTIP

Le vecteur `.MAILFISS.CTIP` est un vecteur d'entiers contenant la liste des numéros des mailles enrichies de type Crack-Tip (maille « CARREE »).

3.3.7 .MAILFISS.HECT

Le vecteur `.MAILFISS.HECT` est un vecteur d'entiers contenant la liste des numéros des mailles enrichies de type Heaviside-Crack-Tip (maille « RONDE-CARREE »).

3.3.8 .MAILFISS.CONT

Le vecteur `.MAILFISS.CONT` est un vecteur d'entiers contenant la liste des numéros des mailles sur lesquelles du contact est défini pour la fissure. Il s'agit des mailles:

- Soit strictement intersectées par la fissure (type 1 sur la fig.3.3.8-a)
- Soit présentant une arête (en 2D) ou une face (en 3D) confondue avec la fissure, et située du côté esclave (type 2 sur la fig.3.3.8-a)
- Soit, en multi-fissuration, des mailles présentant un enrichissement Heaviside pour la fissure considérée et qui entrent dans une des deux premières catégories pour une autre fissure (type 3 sur la fig.3.3.8-a).

En effet, pour limiter l'introduction de nouveaux éléments lors de l'implémentation du contact avec multi-fissuration, le nombre de degrés de liberté de contact est toujours égal au nombre de degrés de liberté de Heaviside, quitte à mettre ensuite les degrés de liberté de contact superflus à 0. D'où la nécessité d'inclure les mailles de ce troisième type dans le groupe des mailles « en contact » (mais leurs degrés de liberté seront mis à 0).

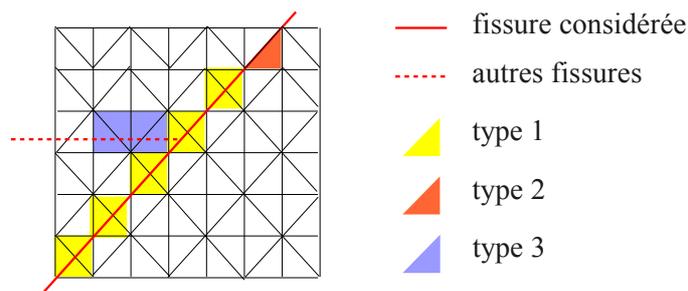


Figure 3.3.8-a exemple du groupe .MAILFISS.CONT d'une fissure.

3.3.9 .JONFISS

Le vecteur .JONFISS contient la liste des fissures mères sur lesquelles se branche la fissure. Il est notamment utilisé dans l'opérateur MODI_MODELE_XFEM pour le découpage et l'enrichissement multiple. Ce vecteur est créé si l'utilisateur fait appel au mot clé JONCTION dans DEFI_FISS_XFEM.

3.3.10 .JONCOEF

Le vecteur .JONCOEF est de même longueur que .JONFISS. Il contient la liste des coefficients à associer aux level sets normales des fissures de .JONFISS pour retrouver le domaine dans lequel la fissure branchée est définie. Ces coefficients valent $+1$ ou -1 et sont calculés automatiquement. La fissure branchée est alors définie dans la zone où pour toutes les fissures mères i , les produits $JONCOEF(i) * lsn(JONFISS(i))$ sont négatifs.

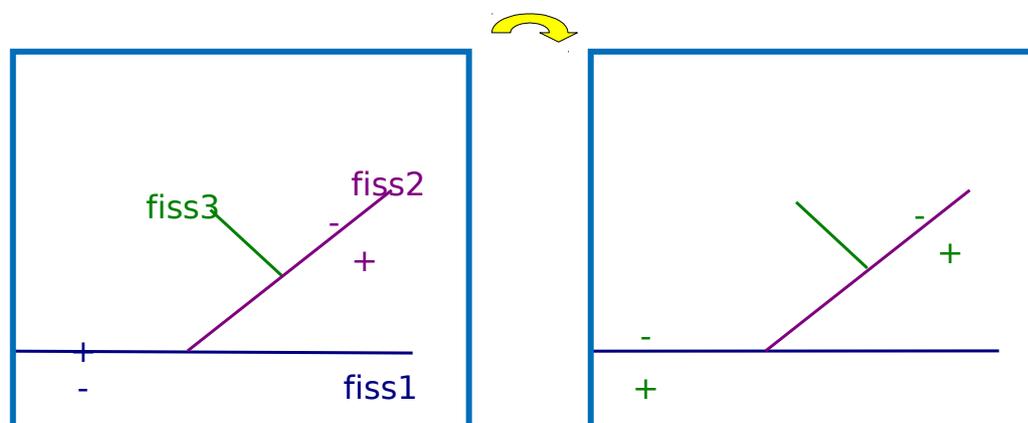


Figure 3.3.10-a signe des levels set des fissures mères à gauche, signe obtenu après multiplication par JONCOEF à droite, et définition de la fissure branchée du côté moins.

On assure ainsi que la fissure branchée est dans la zone « moins » par rapport aux fissures mères. La figure 3.3.10-a montre un exemple d'utilisation de .JONCOEF et de .JONFISS afin de définir la fissure 3. Sur cette figure la fissure 3 est branchée sur la fissure 2, elle-même branchée sur la fissure 1, .JONFISS de la fissure 3 contient donc les fissures 1 et 2. Les signes des level sets des fissures 1 et 2 sont donnés sur la figure de gauche : on en déduit les valeurs de JONCOEF $(-1, 1)$ ainsi que la répartition des signes de $coef(1) \times lsn(1)$ et $coef(2) \times lsn(2)$ sur la figure de droite. La fissure 3 est définie dans la zone où les 2 signes sont moins.

En conclusion .JONFISS et .JONCOEF permettent de définir la fissure 3 avec ses level sets normale et tangente habituelles ainsi que les level sets normales des fissures mères, auxquelles on a accès de manière élémentaire.

3.4 Objets relatifs à la propagation

3.4.1 .PRO.MES_EL

Le concept .PRO.MES_EL est un champ par élément (CHAM_ELEM) à une composante réelle. Elle correspond à la mesure de l'élément (soit son volume pour un élément 3D ou son aire pour un élément 2D).

3.4.2 .PRO.NORMAL

Le concept .PRO.NORMAL est un champ par élément (CHAM_ELEM) contenant les normales n_i opposées au nœud i dans l'élément. Ces informations sont utilisées pour la réinitialisation et

réorthogonalisation par la méthode dite 'SIMPLEXE' (voir doc [R7.02.12] où la notion de normale opposée à un nœud est expliquée).

Soit i le $i^{\text{ème}}$ élément du maillage, et j le $j^{\text{ème}}$ nœud de l'élément i .

`V = .PRO.NORMAL(i) ;`

<code>V(3*(j-1)+1)</code>	Coordonnée suivant x de la normale opposée au nœud j
<code>V(3*(j-1)+2)</code>	Coordonnée suivant y de la normale opposée au nœud j
<code>V(3*(j-1)+3)</code>	Coordonnée suivant z de la normale opposée au nœud j

3.4.3 .PRO.RAYON_TORE

Vecteur de réels de longueur égale à 1.

Dans le cas où ce vecteur existe dans la SD, le calcul de la propagation de la fissure a été fait en utilisant la localisation du domaine de mise à jour des level sets. Le domaine coïncide avec un tore en 3D ou un cercle en 2D construits autour du fond de la fissure. Le rayon de ce tore ou de ce cercle est stocké dans cet objet.

Dans le cas où ce vecteur n'existe pas dans la SD, tout le modèle a été utilisé pour le calcul de la propagation de la fissure.

3.4.4 .PRO.NOEUD_TORE

Vecteur de booléens de longueur égale au nombre de nœuds du maillage sur lequel la fissure a été défini ou, dans le cas où une grille est associée à la fissure, au nombre de nœuds de la grille.

