
Notice d'utilisation de la méthode X-FEM

Résumé

L'objectif de cette note est de donner les informations nécessaires pour qu'un utilisateur puisse réaliser des calculs avec *Code_Aster* en utilisant la méthode des éléments finis étendue (X-FEM pour eXtended Finite Element Method) [1].

La première partie introduit les objectifs de la méthode des éléments finis étendue et rappelle les principes de base de X-FEM et des level sets.

La deuxième partie présente les possibilités et les limites de l'utilisation de X-FEM dans *Code_Aster*.

Les trois parties suivantes détaillent la mise en œuvre de X-FEM dans *Code_Aster*, pour un calcul sans ou avec contact sur les lèvres de la fissure, puis pour un calcul de sous-épaisseur.

Finalement, la dernière partie donne de nombreux conseils pratiques.

Table des matières

1 Introduction.....	3
2 Possibilités et limites de X-FEM dans Code_Aster.....	6
3 Mise en œuvre : sans contact sur les lèvres de la fissure.....	11
4 Mise en œuvre : avec contact sur une interface.....	16
5 Mise en œuvre : trou ou sous-épaisseur.....	19
6 Conseils et recommandations sur le maillage.....	21
7 Conseils et recommandations sur l'utilisation de X-FEM.....	26
8 Conclusions.....	30
9 Bibliographie.....	31

1 Introduction

1.1 Pourquoi utiliser X-FEM ?

La méthode X-FEM [1] est une simple extension de la méthode des éléments finis. Elle autorise un maillage indépendant de la géométrie du problème. Frontières, trous, fissures deviennent des entités que l'on peut insérer, déplacer, propager, sans avoir à modifier le maillage. Un maillage simple et unique remplace ainsi plusieurs maillages complexes. Pour représenter une discontinuité ou une singularité au sein des éléments finis, la base des fonctions de forme est enrichie, en utilisant les propriétés de la partition de l'unité. En fissuration, la discontinuité de déplacement (ou de température) due à la fissure est introduite par une fonction Heaviside généralisée et l'ajout des champs asymptotiques en bout de fissure améliore la précision en mécanique de la rupture élastique. De plus, la méthode des « level sets » s'avère particulièrement pratique pour représenter des fissures 3D et efficace pour la phase de propagation, l'idée principale étant de considérer l'interface comme l'iso-zéro d'une fonction distance.

On peut utiliser X-FEM pour :

- représenter une fissure (discontinuité des déplacements ou de la température),
- représenter une interface entre deux solides disjoints (discontinuité des déplacements ou de la température),
- représenter un trou ou un vide (sous-épaisseur par exemple),
- représenter l'interface entre deux matériaux (discontinuités des contraintes).

Représentation d'une fissure

En mécanique de la rupture, une fissure comporte deux lèvres et un fond de fissure. Les lèvres sont initialement confondues, sinon, on parle d'entaille. Le champ de déplacement (ou de température) est discontinu au travers des lèvres de la fissure, et le champ de contrainte est singulier en fond de fissure.

Dans *Code_Aster*, il est possible de définir une fissure (voir la mise en œuvre au §11) grâce à deux fonctions level sets et de la faire propager.

Représentation d'une interface entre deux solides disjoints

Les deux solides sont séparés par une interface (exemples : une faille géologique entre deux couches, l'écrasement d'un lopin sur un bâti fixe, deux solides thermiquement isolés). Le champ de déplacement ou de température est discontinu au travers de l'interface. Les matériaux de part et d'autre de l'interface peuvent être différents, mais ont la même loi de comportement. Du contact est éventuellement défini sur l'interface.

Cette fonctionnalité est possible dans *Code_Aster*, en définissant l'interface par une fonction level set (voir la mise en œuvre au §4).

Représentation d'un trou ou d'un vide

C'est un cas particulier du cas précédent où un des solides est du vide. Pour cela, aucune condition de contact n'est définie sur l'interface. Si aucun chargement n'est appliqué sur le solide correspondant au vide (sauf le blocage des modes rigides) il n'intervient pas dans le calcul, et joue le rôle de « vide ».

Cette fonctionnalité est possible dans *Code_Aster*, en définissant l'interface entre la matière et le vide par une fonction level set (voir la mise en œuvre au §5).

Représentation d'une interface dans un bimatériau

Dans un bimatériau, les deux matériaux sont « collés », le déplacement au travers de l'interface entre les deux matériaux est continu, mais les contraintes sont discontinues.

Cette fonctionnalité n'est pas possible dans *Code_Aster*.

Dans la suite de ce document, on emploiera le terme général de « fissure », qui désignera soit une fissure, soit une interface.

1.2 Spécificité d'un calcul avec X-FEM

Par rapport à un calcul classique, certaines étapes sont particulières :

- création du maillage : le maillage ne comporte pas de fissure,

- définition de la fissure : la fissure n'étant pas contenue dans le maillage, il faut la définir d'une autre manière,
- modification du modèle : certains éléments doivent être enrichis afin de représenter une discontinuité de déplacement ou de la température au travers de la fissure et la singularité de contrainte en fond de fissure,
- post-traitement de visualisation : afin de visualiser l'ouverture de la fissure ou la discontinuité du champ de température, il est nécessaire de créer un maillage de visualisation et les champs de résultat associés.

1.3 Documentation associée

Documentation d'Utilisation :

- `DEFI_FISS_XFEM` [U4.82.08] ;
- `MODI_MODELE_XFEM` [U4.44.11] ;
- `POST_MAIL_XFEM` [U4.82.21] ;
- `POST_CHAM_XFEM` [U4.82.22] ;
- `PROPA_FISS` [U4.82.11].

Documentation de Validation (cas tests) :

- `ASCOU01` : Calcul élastique linéaire dans un coude fissuré [V1.10.113] ;
- `HPLV103` : Calcul de KI et de G thermo-élastique 3D pour une fissure circulaire [V7.03.103] ;
- `HSNV132` : Fissure X-FEM en thermo-élasticité [V7.22.132] ;
- `SDLS114` : Calcul des facteurs d'intensité de contrainte d'une plaque fissurée par recombinaison modale [V2.03.114] ;
- `SDLS120` : Plaque 2D fissurée soumise à un chargement en Mode I . Validation du calcul modal avec X-FEM [V2.03.120] ;
- `SDLV130` : Plaque 3D fissurée soumise à un chargement en Mode I . Validation du calcul modal avec X-FEM [V2.03.130] ;
- `SSLP313` : Fissure inclinée dans une plaque illimitée, soumise à une traction uniforme à l'infini [V3.02.313] ;
- `SSLP315` : Propagation d'une fissure inclinée dans une plaque en 2D [V3.02.315] ;
- `SSLP316` : Validation de l'estimateur d'erreur X-FEM sur une plaque fissurée [V3.02.316] ;
- `SSLP317` : Validation de la macro-commande `RAFF_XFEM` sur une plaque multi-fissurée [V3.04.317] ;
- `SSLP318` : Propagation d'une fissure X-FEM non débouchante sollicitée en mode I [V3.02.318] ;
- `SSLP319` : Propagation de deux fissures XFEM débouchantes sollicitées en mode I [V3.02.319] ;
- `SSLP320` : Propagation d'une fissure X-FEM débouchante sollicitée en Mode I [V3.02.320] ;
- `SSLP321` : Propagation d'une fissure X-FEM dans une plaque en flexion 3 points [V3.02.321] ;
- `SSLP322` : Propagation d'une fissure X-FEM dans une plaque en flexion 3 points avec 3 trous [V3.02.322] ;
- `SSLP323` : Propagation d'une fissure radiale débouchante sur un disque en rotation [V3.02.323] ;
- `SSLV110` : Fissure elliptique dans un milieu infini [V3.04.110] ;
- `SSLV134` : Fissure circulaire en milieu infini [V3.04.134] ;
- `SSLV311` : Fissure en quart d'ellipse au coin d'un disque épais en rotation [V3.04.311] ;
- `SSLV313` : Tube sous pression fissuré - validation de la méthode X-FEM [V3.04.313] ;
- `SSLV314` : Propagation d'une fissure plane en mode I pur en 3D [V3.04.314] ;
- `SSLV315` : Propagation d'une fissure inclinée en mode mixte en 3D [V3.04.315] ;
- `SSLV316` : Fissuration à propagation imposée avec X-FEM [V3.04.316] ;
- `SSNP110` : Fissure de bord dans une plaque rectangulaire finie en élasto-plasticité [V6.03.110] ;

- SSNP138: Fissure inclinée en 2D avec X-FEM [V6.03.138] ;
- SSNP144: Utilisation d'un modèle à zones cohésives avec la méthode X-FEM [V6.03.144] ;
- SSNP503: Contact en grands glissements avec X-FEM pour des fissures horizontales [V6.03.503] ;
- SSNP504: Contact en grands glissements avec X-FEM pour des fissures obliques [V6.03.504] ;
- SSNV108: Éprouvette CT - Round Robin Européen en Mécanique de la Rupture (1985) [V6.04.108] ;
- SSNV166: Cylindre fissuré sous chargements multiples [V6.04.166] ;
- SSNV173: Barreau fissuré avec X-FEM [V6.04.173] ;
- SSNV182: Bloc avec interface en contact frottant avec X-FEM [V6.04.182] ;
- SSNV185: Fissure débouchante dans une plaque 3D de largeur finie avec X-FEM [V6.04.185] ;
- SSNV186: LBB condition et contact frottant avec X-FEM [V6.04.186] ;
- SSNV191: Validation des conditions de Neumann avec X-FEM en 3D [V6.04.191] ;
- SSNV192: Éprouvette avec fissure centrale X-FEM [V6.04.192] ;
- SSNV195: Barreau en multi-fissuration avec X-FEM [V6.04.195] ;
- SSNV198: Conditions de Dirichlet avec X-FEM en 3D [V6.04.198] ;
- SSNV201: Bloc avec interface en contact glissière avec X-FEM [V6.04.201] ;
- SSNV203: Application d'une pression sur les lèvres d'une fissure avec X-FEM [V6.04.203] ;
- SSNV209: Interface en contact-frottant avec X-FEM [V6.04.209] ;
- SSNV507: Rotation d'une inclusion rigide avec X-FEM [V6.04.507] ;
- SSNV508: Bloc avec interface en traction et pression latérale sans contact [V6.04.508] ;
- SSNV509: Chainette en contact frottant avec X-FEM quadratiques [V6.04.509] ;
- SSNV510: Compression uniaxiale d'un bloc multi-fissuré [V6.04.510] ;
- SSNV511: Bloc découpé par deux interfaces intersectées avec X-FEM [V6.04.511] ;
- SSNV512: Bloc découpé par une fissure verticale se branchant entre deux fissures horizontale avec X-FEM [V6.04.512] ;
- SSNV513: Bloc découpé par trois interfaces se banchant séquentiellement avec X-FEM [V6.04.513] ;
- TTLA203: Cylindre avec fissure adiabatique à températures imposées [V4.19.203] ;
- TTLP101: Plaque fissurée à températures imposées avec condition d'échange à travers les lèvres de la fissure [V4.23.101] ;
- TPLP305: Barreau à températures imposées avec interface adiabatique de type X-FEM [V4.05.305] ;
- ZZZZ255: Validation de l'option TEST_MAIL dans PROPAG_FISS [V1.01.255] ;

Documentation de Référence :

- Extended Finite Element Method : Généralités [R7.02.12] ;
- Algorithmes de propagation de fissures avec X-FEM [R7.02.13] ;
- Contact en petits glissements avec X-FEM [R5.03.54] ;
- Contact en grands glissements avec X-FEM [R5.03.53].

