

UNIVERSITES PAUL CEZANNE, de PROVENCE, de la MEDITERRANEE  
UNIVERSITE du SUD TOULON-VAR  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE d'ARTS et METIERS

# **MASTER SIS**

*Sciences de l'Information et des Systèmes*

## **Étude Bibliographique et rapport de Stage de Recherche**

14 Juin 2007

*Ruding LOU*

**Sujet**

## **Modification de maillages et transfert d'informations sémantiques**

Stage de recherche effectué au Laboratoire: **LSIS – UMR CNRS 6168**

Dans l'équipe : **IMS - CER ENSAM Aix-en-Provence**

Sous la direction de : **Alexei MIKCHEVITCH** (EDF R&D)  
**Jean-Philippe PERNOT** (LSIS - IMS)



## **- Remerciements -**

En tout premier lieu, je tiens particulièrement à remercier Monsieur **Jean-philippe PERNOT**, directeur de ce stage :

- pour un étudiant qui touche à la première fois la recherche il m'a orienté avec patience et m'a aidé à surmonter toutes difficultés.
- pour un étudiant qui rencontre pour la première fois le maillage, il me l'a fait bien familiariser et m'a montré comment mieux vivre avec le maillage.
- pour un étudiant sans expérience dans le domaine de développement des logiciels de maillage, il m'a beaucoup aidé à me familiariser avec des pratiques de maquettage de logiciel de maillage.

Je remercie aussi Monsieur **Alexei MIKCHEVITCH** de EDF R&D, co-directeur de ce stage, pour avoir proposé ce sujet dû à des besoins industriels et m'avoir montré et le contexte et les problèmes industriels auxquels répond ce mémoire.

J'adresse mes remerciements à Monsieur **Philippe VÉRON** responsable de l'équipe IMS du laboratoire LSIS, pour m'avoir encouragé et orienté au niveau de la recherche.

Je remercie Mademoiselle **Minica PANCHETTI**, doctorante à l'équipe IMS, pour m'avoir expliqué et aidé avec patience, et gentillesse.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux et celles qui ont intervenu de près ou de loin à l'élaboration de ce travail. Enfin je remercie tous mes amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de la préparation de ce mémoire.

Par ailleurs, mes remerciements distingués vont à ma chère mère, pour son soutien inconditionnel que ce soit dans mes études ou dans ma vie quotidienne.



# Table des matières

<b>Table des matières</b>	5
<b>PARTIE A – Bibliographie</b>	7
<b>1. Introduction</b>	7
1.1. Volet « modification de maillages » au travers de problèmes rencontrés chez EDF R&D	7
1.2. Volet « maintien et transfert d'informations sémantiques »	12
<b>2. Etat de l'art des approches existantes</b>	14
2.1. Construction, simplification, subdivision et sémantique des maillages	14
2.1.1. Notion de maillage	14
2.1.2. Construction de maillages	14
2.1.3. Modification de maillages par simplification et subdivision	15
2.1.4. Description sémantique des objets	17
2.2. Fusion de maillage	19
2.2.1. Identification et remaillage d'interfaces dans un assemblage de polyèdres	19
2.2.2. Fusion de maillages par lissage des sections topologiquement sur des sections incompatibles	23
2.2.3. Raccord entre maillages à l'aide d'une sphère	25
2.3. Opérations booléennes sur les maillages	26
2.3.1. Algorithme booléen topologiquement robuste	26
2.3.2. Deux algorithmes d'intersection de surfaces de subdivision :	27
2.3.3. Procédures automatiques pour des opérations booléennes sur des maillages éléments finis	27
<b>3. Conclusion</b>	29
<b>PARTIE B – Travail de Recherche</b>	31
<b>1. Objectifs et organisation de travail de développement</b>	31
<b>2. Bibliographie complémentaire</b>	32
<b>3. Approche globale d'assemblage des maillages 2D mise en œuvre</b>	34
3.1 Mode d'assemblage de type « face / arête »	35
3.2 Mode d'assemblage de type « face / face »	36
3.3 Transfert d'informations sémantiques	36
<b>4. Détail des méthodes et algorithmes développés</b>	37

<b>4.1</b>	<b><i>Méthode de détection de faces en contact</i></b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b><i>Méthode de calcul de l'intersection entre deux mailles</i></b>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b><i>Calcul de toutes les intersections entre faces</i></b>	<b>38</b>
<b>4.4</b>	<b><i>Construction de la ligne d'intersection</i></b>	<b>39</b>
4.4.1	Cas de mono ligne	40
4.4.2	Cas de multi ligne	42
<b>4.5</b>	<b><i>Optimisation de la ligne d'intersection</i></b>	<b>44</b>
4.5.1	Approche générale	44
4.5.2	Tests complémentaires et cas particuliers	45
<b>4.6</b>	<b><i>Nettoyage de la zone en contact</i></b>	<b>46</b>
4.6.1	Suppression des faces selon le principe de $n$ -voisinage	46
4.6.2	Stockage des arêtes de contour du trou	47
<b>4.7</b>	<b><i>Remaillage</i></b>	<b>48</b>
<b>4.8</b>	<b><i>Optimisation de maillage de zone d'intersection par insertion de nœuds</i></b>	<b>50</b>
<b>4.9</b>	<b><i>Transfert d'informations sémantiques</i></b>	<b>52</b>
<b>5.</b>	<b>Résultats</b>	<b>53</b>
5.1	<i>Mode Face/Arête</i>	53
5.2	<i>Mode Face/Face</i>	53
<b>6.</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>55</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>56</b>

# PARTIE A – Bibliographie

## 1. Introduction

Le sujet de Master de Recherche proposé s'inscrit directement dans le cadre d'un contrat de recherche entre le laboratoire LSIS-IMS et le Centre de Recherche et Développement du Groupe EDF situé à Clamart. Il s'agit de répondre à quelques besoins des services d'ingénierie opérationnelle du département Analyses Mécaniques et Acoustique (AMA) d'EDF R&D en terme de manipulation des maillages lors des phases d'évaluation des solutions envisagées et/ou d'optimisation d'un modèle numérique. Ce sujet fait partie du lot « Chirurgie des maillages » du projet « Visualisation 3D pour scientifique » piloté par le département Simulation en Neutronique, Technologie de l'Information et Calcul Scientifique (SINETICS) d'EDF R&D. Les travaux de développement de ce lot s'effectuent en collaboration d'AMA.

En se basant sur quelques exemples industriels fournis par le département AMA d'EDF R&D, le contexte du présent travail de Master ainsi que les objectifs fixés seront présentés dans les sections qui suivent.

### 1.1. Volet « modification de maillages » au travers de problèmes rencontrés chez EDF R&D

Les équipes d'ingénierie d'étude du département AMA traitent essentiellement des problèmes de maintenance / durée de vie des installations exploitées par EDF. Les problèmes à résoudre, auxquels les équipes d'étude d'AMA sont souvent amenées, sont de nature différente :

- les expertises vibratoires du matériel,
- les études opérationnelles de la tenue mécanique des installations diverses,
- les études de durée de vie / vieillissement du matériel,
- les contres-expertises vis-à-vis des constructeurs ou sous-traitants,
- le prototypage/évaluation des solutions adaptées aux sites de production d'EDF,
- etc.

L'exemple concret d'une des études opérationnelles réalisée dernièrement par une des équipes d'ingénierie d'étude d'AMA représente l'expertise d'une installation soumise à un niveau vibratoire élevé. Il s'agissait d'un système de fixation des bornes (traversées récupérant l'électricité) d'un caisson dont le niveau vibratoire élevé peut provoquer l'endommagement de ce système.

Afin de répondre à ce problème de site de production, une équipe d'ingénieurs essais et étude a été mobilisée. Une des contraintes de cette expertise était le temps d'étude extrêmement court. L'équipe d'ingénieurs devait expertiser expérimentalement et numériquement la situation, identifier la source du problème ainsi que proposer une solution adaptée compte tenu des contraintes de coûts et de délais. La phase de proposition de solution consiste à prototyper numériquement des solutions envisageables et les évaluer/optimiser suivant des

différents critères techniques (faisabilité, coût et temps de mise en œuvre, maintenance, etc.) dans les plus brefs délais afin de pouvoir relancer le plus rapidement possible la production.

La figure 1 présente le modèle CAO d'une partie du caisson en question et le maillage associé développés par le département AMA pour cette étude. On voit une partie massive de la borne modélisée en 3D et rattachée à la paroi du caisson à l'aide d'un système de raidisseurs.

La partie numérique de l'étude, pratiquée généralement à EDF, comprend différentes étapes :

- le développement et la mise au point de modèle CAO (fig. 1a),
- la création du maillage complexe (fig. 1b) adapté au calcul éléments finis (EF) : maillage suivant des différents critères (modélisation mécanique, contraintes de calcul numérique, qualité du maillage), génération des informations sémantiques diverses pour des fins de calcul EF,
- le calcul EF réalisé avec un solveur EF. Les services d'ingénierie d'EDF utilisent le logiciel *Code ASTER* ([www.code-aster.org](http://www.code-aster.org)), code EF libre développé par EDF R&D pour les études numériques avancées et reconnu par l'Autorité Nationale de Sécurité. La phase de calcul EF peut comprendre le recalage du modèle EF à partir des résultats expérimentaux (mesure de déplacements ou de contraintes, mesure de niveau vibratoire avec l'identification des fréquences propres, etc.). Pour la présente étude, le modèle EF d'EDF a été recalé à partir des données expérimentales,
- l'optimisation du modèle EF nécessitant des retours à la CAO, au maillage, à des paramètres du modèle EF,
- la proposition et le prototypage numérique des solutions possibles afin d'améliorer le comportement mécanique de la structure. Le choix des solutions envisageables, proposées par les unités d'ingénierie d'EDF, est généralement fait en concertation avec le site de production concerné.

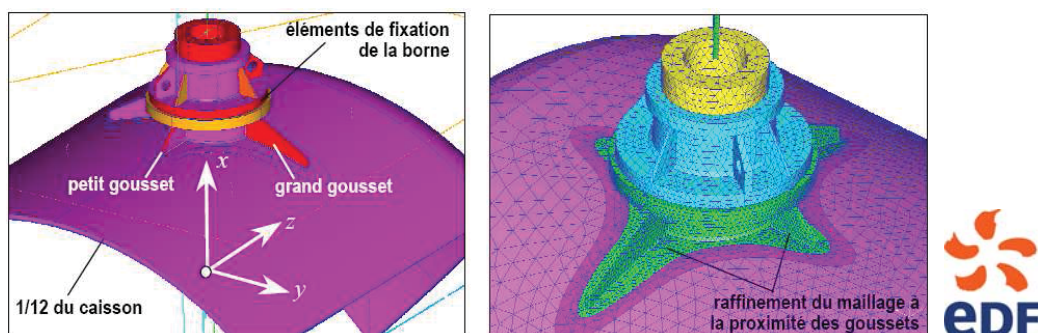


Figure 1 : Modèle CAO et maillage d'EDF R&D pour l'analyse de la tenue mécanique d'un élément du système de fixation du caisson (courtoisie EDF R&D)

Par retour d'expérience sur site EDF, l'analyse réalisée a permis de conclure que c'est la conception des raidisseurs (goussets) qui conduit, lors de l'exploitation, à la concentration de contraintes mécaniques dans un gousset.

Les ingénieurs du département AMA d'EDF R&D ont alors proposé et testé une solution technologiquement convenable pour le site : l'incision des goussets (fig. 2) permettant de « libérer » la borne et donc, d'éviter le problème d'endommagement de la structure.

La mise en place et l'évaluation numérique de solution sur la figure 2 représente la modification structurale à apporter au prototype numérique et nécessite le retour à la géométrie. La mise en place des modifications structurales passe classiquement par retour à la



CAO avec ses modifications et mise à jour suivies de remaillage et de ré-affectation des conditions limites en terme d'efforts/déplacements.

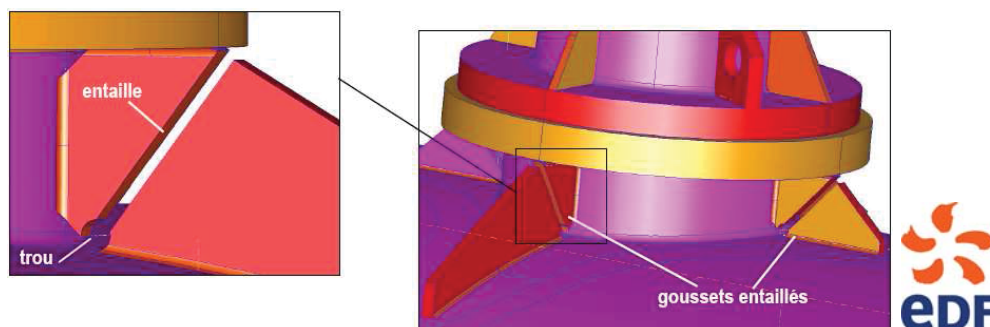


Figure 2 : Modèle CAO d'EDF R&D avec la solution retenue (courtoisie EDF R&D)

La particularité des études EF réalisées avec Code\_Aster consiste à définir des entités de maillage spécifiques permettant d'affecter les conditions aux limites de différente nature, d'affecter des caractéristiques géométriques ou mécaniques diverses (caractéristiques de la section, lois de comportement, raideurs,...) aux différentes parties du modèle, de modéliser des phénomènes complexes (fissuration, contact,...). Ces entités sont des groupes de mailles (éléments) et de nœuds et forment les informations sémantiques nécessaires pour les fins de calcul EF. En fonction de la complexité du modèle ou de problème à résoudre, les modèles EF d'EDF peuvent contenir des centaines de groupes de maillage. Le processus de génération de ces données sémantiques est très laborieux et nécessite des connaissances particulières de logiciel de CAO/maillage. Il est évident que la régénération des toutes ces informations représente un grand nombre de manipulations, ce qui augmente considérablement le temps de mise en place des modifications structurales souhaitées. Le temps d'évaluation des solutions élevé accroît le temps d'étude, facteur important dans le contexte des études opérationnelles visant à répondre rapidement aux besoins des sites de production.

La figure 3a illustre l'aspect de mise en place des modifications des modèles numériques par retour à la géométrie. Il s'agit d'un exemple simple de prototype numérique modélisé par un cube 3D pour lequel le concepteur souhaite vérifier l'impact de la réalisation de différents types de perçages sur le comportement mécanique de la structure. Pour ce faire, plusieurs modèles CAO ont été créés et maillés pour le calcul des déplacements et des contraintes de la structure par méthode EF. On s'aperçoit dans cet exemple que l'état de contrainte se diffère en fonction de la géométrie et la position des trous réalisés dans la structure.

Le processus de réalisation des modifications sur les modèles numériques basée sur les allers-retours au niveau de CAO-Maillage-Calcul est, par ailleurs, très répandu dans d'autres entreprises de haute technologie (Airbus, Boeing, Renault, PSA,...). Il convient de remarquer que les outils commerciaux de CAO/CFAO présents actuellement sur le marché (Catia, IDEAS, Pro/Engineer,...) fonctionnent sur le même principe et ne proposent pas véritablement de solutions permettant de réduire le nombre d'étapes consacrées à la préparation des modèles numériques pour le calcul tout en assurant la qualité de l'étude. Or, une des limites principales de cette façon de procéder réside dans le fait que beaucoup de temps est actuellement consacré à l'étape de préparation des modèles complexes adaptés au calcul EF.