Dans le cas où ce vecteur existe dans la SD, le calcul de la propagation de la fissure a été fait en utilisant la localisation du domaine de mise à jour des level sets. Pour chaque nœud du maillage (ou de la grille), une valeur `TRUE` signifie que le nœud est compris dans le domaine utilisé pour le calcul. Par exemple, si la valeur de la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur est `TRUE`, le $i^{\text{ème}}$ nœud du maillage (ou de la grille) est compris dans le domaine; par contre, si la valeur de la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur est `FALSE`, le $i^{\text{ème}}$ nœud du maillage (ou de la grille) est en dehors du domaine.

Dans le cas où ce vecteur n'existe pas dans la SD, tout le modèle (ou toute la grille) a été utilisé pour le calcul de la propagation de la fissure.

3.4.5 .PRO.NOEUD_PROJ

Vecteur de booléens de longueur égale au nombre de nœuds du maillage sur lequel la fissure a été définie.

Dans le cas où ce vecteur existe dans la SD, le calcul de la propagation de la fissure a été fait sur la grille auxiliaire associée à la fissure et les level sets calculées ont été projetées sur le maillage. Pour chaque nœud du maillage, une valeur `TRUE` signifie que le nœud est compris dans le domaine de projection. Par exemple, si la valeur de la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur est `TRUE`, le $i^{\text{ème}}$ nœud du maillage est compris dans le domaine; par contre, si la valeur de la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur est `FALSE`, le $i^{\text{ème}}$ nœud du maillage est en dehors du domaine et les valeurs des level sets portées par ce nœud n'ont pas été mises à jour.

Dans le cas où ce vecteur n'existe pas dans la SD, le calcul de la propagation de la fissure a été fait directement sur le maillage.

3.4.6 .GRI.MODELE

Vecteur de K8 de longueur égale à 1.

Nom du modèle de la grille associée à la fissure. Si cet objet n'existe pas, aucune grille n'est associée à la fissure.

3.4.7 .GRI.LTNO et .GRI.LNNO

Le concept `.GRI.LTNO` (resp. `.GRI.LNNO`) est un champ aux nœuds (`CHAM_NO`) scalaire qui contient pour chaque nœud de la grille la valeur réelle de la level set tangente (resp. normale) à la fissure. Si cet objet n'existe pas, aucune grille n'est associée à la fissure.

3.4.8 `.GRI.GRLTNO` et `.GRLNNO`

Le concept `.GRI.GRLTNO` (resp. `.GRI.GRLNNO`) est un champ aux nœuds (`CHAM_NO`) à 3 composantes réelles. Il contient pour chaque nœud de la grille les valeurs du gradient de la level set tangente (resp. normale) dans les 3 directions de l'espace.

Soit i le i -ème nœud de la grille,

`V = .GRI.GRLTNO(i) ;`

`V(1)` Valeur du gradient suivant x de la level set tangente, calculé au i ème nœud
`V(2)` Valeur du gradient suivant y de la level set tangente, calculé au i ème nœud
`V(3)` Valeur du gradient suivant z de la level set tangente, calculé au i ème nœud

En 2D, on a seulement 2 composantes suivant x et y .
Si cet objet n'existe pas, aucune grille n'est associée à la fissure.

3.4.9 `.FONDFISG`

Le vecteur `.FONDFISG` est un vecteur de réels contenant les coordonnées des points du fond de fissure construit sur la grille auxiliaire. Les points sont ordonnés suivant la même méthode que celle décrite dans le document [R7.02.12] pour la création du vecteur des points du fond de fissure sur le maillage réel `.FONDFISS`, de manière à ce qu'une abscisse curviligne puisse être définie.

Si `NFON` est le nombre de points du fond de fissure sur la grille, alors la longueur du vecteur `.FONDFISG` est $4 \times \text{NFON}$. Pour chaque point du fond de fissure sur la grille, les 3 premières composantes correspondent aux 3 coordonnées (en 3D) du point, et la quatrième composante est son abscisse curviligne.

Cet objet est créé uniquement en 3D dans le cadre de la propagation de fissure utilisant les méthodes Upwind ou Simplexe comme outils de mise à jour des level sets.

3.5 Objets relatifs au contact

Ces objets sont créés dans la `sd_fiss_xfem` par `DEFI_CONTACT`.

3.5.1 `.BASCO`

Le concept `.BASCO` est un champ aux nœuds (`CHAM_NO`) à 12 composantes réelles (en 2D et en 3D). Il contient l'origine et les vecteurs de la BASE COvariante des facettes de contact. Pour chaque nœud, les trois premières composantes sont les coordonnées du point de contact associé à ce nœud, qui correspond à l'origine de la base covariante. Les trois composantes suivantes sont les coordonnées du 1^{er} vecteur de la base. Les trois composantes suivantes sont les coordonnées du 2^{ème} vecteur de la base. Les trois dernières composantes sont les coordonnées du 3^{ème} vecteur de la base.

Soit i le i ème nœud du maillage,

`V = .BASCO(i) ;`

`V(1)` Coordonnée suivant x du point de contact associé au nœud i
`V(2)` Coordonnée suivant y du point de contact associé au nœud i
`V(3)` Coordonnée suivant z du point de contact associé au nœud i
`V(4)` Coordonnée suivant x du 1^{er} vecteur de la base au point de contact associé au nœud i
`V(5)` Coordonnée suivant y du 1^{er} vecteur de la base au point de contact associé au nœud i
`V(6)` Coordonnée suivant z du 1^{er} vecteur de la base au point de contact associé au nœud i

- V(7) Coordonnée suivant x du 2^{ème} vecteur de la base au point de contact associé au nœud i
- V(8) Coordonnée suivant y du 2^{ème} vecteur de la base au point de contact associé au nœud i
- V(9) Coordonnée suivant z du 2^{ème} vecteur de la base au point de contact associé au nœud i
- V(10) Coordonnée suivant x du 3^{ème} vecteur de la base au point de contact associé au nœud i
- V(11) Coordonnée suivant y du 3^{ème} vecteur de la base au point de contact associé au nœud i
- V(12) Coordonnée suivant z du 3^{ème} vecteur de la base au point de contact associé au nœud i

En 2D, les composantes suivant z sont nulles.

3.5.2 .LISEQ (adresse JLIS1)

C'est la LISTE des relations d'égalité (EQUALITY) entre les inconnues de contact.

Vecteur d'entiers de longueur NRELEQ*2 où NRELEQ est le nombre de relations d'égalité.

Pour chaque relation d'égalité, on stocke les numéros des 2 nœuds faisant partie de l'égalité :

Soit IE la i ^{ème} relation d'égalité,

ZI(JLIS1-1+2*(IE-1)+1) est le numéro du 1^{er} nœud faisant partie de l'égalité.

ZI(JLIS1-1+2*(IE-1)+2) est le numéro du 2^{ème} nœud faisant partie de l'égalité.

3.5.3 .LISEQ_LAGR (adresse JLISLA)

C'est la LISTE des numéros de LAGRANGE associées aux relations d'égalité (EQUALITY) entre les inconnues de contact. Cette liste est construite dans le cas des mailles multi-Heaviside. Elle permet de retrouver le numéro de ddl de Lagrange à associer au numéro d'un nœud pris dans une relation d'égalité.

ZI(JLISLA-1+2*(IE-1)+1) est le numéro de Lagrange à associer au 1^{er} nœud de la relation d'égalité.

ZI(JLISLA-1+2*(IE-1)+2) est le numéro de Lagrange à associer au 2^{ème} nœud de la relation d'égalité.

Par exemple si il faut imposer la relation LAGS_C=LAG3_C entre les nœuds 'N26' et 'N32' pour la i ^{ème} relation d'égalité, on aura :

$$ZI(JLIS1-1+2*(IE-1)+1) = 26$$

$$ZI(JLIS1-1+2*(IE-1)+2) = 32$$

$$ZI(JLISLA-1+2*(IE-1)+1) = 1$$

$$ZI(JLISLA-1+2*(IE-1)+2) = 3$$

3.5.4 .CNCTE (adresse JCNTES)

Il s'agit des groupes d'arêtes vitales connectées. Pour chaque numéro local d'arête dans une maille, qui appartient à un groupe, on incrémente NCTE et on stocke :

ZI(JCNTES-1+4*(NCTE-1)+1) le numéro de l'arête dans le groupe,

ZI(JCNTES-1+4*(NCTE-1)+2) le numéro de groupe,

ZI(JCNTES-1+4*(NCTE-1)+3) le numéro de maille,

ZI(JCNTES-1+4*(NCTE-1)+4) le numéro local de l'arête dans la maille.