Descriptif Informatique :

- Structures de Données liées à X-FEM [D4.10.02] ;
- Mise en œuvre de l'approche « grands glissements avec X-FEM » [D9.05.06].

2 Possibilités et limites de X-FEM dans Code_Aster

Cette partie synthétise les possibilités offertes par Code_Aster à ce jour, en terme d'utilisation d'X-FEM.

Remarque :

Les tous premiers éléments constitutifs de X-FEM sont disponibles dès la version 7, et n'offrent pas grand intérêt. La version 8 correspond aux fruits des trois premières années de développements, et permet de réaliser un calcul mécanique en élasticité linéaire 2D ou 3D, avec des conditions aux limites loin de la fissure, elle-même représentée par des level sets. La prise en compte du contact sur les lèvres de la fissure est possible. La version 9 apporte de nombreuses fonctionnalités avancées (multi-fissuration, plasticité...). La version 10 propose des algorithmes de propagation automatique robustes. En version 11 la méthode X-FEM est étendue à l'opérateur de thermique linéaire afin de prendre en compte dans le problème de thermique la fissure initialement définie pour le problème mécanique.

2.1 Phénomène, modélisation et éléments finis enrichis

Les éléments finis X-FEM sont uniquement disponibles en **mécanique** et en **thermique**. Il n'est donc pas possible de modéliser une fissure avec X-FEM pour un calcul acoustique.

Pour le phénomène 'MECANIQUE' :

Les éléments finis X-FEM peuvent être issus des modélisations 3D, C_PLAN, D_PLAN ou AXIS. A contrario, les éléments X-FEM sous-intégrés (modélisations *_SI) ne sont pas disponibles.

Tous les types géométriques de mailles sont disponibles :

En 3D :

- mailles principales : TETRA4, PYRAM5, PENTA6, HEXA8, TETRA10, PYRAM13, PENTA15, HEXA20 ;
- mailles de bord : TRIA3, QUAD4, TRIA6, QUAD8.

En Contraintes Planes / Déformations Planes/Axi-symétriques :

- mailles principales : TRIA3, QUAD4, TRIA6, QUAD8 ;
- mailles de bord : SEG2, SEG3.

Attention, les éléments X-FEM quadratiques manquent de robustesse (surtout en 3D) et on conseille d'utiliser des éléments X-FEM linéaires.

Pour le phénomène 'THERMIQUE' :

Les éléments finis X-FEM peuvent être issus des modélisations 3D, PLAN, et AXIS.

Il n'est en revanche pas possible d'enrichir les autres modélisations de ce phénomène : 3D_DIAG, PLAN_DIAG, AXIS_DIAG, AXIS_FOURIER, COQUE, COQUE_PLAN, COQUE_AXIS.

Les types géométriques de mailles suivants sont disponibles :

En 3D :

- mailles principales : TETRA4, PYRAM5, PENTA6, HEXA8 ;
- mailles de bord : TRIA3, QUAD4

En modélisation plane ou axisymétrique :

- mailles principales : TRIA3, QUAD4 ;
- mailles de bord : SEG2

Remarque sur les éléments 1D d'une modélisation 3D :

Les éléments de bord 1D contenus dans une modélisation 3D ne peuvent pas être enrichis. Si ces éléments 1D ne servent pas dans le calcul, le mieux est de ne pas les mettre dans le modèle. S'ils servent réellement, il ne faut pas qu'ils soient proches de la fissure.

2.2 Loi de comportement

En mécanique, toutes les lois de comportement sont disponibles (`COMP_ELAS` ou `COMP_INCR`) en **petites déformations** :

- en HPP (petits déplacements et petites rotations) : `DEFORMATION='PETIT'`
- en grands déplacements & rotations : `DEFORMATION='GROT_GDEP'` mais uniquement avec `COMP_INCR`.

Les autres modèles de déformations (comme par exemple `DEFORMATION='PETIT_REAC'`) ne sont pas disponibles.

Remarque sur la modélisation axi-symétrique :

Il est noté que la modélisation axi-symétrique n'est disponible qu'en petite déformation en HPP.

En thermique, la méthode X-FEM n'est disponible que pour l'opérateur `THER_LINEAIRE` : on ne traite que le cas de la thermique linéaire (paramètres matériau indépendants de la température). La conductivité thermique doit de plus être isotrope.

2.3 Définition des fissures

Le nombre de fissures est illimité. Il est aussi possible de les rapprocher pour qu'elles découpent le même élément. On peut aussi les brancher l'une à l'autre. Les fonds de fissures doivent néanmoins respecter un écartement minimal à la fissure voisine : au moins deux mailles non découpées doivent les séparer. Cette restriction peut être contournée en raffinant localement le maillage.

Quatre manières différentes de définir une fissure sont possibles :

- soit par des formes géométriques pré-établies (ellipse...) où l'on demande les paramètres géométriques (demi-grand axe...). Les formes pré-établies disponibles sont les fissures les plus usuelles : en 2D, fissure sur un segment ou une demi-droite ; en 3D, fissure plane à fond rectiligne ou elliptique, fissure cylindrique. **C'est la méthode recommandée.**
- soit par la donnée de deux groupes de mailles (l'un pour une lèvres, l'autre pour le fond de fissure). Cette méthode est pratique lorsque l'on dispose déjà d'un maillage de la fissure ;
- soit par la donnée des formules analytiques des level-sets. Cette méthode n'est pas adaptée aux fissures de forme complexe ;
- soit par re-lecture de 2 champs aux nœuds déjà existants.

Grâce à ces quatre méthodes de définition des level-sets, tous les cas de figure que l'on a rencontrés jusqu'à présent ont pu être traités.

La définition d'une interface se fait de la même façon. En fait, seule la level-set normale doit être définie.

Remarques :

La méthode X-FEM permet théoriquement de représenter une discontinuité forte (fissures ou interface) ou une discontinuité faible (interface entre bi-matériaux collés). Tout dépend de la fonction d'enrichissement introduite dans l'approximation du déplacement ou de la température. Dans Code_Aster, seule une discontinuité forte (champ de déplacements, de contraintes, ou de température discontinus) est possible [§ 1.1].

2.4 Contact frottement

Il est possible de prendre en compte le contact (éventuellement contact glissière) sur les lèvres d'une même fissure. La seule méthode autorisée est la méthode continue, sans usure. Il est impossible de définir d'autres zones de contact. La prise en compte du frottement n'est pas correcte dans le cas général (seules des configurations bien précises fonctionnent correctement) et il est fortement déconseillé de l'utiliser. Le post-traitement des degrés de liberté des contact n'est pas aisé car la table de contact n'est pas complètement créée si l'intégration des termes de contact se fait par la méthode de Gauss.

Avec les restrictions ci-dessus, la prise en compte du contact et du frottement est également possible sous des hypothèses de grands glissements, en 2D comme en 3D. Cette fonctionnalité est activée dès que l'on renseigne le mot clé `REAC_GEOM='AUTOMATIQUE'` ou `REAC_GEOM='CONTROLE'` (mot-clé de l'opérateur `DEFI_CONTACT`).

Le schéma d'intégration utilisé pour les termes de contact est par défaut un schéma de Gauss. Les autres schémas possibles sont l'intégration nodale, les schémas de Simpson (3 et 5 points), et les schémas de Newton-Cotes (4, 5 et 10 points). On conseille cependant l'utilisateur de choisir l'intégration aux nœuds.

À l'heure actuelle, le contact sur des éléments contenant la pointe de la fissure est traité en petits et en grands glissements.

En résumé, les aspects liés au contact frottant sont encore à titre expérimental et ne doivent pas être utilisés pour une étude industrielle.

2.5 Zones cohésives

Il est aussi possible de prendre en compte la présence de forces de cohésion lors de l'ouverture d'une interface X-FEM. La cohésion est modélisée par la loi cohésive `CZM_EXP_REG` déjà existante en méthode des éléments finis classiques (voir [U2.05.07]).

À l'heure actuelle, la loi cohésive ne peut pas être utilisée sur des éléments contenant la pointe de la fissure en 2D et en 3D.

Tout comme le contact frottant, les aspects liés aux lois cohésives sont encore à titre expérimental et ne doivent pas être utilisés pour une étude industrielle.

2.6 Conditions aux limites et chargements

Cas de la mécanique :

Seules certaines conditions aux limites peuvent être imposées sur les nœuds ou éléments X-FEM :

- `DDL_IMPO (DX, DY ou DZ)` sur un nœud X-FEM (mais pas sur un point d'intersection),
- `FACE_IMPO (DNOR ou DTAN)` sur un nœud X-FEM (mais pas sur un point d'intersection),
- pression, force répartie sur des éléments de bords X-FEM,
- force volumique (de type force interne, pesanteur ou rotation) sur les éléments X-FEM,
- pression sur les lèvres.

Notamment, il n'est pas possible d'imposer une relation entre degrés de liberté enrichis, ni d'utiliser `AFFE_CHAR_CINE` sur des nœuds enrichis.

Pour imposer une pression sur les lèvres de la fissure, on ne peut pas utiliser le mot-clé classique `GROUP_MA` car aucun groupe de mailles ne correspond aux lèvres. Pour cela, il faut utiliser `AFFE_CHAR_MECA/PRES_REP/FISSURE`.

Cas de la thermique :

Pour imposer une condition d'échange entre les lèvres de la fissure, ou pour imposer la continuité du champ de température à travers une fissure, il faut utiliser `AFFE_CHAR_THER` (ou `AFFE_CHAR_THER_F`) / `ECHANGE_PAROI/FISSURE`. Dans le premier cas on renseignera le mot-clé `COEF_H`, dans le second le mot-clé `TEMP_CONTINUE`.

Aucune autre condition aux limites ne peut être imposée sur des éléments X-FEM ou des nœuds d'éléments X-FEM, de même, aucun terme source ne peut être imposé sur les éléments X-FEM. L'utilisateur doit donc s'assurer d'appliquer ses chargements suffisamment « loin » de la fissure, c'est à dire sur des éléments non enrichis (ou des nœuds appartenant à des éléments non enrichis). Il est important de souligner que comme il n'existe pas d'éléments de bords X-FEM pour les modélisations thermiques, une condition de flux nul est imposée par défaut sur l'intersection entre la frontière du domaine considéré et les bords des éléments X-FEM principaux.