Cela n'est pas toujours convenable pour des projets d'EDF à court terme, projets nécessitant des études opérationnelles fiables et rapides afin de répondre efficacement aux problèmes survenus sur le terrain. Le contexte de maintenance, dans lequel la plupart des études opérationnelles d'EDF s'inscrivent, est particulier par rapport au contexte de développement

d'un nouveau produit. Dans la plupart des cas des installations des sites de production, EDF n'intervient qu'en tant qu'exploitant et pas concepteur. Les solutions, améliorant le comportement mécanique des installations et proposées par les services d'ingénierie d'EDF, sont souvent mineures et ne représentent que les modifications locales éventuellement à apporter au matériel. En terme de prototypage de ces solutions, comme le montre l'exemple concret sur la figure 1, les modifications structurales à apporter sont généralement de nature locale, et leur mise en place ne « perturbe » généralement pas la géométrie de l'ensemble du modèle. Il paraît donc peu efficace la régénération complète du maillage à géométrie complexe avec de nouveau la création laborieuse de l'ensemble des informations sémantiques, alors que seule une zone localisée du modèle différerait effectivement du maillage initial.

L'analyse de ce premier exemple montre que des fonctionnalités logicielles en terme de manipulation/ modification rapide des maillages permettraient d'accélérer les études opérationnelles à forte contrainte de temps et fiabilité d'expertise. Le lot « Chirurgie des maillages » du projet « Visualisation 3D pour scientifique » initié par le département SINETICS d'EDF R&D vise à répondre à la problématique de manipulation efficace des maillages. Plus précisément, l'idée développée dans ce présent mémoire est de **proposer un certain nombre d'opérateurs permettant de réaliser des opérations de modification rapide des maillages sous contraintes de qualité et de transfert d'informations sémantiques**. A terme, il s'agit de supprimer les étapes de modification de la CAO, de remaillage et de préparation du modèle complexe aux calculs spécifiques EF afin d'apporter les modifications souhaitées directement au maillage initial et donc, gagner en terme de temps d'étude. La figure 3.b résume cette approche. Les opérations de modification sur la CAO ont été remplacées par des opérations équivalentes sur le maillage.

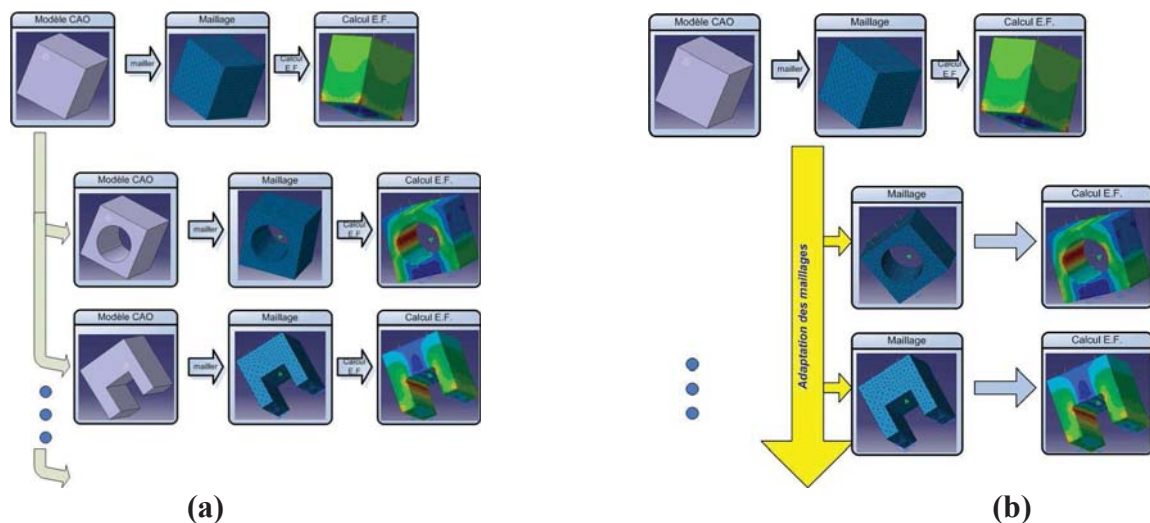


Figure 3. Différentes voies de mise en place des modifications :

(a) modification par la voie classique (retour à la CAO)

(b) modification apportée directement au maillage (approche proposée)

Les modifications envisagées peuvent aussi bien concerner la **topologie de l'objet** (ajout ou suppression de matière) que **les paramètres de la forme** de modification (taille des trous percés, largeur d'une rainure, arrondi le long d'une arête vive, déformation locale d'une zone sous contrainte géométrique, etc.). Certains de ces besoins industriels sont illustrés sur l'exemple d'un autre modèle d'EDF R&D (fig. 4). Il s'agit d'un maillage « mort » (modèle recalé sur un calcul dynamique) obtenu à partir de la discrétisation d'un modèle CAO d'un stator de l'alternateur EDF. Etant donné la taille et la complexité du modèle, la modélisation d'un certain nombre d'éléments de transmission engendre le phénomène de concentration de

contraintes (fig. 4). Pour pallier ce problème, il faudrait ici effectuer des rayons de raccord pour éviter les discontinuités dans la définition des éléments de transmission du modèle CAO. A l'heure actuelle, ces petites modifications répétitives seraient faites sur la CAO, ce qui entraîne le remaillage complet de toute la structure (maillage libre et réglé avec des spécificités) ainsi que la régénération de l'ensemble des informations sémantiques associées (une centaine de groupes dans ce cas précis). Pour traiter ce type de problème, on peut envisager des opérateurs de déformation directe de maillage afin de réaliser les congés de raccordement et les propager sur l'ensemble des éléments concernés (environ 700 congés à faire dans cet exemple).

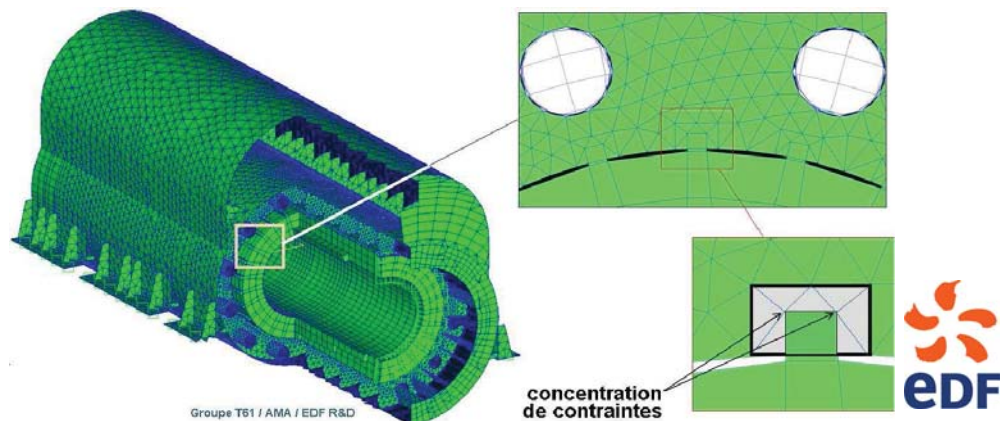


Figure 4 : Problème de réalisation répétitive des congés sur le maillage « mort » de grande taille (modèle d'un stator de l'alternateur développé par EDF R&D, courtoisie EDF R&D)

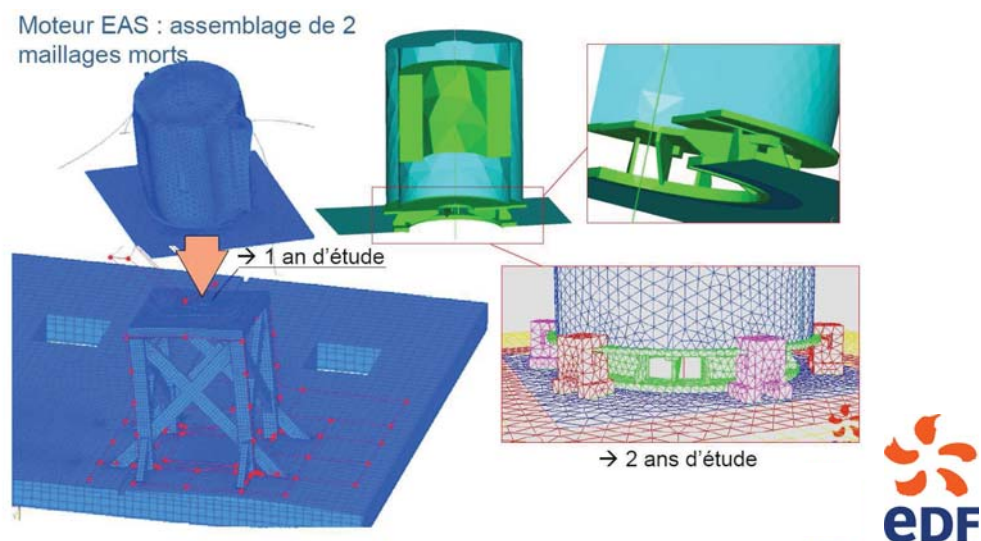


Figure 5 : Problème de fusion de des maillage « mort » de grande taille (modèles d'un moteur et d'un blanc d'essai développés par EDF R&D, courtoisie EDF R&D)

L'exemple sur la fig. 5 illustre le problème d'assemblage de deux maillages 3D « morts ». Dans cet exemple, la problématique consiste à fusionner proprement ces deux maillages en modes suivants : 3D posé sur 3D et 2D posé sur 3D. Il n'en reste pas moins qu'il s'agit là encore d'une « opération de base » à réaliser sur les maillages. Ces opérations prennent aujourd'hui encore beaucoup de temps, car elles sont souvent réalisées par retour à la CAO.

Enfin, la figure 6 montre un exemple de mise en place d'une modification structurale visant à rigidifier la structure. Dans ce cas, le raidisseur central en forme de poutre parallélépipédique

a été maillé et rajouté au maillage réglé initial de la structure globale sans assurer des critères de qualité de résultat de la fusion de deux maillages. En terme de manipulation de maillages, il s'agirait là encore de pouvoir fusionner deux maillages distincts en considérant particulièrement la zone de contact commune aux deux maillages (critères de qualité de maillage de zone de contact).

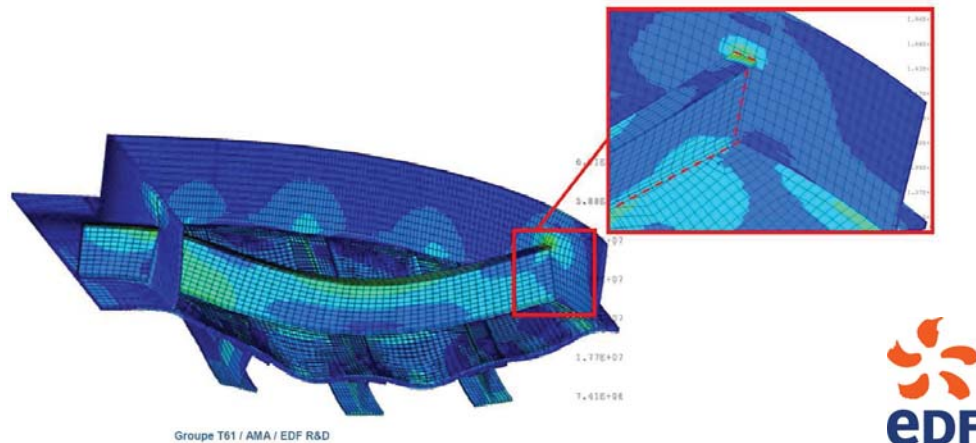


Figure 6 : Exemple de problème de connexion de deux maillages « morts » (modèles développés par EDF R&D) : ajout de raidisseur au maillage de caisson (courtoisie EDF R&D)

## 1.2. Volet « maintien et transfert d'informations sémantiques »

Lorsque l'on parle de sémantique au niveau des calculs Eléments Finis, deux aspects peuvent être distingués :

- le premier concerne les informations permettant d'identifier les différentes zones du maillage en définissant des groupes de nœuds et de faces pour supporter des informations du genre « ceci est un cylindre, ceci est un trou répété huit fois, etc... ». Il s'agit là de donner du sens à des zones du modèles géométriques pour que celles-ci ne soient plus considérées comme des ensembles de triangles mais comme des formes ayant du sens au niveau de la conception. Ce niveau de définition sémantique est à rapprocher du concept de « features » largement utilisés aujourd'hui pour définir les formes d'un objet.
- le second concerne les informations mécaniques que ces groupes de nœuds et de faces peuvent porter. Il s'agit par exemple d'efforts ou de pressions répartis sur des zones de l'objet. Ces informations permettent également de donner un sens mécanique à un modèle géométrique qui en était initialement dépourvu.

Dans le contexte du précédent volet relatif aux « modifications de maillages », les aspects liés au « maintien et au transfert de la sémantique » attachée aux différentes parties des maillages sont des points cruciaux. Il ne s'agit effectivement pas de gagner beaucoup de temps au niveau des modifications de maillage si c'est pour le reperdre lors de la mise à jour des conditions limites (efforts + déplacements imposés). Le maintien de la sémantique peut se décliner sous différents points :

- maintien de la notion de groupes de nœuds/faces lors des opérations de modifications structurales ou de déformation ;
- maintien de la sémantique (efforts, pressions, déplacements) qui est attachée aux différents groupes ainsi identifiés.

Dans le cadre d'études numériques avec Code\_ASTER pratiquées au sein des services d'ingénierie d'EDF, la problématique liée au maintien et au transfert d'informations sémantiques peut être formulée de façon suivante :



- le maintien d'informations sémantiques qui sont des groupes de mailles et de nœuds (listes des entités de maillage). Ces groupes permettent lors du calcul EF avec Code\_ASTER :
  - d'appliquer les conditions aux limites de nature différente,
  - d'affecter des caractéristiques géométriques et/ou mécaniques particulières,
  - de modéliser des phénomènes mécaniques complexes.
- le transfert d'informations sémantiques. Ce transfert se traduit par la mise à jour des groupes de mailles et de nœuds modifiés au cours des opérations de manipulation de maillages :
  - la recherche et l'élimination des entités de maillage supprimées dans les groupes,
  - l'ajout de nouvelles entités de maillage créées aux groupes,
  - éventuellement, la propagation d'informations sémantiques répétées.

Au niveau du transfert de sémantique, il s'agit d'aller plus loin en proposant un certain nombre d'opérateurs permettant de transférer ou d'étendre à de nouveaux groupes des informations sémantiques contenus dans des groupes voisins. L'exemple de la figure 7 illustre parfaitement cet aspect. Les figures du haut montrent comment la notion de trou pourrait être automatiquement étendue lors de l'ajout d'un raidisseur. Effectivement, si ces évidements servent principalement à alléger la structure, pourquoi ne pourrait-on pas propager cette information pour que toute nouvelle entité puisse en hériter. De même les figures du bas montrent comment une pression interne à cette cuve pourrait être propagée sur les faces du raidisseur rajouté.