4 Contenu des objets de la sd_modele_xfem

4.1 Contenu des objets relatifs à la concaténation

4.1.1 .LNNO, .LTNO, .BASLOC et .STNO

Attention, ces objets n'ont pas la même structure que les objets du même nom contenus dans la `sd_fiss_xfem` ([§3.2.2], [§3.2.4] et [§3.3.3]). Ce sont des champs élémentaires de type `ELNO` et non pas des `CHAM_NO`. La principale différence est que les `CHAM_NO` stockent l'information sur les noeuds du maillage (une valeur par noeud) alors que les `CHAM_ELNO` stockent l'information par noeud sur l'élément. Un noeud étant connecté à N éléments, la valeur sera stockée N fois. Ce choix a pour finalité le stockage des informations de plusieurs fissures dans un élément, on utilise alors la notion de sous point.

Si un élément est contenu dans la SD `fiss(i) //'MAILFISS.HEAV'`, on dit qu'il est vu par la fissure i : il faut alors stocker dans le modèle les informations relatives à cette fissure. Si l'élément voit 2 fissures ou plus, il faut stocker dans le modèle les informations de toutes les fissures. En définissant le nombre de sous points `NBSP` des `CHAM_ELNO` comme le nombre de fissures vues par l'élément, on duplique `NBSP` fois l'espace mémoire relatif à la SD pour l'élément qui voit `NBSP` fissures. Ainsi on peut stocker les informations de toutes les fissures dans cet élément.

La figure 4.1.1-a montre un exemple de concaténation de 2 fissures dans le modèle. On représente sur cette figure les SD `.LNNO` des 2 fissures et celle du modèle. L'élément du centre voit 2 fissures, le champ `MODELE` contient donc 2 composantes par noeud dans cet élément.

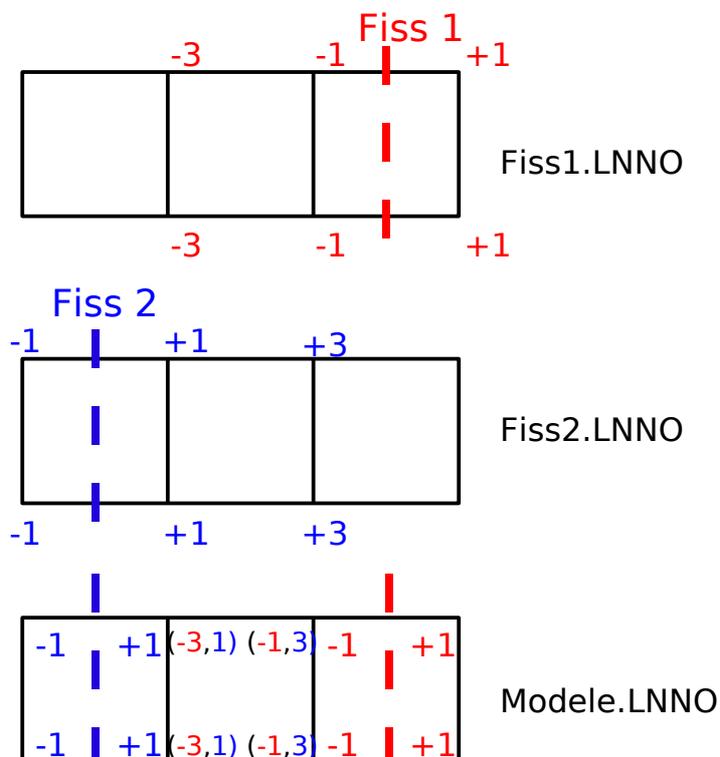


Figure 4.1.1-a Exemple de stockage de SD multiple dans le modèle.

4.1.2 .NOXFEM

Il s'agit d'un `CHAM_NO` à 2 composantes. Les composantes sont affectées si le nœud possède un enrichissement X-FEM (i.e. il existe une fissure `fiss(i)` pour laquelle le champ `fiss(i)//'.STNO'` n'est pas nul en ce nœud). La première composante correspond au numéro de maille X-FEM contenant le nœud. La deuxième composante est le numéro local du nœud dans cette maille X-FEM. Cette structure est utile pour l'imposition de conditions limites de type Dirichlet.

4.1.3 .FISSNO

Il s'agit d'un `CHAM_ELNO`. Cette SD est créée lorsqu'au moins un élément de la structure doit stocker les informations de plusieurs fissures. Pour l'introduction de plusieurs degrés de liberté Heaviside, on a fait le choix d'incrémenter séquentiellement par nœuds les numéros de degrés de liberté. Par exemple figure 4.1.3-a, on introduit deux fissures. On affecte pour la première fissure (en bleu à gauche) les ddl `H1`. Pour la deuxième fissure (en rouge au centre) on attribue des degrés de liberté `H1` aux nœuds qui n'ont pas déjà de degrés de liberté `H1` affectés précédemment, et des degrés de liberté `H2` pour les nœuds possédant déjà des degrés de liberté `H1`. Ce choix est fait dans le but de ne pas alourdir les catalogues élémentaires. En effet cette stratégie ne nécessite pas d'élément ne possédant que des `H2`.

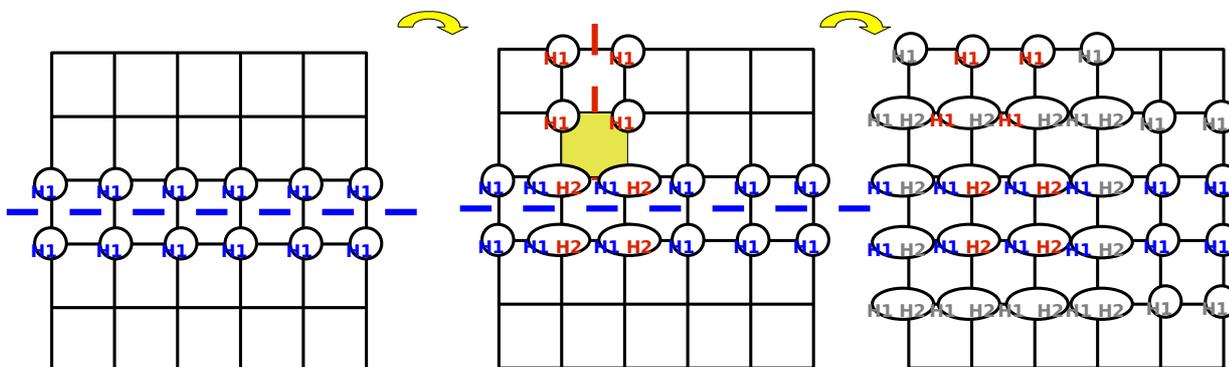


Figure 4.1.3-a Degrés de liberté Heavisides, pour deux fissures qui se chevauchent

Cependant il faut faire attention, car dans certains éléments, l'incrémentation des fissures n'assure pas un lien direct entre le numéro de degré de liberté Heaviside global et le numéro de fissure (Dans l'exemple, `H1` peut correspondre à la fissure 1 ou à la fissure 2 dans l'élément jaune). Lors de l'assemblage dans les TE, il faut donc pouvoir associer les degrés de liberté $H_{IFH}[X, Y, Z]$ (avec `IFH` le numéro de degré de liberté Heaviside global) du nœud `INO` au bon numéro de fissure. De plus les éléments doivent être complétés par des degrés de liberté Heaviside qui sont ensuite éliminés (degrés de liberté en gris sur la figure de droite). Il faut pour éliminer les degrés de liberté $H_{IFH}[X, Y, Z]$ du nœud `INO` avoir le statut de la bonne fissure en `INO`.