2.7 Calcul thermo-mécanique

Si on souhaite réaliser un calcul chaîné thermo-mécanique, Le calcul thermique doit s'effectuer sur un maillage sain, sans discontinuité de la température au travers des lèvres de la fissure. Pour les fissures courtes, cela ne pose pas vraiment de problème car on peut généralement considérer que la température est continue au travers de la fissure. Pour les fissures longues, le fait de considérer un champ de température continue au travers de la fissure constitue une approximation dont il faut être conscient.

Le calcul mécanique s'effectue de manière habituelle, avec la température comme variable de commande. Seuls les opérateurs de résolution `MECA_STATIQUE` et `STAT_NON_LINE` permettent de prendre en compte des éléments X-FEM.

Remarque :

Il n'est pour l'instant pas possible d'utiliser comme variable de commande du calcul mécanique une température issue d'un calcul thermique X-FEM : le transfert de ce champ entre les opérateurs de thermique et de mécanique constitue une évolution à venir.

2.8 Post-traitements de visualisation

La visualisation des résultats sur un maillage sain n'est pas très pertinente. Un post-traitement spécifique permet de générer un « pseudo » maillage fissuré. Ce maillage est uniquement destiné aux post-traitements et ne doit pas être utilisé pour un calcul (ce n'est pas un vrai maillage car il ne respecte pas certaines propriétés de conformité notamment).

Ensuite, un autre post-traitement permet de générer, à partir du résultat du calcul X-FEM et de ce « pseudo » maillage fissuré :

- des champs de déplacements, de contraintes et de variables internes en mécanique
- un champ de température en thermique

Ensuite, ces champs peuvent être utilisés pour d'autres post-traitements (`CALC_CHAMP` ...).

Remarque :

Le passage d'un `CHAM_ELNO` à un `CHAM_NO` n'est pas possible à cause du « pseudo » maillage.

2.9 Mécanique de la rupture

Le calcul du taux de restitution d'énergie G et des facteurs d'intensité de contraintes K_I , K_{II} et K_{III} est possible soit par extrapolation des sauts de déplacements (`POST_K1_K2_K3`) soit par la méthode $G-\theta$ (`CALC_G`). Il existe certaines restrictions particulières pour X-FEM et `CALC_G` (voir [U4.82.03] pour plus de précisions).

Remarque sur le calcul du facteur d'intensité de contrainte dynamique :

Il est possible de calculer pour X-FEM les facteurs d'intensité de contraintes dynamiques (pour un calcul transitoire) et les facteurs d'intensité de contraintes modaux (associés avec les déformés modaux), voir [U4.82.03] pour plus d'information.

2.10 Propagation en fatigue

L'opérateur `PROPA_FISS` de propagation automatique des fissures en fatigue est disponible en 2D et en 3D.

L'opérateur `PROPA_FISS` propose 4 méthodes (`METHODE_PROPA` = 'MAILAGE', 'SIMPLEXE', 'UPWIND' et 'GEOMETRIQUE'), disponibles en 2D et en 3D.

En entrée, il est nécessaire de lui fournir une table contenant les facteurs d'intensité des contraintes le long du (des) fond(s) de fissures pour chaque fissure. Ces tables doivent provenir de `CALC_G` ou de `POST_K1_K2_K2`. À noter que toutes les fissures de la structure doivent être propagées dans un seul appel à l'opérateur `PROPA_FISS`.

La loi de propagation est une loi de Paris (en chaque point du fond de fissure). L'incrément maximum de propagation à chaque itération est imposé par l'utilisateur.

L'angle de bifurcation est calculé dans `PROPA_FISS` (le choix du critère d'angle de bifurcation est donné à l'utilisateur). Le critère par défaut est celui de la contrainte circonférentielle maximale (« maximum hoop stress criterion »). Il est également possible de choisir un angle de bifurcation au préalable calculé. Dans ce cas, il faut que cet angle ait été rajouté dans une colonne `BETA` de la table en entrée de `PROPA_FISS`.

Méthode `MAILLAGE` (projection) : définition des 2 level sets à partir d'un maillage des lèvres et du fond. Afin de propager les level sets, on modifie ce maillage à chaque itération de propagation (`METHODE_PROPA='MAILLAGE'`) [11][12]. On utilise donc deux maillages distincts (fissure et structure) et seul le « maillage » de la fissure est modifié. Une fois ce « maillage » mis à jour, on recalcule les nouvelles level sets par calcul direct de la distance à la fissure (projection orthogonale sur le « maillage » de la fissure).

Méthode `SIMPLEXE` : résolution des équations de réactualisation des level sets par la technique dite du simplexe. Cette méthode consiste à évaluer la contribution de chaque élément à la réactualisation de la level set en un nœud, puis à trier les contributions positives afin d'obtenir un schéma monotone. Sa principale limite provient du fait qu'elle est développée uniquement pour les éléments simples (triangles en 2D et tétraèdres en 3D), mais une tentative d'extension a été réalisée pour d'autres mailles (`QUAD4`, `HEXA8`).

Méthode `UPWIND` : résolution des équations de réactualisation des level sets par un schéma aux différences finies sélectives sur une grille régulière disjointe de la structure.

Méthode `GEOMETRIQUE` : les level sets sont recalculées à chaque pas de propagation en utilisant des relations géométriques à partir du fond de fissure. Cette méthode n'a aucune limitation.

Des conseils sur le choix de la méthode de propagation sont donnés au §27.

2.11 Restrictions diverses

La compatibilité avec les méthodes avancées de *Code_Aster* n'est pas assurée. Notamment, il est impossible d'utiliser X-FEM avec :

- la sensibilité,
- FETI,
- en dynamique,
- la sous-structuration,
- un modèle de zones cohésives sauf ceux mentionnés au §8.

3 Mise en œuvre : sans contact sur les lèvres de la fissure

Cette partie explique pas à pas les différentes étapes d'un calcul avec X-FEM. On pourra se référer au cas test SSNV192a par exemple, qui met en œuvre un calcul d'une éprouvette 3D avec une fissure centrale droite.

3.1 Création du maillage et du modèle sain

La spécificité par rapport à un calcul classique vient du fait qu'avec X-FEM, le maillage ne doit pas comporter la fissure. On part donc d'un maillage de la structure saine. Ce maillage est donc plus simple à réaliser qu'un maillage où la fissure est maillée : nul besoin de définir deux lèvres, nul besoin de mailler un tore en fond de fissure.

Si besoin est, ne pas oublier d'orienter les mailles de bord qui supporteront un chargement de type pression, comme pour un maillage habituel.

Un modèle est ensuite affecté à ce maillage par la commande `AFFE_MODELE`. Seuls les phénomènes 'MECANIQUE' et 'THERMIQUE' sont autorisés. Ce modèle est qualifié de « sain » car il ne comporte que des éléments finis classiques et aucun élément X-FEM. Il est utilisé pour la définition de la fissure.

Les modélisations supportées en mécanique sont :

3D, C_PLAN, D_PLAN et AXIS.

Les modélisations supportées en thermique sont :

3D, PLAN et AXIS.

3.2 Définition de la fissure

Chaque fissure est définie par un appel à la commande `DEFI_FISS_XFEM` [2]. Comme il est rappelé au §2.3, trois manières différentes de définir une fissure sont possibles. Ce paragraphe détaille dans quels cas il est préférable d'utiliser l'une ou l'autre manière.

Par la donnée de deux groupes de mailles

Cette méthode est pratique dans le cas où on dispose d'un maillage de la fissure (provenant d'une étude précédente par exemple), il suffit alors de renseigner le groupe de mailles correspondant soit à la lèvre supérieure, soit à la lèvre inférieure, et de renseigner aussi le groupe de mailles du fond de fissure.

Cette méthode peut être aussi utilisée dans le cas où la forme de la fissure est trop complexe pour être définie à l'aide de formules analytiques. On réalise alors un maillage de la surface de la fissure, disjoint du maillage de la structure. On pourrait envisager à l'avenir l'enchaînement suivant :

- image 3D par tomographie de la fissure dans la structure réelle,
- numérisation de l'image et création de la CAO surfacique associée à la fissure,
- maillage de la surface de la fissure,
- définition de la fissure par la commande `DEFI_FISS_XFEM`.

À noter que si le maillage de la fissure est disjoint du maillage de la structure saine, il faut les concaténer préalablement à la définition du modèle (`ASSE_MALLAGE/OPERATION='SUPERPOSE'`).

Par la donnée des formules analytiques des level sets

Les formules caractérisant les level-sets doivent représenter les vraies fonctions distance (à la surface et au fond de fissure). Sinon, le calcul de la distance au fond de fissure par :

$$r = \sqrt{(l_{sn}^2 + l_{st}^2)}$$

sera erroné.

Cette technique est bien adaptée aux fissures de formes simples : fissure plane circulaire, fissure plane droite...

Par des formes géométriques pré-établies

Un catalogue de formes de fissures est disponible. Un tel catalogue est indispensable car certaines fonctions distance ne possèdent pas d'écriture mathématique explicite et nécessitent un calcul numérique. De plus, l'utilisation d'un catalogue étant la plus rapide, d'autres formes usuelles simples seront intégrées, ce qui limitera aussi le risque d'erreur dans la définition des level sets.

La deuxième étape de la définition de la fissure est l'orientation du fond de fissure (en 3D). Cette étape est un peu délicate, et passe par la définition de deux vecteurs d'orientation et d'un point d'ancrage. Il est conseillé de se référer aux exemples détaillés dans [2] et aux fichiers commandes des cas tests. De plus, il est primordial de toujours vérifier la liste des points du fond de fissure trouvés (et leurs coordonnées), imprimée par la commande `DEFI_FISS_XFEM` dans le fichier message, l'idéal étant de tracer la courbe ainsi discrétisée du fond de fissure. Il est important de vérifier aussi que le nombre de fonds de fissure trouvés correspond bien à celui attendu.

Remarque :

Dans le cas où la fissure est définie à partir du catalogue de formes géométriques pré-établies, l'orientation du fond est faite automatiquement.