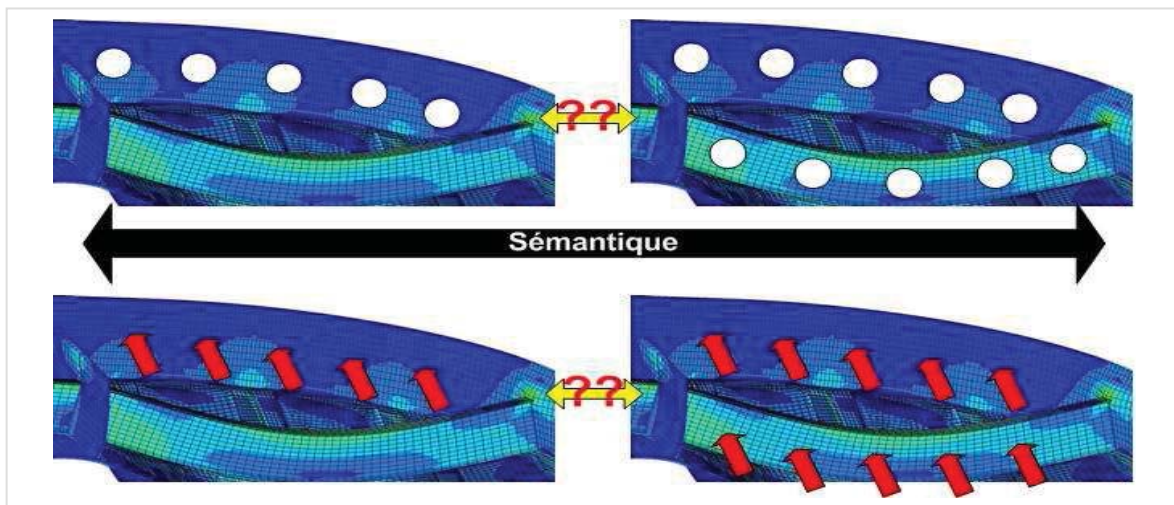


Figure 7 : Transfert de sémantique lors de l'ajout d'un raidisseur

"En conclusion, un certain nombre de besoins des équipes d'ingénierie opérationnelle du département AMA d'EDF R&D en terme de manipulation des maillages seront traités dans ce travail de Master Recherche. Notamment, les aspects d'assemblage des maillages 2D et de transfert d'informations sémantiques seront considérés sous trois angles suivants :

- l'aspect modification de maillages pour la fusion de deux maillages triangulaire conformes en contact. Il s'agira là de proposer et d'implémenter un certain nombre d'algorithmes permettant de répondre à ce besoin. Les tests seront réalisés sur les exemples fournis par EDF R&D.
- l'aspect maintien de la notion de groupes de nœuds/mailles lors de cette opération de fusion.
- la mise à jour des informations liées aux maillages fusionnés.

## 2. Etat de l'art des approches existantes

L'état de l'art proposé dans cette section regroupe en sous-sections un certain nombre de travaux en relation avec mon sujet de Master Recherche, comme défini ci-dessus. La section 2.1 introduit les principaux algorithmes pour la construction, la simplification, la subdivision et la sémantique des maillages. La section 2.2. rassemble les résultats de l'analyse des techniques de fusion de maillages alors que la section 2.3 contient les résultats de l'analyse des techniques à base d'opérations booléennes entre maillages.

### 2.1. Construction, simplification, subdivision et sémantique des maillages

#### 2.1.1. Notion de maillage

Le maillage est la discrétisation d'un domaine  $R^n$ . Autrement dit, si  $\Omega$  est un domaine fermé borné de  $R^n$ , alors  $M$  est un maillage si :

- $\Omega = \bigcup_{K \in M} K_i$  où  $K_i$  est un élément de  $M$ ;
- Tout élément  $K_i$  de  $M$  est à l'intérieur du domaine  $M$  et représente un sous-domaine non vide ;
- L'intersection des intérieurs de deux éléments est vide ;
- L'intersection de deux éléments de  $M$  est soit l'ensemble vide, soit un élément de dimension strictement inférieure.

Un maillage est donc un ensemble d'éléments, appelés parfois « mailles », dont la dimension dépend du domaine à mailler et de l'espace dans lequel se trouve ce domaine. Différents types de maillages couramment rencontrés peuvent ainsi être identifiés :

<b>Maillage linéique</b> (dim. 1)	Eléments de base : <b>segments</b> ;
<b>Surfacique</b> (dim. 2)	Eléments de base : <b>triangles, quadrangles...</b>
<b>Volumique</b> (dim. 3)	Eléments de base : <b>cubes, tétraèdres, hexaèdres...</b>

#### 2.1.2. Construction de maillages

Il existe trois grandes familles de méthodes produisant des triangles et des tétraèdres: les méthodes de type « Delaunay », les méthodes par propagation de fronts et les méthodes par décomposition spatiale.

D'après l'article [DEL01], le critère de Delaunay, dit aussi de la sphère vide, est satisfait pour un couple de triangles si aucun nœud d'un élément n'est contenu dans l'intérieur du cercle circonscrit à l'autre élément. La figure 8.a montre un exemple pour lequel ce critère est satisfait alors que la 8.b montre un exemple pour lequel il ne l'est pas. Delaunay montre également que si ce critère est satisfait pour tout couple d'éléments adjacents, alors il est vérifié pour toute la triangulation. Ainsi, la triangulation obtenue est celle pour laquelle les triangles sont les plus équilatéraux possibles, ce qui est très important pour les calculs EF. En visualisation, ce critère est moins important et les triangles peuvent avoir des formes « aplaties ».

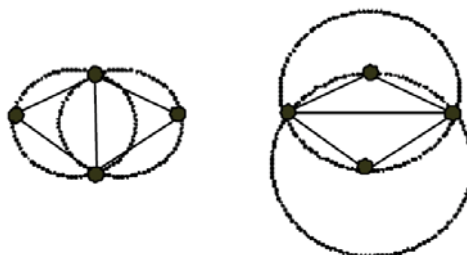


Figure 8 : Critère de la sphère vide

L'article [LOH01] présente une méthode de maillage frontal à partir d'un front initial correspondant à la frontière de la zone à mailler. Cette frontière correspond donc à un polygone pour un maillage surfacique et à un maillage triangulaire fermé pour un maillage volumique. Un segment (resp. une face en 3D) y est choisi afin de former le prochain élément à ajouter au maillage. On calcule ensuite le point qui permettrait de construire un élément idéal à partir du segment (resp. de la face) choisi(e). Dans le cas le plus simple, cet élément idéal est un triangle équilatéral (resp. tétraèdre régulier), mais sa forme peut varier selon les besoins (maillage isotrope contrôlé ou anisotrope). Si des sommets du front appartiennent au voisinage de ce point, alors ils sont utilisés pour former des éléments « candidats » qui sont ensuite comparés entre eux au regard de certains critères. Le meilleur élément qui ne coupe pas le front est choisi et est ajouté au maillage. S'il n'y en a pas ou si aucun ne convient, l'élément idéal est alors ajouté au maillage. Si ce dernier ne convient pas, une méthode doit être appliquée pour forcer la création d'un élément « idéal », en réduisant sa taille par exemple en fonction du nombre de tentatives.

Les premiers travaux basés sur une décomposition de l'espace sont issus du domaine de la visualisation d'objets représentés sous leur forme implicite. L'espace est découpé récursivement en cubes jusqu'à une taille limite donnée. Chaque cube fait l'objet d'un calcul d'intersection avec la surface. A partir des points d'intersection des arêtes du cube avec la surface, un polygone est construit approchant localement la surface. Les polygones sont triangulés et assemblés formant ainsi un maillage fermé de la surface frontière de l'objet.

### 2.1.3. Modification de maillages par simplification et subdivision

Deux grandes activités permettent de modifier un maillage en réduisant ou en accroissant le nombre d'éléments. Il s'agit de la simplification et de la subdivision de maillage. Ces deux activités sont réciproques entre elles. La figure 9 montre l'impact de la simplification et de la subdivision sur des maillages. La simplification est utilisée en ingénierie inverse (reverse engineering) pour réduire la taille de modèles acquis à l'aide de scanner haute définition. Il s'agit alors de réduire le nombre d'éléments en conservant la forme générale du modèle. Ceci permet, par exemple, de réduire les temps de calcul en EF ou le temps d'affichage du modèle. A l'inverse, la subdivision consiste à enrichir le modèle. Ce type de représentation est de plus en plus utilisée dans les modeleurs CAO pour permettre la création de formes gauches complexes de façon très rapide mais malheureusement encore trop peu intuitive (faible jeu de contraintes dans le module « Imagine & Shape » de Catia V5).

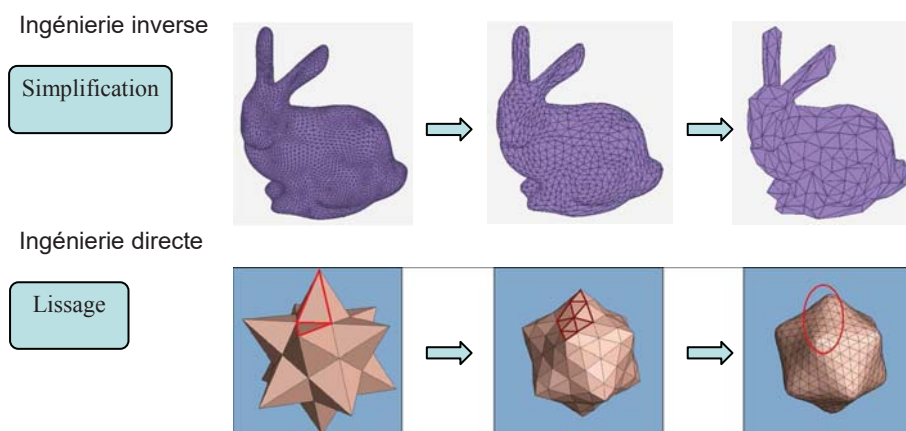


Figure 9 : la simplification et la subdivision

Beaucoup de travaux ont été effectués dans le domaine de simplification de modèles polyédriques. La thèse de [VER 01] porte sur la simplification de modèles polyédriques à

l'aide d'un critère géométrique basé sur le maintien du polyèdre à l'intérieur d'une carte de taille durant les différentes étapes de simplification (fig. 10.b). Cette carte est construite manuellement. Elle se compose d'un ensemble de sphères dont le rayon permet de contrôler le taux de décimation. Les sommets du polyèdre sont tout d'abord ordonnancés par rapport à un critère donné (longueur d'arêtes, courbures discrètes...). Pour chacun des sommets pris successivement, on effectue la suppression du sommet et de ses triangles adjacents. On remaille le trou ainsi formé à l'aide d'un critère de remillage local (équilateralité, courbure discrète...) et on teste si le polyèdre résultant de cette simplification intersecte bien la carte de taille. Si oui, le nœud est effectivement supprimé et l'algorithme continue avec les autres nœuds, sinon le nœud ainsi que les triangles supprimés sont rétablis. Ce critère de simplification permet d'éviter les problèmes d'auto-intersection lors de l'utilisation d'un critère d'enveloppe basé sur deux polyèdres parallèles au polyèdre initial (fig. 10.a).

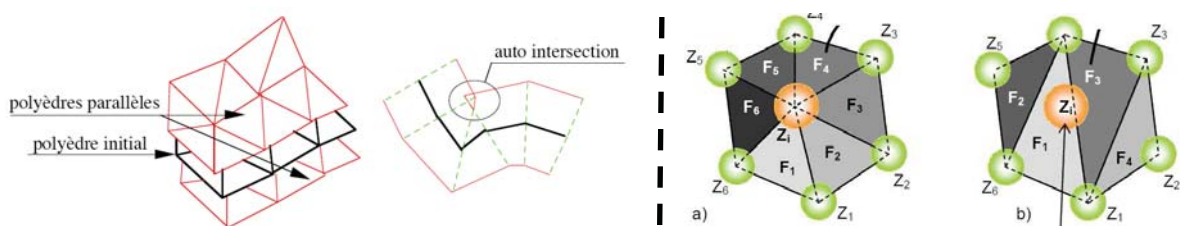


Figure 10 : contrôle d'erreurs à l'aide de polyèdres parallèles (a) ou de sphères d'erreur (b)

Concernant la définition de ces tolérances, les travaux récents de [MIN01] présentent une approche d'extraction de lignes caractéristiques à préserver durant la décimation. L'auteur utilise des techniques de traitement d'image pour extraire les contours importants d'objet, puis elle définit les zones de tolérance à partir de ces lignes de caractère. La partie gauche de la figure 11 montre le schéma de détection des lignes caractéristiques sur le modèle polyédrique. La partie droite montre qu'après simplification les lignes de caractère sont moins simplifiées que le reste du modèle polyédrique.

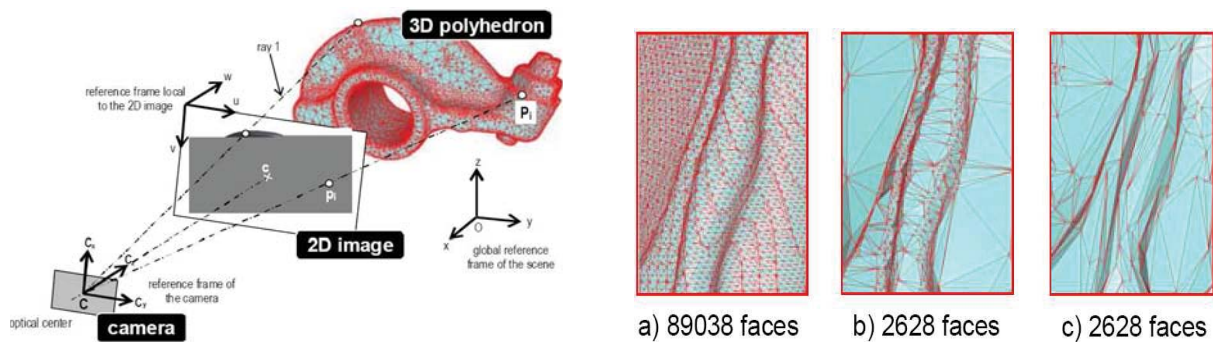


Figure 11 : Simplification pertinente en préservant la forme de pièce.

Côté subdivision de surface, beaucoup de schéma ont été proposés. Les plus connus sont certainement ceux de Loop et de Catmull-Clark. La figure 12 présente les masques utilisés pour positionner les nouveaux sommets à l'aide de l'algorithme de Loop. Les trois images en bas de la figure 9 montrent que les surfaces sont lissées en subdivisant les polyèdres.

Concernant le présent travail de Master Recherche, l'objectif étant de modifier des maillages en les fusionnant ou en y effectuant des opérations booléennes. Les travaux traitant spécifiquement de ces deux catégories d'approches seront présentés séparément. Les



techniques permettent d'ajouter un niveau sémantique aux modèles géométriques seront d'abord discutées.

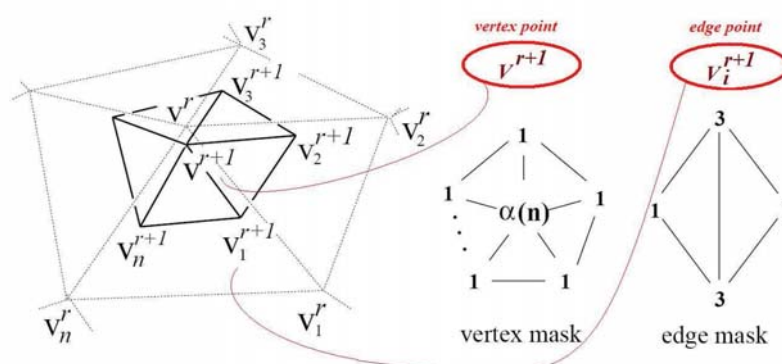


Figure 12 : Les masques de la subdivision de Loop

#### 2.1.4. Description sémantique des objets

La description sémantique d'un objet ne se limite pas aux aspects purement géométrique mais permet d'associer un niveau de connaissance. Ces connaissances peuvent être intrinsèques ou fonctionnelles. Elles sont largement étudiées dans le domaine de l'architecture d'édifices et de la conservation du patrimoine. Dans ce domaine, la représentation géométrique du modèle architectural est aussi importante que les connaissances portées par les modèles de patrimoine. La thèse de [LIV01] présente une approche de multi-représentations du patrimoine architectural. L'objectif d'une représentation en architecture est de conduire une lecture sémantique de données relevées au travers d'une interprétation géométrique de la forme qu'elles décrivent. Cela veut dire que pour être conforme aux objectifs d'une représentation architecturale, le processus de restitution tridimensionnel d'une réalité observée doit nécessairement faire référence à un univers de connaissance. Elle propose un processus de structuration de la maquette qui permet d'organiser les représentations multiples autour d'un modèle de description sémantique de l'édifice : découpage morphologique de la géométrie de l'objet en fonction d'un point de vue ; structuration hiérarchique des éléments qui composent l'ensemble en fonction d'une description sémantique. La description sémantique est définie par une structure de concepts organisés autour de la description géométrique. Les nœuds de la description sémantique sont reliés d'un côté à un terme architectural et de l'autre ils regroupent les éléments de la description géométrique dans une structure hiérarchique : atomes/moulure/parties du profil/profil.