La SD `MODELE//'.FISSNO'` permet de faire cela. Elle retourne le numéro de fissure `IFISS` vu localement au nœud `INO` pour les degrés de liberté $H_{IFH}[X, Y, Z]$. On a $IFISS = FISSNO(INO, IFH)$. On récupère alors le bon pointeur pour les SD `MODELE//'.LNNO, .STNO .TOPOSE.HEA]`.

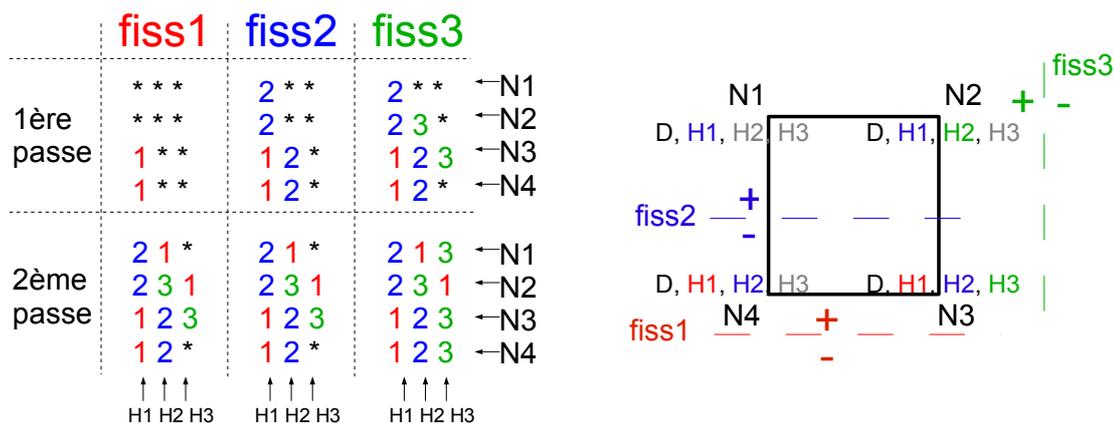


Figure 4.1.3-b Exemple de construction de la SD Modèle.FISSNO

La figure 4.1.3-b illustre la construction du tableau `.FISSNO`. Les lignes correspondent aux numéros de nœud, et les colonnes aux numéros de degré de liberté Heaviside. On remplit le tableau de manière séquentielle en 2 passes. Lors de la première passe, on regarde le statut (`MODELE.STNO`) du nœud `INO` pour la fissure `IFISS`. Si le statut n'est pas nul, on remplit la première case par la donnée `IFH` dans leur ordre de parcours au `INO` qui n'a pas déjà été affectée avec `IFISS`. On complète le tableau si nécessaire lors de la deuxième passe en procédant comme pour la première passe mais en remplissant les cases par la donnée `IFH` en `INO` si le statut est nul.

Pour illustrer l'utilisation de cette SD, on reprend l'exemple plus simple de la figure 4.1.1-a sur la figure 4.1.3-c. On a alors construit `Modele.FISSNO` pour l'élément du milieu. Si on veut (lors de l'assemblage par exemple) récupérer la fonction Heaviside associée au nœud `N1` pour les degrés de liberté $H_1[X, Y]$. On récupère le numéro de fissure via $IFISS = FISSNO(INO=1, IFH=1) = 2$. On a alors la fonction Heaviside qui vaut $HE(IFISS=2) = +1$. Pour le nœud `N4`, on aura $FISSNO(4,1) = 1$ et donc $HE(IFISS=1) = -1$.

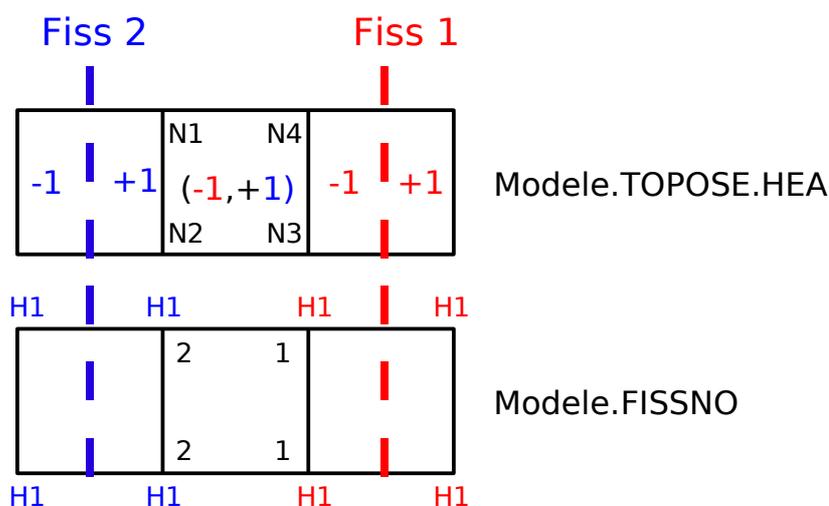


Figure 4.1.3-c Exemple pour la SD Modèle.FISSNO

Plus généralement, la fonction Heaviside dans un sous élément d'intégration `SE`, pour un nœud `INO` et un degré de liberté Heaviside `IFH` s'obtient de la manière suivante :

$$HE(SE, INO, IFH) = HE(SE, IFISS(INO, IFH)) .$$

Cette structure de données permet aussi de supprimer les degrés de liberté Heaviside en trop dans les *TE*. On récupère le statut (*MODELE.STNO*) du nœud *INO* pour le degré de liberté Heaviside *IFH*, alors que cette structure est stockée par fissure :

$$STATUT(INO, IFH) = STATUT(INO, IFISS(INO, IFH)) .$$

Cette structure est aussi utilisée pour le post-traitement X-FEM, lors de l'interpolation des déplacements sur les lèvres de la fissure.

4.1.4 .HEAVNO

Il s'agit de la structure inverse de *.FISSNO*. Cette SD est créée lorsqu'au moins un élément de la structure doit stocker les informations de plusieurs fissures. Elle est construite en même temps que *.FISSNO* et retourne le numéro de degré de liberté Heaviside associé au nœud *INO* et à la fissure *IFISS*. En gardant les notations du paragraphe précédent on a :

$$IFH = HEAVNO(INO, IFISS)$$

Dans le cas du contact multi-Heaviside, le numéro de degré de liberté de Lagrange associé à une fissure *IFISS* correspond au numéro de degré de liberté Heaviside *IFH* correspondant. Ainsi cette structure de données permet-elle de retrouver le nom du degré de liberté de Lagrange (et sa position dans la matrice/vecteur élémentaire) à partir du numéro de fissure. Si on traite le contact sur une facette de contact associée à la fissure *IFISS*, le Lagrangien qui travaille au nœud *INO* porte le numéro :

$$ILAG = HEAVNO(INO, IFISS)$$

4.2 Contenu des objets relatifs à la topologie des sous-éléments

Note aux développeurs, certaines valeurs *ma* sont en dur dans le fortran
(*te0514, xbsigm, xme13d...*)

Rappel sur la manière dont sont découpés les éléments X-FEM (Document R7.02.12 partie 3.3 Sous-découpage) :

	3D	2D
Découpage ⁽¹⁾ Phase préalable de découpe	Chaque élément (hexaèdre, pentaèdre) est virtuellement découpé en tétraèdres 6 tétraèdres au maximum	Chaque élément (quadrangle) est virtuellement découpé en triangles 2 triangles au maximum
Découpage ⁽²⁾ Sous-découpage	Chaque tétraèdre est à son tour découpé en sous-tétraèdres 6 sous-tétraèdres au maximum	Chaque triangle est à son tour découpé en sous-triangles 3 sous-triangles au maximum
Points d'intersection	Points d'intersection entre les arêtes des tétraèdres issus du découpage ⁽¹⁾ et la surface de la fissure 11 points d'intersection au maximum	Points d'intersection entre les arêtes des triangles issus du découpage ⁽¹⁾ et la courbe de la fissure 3 points d'intersection au maximum
Points milieux	ELEMENTS QUADRATIQUES	Points au milieu des arêtes des

	NON TRAITES	triangles issus du découpage ⁽²⁾ [à condition de ne coïncider avec aucun nœud de l'élément initial] 10 points milieux au maximum
Point central du quadrangle quadratique	ELEMENTS QUADRATIQUES NON TRAITES	Point d'intersection des deux diagonales droites d'un quadrangle quadratique 1 point central au maximum
Processus de découpage ⁽¹⁾ et sous-découpage ⁽²⁾	1 élément X-FEM 3D tétraèdre n°1 6 sous-tétraèdres au max. tétraèdre n°2 6 sous-tétraèdres au max. ⁽²⁾ ...	1 élément X-FEM 2D triangle n°1 3 sous-triangles au max. ...