Deux autres vérifications sont possibles : visualiser les champs level-sets, et visualiser le « pseudo » maillage destiné à la visualisation. Les champs level-sets peuvent être extraits du concept créé par la commande `DEFI_FISS_XFEM`, chaque champ level-set étant extrait par un appel à la commande `CREA_CHAMP/OPERATION='EXTR'` [3]. Chaque level-set peut être alors visualisée (par exemple avec `gmsh` ou `Salomé`) suite à un `IMPR_RESU` au format adéquat. La version 5.1.4 de `Salomé` n'est pas idéale pour visualiser les level sets car elle ne permet pas d'afficher des iso-valeurs remplies dans une Scalar map (*filled iso-values* dans le langage `gmsh`) sans faire de lissage des couleurs. L'utilisation de `gmsh` est donc préconisée, avec les réglages de l'onglet *Range* suivants (exemple donné en version 1.65) :

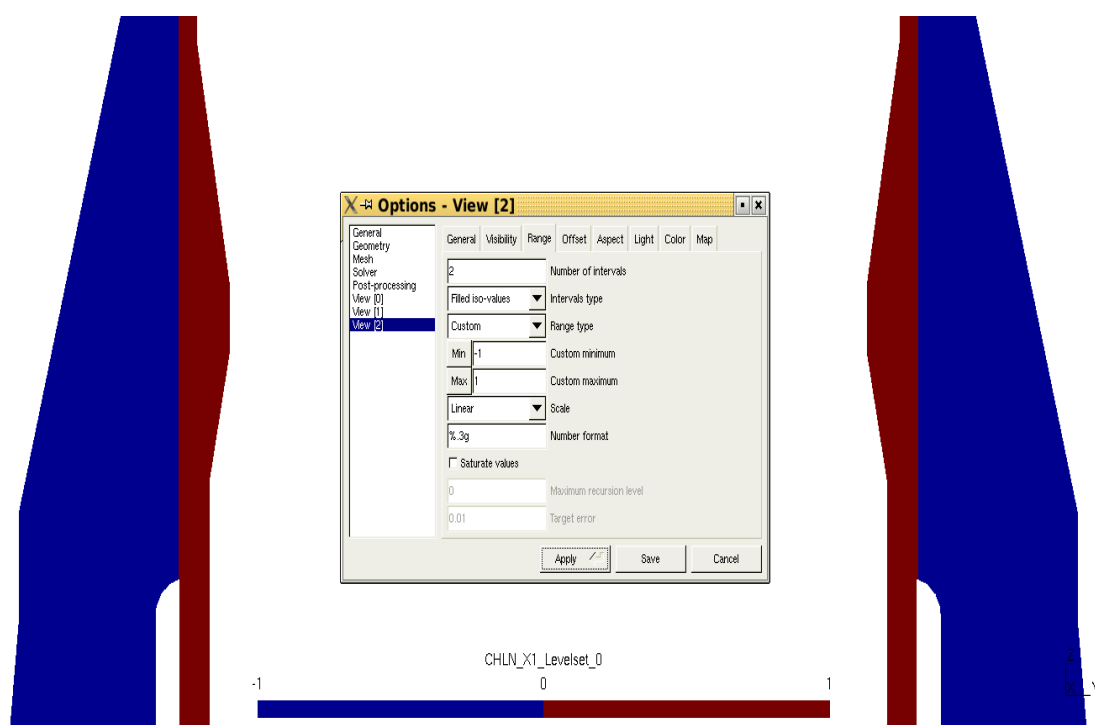


Figure 3.2-a : réglages de `gmsh` (v1.65) pour la visualisation de level sets

Deux couleurs sont affichées : en bleu pour les zones où la level-set est négative, et en rouge pour les zones où la level-set est positive. Le choix des bornes *Min* et *Max* peut être différent, il suffit que l'intervalle soit centré en 0.

On pourra cependant utiliser `Salomé` et afficher les iso-surfaces des level-sets en « Iso-surfaces ».

La deuxième vérification est celle du « pseudo » maillage, mais celui-ci n'est créé qu'après la modèle enrichi. Cette dernière vérification sera expliquée au §3.6.

3.3 Création du modèle enrichi

Le modèle enrichi est créé par la commande `MODI_MODELE_XFEM` [4] à partir du modèle sain [§3.1] et de la fissure définie par `DEFI_FISS_XFEM` [§3.2]. Si plusieurs fissures ont été définies par plusieurs appels préalables à `DEFI_FISS_XFEM`, alors l'entrée de `MODI_MODELE_XFEM` sera la liste des noms de ces fissures. Il n'y a pas de limitation concernant le nombre de fissures, en mécanique comme en thermique.

En mécanique, il est en outre possible de découper un élément avec plusieurs fissures. Certains nœuds de l'élément seront alors enrichis avec plusieurs fonctions Heaviside. Le support d'un élément peut être découpé par autant de fissures que l'on veut, à condition que le support de chacun de ses nœuds ne soit pas coupé plus de 4 fois. Attention, cela ne fonctionne pas pour les enrichissements de fond de fissures. Un fond de fissure doit être espacé d'au moins 2 mailles non-coupées d'une autre fissure. Il se peut que lors du découpage dans l'opérateur `MODI_MODELE_XFEM`, il y ait un plantage causé par la limite sur le nombre maximum de sous-éléments: cela arrive lorsque l'élément est trop re-découpé et il faut alors espacer les fissures. Cette limitation devrait être temporaire en attendant que la taille de la carte élémentaire 3D X-FEM soit augmentée sans que cela nuise aux performances du code (fiche 15958). On peut aussi avoir certains problèmes de conditionnement qui produisent un pivot nul lors de la factorisation de la matrice: cela arrive en 3D et on peut dans l'attente de développement s'en sortir en utilisant le solveur MUMPS. Si les fissures se croisent ou se branchent l'une à l'autre, il est impératif d'utiliser préalablement le mot clé `JONCTION` dans `DEFI_FISS_XFEM` sous peine de résultats faux. La Figure 3.3-a présente un exemple d'une plaque maillée avec des quadrangles, comportant trois fissures X-FEM (2 en rouge et une en bleu). Les éléments grisés sont ceux traversés par les fissures rouges . Les éléments verts sont les éléments de fonds de fissures . Les éléments violets sont ceux concerné par la troisième fissure qui se branche sur les deux premières . Ces éléments peuvent être communs avec les éléments grisés des deux premières fissures, mais les éléments ne peuvent pas être à la fois vert et violet .

En thermique, cette fonctionnalité n'est pas disponible. Si le modèle sain est un modèle thermique et que le mot clé `JONCTION` est utilisé, le code s'arrête en erreur fatale avec un message utilisateur.

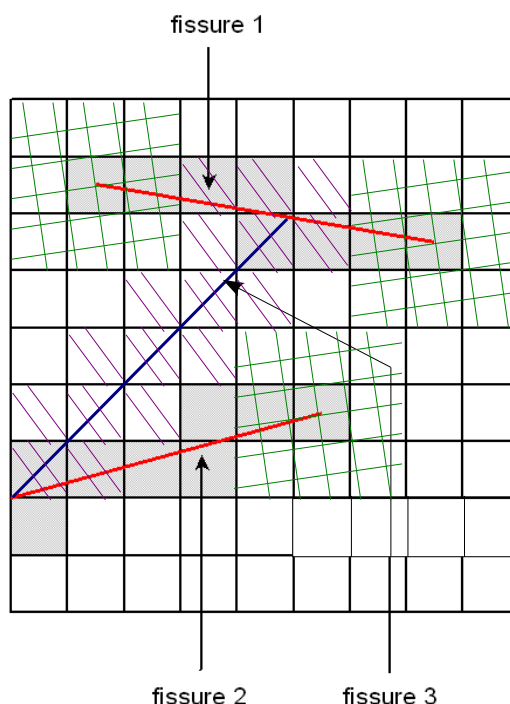


Figure 3.3-a : exemple d'une plaque comportant 3 fissures

Ce modèle enrichi doit être utilisé pour toute la suite du calcul. Notamment, on doit affecter les matériaux et les chargements sur ce modèle, et l'utiliser dans les opérations de résolution MECA_STATIQUE ou STAT_NON_LINE.

3.4 Charge spécifique X-FEM et autres chargements

L'utilisation du contact avec X-FEM nécessite une charge supplémentaire qui consiste à imposer des relations entre les degrés de liberté de contact (gestion de la condition LBB [R5.03.54]). Cette charge doit donc être obligatoirement et uniquement utilisée lors d'un calcul X-FEM avec contact. On retrouve la ligne suivante dans les cas tests correspondants de la base :

```
CHXFEM=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=...,LIAISON_XFEM='OUI')
```

(les ... remplacent le nom du modèle enrichi).

Il ne faut pas oublier de spécifier cette charge lors de la résolution, c'est-à-dire sous le mot-clé EXCIT=_F(CHARGE= de la commande MECA_STATIQUE ou STAT_NON_LINE. Sinon, la résolution du problème conduira dans la majorité des cas à un pivot nul.

Les autres chargements sont créés de manière habituelle, en respectant les limitations mentionnées au § 2.6.

3.5 Résolution

La résolution de l'équilibre mécanique avec X-FEM est réalisée de manière classique, mais uniquement avec les opérateurs de résolution MECA_STATIQUE ou STAT_NON_LINE.

La résolution de l'équation de la chaleur avec X-FEM est réalisée de manière classique, mais uniquement avec l'opérateur de résolution THER_LINEAIRE.

3.6 Post-traitement de visualisation

La création du maillage de visualisation se fait par la commande POST_MAIL_XFEM [5], qui génère un « pseudo » maillage, non conforme. Ce maillage est basé sur le maillage sain, dont les éléments X-FEM ont été sous-découpés. Vérifier le maillage de visualisation permet de contrôler la position de la fissure, et donc de contrôler que les level sets ont été correctement calculées. Notons que la création du maillage de visualisation se sert uniquement du modèle enrichi et du maillage sain, donc cette phase de vérification peut être réalisée juste après la création du modèle enrichi, avant la résolution.

Afin de créer des champs de résultat correspondant à ce maillage de visualisation, il est nécessaire de créer d'abord un modèle de visualisation. Pour cela, il faut utiliser la commande AFPE_MODELE, exactement de la même manière que pour le modèle sain, en changeant juste le nom du maillage et en mettant le nom du maillage de visualisation.

La création du concept résultat associé au modèle de visualisation se fait par la commande POST_CHAM_XFEM [6]. Cette commande génère pour la mécanique les champs de résultat DEPL, SIEF_ELGA, VARI_ELGA, et pour la thermique le champ TEMP. Ce résultat peut être ensuite utilisé comme un résultat issu d'un calcul classique, notamment, les champs peuvent être imprimés avec la commande IMPR_RESU (au format MED par exemple) pour être visualisés avec un logiciel de post-traitement.

Ce résultat peut être utilisé pour d'autres post-traitements (contraintes équivalentes, déformations, forces nodales...) notamment avec la commande CALC_CHAMP. Pour certaines options de post-traitement (EPSI_ELGA par exemple) il est nécessaire de recréer un champ de matériau sur le « pseudo » maillage fissuré par la commande AFPE_MATERIAU. Ce champ de matériau sera alors donnée en entrée de CALC_CHAMP sous le mot-clé CHAM_MATER. C'est également le cas si des éléments de structures sont contenus dans le maillage. Il sera alors nécessaire de recréer le cara_elem et de le renseigner sous le mot-clé CARA_ELEM de CALC_CHAMP.

Un exemple de post-traitement complet (`POST_MAIL_XFEM` , `AFPE_MODELE` , `POST_CHAM_XFEM` , `AFPE_MATERIAU` , `CALC_CHAMP` , `IMPR_RESU`) est donné dans le cas-test `ssnv185b` .