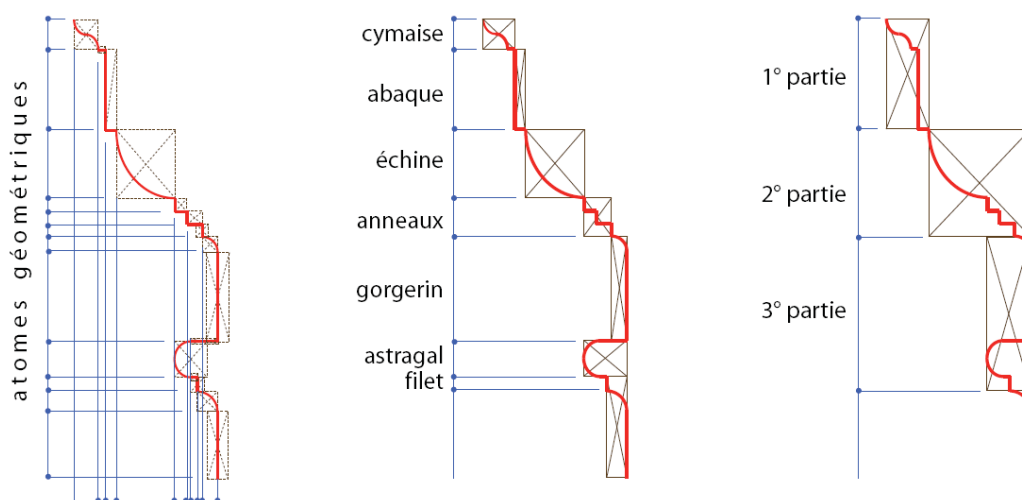
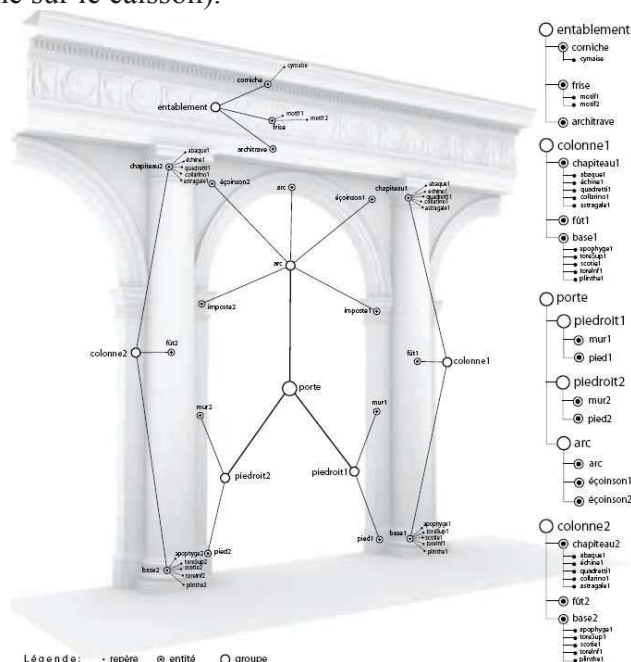


Figure 13 : Description sémantique d'un chapiteau de monument

Pour ce qui est de mon sujet de master recherche, nous pourrions très bien stocker les sémantiques des pièces de façon similaire. Lorsque nous faisons une modification sur un modèle EF, nous pourrions récupérer sa sémantique d'origine et la transférer au niveau de la modification. En s'appuyant sur l'exemple de la figure 14, nous pourrions stocker la sémantique attachée au produit comme les efforts appliqués ou les caractéristiques de formes particulières (trous). Une fois le raidisseur ajouté sur le caisson, on pourra extraire la sémantique du caisson et la transférer sur le raidisseur en fonction des paramètres utilisateur (utilisateur qui détermine si le raidisseur subit également les efforts et s'il faut faire des trous sur le raidisseur comme sur le caisson).



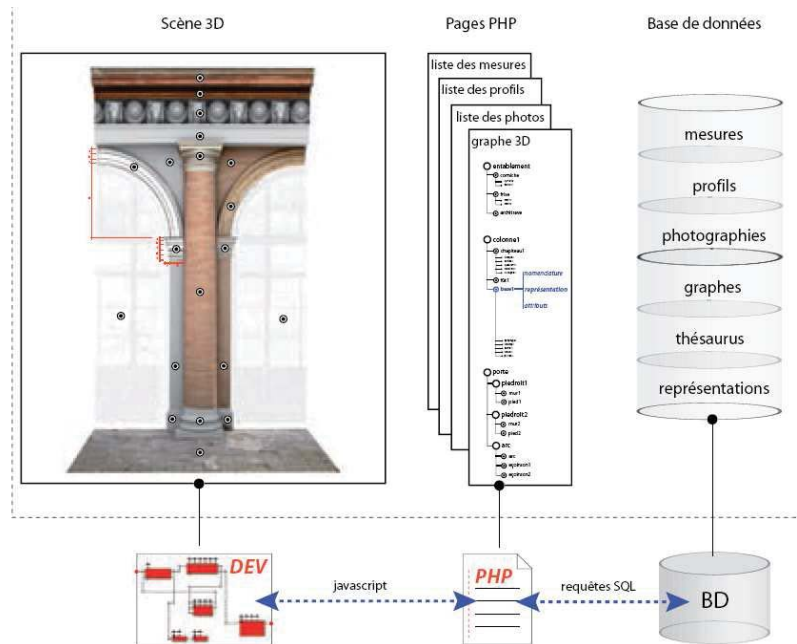


Figure 15 : Architecture de système de stockage et d'interrogation de sémantiques

## 2.2. Fusion de maillage

### 2.2.1. Identification et remaillage d'interfaces dans un assemblage de polyèdres

L'article [CHOU01] porte sur l'identification et le remaillage d'interfaces de contact entre des modèles polyédriques assemblés. L'approche proposée permet de vérifier et de maintenir une structure globale du modèle d'assemblage et ceci pour assurer la fiabilité des futurs traitements. Le schéma des différentes étapes de traitement est proposé sur la figure 16. En entrée, on accepterait les pièces CAO mosaïquées (maillées) ou un modèle polyédrique généré par l'ingénierie inverse. En sortie du processus de traitement d'assemblage, on a un assemblage polyédrique conforme, i.e. un assemblage pour lequel les interfaces en contact entre modèles à mailler sont discrétisées convenablement. Le résultat du traitement est approprié aux objectifs de décimation et de génération d'enveloppes de polyèdres.

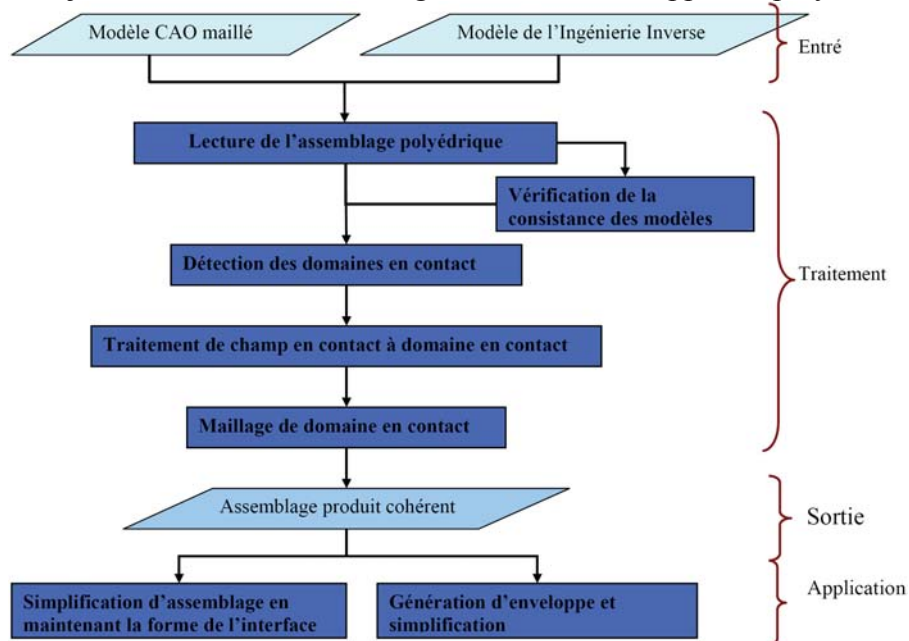


Figure 16 : schéma général de traitement d'assemblages polyédriques

Un « champ en contact » est défini comme un ensemble de faces en contact alors que le « domaine » est défini comme une zone contenant simplement les sommets et arêtes. Les « interfaces en contact » sont définies comme des champs en contact délimités par des arêtes le long de la frontière exacte. Les entités des maillages sont des arêtes et les sommets.

### **2.2.1.1. Détection de contact entre deux pièces.**

Certains travaux relatifs à la détection de contact peuvent être corrélés à ce de l'article de [CHOU1]. [JIM 01] et [LIN 01] se concentrent sur la détection de collisions qui peut servir aussi à la détection de contact, mais sans gérer le contact statique d'un point de vue mécanique. L'approche de [KIT 01], inspirée des techniques de détection de collisions, est basée sur l'espace de partition octree et est adaptée pour gérer le contact statique. La tolérance dans la détection de contact et le traitement du cas de tangence a été introduite par [CHOU2]. Dans [CHOU1], la méthode de détection de contact entre deux pièces est constituée de deux sous étapes. La 1<sup>ère</sup> détecte grossièrement les couples de pièces en contact en construisant une boîte englobante de chaque pièce et en détectant l'intersection de deux de ces boîtes englobantes (fig. 17).

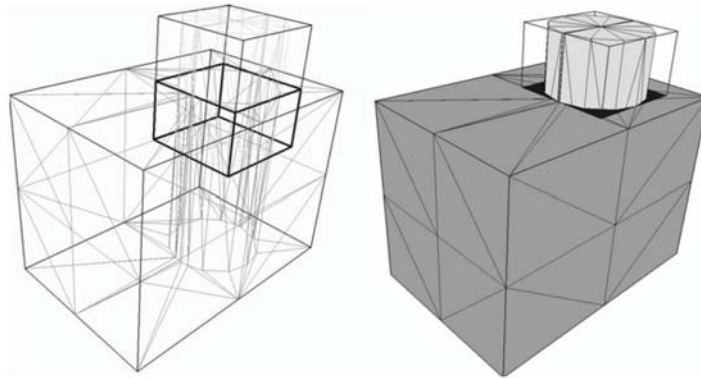


Figure 17 : intersection entre cylindre et parallélépipède à l'aide d'un calcul de boîtes englobantes

La figure 18 montre comment l'intersection des boîtes représentant l'assemblage de deux modèles polyédriques peut être identifiée. L'intersection ainsi obtenue sert à examiner grossièrement le contact entre deux pièces avant de lancer le calcul d'intersection plus en détail [CHOU2].

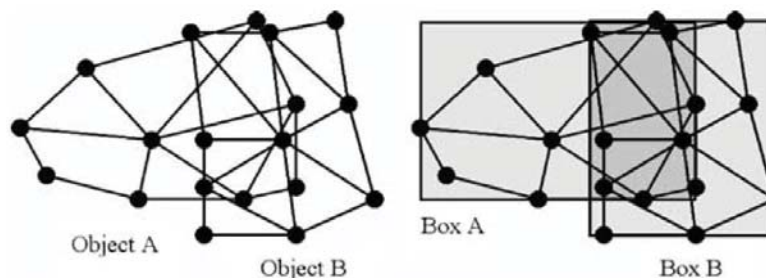


Figure 18 : assemblage polyédrique (gauche) et intersection des boîtes englobantes (droite)

La 2<sup>ème</sup> sous étape prend en entrée une liste de couple de pièces en contact vérifiée par la 1<sup>ère</sup> sous étape, puis elle extrait une liste de couples de faces en contact. [CHOU2] propose une méthode pour faire cela. On construit les boîtes pour les faces qui sont près de la zone de l'intersection, puis on détermine les faces qui produisent le contact (fig. 19).

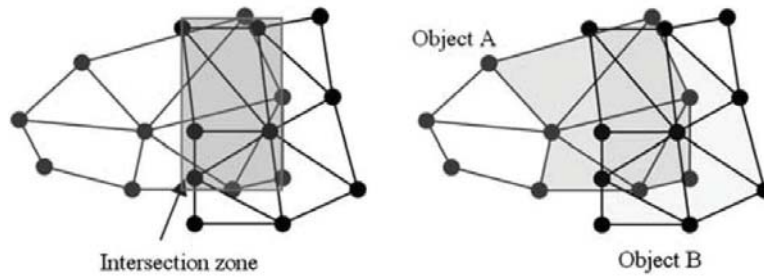


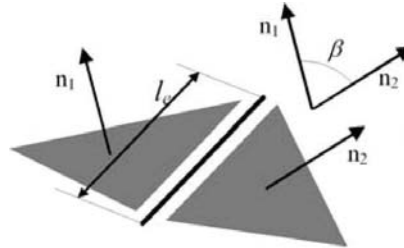
Figure 19 : La zone d'intersection (gauche) et l'ensemble de faces déterminant le champ de contact (droite).

### 2.2.1.2. Remaillage des champs en contact.

Dans cette étape, on prend en entrée l'ensemble des faces en contact trouvées à l'étape précédente. Comme la frontière commune n'est pas strictement définie, et qu'elle n'est pas identique pour les deux pièces, on réalise une opération de remaillage en deux étapes :

- (1) Pour réaliser cette étape, il faut d'abord déterminer le domaine à remailler. On commence par supprimer les arêtes non significantes, i.e. les arêtes ayant une petite courbure moyenne. La courbure discrète moyenne  $H_e$  est définie par :

$$H_e = \frac{1}{2} \times \beta \times l_e$$



où  $\beta$  est l'angle entre deux faces adjacentes et  $l_e$  est la longueur d'arête. Les arêtes de frontière de contact et les arêtes ayant la courbure significative sont étiquetées *non retirable*. Ensuite, pour les arêtes non retirables des deux faces, si celle d'une face est en intersection avec celle d'une autre face, alors les deux arêtes de deux faces respectivement sont subdivisées de façon illustrée dans la figure 20.

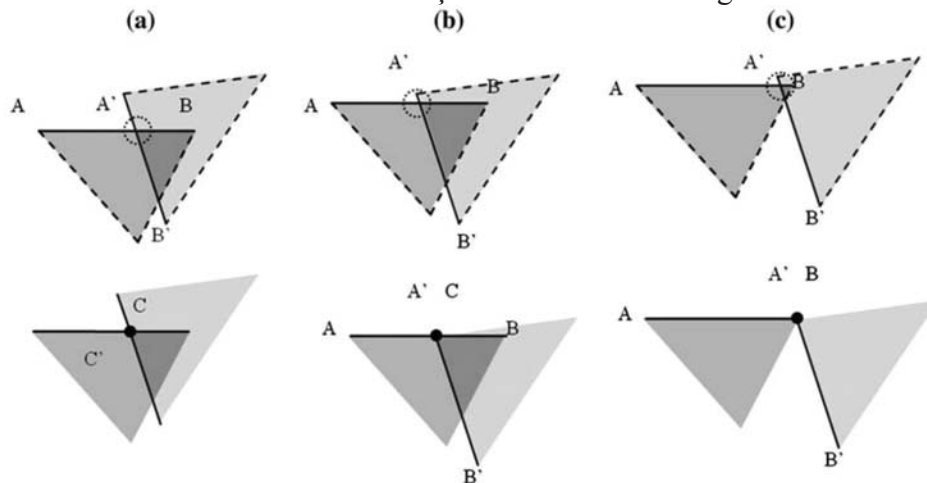


Figure 20 : subdivision d'arêtes selon trois différents cas.