(2)

Remarque : le nombre de sous-éléments n'est pas modifié par l'introduction de mailles quadratiques.

4.2.1 . TOPOSE . PIN

Renseigne sur les Points d'Intersection.

C'est un champ constant par élément (CHAM_ELEM) à 33 composantes réelles.

Pour chaque élément, ce champ comporte les coordonnées des points d'intersection (au sens précédemment défini). Comme le nombre maximal de tels points est 11, et vu que l'on travaille en dimension 3, le nombre de composantes par élément est dimensionné à 33. Pour chaque élément, les composantes sont ordonnées comme ceci :

$\{x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_{11}, y_{11}, z_{11}\}$ où x_i, y_i, z_i sont les coordonnées du $i^{\text{ème}}$ point d'intersection sur l'élément.

On notera que si l'élément n'est pas fissuré, les composantes sont nulles.

En 2D, on a au maximum 3 points d'intersection, avec 2 composantes chacun, donc 6 composantes au total.

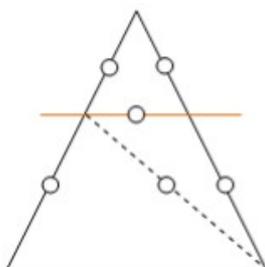
4.2.2 . TOPOSE . PMI

Renseigne sur les Points Milieux en présence de mailles quadratiques.

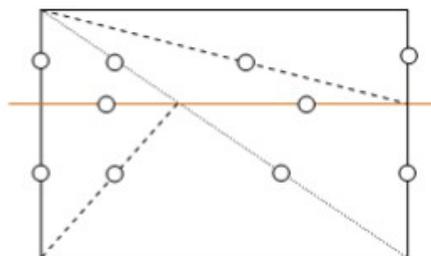
4.2.2.1. 2D

C'est un champ constant par élément (CHAM_ELEM) à 22 composantes réelles. Pour chaque élément, ce champ comporte :

- les coordonnées des points milieux



Points milieux d'un TRIA6
(6 au maximum)



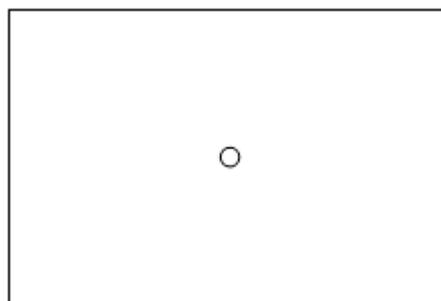
Points milieux d'un
QUAD8
(10 au maximum)

LEGENDE

	Frontière de l'élément (avant découpage)
	Fissure
	Découpage ⁽¹⁾
	Découpage ⁽²⁾
	Point milieu

Remarque : on rappelle que les coordonnées des points milieux qui coïncident avec un nœud de l'élément parent ne sont pas stockées dans cette structure de données.

- les coordonnées du point central introduit lors du découpage⁽¹⁾ d'un QUAD8 :



Point central d'un QUAD8
(1 au maximum)

Cela fait un total de 11 points au maximum. Comme on se place en 2D, on peut avoir $11 \times 2 = 22$ composantes au maximum. On dimensionne ainsi le champ à 22.

Pour chaque élément, les composantes sont ordonnées comme ceci :

$$\{x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_{11}, y_{11}\}$$

où $(x_i, y_i)_{1 \leq i \leq 10}$ sont les coordonnées du $i^{\text{ème}}$ point milieu sur l'élément et où (x_{11}, y_{11}) sont les coordonnées du nœud central d'un QUAD8.

4.2.3 .TOPOSE.CNS

Renseigne sur la connectivité des sous-éléments.

4.2.3.1. 3D

C'est un champ constant par élément (`CHAM_ELEM`) à 128 composantes entières.

Pour chaque élément, ce champ contient la connectivité des sous-éléments de l'élément. Par convention, tous les sous-éléments sont des tétraèdres à 4 nœuds (`TETRA4`), et il peut y en avoir au maximum 32 par élément X-FEM (pour une explication détaillée de ce résultat, voir la documentation de référence sur la méthode X-FEM [R7.02.12]). Il y a au maximum 6 tétraèdres et 6 sous-éléments par tétraèdre, mais il n'y a aucune configuration avec 6 sous-éléments pour chaque tétraèdre, c'est pourquoi le maximum est de 32. Les composantes sont rangées 4 par 4. L'objet `.TOPOSE.CNS` fait référence à 2 types de sommets : soit des nœuds déjà existants du maillage, soit des points d'intersection. Ainsi, pour chaque élément :

- si un sommet d'un sous-élément est un nœud de l'élément X-FEM en question, alors ce nœud est repéré par son numéro local dans l'élément;
- si un sommet est un point d'intersection, alors ce point est repéré par un nombre supérieur à 1000, où le chiffre des unités renvoie à son numéro local dans la liste des points d'intersection de l'élément.

Exemple :

Pour l'élément `ie` :

`CNS(ie) =`

1001	1005	6	1002	1003	3	1001	2	...	1004	4	5	6
------	------	---	------	------	---	------	---	-----	------	---	---	---

1^{er} sous-tétra : sommet n°1 : 1001 -> renvoie au 1^{er} point de `PIN(ie)`
sommet n°2 : 1005 -> renvoie au 5^{ème} point de `PIN(ie)`
sommet n°3 : 6 -> renvoie au 6^{ème} nœud de l'élément `ie`
sommet n°4 : 1002 -> renvoie au 2^{ème} point de `PIN(ie)`

2^{ème} sous-tétra : sommet n°1 : 1003 -> renvoie au 3^{ème} point de `PIN(ie)`
sommet n°2 : 3 -> renvoie au 3^{ème} nœud de l'élément `ie`
sommet n°3 : 1001 -> renvoie au 1^{er} point de `PIN(ie)`
sommet n°4 : 2 -> renvoie au 2^{ème} nœud de l'élément `ie`

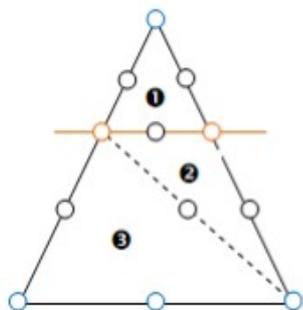
4.2.3.2. 2D

C'est un champ constant par élément (`CHAM_ELEM`) à 36 composantes entières. Pour chaque élément, il contient la connectivité des sous-éléments de l'élément.

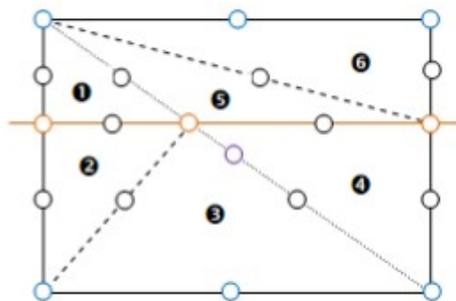
On dénombre :

- 6 sous-triangles au maximum (atteint pour une maille quadrangle)
- 6 nœuds au maximum pour chaque sous-triangle (atteint pour une maille quadratique)

Ce qui fait $6 \times 6 = 36$ composantes au maximum. Le champ est donc dimensionné à 36 et l'on range ces dernières 6 par 6.