3.7 Post-traitement en mécanique de la rupture

Comme pour une fissure maillée, le calcul du taux de restitution d'énergie G et des facteurs d'intensité de contraintes K_I , K_{II} et K_{III} est possible soit par extrapolation des sauts de déplacements (`POST_K1_K2_K3`) soit par la méthode G-thêta (`CALC_G`). La fissure est directement renseignée dans ces opérateurs par le mot-clé `FISSURE`.

Des conseils sur le choix des paramètres de calcul de G et de K sont donnés dans les paragraphes §26 et §27.

3.8 Post-traitements divers

Les autres post-traitements (par exemple, contraintes de Von Mises...) se font à partir du résultat associé au modèle de visualisation. Ainsi, il ne faut pas enchaîner directement la résolution (`MECA_STATIQUE` ou `STAT_NON_LINE`) et le post-traitement des champs élémentaires (`CALC_CHAMP`). Il faut impérativement post-traiter les champs à partir du résultat issu de `POST_CHAM_XFEM`.

4 Mise en œuvre : avec contact sur une interface

Cette partie explique pas à pas les différentes étapes d'un calcul avec X-FEM où le contact est défini sur les lèvres de la fissure (ici, une interface). Il est conseillé d'avoir lu le chapitre précédent. On pourra se référer aux cas tests SSNV182, SSNV186, SSNV201, SSNV209, SSNP503 ou SSNP504.

4.1 Ancienne formulation

4.1.1 Quadratisation du maillage

Le contact sur la fissure X-FEM ne fonctionne qu'avec des fonctions de forme linéaires. La maillage initial est donc un maillage ne comportant que des mailles linéaires. Cependant, pour des besoins propres à Code_Aster, les éléments de contact X-FEM nécessitent de disposer de nœuds milieu. La première phase est donc la transformation du maillage initial linéaire en maillage quadratique, grâce à la commande `CREA_MAILLAGE/LINE_QUAD`. Le plus simple est de tout transformer en mailles quadratiques.

Le maillage initial linéaire ne doit plus être utilisé par la suite, sauf pour le post-traitement de visualisation.

4.1.2 Création du modèle sain

Un modèle est ensuite affecté à ce maillage quadratique par la commande `AFFE_MODELE`. Pour se ramener à des éléments finis dont la maille associée est quadratique, mais dont les fonctions de forme sont linéaires, il est nécessaire de donner une modélisation spécifique : `'3D_XFEM_CONT'`, `'CPLAN_XFEM_CONT'` ou `'DPLAN_XFEM_CONT'`. Les groupes de mailles à affecter par la modélisation spécifique doivent être exactement tous ceux quadratisés par `CREA_MAILLAGE/LINE_QUAD`. Le plus simple est de tout affecter par la modélisation spécifique.

4.2 Nouvelle formulation

L'ancienne formulation n'est pas très optimale et limite l'implémentation de nouvelles fonctionnalités. Une nouvelle formulation a donc été introduite et elle dispose déjà de possibilités plus avancées que l'ancienne (notamment pour les grands glissements, où il est ainsi possible d'utiliser des modèles 3D ou d'introduire des fonds de fissure). Nous recommandons vivement cette formulation à l'utilisateur car c'est maintenant celle-ci qui fait l'objet des développements en cours et à venir (intersections, fonctions de formes quadratiques).

Pour cette formulation, il n'y a pas besoin de rendre le maillage initial quadratique (si l'on souhaite utiliser des fonctions de formes linéaires) et la création du modèle sain se fait exactement comme dans le cas sans contact.

4.3 Définition de l'interface

Une interface est définie par une seule level set : la level-set normale. Il faut préciser dans `DEFI_FISS_XFEM` le type de discontinuité : `TYPE_DISCONTINUITE='INTERFACE'`.

Contrairement au cas d'une vraie fissure, il n'est pas nécessaire de définir la vraie fonction distance. Une level-set quelconque suffit, pourvu que l'iso-zéro de la level-set coïncide avec l'interface. Par exemple, la vraie fonction distance signée au cercle de centre C et de rayon R est :

$$LSN = \sqrt{((X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2) - R^2}$$

mais une fonction level-set dont l'iso-zéro coïncide avec le cercle est par exemple :

$$LSN = (X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2 - R^2$$

4.4 Création du modèle enrichi

La particularité du cas où le contact est défini sur l'interface ou fissure X-FEM est qu'il faut le préciser lors de la création du modèle enrichi, par le mot-clé `CONTACT='OUI'` de la commande `MODI_MODELE_XFEM`. La restriction sur le positionnement de plusieurs fissures est la même que celle expliquée au §3.3.

4.5 Bi-matériau

La définition d'un matériau différent de part et d'autre de l'interface n'est pas aisée car normalement, un matériau est défini par groupes de mailles, donc sur une maille, on a forcément le même matériau. Or dans le cas d'un interface traversant une maille, on pourrait souhaiter avoir des matériaux différents de part et d'autre de l'interface. Ceci est néanmoins possible si :

- la level-set normale est une fonction explicite de l'espace,
- la loi de comportement est la même sur toute la maille.

Dans ce cas, on peut définir les caractéristiques matériaux (comme E et ν) en fonction d'une variable de commande VC , qui est en fait la level-set normale LSN . On procède donc ainsi :

$$(X, Y) \rightarrow LSN(X, Y) \rightarrow VC = LSN(X, Y) \rightarrow (E, \nu) = f(VC)$$

On passe par une variable de commande car le matériau ne peut pas dépendre directement des coordonnées de l'espace. La fonction f est une fonction du type :

$$\text{if } VC > 0 \text{ then } (E, \nu) = (E^1, \nu^1) \text{ else } (E, \nu) = (E^2, \nu^2)$$

où (E^1, ν^1) et (E^2, ν^2) sont les propriétés des deux matériaux en question.

4.6 Charge de contact

Lors de la création de la charge de contact, il faut spécifier `METHODE = 'XFEM'`, et donner le nom de la fissure sous le mot-clé `FISS_MAIT`. La méthode de contact activée est la méthode continue.

Il peut être utile pour la convergence de l'algorithme de préciser le schéma d'intégration par `INTEGRATION='NOEUD'` ou `INTEGRATION='SIMPSON'`.

4.7 Charge spécifique

Comme tout calcul X-FEM, il faut définir une charge spécifique (voir §3.4), et dans le cas du contact, rajouter la charge de contact sous le mot-clé `CONTACT_XFEM` de la commande `AFFE_CHAR_MECA` :

```
CHXFEM=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=...,LIAISON_XFEM='OUI', CONTACT_XFEM=...)
```

4.8 Post-traitement de visualisation

Tout ce qui est expliqué au §3.6 reste valable, mais le maillage sain à renseigner est le maillage initial linéaire. (dans `POST_MAIL_XFEM` et `POST_CHAM_XFEM`). De plus, le modèle de visualisation est la copie du modèle sain, mais avec les modélisations classiques `'3D'`, `'CPPLAN'`, `'DPLAN'` et `'AXIS'`.

4.9 Post-traitement en mécanique de la rupture

Il est tout à fait possible de calculer G et K sur une fissure totalement ou partiellement fermée. Le calcul se fait avec les opérateurs `POST_K1_K2_K3` ou `CALC_G`. Pour l'opérateur `POST_K1_K2_K3`, le maillage à renseigner est le maillage initial linéaire.

Si le fond de fissure est fermé, la valeur théorique de G ou K est 0, mais on ne s'en approche avec la commande `CALC_G` qu'avec des mailles très petites.

4.10 Post-traitement du contact

Comme pour un calcul de contact classique, le champ `VALE_CONT`, qui donne des informations sur les valeurs de certaines quantités liées au contact, est calculé et peut être post-traité. Toutefois, si les termes de contact sont intégrés numériquement par une méthode de Gauss, les quantités définies aux points de Gauss des facettes de contact ne pourront être affichées.

5 Mise en œuvre : trou ou sous-épaisseur

Afin de représenter un trou ou une sous-épaisseur par X-FEM, on se sert de la définition d'une interface, qui représente la bordure du trou ou de la sous-épaisseur. Prenons l'exemple d'une plaque qui présente un manque de matière sur de des côtés (région grisée de la Figure 5-a). Ce manque de matière peut être modélisé suivant sa forme par une portion d'ellipse.

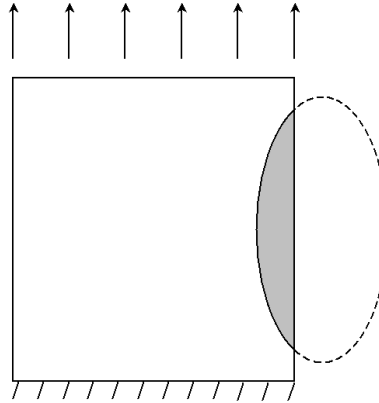


Figure 5-a : exemple d'une sous-épaisseur sur le bord d'une plaque

On représente alors l'interface entre la plaque et le vide par une level-set de type inclusion elliptique, dont la formule s'écrit simplement :

```
LN=FORMULE (NOM_PARA= ('X', 'Y'), VALE= ' (X-Cx) **2 / (b*b) + (Y-Cy) **2 / (a*a) -1. ' )
```

où (C_x, C_y) sont les coordonnées du centre de l'ellipse et a et b les longueurs des demi-axes de l'ellipse.

Comme dans le cas d'une interface entre 2 solides en contact, il ne faut définir que la level-set normale, la level-set tangentielle ne sert à rien ici. Dans `DEFI_FISS_XFEM`, on ne renseignera que `FONC_LN` et on précisera le type de discontinuité : `TYPE_DISCONTINUITE= 'INTERFACE'`.

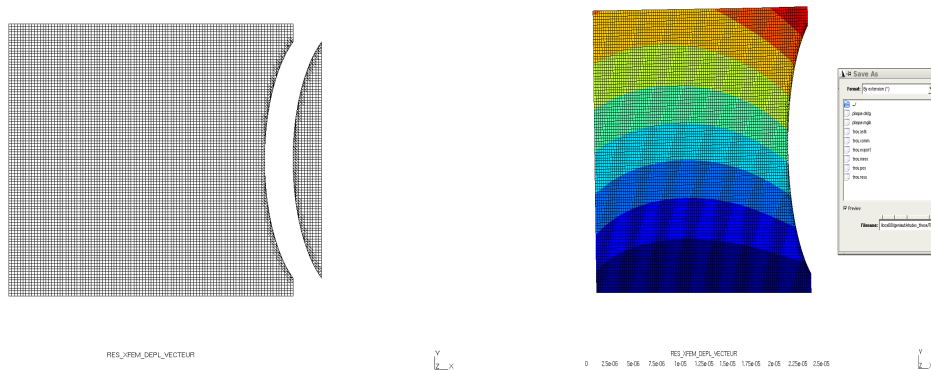


Figure 5-b : déformée non amplifiée (gauche) et amplifiée (droite)

On procède de la même façon que pour un cas sans contact. Mais il faut veiller à bloquer les modes rigides de la partie vide, par exemple en bloquant deux nœuds de la partie grisée. Le mieux est même d'imposer un déplacement important sur ces deux nœuds, de manière à ce qu'il translate la partie vide loin de la plaque. Cet artifice permet de ne visualiser que la plaque sans la partie vide (voir Figure 5-b). Rappel : utiliser `MECA_STATIQUE` ou `STAT_NON_LINE` pour la résolution.