En fonction d'un seuil de distance entre l'extrémité d'une arête et le point d'intersection donné, on peut juger si l'extrémité immigre vers le point d'intersection. La figure 20 illustre les trois cas d'évolution.



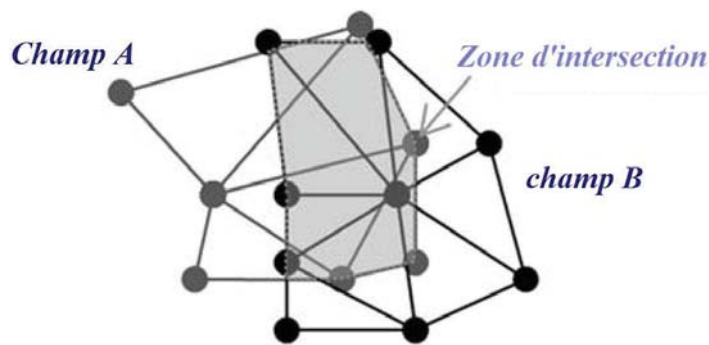


Figure 21 : Champs en contact

Enfin, on doit insérer les entités communes. On projette les arêtes significantes communes sur les deux objets et on les insère dans chaque domaine pour remailler. Les arêtes insérées sont celles communes au champ en contact. Cela permet d'assurer que les champs en contact seront remaillés similairement sur les deux pièces. La figure 21 montre comment pour chaque champ en contact A les arêtes contenues dans la zone d'intersection sont intersectées dans le champ en contact B opposé.

- (2) Une fois que l'on a défini le domaine à remailler et que les arêtes communes sont intersectées avec les deux pièces, on peut commencer à remailler. L'approche proposée utilise une méthode de remaillage par front. Le maillage est créé progressivement en propageant les mailles à partir dans le contour initial formé à partir des mailles en contact identifiées précédemment. Ce contour est appelé le « front ». La figure 22 illustre la propagation frontale de maillage à partir de la première arête. Pour le « front » on commence par l'arête de frontière de l'interface ou l'arête interne. Le sommet éligible dans ce cas est très important. C'est un sommet qui touche au moins un domaine non maillé. Sur la figure 22, les sommets marqués par deux cercles ne sont plus éligibles.

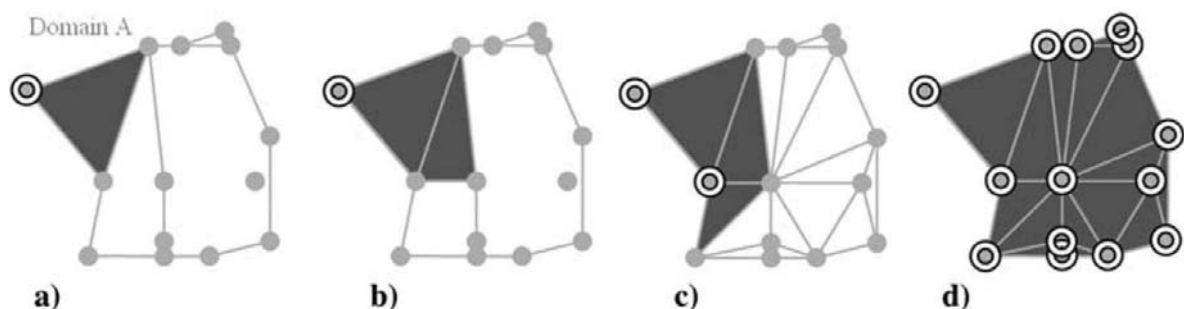


Figure 22 : la propagation frontale par première arête

A l'issue de cette étape, on sort l'assemblage polyédrique remaillé ayant des interfaces identiques au niveau des contacts entre les deux pièces.

### **2.2.1.3. Conclusions vis-à-vis de l'objectif de Master Recherche**

La méthode présentée dans la section ci-dessus a pour objectif d'assembler les maillages indépendants. L'algorithme permet de remailler de manière conforme l'interface commune des maillages en contact, mais ces maillages restent séparés à la fin de l'opération d'assemblage (i.e. les sous-maillages indépendants). Dans notre cas, la problématique est différente : le but est d'avoir un maillage unique après l'opération de fusion. Il faudrait donc prévoir une étape complémentaire de suppression des zones en contact et de raccordement des

maillages à fusionner. De plus, les algorithmes proposés devraient être validés sur l'exemple de surfaces qui ne sont ni cylindres ni plans.

### 2.2.2. Fusion de maillages par lissage des sections topologiquement sur des sections incompatibles

Les auteurs de l'article [JIN 01] ont développé une approche par fonctions de raccordement pour permettre le raccord entre plusieurs maillages de sections topologiquement incompatibles. La figure 23 illustre le principe de leur approche. La paume et les jambes ont été d'abord coupés à partir des modèles de main et de statue d'un homme, puis rassemblés par l'intermédiaire d'une surface de transition bleue. L'approche proposée par cet article utilise les fonctions de Hermite pour créer une représentation implicite joignant deux sections qui contiennent les deux ouvertures à fusionner. Enfin, la surface implicite de transition est maillée par un maillage polygonal. Leur méthode n'a pas besoin que les parties à fusionner aient une frontière topologiquement équivalente.

Leur méthode possède quatre principaux avantages : le maillage se raccorde en tangence avec les maillages initiaux, le détail de la combinatoire des objets est mélangé peu à peu dans la surface de transition, la fusion n'a pas de suture et la surface de transition peut être manipulée et enfin cette approche n'a pas de grande contrainte sur la topologie des objets. Contrairement aux autres travaux dans ce domaine, cette approche n'est pas limitée au cas de topologie équivalente à un disque.

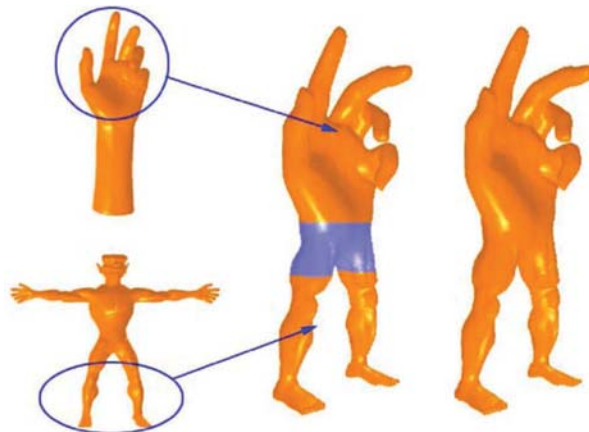


Figure 23 : Deux parties d'objets (gauche) utilisées pour fusionner deux maillages (à droite)

Concernant les besoins d'EDF en matière de modification et de fusion de maillages, il pourrait être intéressant dans certains cas d'avoir à disposition un ensemble d'opérateurs de « blending » pour permettre le lissage des angles vifs présents sur les maillages issus de la CAO. Ces angles vifs peuvent présenter des éléments critiques du point de vue des calculs EF puisque c'est dans ces zones que les contraintes mécaniques se concentrent le plus souvent. Une fois de plus, l'existence de tels opérateurs applicables directement aux maillages permettrait d'éviter les boucles de mise à jour CAO/maillage.

#### 2.2.2.1. Définition implicite des ouvertures :

Soient  $M_i$  les objets polygonaux prêts à être assemblés. L'ouverture sur chaque  $M_i$  est notée  $\Gamma_i$ . Les ouvertures sont définies implicitement à l'aide d'une méthode d'interpolation de [TURK 01]. Les points de frontières et les points de déviation (offset points) sont dans un premier temps déterminés puis interpolés à l'aide d'une **fonction radiale principale (FRP)**.

#### 2.2.2.2. Description de la surface :

Après avoir déterminé implicitement les ouvertures sur deux objets donnés, on utilise les fonctions de base de Hermite (Hermite basis functions) pour générer la surface de transition

entre deux ouvertures. Un paramètre  $\omega$  est adopté pour paramétrer le changement de  $\Gamma_1$  vers  $\Gamma_2$ . Le raccord est alors défini par l'équation :

$$\Psi(w) = \Gamma_1 F_1(w) + \Gamma_2 F_2(w) + T_1 F_3(w) + T_2 F_4(w)$$

où les  $F_i(\omega)$  sont les fonctions de base de Hermite telles que  $\omega \in [0,1]$  et :

$$(F_1(w), F_2(w), F_3(w), F_4(w)) = ((w-1)^2(1+2w), w^2(3-2w), w(w-1)^2, w^2(w-1))$$

et les  $\Gamma_i$  sont les fonctions implicites définies sur les ouvertures des objets donnés. Les  $T_i$  représentent le changement de  $\Gamma_i$  au long de la direction  $\omega$ . Pour simplifier l'implémentation, les plans utilisés pour les exemples sont parallèles au plan  $xy$ .

Une ouverture  $\Gamma_i$  sur un objet  $M_i$  donné est déterminée en définissant un plan  $P_i$  pour couper l'objet et enlever des polygones du côté spécifié du plan. Un exemple de calculer de  $\Gamma_i$  par les plans de dérivation est illustré dans la figure 24.

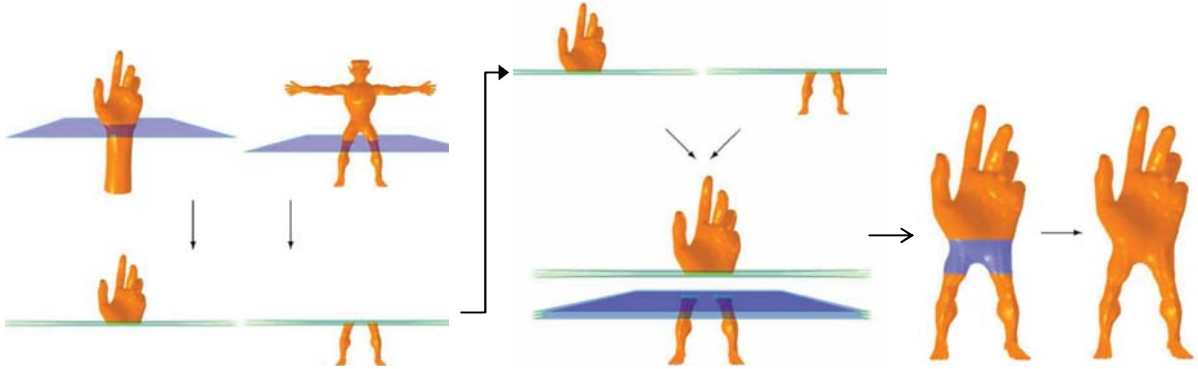


Figure 24 : Formuler l'ouverture  $\Gamma_i$  en utilisant des plans de dérivation pour la description de surface

### 2.2.2.3. Contrôle de la forme :

Une fonction  $\mathbf{w} = \mathbf{h}(\mathbf{Z})$  est introduite pour décrire la 'mapping' entre la coordonnée  $\mathbf{Z}$  et le paramètre de raccord  $\mathbf{w}$ . La forme de la surface de transition est donc contrôlée en ajustant la fonction de mapping  $\mathbf{h}(\dots)$  et le paramètre de la FRP. On utilise une courbe de Bézier de degré six pour représenter  $\mathbf{w} = \mathbf{h}(\mathbf{Z})$ . En haut de la figure 25, on fixe les deux premiers et les deux derniers points sur la ligne  $\mathbf{w} = \mathbf{h}(\mathbf{Z})$ . Les deux points de contrôle restants sont employés pour changer la forme de la courbe de 'mapping' afin de pouvoir ajuster la forme de surface (fig. 25 bas).

### 2.2.2.4 . Maillage de la surface :

Enfin, il ne reste qu'à mailler la surface de raccordement. On adopte la polygonisation pour mailler. Des sommets correspondants seront créés par l'algorithme gourmand qui incrémente itérativement les sommets courants.

Cet article a proposé une nouvelle approche de fusion de maillages basés sur la définition d'une fonction de raccord entre les maillages à fusionner. Cette approche permet de créer rapidement des mixages entre différents modèles polyédriques. Les surfaces intermédiaires créées par cette approche sont suffisamment jolies et lisses pour la synthèse d'image. Cependant, l'application directe de cette approche semble être peu intéressante pour la problématique de traitement locale des maillages 3D en matière de raccords/ lissages rapides. Toutefois, les besoins en terme de raccord entre maillages ou en terme de déformation des



maillages sont des axes intéressants qui visent à améliorer le processus de la modification rapide et simple de maillages.

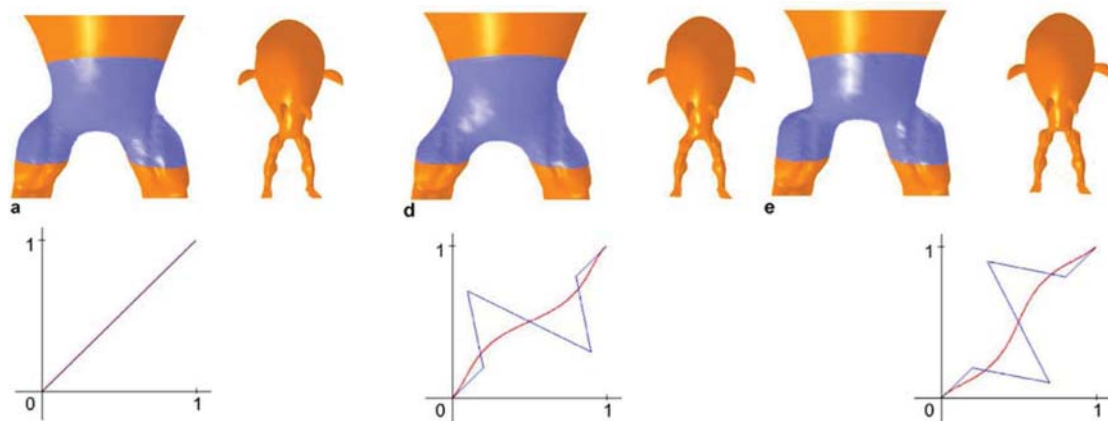


Figure 25 : La surface de raccord est créée (haut) en utilisant différentes fonctions de 'mapping' (bas).

### 2.2.3. Raccord entre maillages à l'aide d'une sphère

[LIU 05] proposent une méthode pour raccorder deux pièces avec déformation de la zone de raccord pour satisfaire des contraintes de raccord. La méthode de fusion de maillage présentée par les auteurs est basée sur une **balle de fusionnement roulante** (FBR) qui est une notion connue dans le domaine du raccord de surfaces paramétriques. On appelle **surface de fusionnement** une surface intermédiaire qui relie par lissage deux surfaces nommées **surface de base**. Pour réaliser cette opération, la surface de fusionnement est générée en mettant une balle en contact avec deux surfaces de base. La nouveauté ici est de permettre cette opération sur des maillages triangulaires (fig. 25.2).