Sous-découpage d'un
TRIA6
3 sous-triangles au
maximum
6 nœuds pour chacun
= 18 nœuds à répertorier



Sous-découpage d'un QUAD8
6 sous-triangles au maximum
6 nœuds pour chacun
= 36 nœuds à répertorier

LEGENDE

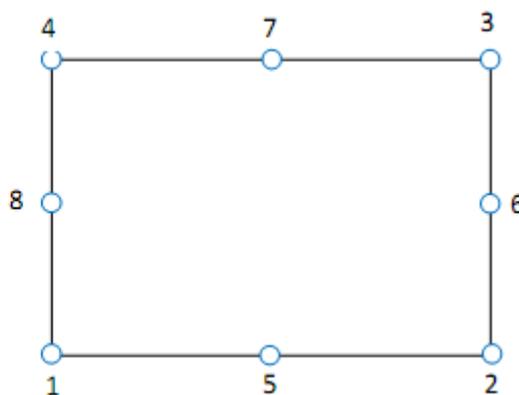
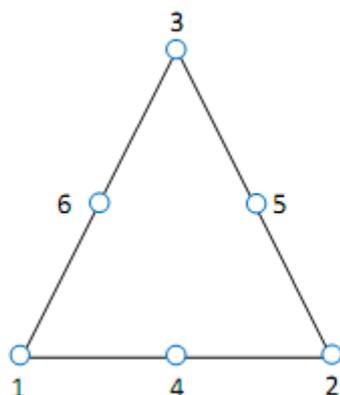
— Frontière de l'élément (avant
découpage)
— Fissure
..... Découpage⁽¹⁾
- - - - - Découpage⁽²⁾
● N° sous-triangle

○ Point d'intersection
○ Point milieu
○ Point central
○ Nœud de l'élément

L'objet `.TOPOSE.CNS` fait référence à 4 types de points :

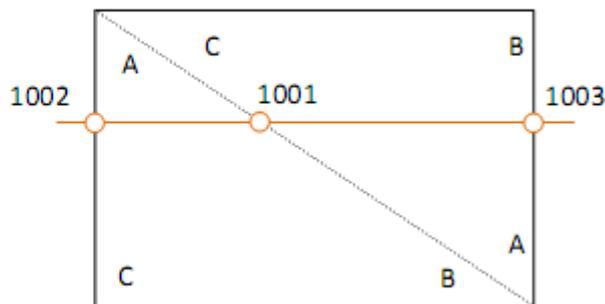
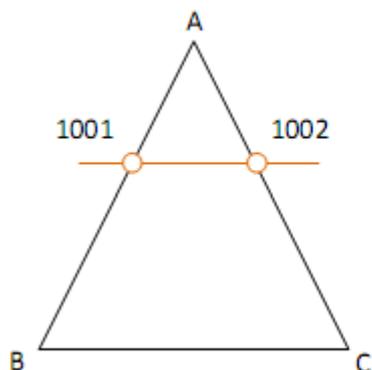
○ Type 1 : Nœud de l'élément (appartenant au maillage)

Il est repéré par son numéro local dans l'élément



○ Type 2 : Point d'intersection

Il est repéré par un nombre $1000+u$, où u renvoie à son numéro local dans la liste des points d'intersection de l'élément.

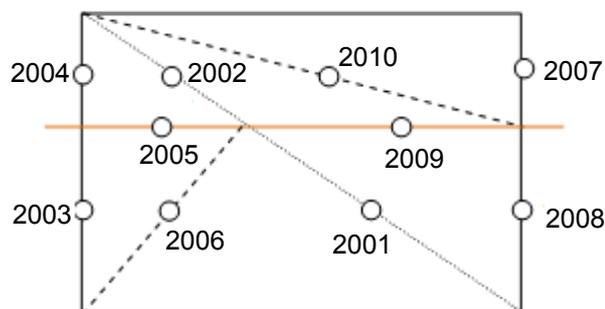
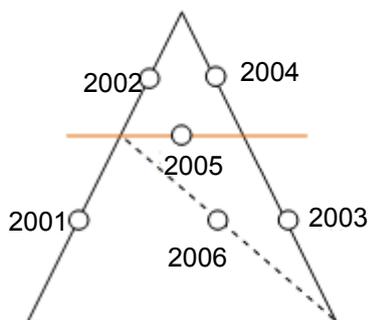


1001 → 1^{er} point stocké dans PINTTO

1002 → 2^{eme} point stocké dans PINTTO...

○ Type 3 : Point milieu

Il est repéré par un nombre $2000 + u$, où u renvoie à son numéro local dans la liste des points milieux de l'élément.

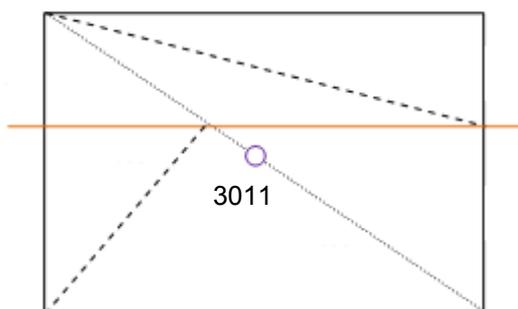


200 1 → 1^{er} point stocké dans PMILTO

200 2 → 2^{ème} point stocké dans PMILTO, etc.

○ Type 4 : Point milieu quadrangle

Il est repéré par un nombre $3000 + u$, où u renvoie à son numéro local dans la liste des points milieux de l'élément.



3011 → 11^{ème} point stocké dans `PMILTO`

4.2.4 .TOPOSE.HEA

Renseigne sur la valeur de la fonction HEAVISIDE.

C'est un champ constant par élément (`CHAM_ELEM`) à 36 composantes entières correspondant à la valeur de la fonction Heaviside sur les sous-tétraèdres (+1 ou -1), rangées par groupe de 6 valeurs par tétraèdre :

$$\left[H_1^1, H_2^1, H_3^1, 0, 0, H_1^2, H_2^2, H_3^2, H_4^2, H_5^2, H_6^2, H_1^3, H_2^3, \dots, H_6^6 \right]$$

Il peut y avoir des 0 si le nombre de sous-éléments (`NSE`) < 6 sur un tétraèdre (comme sur le 1^{er} tétraèdre de l'exemple ci-dessus).

En 2D, les sous-éléments sont au nombre maximum de 6, le champ `TOPOSE.HEA` aura donc uniquement 6 composantes rangées par groupes de 3, par élément.

Dans le cas où l'élément voit plusieurs fissures, ce champ est dupliqué autant de fois qu'il y a de fissures. On utilise alors le nombre de sous-points `NBSP` défini au [§4.1.1]. Le champ sera de $36 \times NBSP$ composantes en 3D et de $6 \times NBSP$ composantes en 2D.

4.2.5 .TOPOSE.LON

Renseigne sur la valeur de la LONGueur de champs utilisés pour définir les sous-éléments.

C'est un champ constant par élément (`CHAM_ELEM`) à 8 composantes entières

La 1^{ère} composante est le nombre de tétraèdres (`NIT`) contenus dans l'élément X-FEM (6 si l'élément est un hexaèdre, 3 si c'est un pentaèdre, 1 si c'est un tétraèdre).

En 2D, la 1^{ère} composante est le nombre de triangles contenu dans l'élément X-FEM (2 si l'élément est un quadrilatère, 1 si c'est un triangle).

Les `NIT` composantes suivantes sont le nombre de sous-éléments (`NSE`) issus de chaque tétraèdre. On doit avoir :

$$\sum_{i=1}^{NIT} NSE^i \leq 32$$

En 2D, cette somme est au maximum de 6.

La 8^{ème} composante est le nombre de points d'intersection entre les arêtes des tétraèdres et la fissure (normalement ≤ 11 en 3D et 3 en 2D).

4.3 Objets relatifs à la topologie des facettes de contact

Les champs `.TOPOFAC.PI`, `.TOPOFAC.AI`, `.TOPOFAC.CF`, `.TOPOFAC.LO` et `.TOPOFAC.BA`, sont dupliqués par élément autant de fois que le nombre de fissures vues par la maille. On utilise pour cela le nombre de sous-points qui correspond à n_{fiss} .