Pour imposer un chargement de pression sur l'interface, il faut procéder comme pour les fissures : imposer une pression sur les 2 cotés de l'interface (bien qu'imposer la pression uniquement sur le coté « dans la matière » sera suffisant). Voir le §2.6.

6 Conseils et recommandations sur le maillage

Cette partie traite de l'adéquation entre le maillage utilisé pour le calcul et la qualité de la solution obtenue. D'abord on rappelle la problématique du raffinement de maillage dans le cadre de la méthode X-FEM. Après un rappel de la définition de la taille de maille, un critère à respecter sur les tailles des mailles est donné. Ensuite, on présente différentes stratégies de raffinement. On détaille par la suite celle basée sur le logiciel Homard couplé à Code_Aster. Enfin, on résume la méthodologie recommandée pour le raffinement de maillage dans le cadre X-FEM.

6.1 La problématique du raffinement de maillage dans le cadre X-FEM

L'utilisation de la méthode X-FEM permet de lever certaines difficultés liées au maillage. Notamment, un maillage libre de la structure saine suffit.

Par la suite, on fera l'hypothèse que le maillage sain initial est suffisamment fin pour obtenir une précision suffisante sur les déplacements et contraintes pour un calcul d'une structure sans fissure.

L'introduction de la fissure amène à se poser 2 questions :

- Le maillage initial est-il suffisamment fin pour représenter la forme géométrique de la fissure ?
- Le maillage initial est-il suffisamment fin pour le post-traitement des quantités caractéristiques de la mécanique de la rupture (taux de restitution d'énergie et facteurs d'intensité des contraintes) ?

La première question est légitime, car la géométrie de la fissure est caractérisée par les level sets, dont les valeurs sont portées aux nœuds du maillage. Donc la finesse du maillage influe sur la qualité de la représentation de la fissure, et donc sur la forme de la fissure. Dans l'immense majorité des cas, la surface de la fissure est plane. Ce type de surface peut être représenté fidèlement même avec un maillage relativement grossier. Dans le cas contraire (fissure courbe), il faut s'assurer que la courbure de la fissure peut être bien représentée.

La qualité de la représentation du fond de fissure est aussi importante. Mais les exigences en terme de représentation géométrique correcte sont négligeables devant celles nécessaires pour le post-traitement (cf. 2^{ème} question).

La 2^{ème} question est la plus préoccupante. En effet, les contraintes sont singulières en pointe de fissure. Il faut donc un maillage adapté pour bien capter cette singularité. Ce problème est traité avec la méthode des éléments finis (FEM) par l'utilisation d'une part d'éléments quadratiques dont les nœuds milieux sont déplacés au quart des arêtes (éléments dits de « Barsoum ») et d'autre part d'un maillage rayonnant qui permet un fort raffinement dans la zone de post-traitement.

Avec X-FEM, l'ajout de fonctions d'enrichissement asymptotiques est le pendant des éléments de Barsoum. Mais cela n'a une influence que très localement. Il faut donc un maillage relativement raffiné dans la zone de post-traitement. Notons aussi que seuls les éléments X-FEM linéaires sont considérés dans cette note (les éléments X-FEM quadratiques étant actuellement en cours d'optimisation).

L'obtention d'un maillage suffisamment fin est le cœur de ce chapitre. L'objectif est de préciser dans un premier temps quelle doit être la finesse du maillage dans la zone de post-traitement. Ensuite, la démarche d'obtention d'un tel raffinement est expliquée.

Remarque :

Le cas des interfaces est plus problématique car d'une part les interfaces sont généralement courbes et d'autre part des conditions de contact unilatéral sont souvent définies sur les interfaces. Or pour résoudre correctement le problème du contact entre 2 surfaces courbes, il est impératif que les surfaces soient représentées par des éléments finis d'ordre 2. Une thèse sur les interfaces courbes représentées par des level sets d'ordre 2 est en cours. Cependant, on ne traitera pas dans ce chapitre le cas du raffinement de maillage pour les interfaces.

6.2 Définition de la taille d'une maille

On définit la taille d'une maille (ou encore diamètre d'une maille) comme la valeur de la longueur de la plus grande arête de la maille. Cette taille peut être facilement calculée dans le module SMESH de Salomé (Control → Element Diameter 2D ou 3D).

6.3 Critères sur les tailles des mailles

La précision du calcul du taux de restitution d'énergie (G) et des facteurs d'intensité des contraintes (K) est directement liée à la taille des éléments proches du fond de fissure. Il convient de distinguer 2 longueurs :

- la longueur des éléments dans le plan orthogonal au fond de fissure en 3D, c'est-à-dire le plan complet en 2D ;
- la longueur des éléments le long du fond de fissure (en 3D uniquement).

Dans le plan, on considère que la zone d'intérêt est un disque autour du fond de fissure de rayon $R < a/5$, a étant la profondeur de la fissure. Dans cette zone, on constate qu'environ 4 à 6 éléments sont nécessaires pour obtenir une erreur sur le taux de restitution d'énergie entre 1% et 2%. Par conséquent, la taille maximale d'un élément dans cette zone, notée h_1 , doit être de l'ordre de $a/20$.

Le long du fond de fissure, la discrétisation est liée à la courbure du fond de fissure. Pour un fond droit, quelques éléments suffisent. Pour un fond courbe, par exemple un quart de cercle, le nombre d'éléments le long du fond, noté h_2 , doit être au moins égal à 20.

Dans certains cas (notamment avec un maillage en hexaèdres), on peut régler indépendamment les tailles des mailles h_1 , et h_2 . Mais dans la plupart des cas (maillages en tétraèdres), la taille des mailles est liée à un seul paramètre utilisateur h . Il faut donc que h satisfasse les 2 conditions ci-dessus, soit $h = \min(h_1, h_2)$. La 2^{ème} condition n'est pas aisée à écrire car elle dépend de la courbure du fond de fissure. Or c'est bien souvent la 1^{ère} condition qui est la plus contraignante sur la taille des mailles ($h_1 < h_2$). On peut ainsi conclure dans le cas général, la condition à respecter sur la taille des mailles dans la zone d'intérêt : h ne doit dépasser $a/20$.

Bilan :

Dans le cas général, la taille des mailles dans un zone proche du fond de fissure doit être de l'ordre de $a/20$, a étant la profondeur de la fissure. Des tailles de l'ordre de $a/10$ permettent d'avoir déjà une bonne idée du résultat.

6.4 Techniques de raffinement de maillage dans le cadre X-FEM

L'obtention d'un maillage X-FEM sur une structure industrielle n'est pas si aisée. Deux approches peuvent être envisagées : l'introduction d'un bloc fissure, ou l'adaptation de maillage.

L'introduction d'un bloc fissure consiste à définir lors de la création du maillage, une boîte englobant la fissure. Le maillage dans cette boîte sera réglé, et la finesse du maillage doit être un paramètre de la procédure de maillage. La boîte doit être suffisamment large si l'étude la propagation de la fissure est envisagée. Il est aussi nécessaire de créer une zone de raccord entre la boîte réglée, et le reste de la structure maillée en libre. Cette approche a récemment été utilisée dans plusieurs études (voir les notes d'étude [7] et [8]). Ce bloc raffiné peut être également obtenu en exploitant les cartes de tailles locales des algorithmes de maillages (Netgen, Blsurf).

La deuxième approche (recommandée) consiste à réaliser un maillage adéquat par raffinements successifs d'un maillage libre initial jugé grossier. Le critère de raffinement (ou critère d'erreur) est basée sur la distance au fond de fissure. Un exemple d'utilisation de cette approche par adaptation de maillage avec le logiciel Homard est présenté dans [9]. Sa mise en œuvre est dorénavant très aisée, grâce à la macro-commande `RAFF_XFEM` qui crée le champ d'erreur directement à partir de la liste

des fissures. Ce champ d'erreur doit ensuite être donné en entrée de la macro-commande `MACR_ADAP_MAIL` (voir un exemple d'adaptation de maillage pour X-FEM avec le cas test `sslp317a,b,c`).

La paragraphe suivant détaille cette 2ème approche.

6.5 Méthodologie de raffinement de maillage avec Homard et level sets

Cette technique ne nécessite pas de disposer de la géométrie (CAO). Elle fait appel seulement au maillage initial sain. Elle utilise le logiciel de raffinement de maillage Homard, callable depuis `Code_Aster` par la commande `MACR_ADAP_MAIL`.

6.5.1 Détermination du nombre d'appel à Homard

À chaque appel à Homard, les mailles qui seront découpées verront leur taille divisée d'un facteur 2. Il est donc facile de savoir le nombre de fois qu'il faut successivement appeler Homard. Connaissant la taille initiale des mailles dans la zone d'intérêt h_0 et la taille des mailles que l'on souhaite obtenir au

final h_c (taille cible), il faut appeler Homard au moins nb_raff fois, avec $nb_raff \geq \frac{\ln(h_0) - \ln(h_c)}{\ln(2)}$.

On recommande de prendre $nb_raff = E(n) + 1$, avec $n = \frac{\ln(h_0) - \ln(h_c)}{\ln(2)}$. La taille des mailles

après raffinement sera donc de $h = \frac{h_0}{2^{nb_raff}}$. Notons que bien souvent, à cause de la division entière,

la taille finale n'est pas exactement la taille cible souhaitée, mais on sait que $\frac{h_c}{2} \leq h \leq h_c$.

Maintenant que le nombre d'appels à Homard est déterminé, il est nécessaire de savoir pour chaque appel à Homard combien de mailles, et lesquelles, doivent être découpées (pilotage d'Homard).

6.5.2 Pilotage d'Homard (indicateur d'erreur et critère de raffinement)

Il faut que Homard raffine uniquement les mailles les plus proches du fond de fissure. Pour cela, il suffit de lui fournir un champ représentant la distance au fond de fissure en chaque nœud du maillage. Les nœuds dont cette distance est la plus faible permettent de déterminer les mailles à raffiner en priorité. La question est alors la suivante : combien de mailles faut-il découper à chaque appel à Homard ? On peut soit imposer :

-un pourcentage de mailles à découper,

-ou bien choisir de découper toutes les mailles dont la distance au fond est inférieure à une valeur limite (seuil). Cette valeur limite peut être la valeur du rayon de la zone de post-traitement (notée R au §22).

Critère avec pourcentage d'éléments : difficulté de trouver les bons pourcentages, et ils peuvent dépendre de la position du fond (longueur du fond). Cela pose un problème en pratique pour la propagation. Bien que simple, ce critère est déconseillé car il aboutit à des maillages peu optimaux en termes de nombre de nœuds (voir illustration sur le cas-test `sslp317a`).