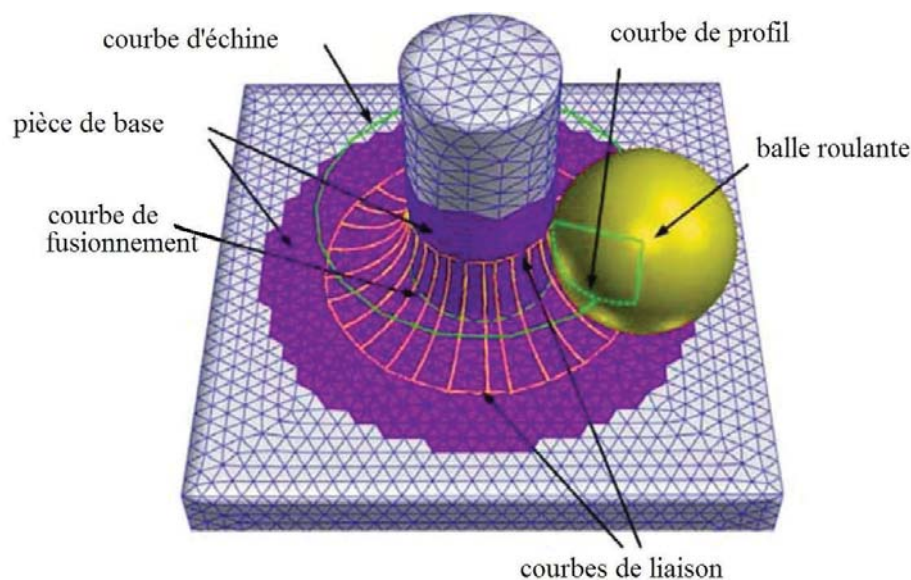


Figure 25.2 : Raccord de maillages.

Ce type d'opération peut s'avérer très intéressant dans le contexte de mon sujet de master recherche. Le fait que l'on ne soit plus obligé de faire ces opérations sur la CAO initiale peut permettre de gagner un temps précieux au niveau du remaillage. Malgré tout, la méthode présentée dans cet article est limitée par la paramétrisation conforme du domaine qui est effectuée. Dans son implémentation actuelle, la méthode ne permet pas d'appliquer la boule

entre deux maillages quelconques. Cependant, on peut imaginer l'utilisation de cette approche après la phase de fusion et de remaillage de zone de contact de deux maillages indépendants devenus un seul modèle. La phase de remaillage rendrait conforme le maillage modifié fusionné, ce qui faciliterait l'application de méthode de sphère. L'emploi de cette méthode est particulièrement intéressant en cas de modélisation et d'étude de sensibilité des soudures de taille différente dont la mise en œuvre est représentée actuellement une contrainte pour l'étude opérationnelle.

## 2.3. Opérations booléennes sur les maillages

### 2.3.1. Algorithme booléen topologiquement robuste

[JUL01] présente un algorithme booléen orienté topologie. De la même manière que l'algorithme booléen classique, la partie principale de cet algorithme se constitue d'une série d'opérateurs indépendants qui garantissent la génération de résultats intermédiaires consistants ce qui assure la validité de la connectivité des résultats finaux.

L'algorithme booléen entre deux formes A et B effectue une série d'opérations indépendantes. Chaque opération détermine une relation entre deux entités, une entité pour chaque forme. Une entité est soit un sommet, une arête, une facette ou bien une forme entière. Il y a donc 16 types d'opérations possibles entre deux entités ( $4 \times 4$ ). Chaque type d'opération est considérée comme appartenant à un niveau particulier, de 0 à 6, équivalant à la somme des dimensions des deux entités  $o_A$  et  $o_B$ . Par exemple, entre un sommet et une arête, la somme des dimensions est  $0 + 1 = 1$ . La figure 26 montre une dépendance hiérarchique entre les types d'opération. Les opérations des niveaux 0 à 3 déterminent le point où les entités sont en intersection, et celles des niveaux 3 à 6 vont vers les résultats de construction. Les opérations de niveau 3 jouent un rôle de pivot entre deux étapes. Elles déterminent si un sommet d'un solide se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur d'un autre solide, et si une arête d'un solide est en intersection avec une facette d'un autre solide.

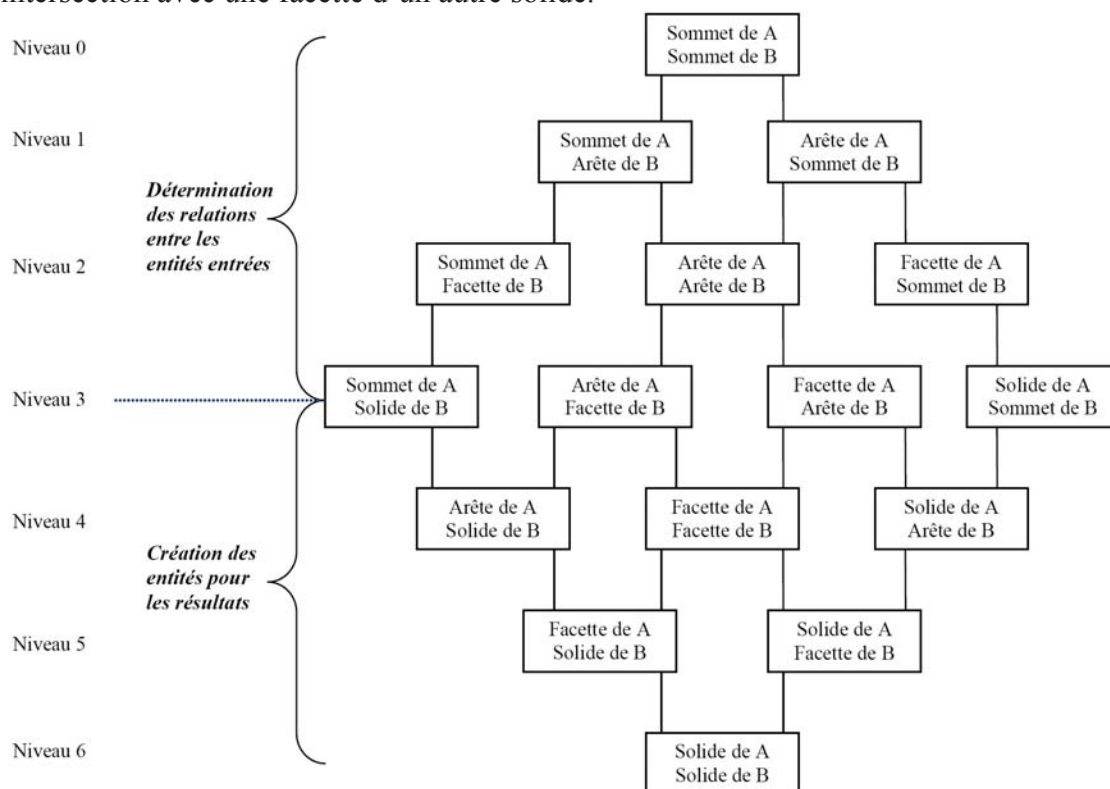


Figure 26 : hiérarchie des opérations de l'algorithme booléen

Pour les opérations de niveau 0 à 3, on utilise une fonction d'intersection  $X_{ij}(\mathbf{o}_A, \mathbf{o}_B)$  pour vérifier si les entités  $\mathbf{o}_A$  et  $\mathbf{o}_B$  sont en intersection (ici,  $i$  et  $j$  désignent les dimensions des entités). A partir de la détermination des points d'intersection au niveau 3, la structure représentant le résultat est construite. L'opération de niveau 4 construit les arêtes, celle de niveau 5 construit les facettes par les arêtes retenues au niveau 4. Et celle de niveau 6 construit des solides par les facettes générées à l'opération de niveau 5.

### 2.3.2. Deux algorithmes d'intersection de surfaces de subdivision :

[LAN01] s'intéressent au calcul d'intersections entre des surfaces de subdivision dans un contexte d'algèbre de solides modélisés par des surfaces de subdivision. Ils considèrent que les surfaces de subdivision sont générées par le principe de Loop et fournissent par conséquent un maillage triangulaire. Ils présentent et comparent trois variantes d'un algorithme de calcul. La 1<sup>ière</sup> variante calcule cette intersection après une classification des faces des objets en couples d'intersection et de non intersection. Il s'agit donc d'abord de détecter des intersections entre deux faces en utilisant des tests de collision de boîtes englobantes. Les points d'intersection entre deux faces sont ensuite calculés et permettent l'évaluation de la courbe polygonale d'intersection. La 2<sup>ème</sup> variante se base sur la subdivision du 1-voisinage des faces en intersection. La figure 27 montre de gauche à droite : les deux surfaces en intersection, la subdivision du 1-voisinage et leurs isolements successifs. La 3<sup>ème</sup> variante utilise la notion de graphe biparti, ce qui permet de réduire le nombre des intersections à tester.

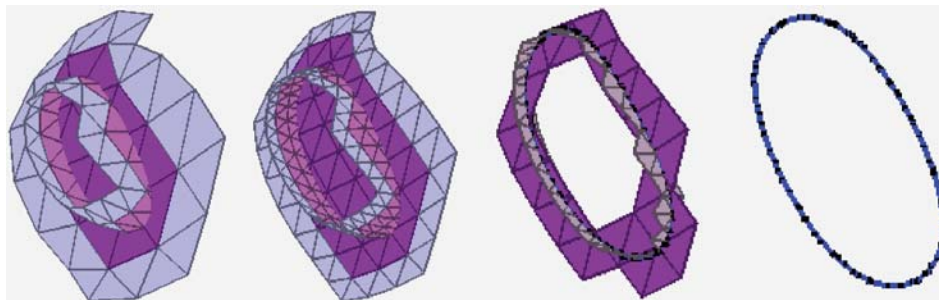


Figure 27 : voisinage, subdivision et courbe d'intersection.

Dans le cas des problèmes rencontrés chez EDF, et notamment ceux concernant la fusion de deux maillages quelconques, la notion de 1-voisinage pourrait être étendue au cas des maillages classiques pour permettre le calcul de l'intersection des deux maillages à fusionner.

### 2.3.3. Procédures automatiques pour des opérations booléennes sur des maillages éléments finis

[GRAY01] propose une méthode de construction de maillage à partir deux maillages structurés ou non. Le résultat de l'opération est un maillage unique. Cet algorithme sur les opérations booléennes a été développé pour fusionner deux maillages ou bien pour imposer un nouveau maillage surfacique sur un maillage volumique. La figure 27 montre les principales étapes de l'algorithme qui peut se décomposer en 4 étapes :

1. Détection d'éléments ;
2. Construction de contour ;
3. Création d'éléments dans le contour ;
4. Assemblage des maillages.

On appelle MESH1 et MESH2 les deux maillages d'origine qui peuvent contenir des éléments volumiques. Pour faciliter les illustrations, les exemples seront en deux dimensions. Un ensemble d'éléments sont utilisés pour définir une zone de travail. Sur la figure 28, on montre

que la zone de travail doit être au moins aussi large que l'espace où les deux maillages se superposent. Donc MESH1 et MESH2 sont décomposés en Mesh1, REST1, Mesh2 et REST2. Mesh1 et Mesh2 sont les sous-ensembles situés dans la zone de travail alors que REST1 et REST2 sont les sous-ensembles hors de la zone de travail.

Une recherche est tout d'abord effectuée pour trouver les sommets de Mesh2 qui sont situés à une distance de recherche de Mesh1. Les sommets trouvés vont être supprimés de MESH2. Les sommets supprimés précédemment sont stockés dans un autre sous ensemble appelé Delete2. On fait la même opération sur Mesh1 pour arriver à la situation de la figure 28.b. L'ensemble des faces qui limitent l'espace où le remaillage doit avoir lieu (Delete 1 et 2) est ensuite utilisé pour déterminer le contour du remaillage et ainsi former le domaine appelé SHELL. La méthode de Delaunay est ensuite utilisée pour générer le maillage tétraédrique (triangulaire en 2D). La méthode de Delaunay ne marchant pas très bien dans certains cas, une procédure alternative est utilisée pour déplacer le sommet central du contour (fig. 29). A partir du moment où une arête est en intersection avec le contour (fig. 29.a), la position du sommet central est modifiée pour éviter les auto-intersections (fig. 29.b). Dès que le sommet central est créé, les sommets dans le contour sont liés au sommet central pour créer un maillage cohérent (fig. 28.d). Enfin, le maillage est rattaché à Mesh1 et Mesh2. Si les faces originales dans Mesh1 et Mesh2 sont quadrilatérales, les éléments qui lient Mesh1 et Mesh2 devront être subdivisés (fig. 28.e).

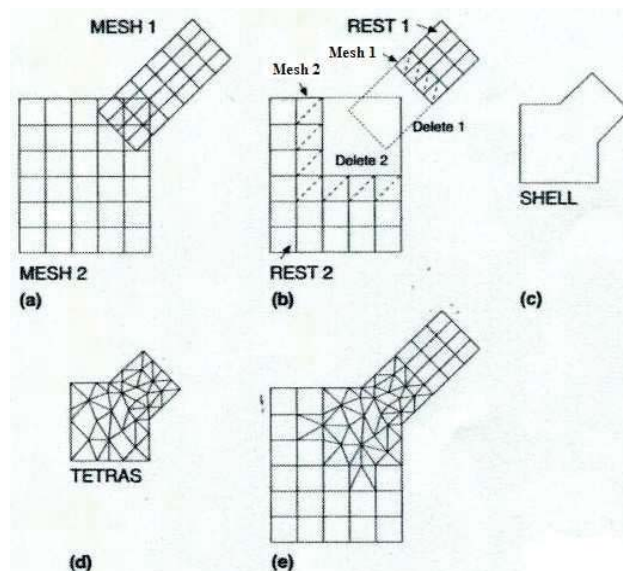


Figure 28 : a) les deux maillages sont superposés, b) les éléments en intersection sont détectés, c) le contour (SHELL) est construit, d) puis mailler et e) assembler.

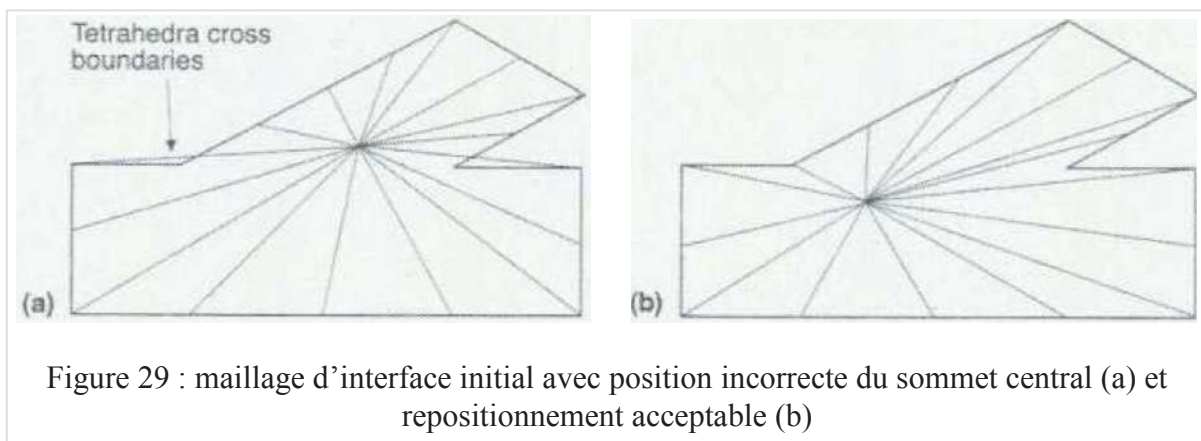


Figure 29 : maillage d'interface initial avec position incorrecte du sommet central (a) et repositionnement acceptable (b)



L'avantage de la méthode proposée dans cet article réside dans le fait que les opérations booléennes peuvent être effectuées pour créer un maillage complexe en ajoutant successivement un nouveau maillage composant. En revanche un défaut méthodologique est de demander aux utilisateurs d'entrer des paramètres. Pour les utilisateurs inexpérimentés il faut créer beaucoup de maillages à fin d'en avoir un satisfaisant. Dans tous les cas, cet algorithme devra être comparé aux autres algorithmes de fusion identifiés dans cet état de l'art.