Attention, la taille de certains objets décrits dans cette partie est différence entre élément Heaviside et élément pouvant contenir le fond de fissure (crack-tip ou mixte), en 3D. On marque ces objets par une étoile (*) à côté de leur nom.

4.3.1 .TOPOFAC.LO

Renseigne sur la Longueur des champs utilisés pour le contact.

C'est un champ constant par élément (CHAM_ELEM) à 2 composantes entières, contenant le nombre de points d'intersection (NINTER) et le nombre de facettes triangulaires de contact (NFACE).

4.3.2 .TOPOFAC.PI (*)

Renseigne sur les Points d'Intersection.

C'est un champ constant par élément (CHAM_ELEM) à 18 ou 21 composantes réelles, qui sont les coordonnées dans l'espace de référence parent des points d'intersection des arêtes de l'élément avec la fissure.

Pour les éléments Heaviside, il y a au maximum 6 points d'intersection en 3D, donc le champ est dimensionné à 18.

Pour les éléments crack-tip ou mixtes, il y a au maximum 7 points d'intersection en 3D, donc le champ est dimensionné à 21.

Soit i le $i^{\text{ème}}$ élément du maillage,

```
V = .TOPOFAC.PI (i) ;
```

V (1)	Coordonnée de référence suivant x du 1 ^{er} point d'intersection
V (2)	Coordonnée de référence suivant y du 1 ^{er} point d'intersection
V (3)	Coordonnée de référence suivant z du 1 ^{er} point d'intersection
V (4)	Coordonnée de référence suivant x du 2 ^{ème} point d'intersection
V (5)	Coordonnée de référence suivant y du 2 ^{ème} point d'intersection
...	...
V (18)	Coordonnée de référence suivant z du 6 ^{ème} point d'intersection

Si le nombre de points d'intersection est strictement inférieur au nombre maximal de points d'intersection (6 ou 7 suivant les cas), le vecteur est complété par des 0. Le nombre de points d'intersection est contenu dans le vecteur .TOPOFAC.LO (voir §4.3.1).

En 2D linéaire, on a au maximum 2 points d'intersection avec chacun 2 composantes, soit 4 composantes réelles. En 2D quadratique, on a au maximum 2 points d'intersection avec chacun 2 composantes plus le point milieu de l'interface sur l'élément à 2 composantes, soit 6 composantes réelles.

4.3.3 .TOPOFAC.AI (*)

Renseigne sur les Arêtes Intersectées.

C'est un champ constant par élément (CHAM_ELEM) à 30 ou 35 composantes réelles contenant des informations sur les arêtes intersectées.

Pour chacun des 6 ou 7 points d'intersection de chaque élément :

La 1^{ère} composante est le numéro local de l'arête correspondante (0 si c'est un nœud sommet).

La 2^{ème} composante est le numéro local du nœud si c'est un nœud sommet (0 sinon).

La 3^{ème} composante est la longueur de l'arête.

La 4^{ème} composante est la position du point d'intersection sur l'arête, avec un sens arbitraire qui dépend de la maille. Ce réel est strictement compris entre 0 et 1, et vaut 0 si le point d'intersection est un nœud sommet.

La 5^{ème} composante permet de savoir si l'arête intersectée est vitale ou non. Si elle est vitale, la composante vaut 1, si elle ne l'est pas, la composante vaut 0.

Le nombre de composantes par point d'intersection (5) est accessible dans le fortran par un appel à la fonction `XXMMVD('ZXAIN')`

Soit i le $i^{\text{ème}}$ élément du maillage,

`V = .TOPOFAC.AI(i);`

<code>V(1)</code>	Numéro local de l'arête correspondant au 1 ^{er} point d'intersection
<code>V(2)</code>	Numéro local du nœud correspondant au 1 ^{er} point d'intersection
<code>V(3)</code>	Longueur de l'arête correspondant au 1 ^{er} point d'intersection
<code>V(4)</code>	Position du 1 ^{er} point d'intersection sur l'arête
<code>V(5)</code>	1 ^{er} point d'intersection: si sur arête vitale (1) sinon (0)
<code>V(6)</code>	Numéro local de l'arête correspondant au 2 ^{ème} point d'intersection
...	...
<code>V(30)</code>	6 ^{ème} point d'intersection vitale (1) ou non (0)

Si le nombre de points d'intersection est strictement inférieur au nombre maximal de points d'intersection (6 ou 7 suivant les cas), le vecteur est complété par des 0.

En 2D, on a au maximum 3 points (2 points d'intersection et 1 point milieu) avec de la même façon qu'en 3D 5 informations (numéro de l'arête, numéro du nœud, longueur de l'arête et position du point d'intersection, arête intersectée vitale ou non). Le champ `TOPOFAC.AI` a donc 15 composantes par élément.

4.3.4 .TOPOFAC.CF

Renseigne sur la connectivité des Facettes de contact.

C'est un champ constant par élément (`CHAM_ELEM`) à 15 composantes entières, contenant la connectivité des sommets des facettes triangulaires. Il y a au maximum 5 facettes par élément.

Soit i le $i^{\text{ème}}$ élément du maillage,

`V = .TOPOFAC.CF(i);`

<code>V(1)</code>	Numéro local du 1 ^{er} sommet de la 1 ^{ère} facette triangulaire
<code>V(2)</code>	Numéro local du 2 ^{ème} sommet de la 1 ^{ère} facette triangulaire
<code>V(3)</code>	Numéro local du 3 ^{ème} sommet de la 1 ^{ère} facette triangulaire
<code>V(4)</code>	Numéro local du 1 ^{er} sommet de la 2 ^{ème} facette triangulaire
<code>V(5)</code>	Numéro local du 2 ^{ème} sommet de la 2 ^{ème} facette triangulaire
...	...
<code>V(15)</code>	Numéro local du 3 ^{ème} sommet de la 5 ^{ème} facette triangulaire

Si le nombre de facettes triangulaires est strictement inférieur à 5, le vecteur est complété par des 0.

En 2D linéaire, on a seulement 1 facette de contact, qui est un segment et a donc 2 sommets. Le vecteur a donc seulement 2 composantes. En 2D quadratique, on a 1 facette de contact, qui est une parabole à 2 sommets et un point milieu. Le vecteur a donc 3 composantes.

4.3.5 .TOPOFAC.BA

Renseigne sur la BASE covariante des facettes de contact.

C'est un champ par élément (`CHAM_ELEM`) à 54 ou 63 composantes réelles qui sont les coordonnées des vecteurs de la base covariante (n, τ_1, τ_2) pour chacun des 6 ou 7 points d'intersection.

Pour chaque élément (l'exposant faisant référence au numéro du point d'intersection) :

$$\left[n_x^1, n_y^1, n_z^1, \tau_{1x}^1, \tau_{1y}^1, \tau_{1z}^1, \tau_{2x}^1, \tau_{2y}^1, \tau_{2z}^1, n_x^2, \dots, \tau_{2z}^6 \right]$$

Soit i le $i^{\text{ème}}$ élément du maillage, et j le numéro du point d'intersection

V = .TOPOFAC.BA(i);

V(9*(j-1)+1)	Coordonnée suivant x du 1 ^{er} vecteur de la base au $j^{\text{ème}}$ point d'intersection
V(9*(j-1)+2)	Coordonnée suivant y du 1 ^{er} vecteur de la base au $j^{\text{ème}}$ point d'intersection
V(9*(j-1)+3)	Coordonnée suivant z du 1 ^{er} vecteur de la base au $j^{\text{ème}}$ point d'intersection
V(9*(j-1)+4)	Coordonnée suivant x du 2 ^{ème} vecteur de la base au $j^{\text{ème}}$ point d'intersection
V(9*(j-1)+5)	Coordonnée suivant y du 2 ^{ème} vecteur de la base au $j^{\text{ème}}$ point d'intersection
V(9*(j-1)+6)	Coordonnée suivant z du 2 ^{ème} vecteur de la base au $j^{\text{ème}}$ point d'intersection
V(9*(j-1)+7)	Coordonnée suivant x du 3 ^{ème} vecteur de la base au $j^{\text{ème}}$ point d'intersection
V(9*(j-1)+8)	Coordonnée suivant y du 3 ^{ème} vecteur de la base au $j^{\text{ème}}$ point d'intersection
V(9*(j-1)+9)	Coordonnée suivant z du 3 ^{ème} vecteur de la base au $j^{\text{ème}}$ point d'intersection

Si le nombre de points d'intersection est strictement inférieur au nombre maximal de points d'intersection (6 ou 7 suivant les cas), le vecteur est complété par des 0.