Critère avec seuil : des mailles initiales très grosses peuvent poser problème. Ainsi aucune maille n'est découpée initialement, car aucune maille ne se trouve complètement à une distance inférieure au seuil R . Il faut alors forcer l'algorithme à découper et utiliser un seuil variable. Le seuil au niveau

de raffinement k s'écrit alors $\max\left(R, \frac{h_0}{2^k}\right)$.

Remarque :

Homard ne permet de découper que les mailles dont la valeur du champ « d'erreur » est supérieure au seuil. Il a donc fallu créer un champ d'erreur tel que les mailles les plus proches du fond de fissure

ait une erreur la plus grande. Pour cela, l'erreur n'est pas la distance d au fond de fissure, mais l'opposée de la distance au fond, soit $e = -d$. La condition $d < \max\left(R, \frac{h_0}{2^k}\right)$ devient donc $e = -d > -\max\left(R, \frac{h_0}{2^k}\right)$. Donc le seuil à définir dans Homard (CRIT_RAFF_ABS) est en fait égal à $-\max\left(R, \frac{h_0}{2^k}\right)$. Il faut aussi utiliser le mot-clé `USAGE_CMP = 'RELATIF'`. (voir illustration sur le cas-test sslp317b)

Sur certains maillages où les mailles sont un peu allongées, l'utilisation d'un critère avec seuil variable tel que évoqué précédemment ne fonctionne pas et aucune maille n'est découpée initialement. Un nouvel indicateur d'erreur par zone (indicateur binaire) a récemment été mis en place (RAFF_XFEM/TYPE='ZONE'). Le principe de cet indicateur est de valoir 1 dans la zone à raffiner (zone d'intérêt) et 0 partout ailleurs. La zone d'intérêt est en 2d un disque autour du fond de fissure et en 3d un tore autour du fond de fissure, caractérisée par la donnée d'un rayon R . Cet indicateur permet de toujours raffiner au moins une maille, et est plus simple à utiliser que l'indicateur précédent (voir [U7.03.51]). **L'utilisation de ce nouvel indicateur ainsi que la méthodologie associée sont conseillées.** Il s'utilise exclusivement avec un critère en valeur absolue dans `MAC_ADAP_MAIL` (CRIT_RAFF_ABS fixé à 0,5). Avec cette indicateur, il est préférable de réaliser un appel à Homard en plus de `nb_raff`, avec `DIAM_MIN` fixé à h_c .

Pour une illustration de cette méthodologie, on peut se référer aux cas-test sslv155[b,c], sslv110f, sslp317c. Un récapitulatif complet de cette méthodologie est donné au paragraphe suivant

6.6 Récapitulatif de la méthodologie recommandée de raffinement de maillage

On peut résumer la méthodologie recommandée par l'algorithme suivant :

- estimation de la taille des mailles initiales dans la zone d'intérêt (il est préférable que les tailles dans cette zone soient homogènes) $\rightarrow h_0$
- donnée de la taille cible de mailles après raffinement de la zone d'intérêt : h_c (entre $a/10$ et $a/40$)
- calcul du nombre minimal de raffinements : $\text{nb_raff} = E(n) + 1$, avec $n = \frac{\ln(h_0) - \ln(h_c)}{\ln(2)}$
- calcul de la taille des mailles après raffinement : $h = \frac{h_0}{2^{\text{nb_raff}}}$
- calcul du rayon de la zone d'intérêt : $R = 5h$
- nombre véritable d'itérations de la boucle d'adaptation : $\text{nb_iter} = \text{nb_raff} + 1$.
- boucle d'adaptation
 - définition de la fissure/interface sur le maillage courant
 - calcul de l'indicateur par zone (RAFF_XFEM/TYPE='ZONE', RAYON= R).
 - appel à Homard avec `CRIT_RAFF_ABS = 0,5` et `DIAM_MIN =  $h_c$` .

Remarque :

Dans le cas des maillages dont la taille des mailles n'est pas uniforme dans la zone d'intérêt, on peut utiliser le même algorithme en notant h_0 la plus grande taille des mailles dans cette zone. Mais la

formule $h = \frac{h_0}{2^{\text{nb_raff}}}$ ne s'applique plus. Donc la taille des mailles après raffinement est inconnue. On ne peut donc pas choisir $R=5h$ car h est une inconnue. On choisit alors $R=5h_c$ bien que ce choix ne soit pas optimal. On conseille alors après la phase de raffinement de déterminer h « à la main », puis de dé-raffiner hors de la zone d'intérêt définie par $R=5h$. Ceci étant un peu délicat à mettre en œuvre, une macro-commande est en cours de réflexion.

7 Conseils et recommandations sur l'utilisation de X-FEM

7.1 Enrichissement

L'influence de la zone d'enrichissement asymptotique est notable. Plus la zone d'enrichissement est étendue, meilleure est la précision (en mécanique de la rupture élastique linéaire). Cependant, on ne peut pas étendre à toute la structure cette zone d'enrichissement car cela ajoute de nombreux degrés de liberté supplémentaires et surtout, cela dégrade fortement le conditionnement de la matrice de rigidité, à tel point que le calcul peut s'arrêter brutalement pour cause de pivot nul. Une étude détaillée de l'influence de la taille de la zone d'enrichissement sur la précision, le taux de convergence de l'erreur et le conditionnement du système est présentée dans [10]. Il en ressort qu'il faut limiter le nombre de couches d'éléments enrichis à sept couches, un bon compromis étant quatre couches.

Le choix de la zone d'enrichissement se fait à l'heure actuelle dans la commande `DEFI_FISS_XFEM` par le mot-clé `TYPE_ENRICHISSEMENT = 'TOPOLOGIQUE'` ou `'GEOMETRIQUE'`. Dans le cas de l'enrichissement géométrique, on renseigne soit la valeur du rayon d'enrichissement avec `RAYON_ENRI`, soit le nombre de couches avec `NB_COUCHES` ; si aucun de ces 2 mot-clé n'est présent un enrichissement sur 4 couches est effectué par défaut.

7.2 Paramètres de CALC_G

L'utilisation de la méthode G-thêta avec X-FEM soulève les mêmes questions quant aux choix des paramètres numériques que pour une fissure maillée : valeurs des rayons de la couronne R_{inf} et R_{sup} , type de lissage en 3D (et degré si lissage de type Legendre).

Le fait que la fissure soit maillée (méthode classique) ou pas (méthode X-FEM) ne change pas la manière de procéder. On trouvera donc des conseils complémentaires dans le guide d'utilisation des opérateurs de mécanique de la rupture [13].

Choix de la couronne

D'une manière générale, il ne faut pas que la couronne soit trop proche du fond de fissure (indépendamment de la taille des mailles), mais suffisamment loin des bords de la structure (attentions aux structures trouées) pour que l'hypothèse de fissure en milieu infini reste valable. Pour fixer un ordre d'idées, certaines études [14-15] ont montré que le choix $R_{inf}=2h$ et $R_{sup}=5h$ où h est la taille d'un élément en fond de fissure, est un choix satisfaisant.

Un calcul est jugé bon lorsque les résultats sont indépendants du raffinement du maillage et indépendants du choix des rayons R_{inf} et R_{sup} .

Une fois que la couronne est validée, si on affine le maillage il vaut mieux garder la même couronne que de choisir une couronne qui dépend de la taille des mailles.

Notons que pour X-FEM et un enrichissement géométrique, il est préférable que le rayon R_{inf} soit supérieur au rayon d'enrichissement.

Un mode de calcul automatique des rayons R_{inf} et R_{sup} est également proposé par `CALC_G`. Mais on conseille de bien vérifier que ces valeurs automatiquement calculées conduisent à des résultats indépendants du choix des rayons.

Choix du type de lissage

Deux familles de lissage sont disponibles :

- le lissage par les polynômes de Legendre : G (ou K) est alors une combinaison linéaire de polynômes de Legendre. Cette solution donne des résultats réguliers et est moins coûteuse en temps de calcul que le lissage de type Lagrange. Les polynômes de Legendre de degré élevé amplifient cependant les erreurs numériques aux extrémités du fond de fissure [13] ;
- le lissage de type Lagrange est basé sur les fonctions de forme des éléments linéiques du fond de fissure. Ainsi, s'il y a beaucoup de points le long du fond de fissure, le calcul de G sera coûteux (car proportionnel au nombre de points le long du fond de fissure). De plus, le

résultat sera souvent très irrégulier le long du fond de fissure, du fait de la distance variable entre deux points successifs du fond.

La solution pour améliorer les résultats du lissage de Lagrange et pour diminuer les temps de calcul est de réduire le nombre de points en fond de fissure et de répartir uniformément. Cela est possible à l'aide du mot clé `NB_POINT_FOND` de `CALC_G`. Un rapport de l'ordre de 4 entre le nombre total de points initial et le nombre de points équi-répartis semble un bon compromis.

Conclusion

Il est fortement recommandé de valider son modèle en comparant les résultats obtenus pour différents raffinements de maillage, pour différentes couronnes d'intégration et pour deux types de lissage (par exemple Legendre de degré 5 et Lagrange avec équi-répartition des points du fond).

7.3 Paramètres de `POST_K1_K2_K3`

Le seul paramètre à choisir est l'abscisse curviligne maximale s . On conseille de prendre s supérieure au rayon d'enrichissement. On conseille également de lier le choix de s à la taille des mailles, par exemple $s = 5h$. Un mode de calcul automatique de s est également proposé. Mais on conseille de bien vérifier que la valeur automatiquement calculée conduit à des résultats indépendants du choix de s .

Pour réduire les temps de calcul avec `POST_K1_K2_K3` qui peuvent rapidement devenir prohibitifs, on conseille de limiter le nombre de points de post-traitement à l'aide du mot clé `NB_POINT_FOND`.

7.4 Post-traitement sur plusieurs fonds de fissure

Dans les calculs X-FEM, plusieurs fonds de fissure peuvent être définis dans la même structure de données `fiss_xfem` (commande `DEFI_FISS_XFEM`). Chaque appel à un opérateur de post-traitement (`CALC_G` ou `POST_K1_K2_K3`) permet de calculer G et K pour un seul fond à la fois (opérande `NUME_FOND`). Or dans le cas d'une étude de propagation de fissures avec `PROPA_FISS` (voir §27), il faut disposer d'une seule table contenant les résultats sur tous les fonds de fissure. Cela est possible par appel aux opérateurs `CALC_G` ou `POST_K1_K2_K3` autant de fois que de fonds de fissure, puis par concaténation des tables en une seule table (voir cas-test `sslp318a`).

Remarque :

Si on veut rester en `PAR_LOT='OUI'`, cela nécessite de connaître à l'avance le nombre de fonds de fissure. Dans des cas de propagation complexe où le fond se subdivise en plusieurs fonds ou bien si les fonds se recombinent entre-eux, on ne peut pas connaître à l'avance le nombre de fonds, et il faut alors récupérer ce nombre dans la `sd_fiss_xfem` (en `PAR_LOT='NON'` avec la commande `RECU_TABLE`, cf. `ssnv192a`).