### 3. Conclusion

L'étude de l'état de l'art présentée dans ce document fait apparaître un grand nombre d'algorithmes géométriques permettant de modifier la géométrie d'un modèle polyédrique et plus particulièrement des algorithmes de fusion de maillage ainsi que des algorithmes permettant des opérations booléennes entre maillages. Les aspects préservation de la sémantique durant ces phases de modifications géométriques n'ont pu être beaucoup développés puisque peu d'articles ont été publiés sur ce sujet. Néanmoins, l'intérêt porté aujourd'hui aux aspects sémantiques est grandissant et l'apport d'outils permettant des manipulations de plus haut niveau sémantique n'est plus à démontrer. Des réseaux d'excellence y sont d'ailleurs consacrés, e.g. le réseau européen d'excellence Aim@Shape ([www.aimatshape.net](http://www.aimatshape.net)).

C'est donc dans ce contexte de manipulation géométrique de maillages avec transfert de sémantique que mon sujet s'est orienté. Il s'agit de proposer un certain nombre d'outils de modification de maillages pour éviter des retours trop coûteux sur la CAO lors des phases d'optimisation des simulations EF chez EDF. Toutefois, pour éviter de rompre la chaîne numérique et ainsi perdre des informations sémantiques (trous débouchant, force répartie sur une partie cylindrique...) associées aux modèles géométriques, les outils développés devront tenir compte de ces aspects non purement géométriques. Deux phases principales ont donc été identifiées :

**A1.** Tests, étude, définition et implémentation d'opérateurs booléens de modification locale de maillages permettant de :

- manipuler et assembler/fusionner les maillages libres de type 2D indépendants avec le remaillage local de zone de collage de deux maillages, compatibles ou pas. Les étapes d'identification des mailles de contact sont à prévoir : mailles tangentes (superposées), éléments intersectés (interpénétrés) ou présence des éléments sans contact. Cette partie devrait permettre d'améliorer les algorithmes précédemment introduits (fonctionnement sur des contacts non-plans, suppression de la zone de contact et couture des maillages, insertion de points dans la zone de contact et maillage de Delaunay...) ;
- ajouter/supprimer la matière, par exemple, ajouter un raidisseur ; l'association d'un nouveau composant 2D à la structure de base (i.e. sans modification) de type 2D également se fera à l'aide des opérateurs d'assemblage précédemment définis. Les étapes d'identification des mailles de contact sont à prévoir.

**A2.** Développement des opérateurs de transfert d'informations sémantiques :

- dans un premier temps il s'agira de préserver les informations contenus dans les fichiers universels .unv d'Ideas lors des opérations de manipulation et de fusion. Il s'agira principalement d'informations sémantiques liées au type de groupes d'entités de maillage : groupe (liste) de mailles (éléments) et/ou nœuds ;

- dans un second temps il s'agira de proposer un certain nombre d'opérateurs permettant de mettre à jour ces informations sémantiques lors des phases d'ajout et/ou de suppression de nouveaux nœuds et de nouvelles mailles (suppression/ajout de nœud dans des groupes, ...).

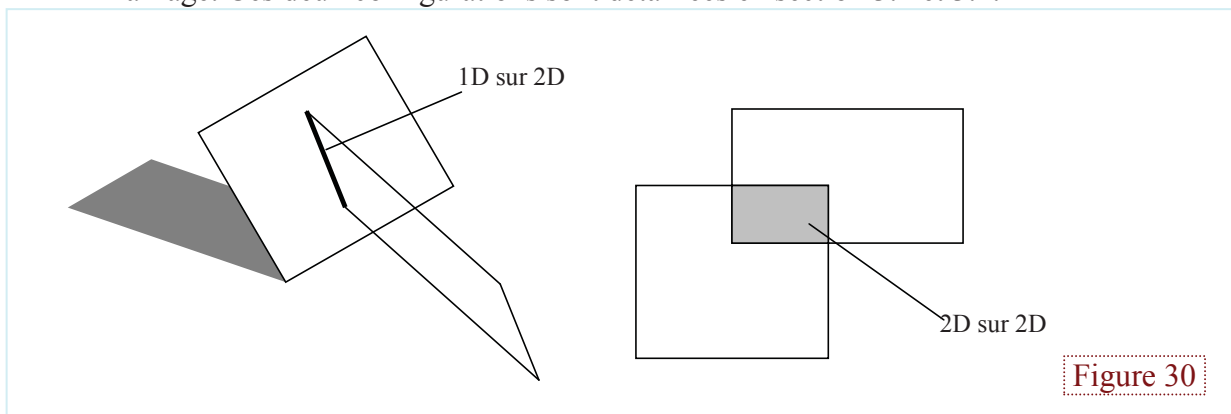
# PARTIE B – Travail de Recherche

## 1. Objectifs et organisation de travail de développement

Comme cela a été évoqué dans la partie bibliographique, l'**objectif général initial** de ce stage recherche est de proposer des opérateurs logiciels permettant de manipuler directement les maillages 2D « morts », notamment, pouvoir mettre en place rapidement et facilement des modifications locales et donc de réduire les allers-retours multiples entre la CAO et le maillage lors de l'étude opérationnelle rapide dans un contexte de maintenance des installations exploitées sur les sites de production. La **Figure 3** illustre le principe d'approche utilisée qui consiste à effectuer les modifications souhaitées directement sur les maillages « morts » au lieu de retourner sur la CAO. La notion d'opérateurs de modification de maillages regroupe différentes catégories d'opérations : les opérations booléennes (ajout et enlèvement et intersection entre maillages indépendants), les opérations de lissage comme l'ajout de congés de raccord, les opérations de réparations ou de simplifications de maillages comme l'identification des détails inutiles, les opérations de remplissage de trou etc. Plus précisément, le présent travail vise à permettre de réaliser la fusion de maillages indépendants 2D sans retourner sur la CAO.

Le cahier des charges défini par EDF R&D comporte essentiellement deux aspects à traiter :

- Deux modes d'assemblage de maillages 2D (**Figure 30**). Le schéma de gauche illustre le 1<sup>er</sup> mode que nous appelons arête/face. Il correspond à une intersection où les éléments sont en intersection et où la zone d'intersection est une poly ligne. Le schéma de droite montre le 2<sup>ème</sup> mode que nous appelons face/face. Il correspond à une configuration pour laquelle les mailles sont quasiment confondues (e.g. tangentes, superposées) et où la zone d'intersection n'est plus une poly ligne mais un morceau de maillage. Ces deux configurations sont détaillées en section 3.1 et 3.2.



Même si ce travail porte principalement sur l'assemblage de maillages triangulaires, le traitement de maillages quadrangulaires et ainsi que maillages quadratiques est également prévu. Le développement des opérateurs de suppression de matière et la généralisation de méthode employée au problème de la manipulation de maillages 3D représentent les perspectives de ce présent travail.

- Le maintien et la mise à jour des informations sémantiques associées aux entités de maillage et utilisées pour les besoins des calculs EF. En cas de 2D, ces informations à regroupées dans les groupes d'entités de maillage qui sont les triangles, les arêtes et les nœuds. Cette notion de groupe est très importante car ces entités de maillage permettent d'affecter plus facilement les conditions aux limites et des paramètres géométriques/mécaniques lors de la modélisation EF avec Code\_ASTER utilisé au sein des services d'ingénierie du Groupe EDF. La Figure 31 montre le schéma de passage d'un modèle géométrique représentant un maillage 2D de type coque à un modèle d'analyse EF : lors de la modélisation EF une certaine épaisseur sera associée au modèle coque. La possibilité de définir les groupes de mailles permet d'affecter les épaisseurs, les raideurs ou les matériaux différents à un groupe de mailles donné.

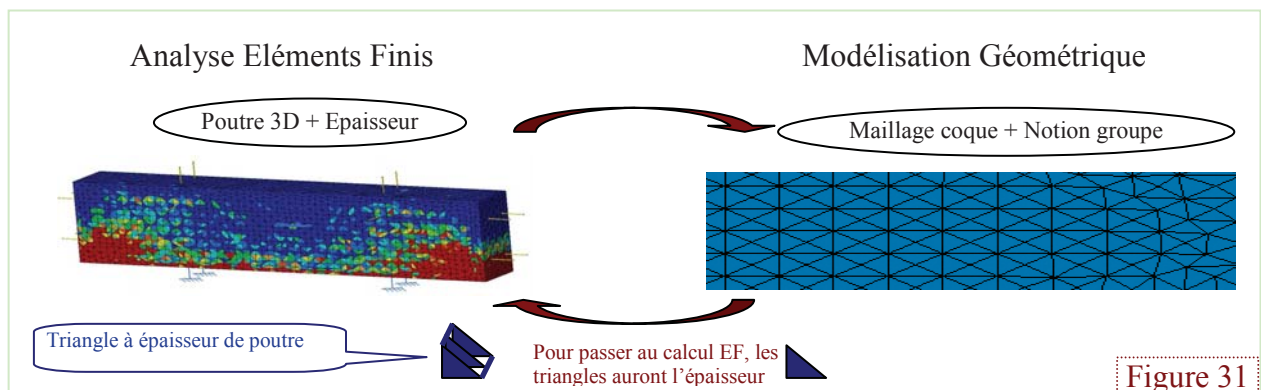


Figure 31

D'un point de vue pratique, plusieurs points sont également à rappeler:

- Tous les développements sont réalisés sous le logiciel prototype 'XDS' développé par l'équipe IMS du laboratoire LSIS. Si pour l'instant il n'y a que le module MESH dans ce logiciel, il est prévu l'incorporation de routines pour les images et les courbes/surfaces NURBS. Donc le 'X' désigne multi-format, le 'D' désigne 'Déformation', et le 'S' désigne 'Simplification'. Pour faciliter les échanges de fichier de maillages, j'ai dû écrire un plug-in de import/export de fichier universel d'IDEAS (.unv) non initialement inclus dans XDS. Cet aspect n'est pas développé par la suite.
- Il s'agit du stage de recherche co-encadré par EDF R&D et l'équipe IMS du laboratoire LSIS, ainsi le stage a été réalisé à l'équipe IMS, et au département A.M.A de EDF R&D selon les modalités définies dans le contrat EDF R&D –SERAM / ENSAM. Durant mon séjour chez EDF, j'ai utilisé des systèmes de conférence vidéo pour travailler en collaboration avec mes deux directeurs. C'est le logiciel IBM® Lotus® Instant Messaging and Web Conferencing (Sametime) 6.5.1 qui est mis en service par l'ENSAM. Il a deux grands modules :
  - Tableau blanc : Il permet aux participants de la réunion d'écrire et de tracer en même temps.
  - Partage d'écran : Il permet à tous les participants de voir le même écran tenu par un présentateur. Nous pouvons montrer certains transparents, quelques démonstrations en temps réel et discuter ensemble sur certains points du code source en cours de développement.

Donc avec ce logiciel, la collaboration est réalisée, et le co-encadrement est assuré, et les opinions des personnes de différents sites sont synchronisées. Cet aspect n'est pas plus développé par la suite.

## 2. Bibliographie complémentaire



L'article [LIRA01] propose une méthode particulière de multi-intersections de maillages surfaciques. L'auteur prend la suite d'un algorithme d'intersection surfacique proposé par l'article [GOE 01] et adapte cet algorithme au cas d'intersections multiples.

L'algorithme proposé par l'article [GOE 01] était tout d'abord présenté. Cet algorithme effectue l'intersection entre deux maillages 2D A et B, à partir du calcul des courbes d'intersection et la reconstruction topologique du maillage selon les étapes suivantes:

- I. Détermination des points d'intersection.
  - Calculer et enregistrer les points d'intersection produits par les arêtes de maillage A et les faces de maillage B.
- II. Détermination des courbes de réparation.
  - Lier les points d'intersection comme une poly-ligne qui serait la courbe de réparation.
  - Calculer la courbe paramétrique à partir des points de la poly-ligne.
  - Régénérer des nouveaux points qui discrétisent la courbe paramétrique.
  - Bouger ces nouveaux points vers les surfaces des maillages en intersection.
- III. Reconstruction topologique.
  - Déterminer une zone de réparation par la suppression des arêtes et nœuds autour de la courbe de réparation.
  - Insérer des nouvelles arêtes entre chaque deux nouveaux points voisins générés par l'étape II sur la courbe de réparation.
  - Trianguler les zones de réparation sur les deux surfaces.
  - Lisser les deux maillages au niveau de la zone réparée en utilisant la description paramétrique d'origine.

L'algorithme de Ceolho présenté ci-dessus offre donc une piste pour la réparation des maillages en cas d'intersection simple entre eux. L'intersection simple veut dire que c'est une intersection entre seulement deux maillages surfaciques. De plus cet algorithme ne prend pas en compte que l'intersection produite par arête et face.

L'article de Lira prend la suite de cet algorithme et propose des solutions pour l'intersection de plusieurs maillages. La **Figure 32.A** montre une intersection produite par trois surfaces. L'auteur propose d'effectuer l'algorithme d'intersection sur chaque paire des deux faces ce qui amène au problème où la courbe d'intersection calculée précédemment est en intersection avec la courbe d'intersection suivante. L'**image B** montre une courbe d'intersection calculée (CC) qui est en intersection avec la courbe calculée précédemment (CO) ce qui a pour effet d'invalider la réparation précédente autour de la courbe (CO). Ensuite le problème de l'intersection entre deux arêtes colinéaires est traité (**image C**).

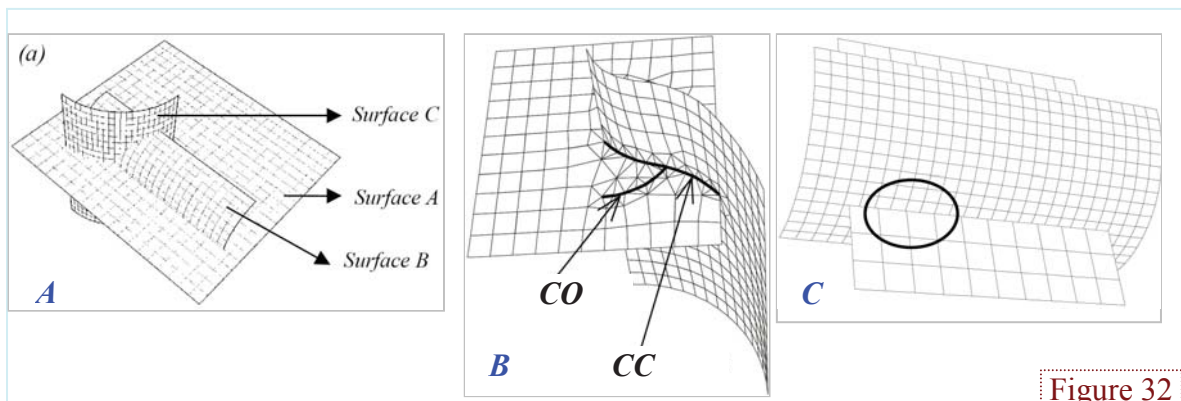
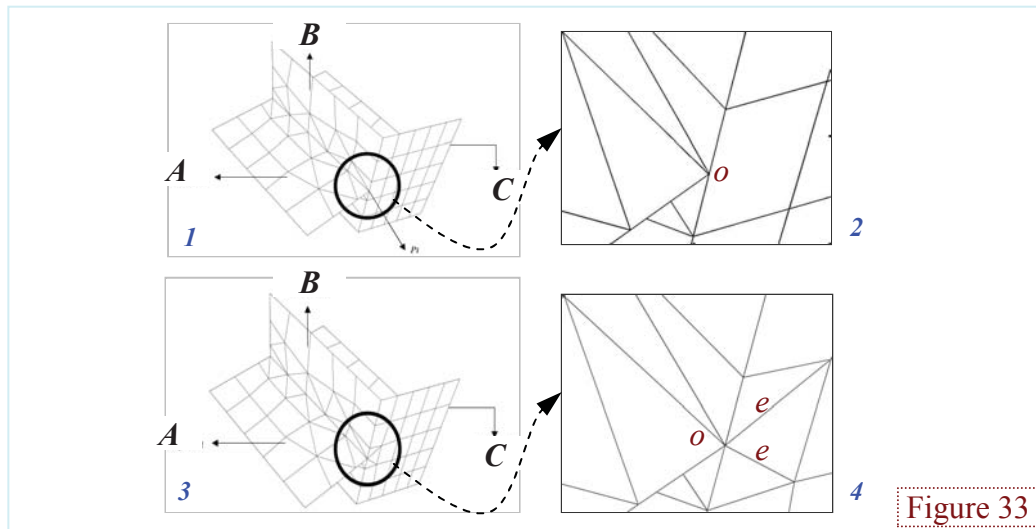


Figure 32

Enfin, l'auteur a montré un problème de compatibilité entre la partie réparée de la surface 1 et la surface adjacente de la surface 1. La **Figure 33** montre ce fait dernier. L'**image 1** montre une réparation pour l'intersection entre la **surface A** et **surface B**. Mais cette pièce de maillage de la zone réparée n'est pas compatible avec la **surface C** qui est la face adjacente. Alors l'**image 2** montre en détail ce fait, le **nœud o** est généré pour la réparation de l'intersection entre la **A** et la **B**, mais ce **nœud o** n'est pas compatible avec la face à droite sur la **surface C**. Donc la solution est créer deux arêtes passant par le **nœud o** sur la face à droite. Donc l'**image 3** est la solution et nous pouvons voir sur l'**image 4**, qui montre la partie résolue zoomée, que deux nouvelles arêtes **e** sont créées pour rendre la compatibilité.