En 2D linéaire, la base covariante est constituée de 2 vecteurs (n, τ_1) ayant chacun 2 composantes et il y a 2 points d'intersection. Le nombre de composantes est 8. En 2D quadratique, la base covariante est constituée de 3 vecteurs (n, τ_1) ayant chacun 2 composantes et il y a 2 points d'intersection et 1 point milieu. Le nombre de composantes est 12.

4.3.6 TOPOFAC.HE

Renseigne sur la valeur des fonctions HEaviside de part et d'autre de la facette de contact. Cette SD n'est utile que dans le cas d'éléments multi-Heaviside. Elle n'est pas créée si le modèle ne possède pas de tels éléments. Soit n_{fiss} le nombre de fissures vues par la maille. Le nombre de sous-points pour cet objet est alors n_{fiss}^2 (pour chaque fissure, on va vouloir connaître les valeurs venant des autres fissures). Le nombre de composantes est de $2 \times n_{\text{face}}$ avec n_{face} le nombre maximum prédéfini de facettes de contact soit $n_{\text{face}}=1$ en 2D et $n_{\text{face}}=5$ en 3D.

Soit i le $i^{\text{ème}}$ élément du maillage, j le numéro de facette pour la fissure k

V = .TOPOFAC.HE(i);

V(2*nface*(nfiss*(k-1)+1-1)+2*(j-1)+1)	Valeur de la fonction Heaviside de la fissure 1 du côté esclave de la facette
V(2*nface*(nfiss*(k-1)+1-1)+2*(j-1)+2)	Valeur de la fonction Heaviside de la fissure 1 du côté maître de la facette
V(2*nface*(nfiss*(k-1)+2-1)+2*(j-1)+1)	Valeur de la fonction Heaviside de la fissure 2 du côté esclave de la facette
V(2*nface*(nfiss*(k-1)+2-1)+2*(j-1)+2)	Valeur de la fonction Heaviside de la fissure 2 du côté maître de la facette
...	
V(2*nface*(nfiss*(k-1)+n _{fiss} -1)+2*(j-1)+1)	Valeur de la fonction Heaviside de la fissure n_{fiss} du côté esclave de la facette
V(2*nface*(nfiss*(k-1)+n _{fiss} -1)+2*(j-1)+2)	Valeur de la fonction Heaviside de la fissure n_{fiss} du côté maître de la facette

Cette SD est utile pour calculer le saut de déplacement entre les côtés maître et esclave dans le cas des éléments multi-Heaviside. Dans ce cas le saut ne dépend pas uniquement de la fonction Heaviside associée à la fissure découpant la facette mais de toutes les fonctions Heaviside (une par fissure) présentes dans l'élément. Un exemple est montré sur la figure 4.3.6-a.

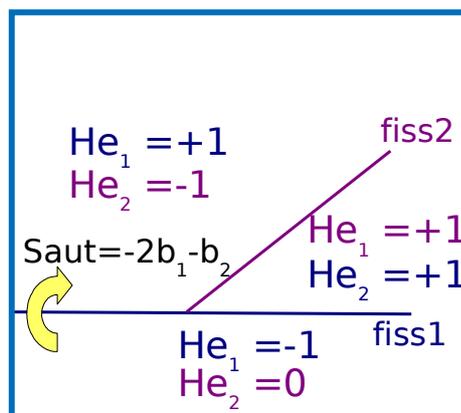


Figure 4.3.6-a Calcul du saut dans le cas d'une jonction. Le saut associé à la fissure 1 dépend aussi de la fonction Heaviside associée à la fissure 2.

4.3.7 .TOPOFAC.OE (*)

Il s'agit d'un champ dont la structure informatique est rigoureusement la même que `TOPOFAC.PI`. Comme ce dernier il contient les coordonnées des points d'intersections dans l'espace réel, mais **dans la configuration initiale**. Ce champ sert dans le cadre de l'approche grands glissements avec X-FEM.

4.3.8 .TOPOFAC.GE (*)

Il s'agit d'un champ dont la structure informatique est rigoureusement la même que `TOPOFAC.OE`. Comme ce dernier il contient les coordonnées des points d'intersections dans l'espace réel, mais **actualisées selon la cinématique des facettes esclaves**. Ce champ sert dans le cadre de l'approche grands glissements avec X-FEM.

4.3.9 .TOPOFAC.GM (*)

Il s'agit d'un champ dont la structure informatique est rigoureusement la même que `TOPOFAC.OE`. Comme ce dernier il contient les coordonnées des points d'intersections dans l'espace réel, mais **actualisées selon la cinématique des facettes maîtres**. Ce champ sert dans le cadre de l'approche grands glissements avec X-FEM.

4.4 Autres objets

4.4.1 .XFEM_CONT

Vecteur d'entiers de longueur égale à 1. Cette valeur vaut 0 si le contact n'est défini sur aucune des fissures X-FEM, et vaut 1 sinon (contact sur au moins une fissure X-FEM)

4.4.2 .NFIS

Vecteur d'entiers de longueur égale à 1. Il correspond au nombre de fissures X-FEM du modèle.

4.4.3 .FISS

Vecteur de \mathbb{K}^8 de longueur égale au nombre de fissures X-FEM du modèle. Il correspond au nom de la `sd_fiss_xfem` de chaque fissure.

4.4.4 .XMAFIS

CHAM_ELEM de K8. Pour chaque maille, ce CHAM_ELEM correspond au nom des fissures vues par cette maille, dans l'ordre défini par l'utilisateur. Le nombre de sous-points de cette SD correspond au nombre de fissures vues par la maille.

5.6.1 '.XFPO'

Carte de **R** qui stocke pour chaque élément tardif des informations sur l'appariement (voir les commentaires dans la routine `XMCART` pour plus de détails).

5.6.2 '.XFST'

Carte de **I** qui stocke dans l'ordre des nœuds de l'élément tardif les statuts d'enrichissement des nœuds des éléments esclave et maître de l'élément tardif. Elle correspond à une copie de la `SD MODELE//'.STNO'` pour les éléments esclave et maître de l'élément tardif.

5.6.3 '.XFPI'

Carte de **R** qui stocke les coordonnées locales des points d'intersection de l'élément esclave. Elle correspond à une copie de la `SD MODELE//'.TOPOFAC.PI'` pour l'élément esclave de l'élément tardif.

5.6.4 '.XFAI'

Carte de **R** qui stocke les informations sur les arêtes intersectées de l'élément esclave. Elle correspond à une copie de la `SD MODELE//'.TOPOFAC.AI'` pour l'élément esclave de l'élément tardif.

5.6.5 '.XFCF'

Carte de **I** qui stocke les informations sur la connectivité des facettes de l'élément esclave. Elle correspond à une copie de la `SD MODELE//'.TOPOFAC.CF'` pour l'élément esclave de l'élément tardif.

5.6.6 '.XFHF'

Carte de **I** qui stocke la valeur des fonctions Heaviside de part et d'autre de la discontinuité, dans le cas où l'élément esclave ou maître est multi-Heaviside. Elle correspond à une copie de la `SD MODELE//'.TOPOFAC.HE'` côté esclave de l'élément esclave et côté maître de l'élément maître pour l'élément tardif.

5.6.7 '.XFPL'

Carte de **I** qui stocke la place des Lagrange de contact aux nœuds de l'élément esclave, dans le cas où l'élément esclave ou maître est multi-Heaviside. Elle correspond à une copie de la `SD MODELE//'.HEAVNO'` pour la fissure associée à la zone de contact, pour l'élément esclave de l'élément tardif.