7.5 Propagation

Un calcul de propagation est basé sur trois ingrédients :

- un critère de propagation (donnant l'incrément d'avancée de la fissure),
- un critère de bifurcation (donnant l'angle de bifurcation),
- un algorithme de mise à jour de la fissure.

Pour qu'un calcul de propagation soit correct, il faut que ces trois ingrédients le soient aussi. Les deux premiers ingrédients sont communs aux fissures maillées ou non. Seul le troisième présente des spécificités propres au cadre X-FEM.

Critère de propagation

Usuellement, on utilise une loi de Paris dont les entrées sont des paramètres matériaux, les facteurs d'intensité des contraintes et le nombre de cycles à simuler. Il est donc nécessaire de connaître d'une part ces paramètres matériaux. De plus, la précision et la régularité des facteurs d'intensité des contraintes est un élément clé de la propagation. Une erreur faible (de l'ordre de 1 ou 2 % sur ΔK)

peut entraîner des différences importantes sur la durée de vie (figure 48 de [16]). Le nombre de cycles à simuler est normalement un paramètre libre. Cependant, un choix trop faible de ce nombre de cycles pouvait impliquer une propagation d'une longueur très inférieure à un élément. Il est donc plus commode, de piloter l'avancée non pas en nombres de cycles mais en incrément maximal d'avancée ('DA_MAX'). Il est recommandé de choisir une avancée maximale de 1 ou 2 éléments.

Critère de bifurcation

Une comparaison des plusieurs critères de bifurcation n'a pas encore été faite. Mais il semblerait qu'en 2D, tous les critères de bifurcation se valent, ce qui n'est pas le cas en 3d. Une thèse est en cours sur un modèle de propagation de fissure en fatigue en mode mixte avec le LMT Cachan et AREVA [17].

Algorithme de mise à jour de la fissure

Dans le cadre X-FEM, les fissures étant représentées par des level sets, la mise à jour de la fissure revient à la mise à jour (ou réactualisation) des level sets. L'opérateur `PROPA_FISS` propose 4 méthodes pour cela (cf. §9). Ces quatre méthodes n'ont pas de limite théorique d'utilisation, mais dans la pratique elles ne se valent pas toutes, et elles ont chacune des spécificités.

D'une manière générale, la méthode `UPWIND` nécessite que le maillage soit régulier. Si ce n'est pas le cas, il est impératif de créer une grille auxiliaire (régulière) et la définir dans `PROPA_FISS`. La méthode '`SIMPLEXE`' donne de meilleurs résultats sur des maillages libres que sur des maillages réglés. Si cela est possible, on privilégiera la méthode '`UPWIND`' à la méthode '`SIMPLEXE`'.

La méthode `GEOMETRIQUE` est une nouvelle méthode qui a été formulée et introduite dans `Code_Aster` récemment. Les premiers tests qui ont été faits ont montré que cette méthode est beaucoup plus performante et robuste que les trois autres et que son utilisation est très facile du point de vue de l'utilisateur: elle ne nécessite pas de grille auxiliaire, comme dans le cas de la méthode `UPWIND`, et utilise seulement le maillage de la structure, à la différence de la méthode `MAILLAGE`. Son utilisation est donc identique à celle des méthodes `SIMPLEXE` ou `UPWIND` sans grille auxiliaire mais elle est beaucoup plus stable et performante.

Remarque sur le choix de la zone de mise à jour (méthodes `UPWIND`, `SIMPLEXE`, et `GEOMETRIQUE`):

Le mot-clé `ZONE_MAJ='TORE'` et `RAYON_TORE` permettent de limiter la zone de mise à jour des level sets. Attention : dans les cas de fissures avec plusieurs fonds de fissure (par exemple dans le cas d'une fissure de type segment, en 2d, qui possède 2 fonds de fissure), il ne faut pas que le `tore` englobe les autres fonds de la fissure (même si ces autres fonds se trouvent « en dehors du maillage »). Il faut donc limiter la valeur de `RAYON_TORE` à une zone « proche » du fond de fissure.

En 2d :

Pour un maillage suffisamment fin, les 4 méthodes donnent des résultats très similaires, mais la méthode '`MAILLAGE`' est la plus rapide. On recommande donc d'utiliser en 2d la méthode '`MAILLAGE`'. On pourra se référer à [11] pour des exemples de propagation 2d avec la méthode '`MAILLAGE`' et à [15] pour des comparaisons entre les trois méthodes en 2d.

En 3d :

En propagation plane, une comparaison entre les trois méthodes pour la propagation 3d [18] a montré que les 4 méthodes donnent des résultats similaires sur une structure industrielle, mais que la méthode '`MAILLAGE`' semble la plus performante, suivie de près par la méthode '`UPWIND`'. Notons toutefois que la méthode '`UPWIND`' est plus délicate à mettre en place sur des maillages libres en raison de l'ajout d'une grille auxiliaire.

En propagation non-plane, une étude [19] a montré que la méthode '`MAILLAGE`' n'est plus totalement robuste lorsque la propagation devient vraiment non-plane. Dans ce cas, on conseille la méthode '`UPWIND`'.

On pourra aussi se référer à [12] pour des exemples de propagation 3d plane avec la méthode '`MAILLAGE`'.

Le cas-test sslv317a présente un cas de propagation hors-plane avec raffinement adaptatif suivant l'évolution du fond de fissure avec la méthode 'MAILLAGE'.

Remarque :

Il est aussi possible de mettre à jour les level sets sans passer par `PROPA_FISS` : en modifiant à chaque pas de propagation les caractéristiques de la fissure à forme imposée, dans `DEFI_FISS_XFEM` (similaire à la méthodologie PROFAT). Cette technique donnent des résultats satisfaisants [16], mais reste limitée aux cas de propagations planes, avec une fissure qui se propage en gardant la même forme (semi-elliptique par exemple).

En résumé :

- Pour la propagation 2d, 3d plane ou 3d quasi-plane, il vaut mieux utiliser la méthode **MAILLAGE** ;
- Pour la propagation 3d hors-plan, il vaut mieux utiliser la méthode **GEOMETRIQUE**
- La méthode **SIMPLEXE** va être résorbée
- La méthode **UPWIND** permet des comparaisons avec les autres codes internationaux.

	Robustesse en 2D mixte et 3D plan	Robustesse en 3D mixte	Facilité d'utilisation	Performances
MAILLAGE	++	—	++	+
SIMPLEXE	+	—	—	—
UPWIND	++	+	—	+
GEOMETRIQUE	++	++	—	++

7.6 Contact frottement

L'utilisation du contact-frottement avec la méthode X-FEM est présente dans le code à titre expérimental, et est l'objet de recherches. La prise en compte des termes de frottement n'est pas correcte dans le cas général. En particulier, seules les fissures de faible courbure donneront des résultats corrects.

Par ailleurs, la convergence de la méthode continue est loin d'être systématique. Dans l'état actuel, le choix du schéma d'intégration pour les termes de contact-frottement est un point crucial pour la convergence des simulations X-FEM. Les schémas conseillés sont les schémas contenant les nœuds de l'élément comme points d'intégrations (`INTEGRATION='NOEUD'`, `'SIMPSON'`, `'NCOTES'` sous le mot-clé `CONTACT`).

8 Conclusions

Ce document rassemble les éléments d'informations disponibles sur la méthode X-FEM dans *Code_Aster*. Les limites et les possibilités de X-FEM sont rappelées, et des exemples de mise en œuvre dans un cas sans puis avec contact sont présentés.

Dans le futur, ce document sera complété par :

- l'utilisation d'indicateurs d'erreur pour X-FEM,
- le post-traitement des termes de contact sur le modèle de visualisation.

9 Bibliographie

- [1] S. Geniaut, P. Massin, N. Moës, eXtended Finite Element Method, Documentation de Référence de *Code_Aster* n° [R7.02.12], 2007
- [2] S. Geniaut, Opérateur `DEFI_FISS_XFEM`, Documentation d'Utilisation de *Code_Aster* n° [U4.82.08], 2007
- [3] J. Pellet, Opérateur `CREA_CHAMP`, Documentation d'Utilisation de *Code_Aster* n° [U4.72.04], 2007
- [4] S. Geniaut, Opérateur `MODI_MODELE_XFEM`, Documentation d'Utilisation de *Code_Aster* n° [U4.41.11], 2007
- [5] S. Geniaut, Opérateur `POST_MAIL_XFEM`, Documentation d'Utilisation de *Code_Aster* n° [U4.82.21], 2007
- [6] S. Geniaut, Opérateur `POST_CHAM_XFEM`, Documentation d'Utilisation de *Code_Aster* n° [U4.82.22], 2007
- [7] S. Geniaut, Analyse avec X-FEM de nocivité d'un défaut en zone singulière des manchettes thermiques des tubulures d'aspersion des pressuriseurs CP0, Note H-T64-2007-02191-FR, 2007
- [8] E. Galenne, S. Geniaut, J. Rivière, Prestation DCNS : étude de la nocivité d'une fissure avec la méthode X-FEM, Note H-T64-2007-03094-FR, 2007
- [9] S. Geniaut, Utilisation des level sets pour le maillage adaptatif, CR-AMA-07.215, 2007
- [10] S. Geniaut, Convergences en mécanique de la rupture : validation des éléments finis classiques et X-FEM dans *Code_Aster*, Note H-T64-2008-00047-FR, 2008
- [11] S. Geniaut, E. Galenne, Méthodologie pour la propagation manuelle de fissure 2D avec X-FEM, CR-AMA-07.196, 2007
- [12] E. Galenne, Propagation automatique de fissures 3D avec X-FEM : méthode de projection, CR-AMA-08.269, 2008
- [13] I. Debost, G. Debruyne, Y. Wadier, Domaine d'application des opérateurs de mécanique de la rupture du *Code_Aster* et conseils d'utilisation, Documentation d'Utilisation de *Code_Aster* n° [U2.05.01], 2003.
- [14] E. Galenne, Calcul des facteurs d'intensité des contraintes et propagation de fissures en 3D, Rapport de stage de Dominique Joffin, CR-AMA-08.270, 2008
- [15] S. Geniaut, J. Messier, Validation d'un outil de propagation de fissures en 2d avec X-FEM sous *Code_Aster*, Rapport de stage de M. Fiabane, CR-AMA-09.172, 2009
- [16] S. Taheri, J. Cabirol, Propagation de fissure en 3D sous fatigue thermique, remaillage automatique et XFEM, CR-AMA-08.250, 2008
- [17] E. Galenne, Étude d'opportunité pour une thèse sur un modèle de propagation de fissure en fatigue en mode mixte avec le LMT Cachan et AREVA, CR-AMA-08.279, 2008
- [18] E. Galenne, Étude avec la méthode X-FEM de la propagation par fatigue de deux fissures dans un piquage sous pression, CR-AMA-09.183, 2009
- [19] S. Geniaut, Propagation de fissures 3d avec X-FEM sur un benchmark international - Rapport de stage de L. Chappé, CR-AMA-10.222, 2010