Cet article montre les réparations lors de l'intersection entre des maillages surfaciques en intersections multiples. Les étapes de calcul d'intersection, de nettoyage et de reconstruction de la zone nettoyée sont assez similaires à la démarche d'assemblage des maillages en mode Arête/Face comme présentée en détail par la suite. Le point faible de l'algorithme proposé est qu'il ne se comporte pas bien lorsque les maillages ont des densités différentes. Effectivement, dans ce cas, il faut que la zone de remaillage assure la transition entre les différentes tailles à fusionner. Dans notre approche, ceci est rendu possible par la suppression de triangles dans une largeur de bande autour des faces en intersection. Ainsi, des faces ne participant pas directement à l'intersection pourront être modifiées pour permettre une variation progressive des tailles. Dans l'approche de Lira, seule les faces en intersection sont modifiées ce qui peut mener à la création de triangles dégénérés (petits angles) et non adaptés au calcul Eléments Finis.

### 3. Approche globale d'assemblage des maillages 2D mise en œuvre

Dans cette section, les étapes de mise en œuvre des opérateurs de modification de maillages triangulaires 2D sous contrainte de conformité ainsi que des particularités du processus du transfert d'informations sémantiques proposé sont présentées. Concernant la modification géométrique conforme de maillage, la problématique d'assemblage de maillages par **fusion** deux à deux sera traitée. Par ailleurs, on distingue deux modes d'assemblage des maillages 2D indépendants : **face/arête** et **face/face**. Ces deux modes seront détaillés dans les sections suivantes.

### 3.1 Mode d'assemblage de type « face / arête »

Un exemple de ce mode est représenté sur la **Figure 34.a**. Les deux autres images à côté peuvent être considérées comme zoom local de la zone de contact de deux maillages plans et illustrent les particularités d'intersection des deux surfaces planes maillées. L'**image b** montre l'intersection de deux maillages avant la fusion : les arêtes d'un maillage traversent les faces de l'autre, ce qui justifie l'appellation de mode **face/arête**. L'**image c** illustre le résultat de la fusion conforme des deux maillages. Pour réaliser cette opération d'assemblage, quatre principales étapes d'assemblage ont été introduites et détaillées ci-dessous.

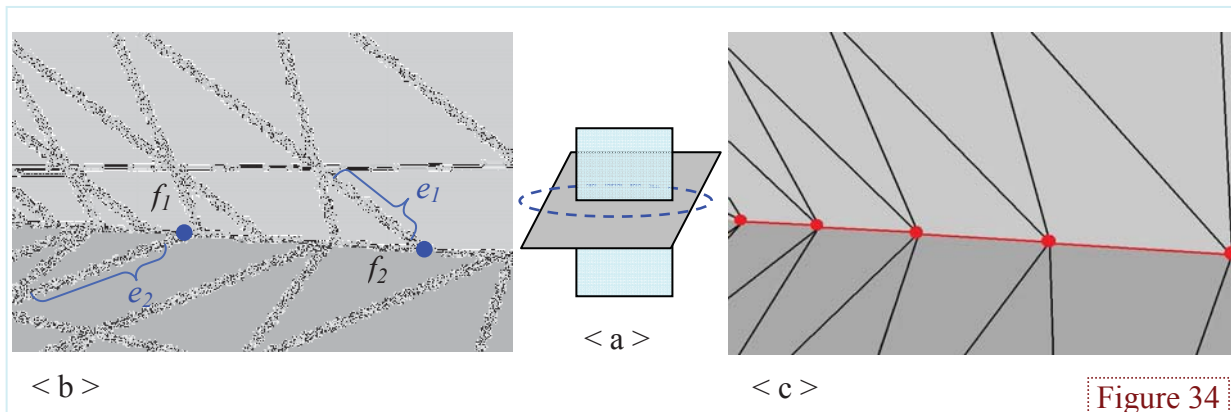
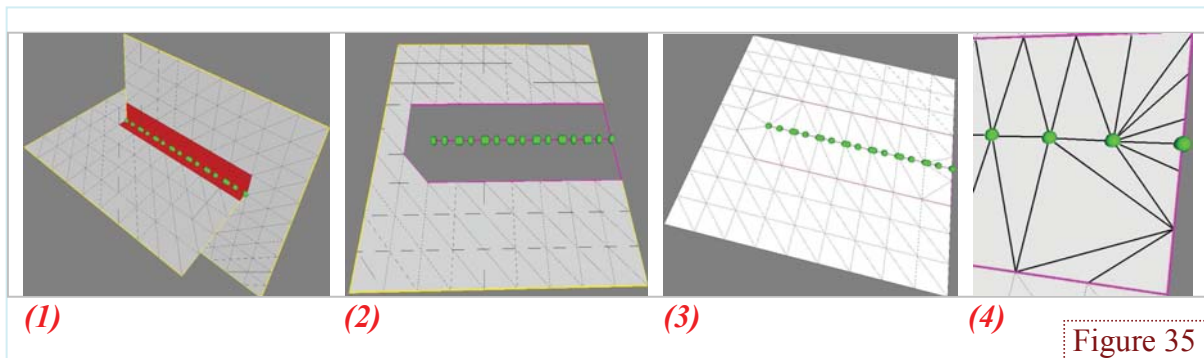


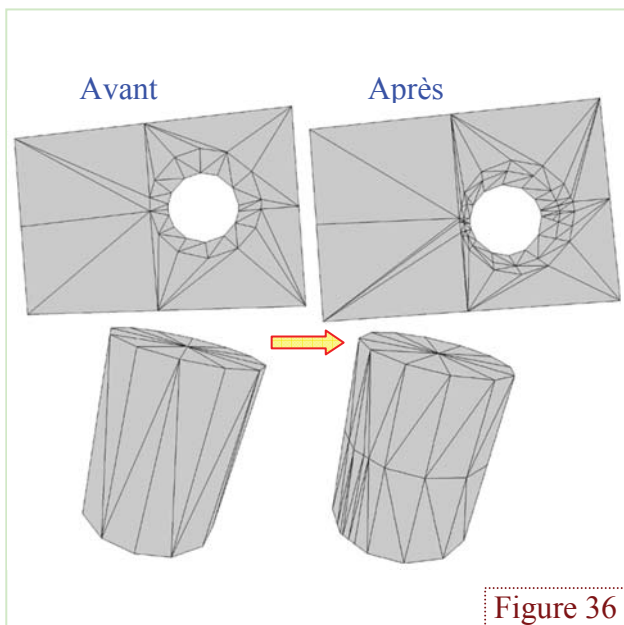
Figure 34

1. **Calculs des intersections** : Dans cette étape il s'agit de définir les nœuds résultants des intersections entre les arêtes et les faces des deux maillages. Après avoir identifié les faces potentiellement en intersection à l'aide d'une stratégie de boîtes englobantes, il s'agit de lancer plusieurs fois notre algorithme de calcul d'intersections face/arête. La **Figure 35.1** illustre le résultat de cette première étape sur une intersection entre deux maillages triangulaires formant deux plans. Les nœuds nouvellement introduits sont en vert et les faces en intersection sont en rouge. Une fois les nœuds obtenus, il reste à déterminer l'ensemble des lignes d'intersection, ce qui revient à définir des arêtes entre ces nœuds.
2. **Nettoyage de la zone d'intersection** : Une fois que les nœuds d'intersection sont trouvés, alors il faut remailler la zone de contact. Pour cela, on a fait le choix de d'abord nettoyer/supprimer les faces au niveau du contact et ceci dans une largeur de bande que nous pouvons piloter pour améliorer la qualité du raccord lorsque les deux maillages ont des densités assez différentes. La **Figure 35.2** montre le trou produit par la suppression d'une seule rangée de face. Les lignes violettes correspondent au bord du trou qui est fermé à l'aide d'un algorithme de recherche de nœuds les plus proches des extrémités de l'intersection.
3. **Remplissage des trous dans la zone d'intersection** : Dès que la zone d'intersection est nettoyée, il faut remailler le trou sous contrainte. La contrainte est ici de passer par la ligne d'intersection précédemment identifiée. La **Figure 35.3** montre la triangulation créée pour remplir le trou.
4. **Optimisation du maillage par insertion de nœuds** : A la sortie de la 3<sup>ième</sup> étape, la zone en contact est remaillée mais les triangles ne sont pas adaptés vis-à-vis des critères de qualité de mailles en EF. L'**image** montre les triangles de remaillage ne sont pas très équilatéraux, donc il s'agit dans cette étape d'optimiser les mailles en insérant des nœuds, pour rendre les triangles plus équilatéraux tout en permettant une transition entre les différentes tailles des mailles.

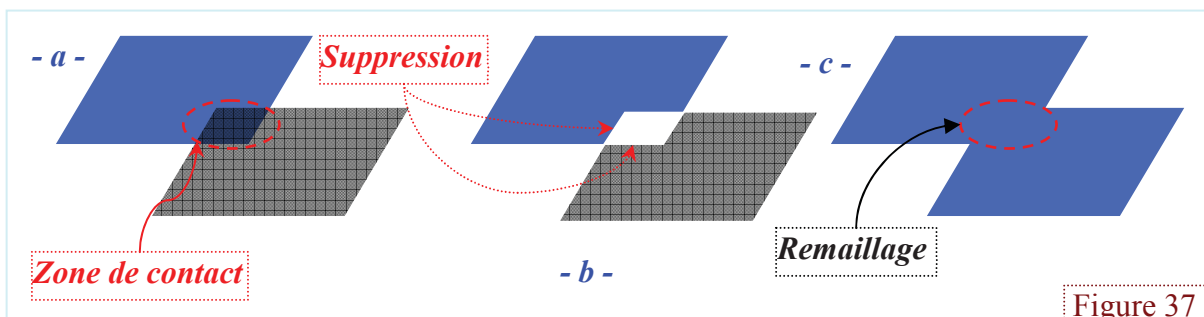


### 3.2 Mode d'assemblage de type mode « face / face »

Les objectifs présentés par [CHOU 01] et rappelés dans la partie bibliographique diffèrent sensiblement des objectifs de notre mode face/face. La **Figure 36** montre un exemple d'assemblage présenté dans cet article. Les deux modèles polyédriques de gauche représentent deux pièces avant l'assemblage. Après assemblage, les deux modèles polyédriques ont été modifiés pour que les nœuds et arêtes des deux polyèdres soient en relation deux à deux au niveau de l'interface.



Dans notre cas, le besoin est sensiblement différent mais complémentaire puisqu'il s'agit de fusionner les deux maillages pour n'en n'obtenir qu'un seul. La **Figure 37** illustre le processus d'assemblage de maillages en mode *face/face* tel que nous le proposons et testons par la suite. Sur l'**image a** nous avons deux plans qui sont partiellement superposés (voir plus loin pour des exemples plus complexes). Pour fusionner les deux maillages nous détectons d'abord les mailles en contact à l'aide d'un algorithme basé sur les boîtes englobantes. Ensuite sur l'**image b**, la zone de contact est nettoyée par suppression des mailles en contact. La dernière étape consiste à remailler la zone nettoyée pour fusionner les deux maillages (**Figure 37.c**).



### 3.3 Transfert d'informations sémantiques

Comme rappelé dans les éléments du cahier des charges, il s'agit ici de réussir à gérer les informations relatives aux calculs Eléments Finis lors des étapes de modification de maillages. Cette gestion peut se décliner en trois points :

- 1) **Maintenir les informations sémantiques** en assurant que les groupes de nœuds et de mailles présents sur les parties non modifiées sont conservés après fusion. La **Figure 38** de gauche montre que l'on veut assembler deux maillages. Le maillage1 comporte trois groupes représentés par 3 couleurs différentes. Le schéma de droite montre le résultat où les éléments issus de maillage1 appartiennent toujours aux mêmes groupes d'origine.
- 2) **Mettre à jour les informations sémantiques** en assurant que les nouvelles mailles créées par triangulation et raffinement soient automatiquement placées dans les groupes correspondants, c'est-à-dire soit dans les groupes du maillage 1 soit dans ceux du maillage2.
- 3) **Propager les informations sémantiques** lorsque le maillage2 ne contient pas de groupes à l'origine, ce qui est le cas sur l'exemple de la **Figure 38**. Cet aspect est illustré sur la droite. Il est beaucoup plus délicat à traiter que les précédents points et je n'ai pas eu le temps de l'aborder durant mon master.

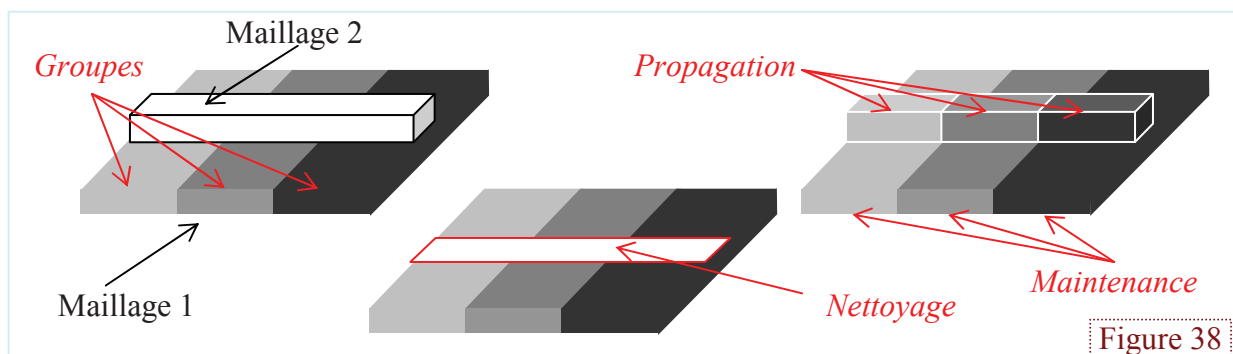


Figure 38

## 4. Détail des méthodes et algorithmes développés

Dans cette section, les méthodes et les algorithmes proposés pour le calcul de l'intersection, la construction de la ligne d'intersection, le nettoyage de la zone en contact et le remaillage du trou vont être présentés en détail.

### 4.1 Méthode de détection de faces en contact

Cette étape est indispensable pour éviter de lancer le calcul d'intersection face/face sur toutes les faces des modèles. La méthode utilisée est semblable à celle proposée par [CHOU01]. Elle se base sur la détection de l'intersection des boîtes englobantes des triangles. La **Figure 39** illustre le processus de détermination de deux faces en contact.

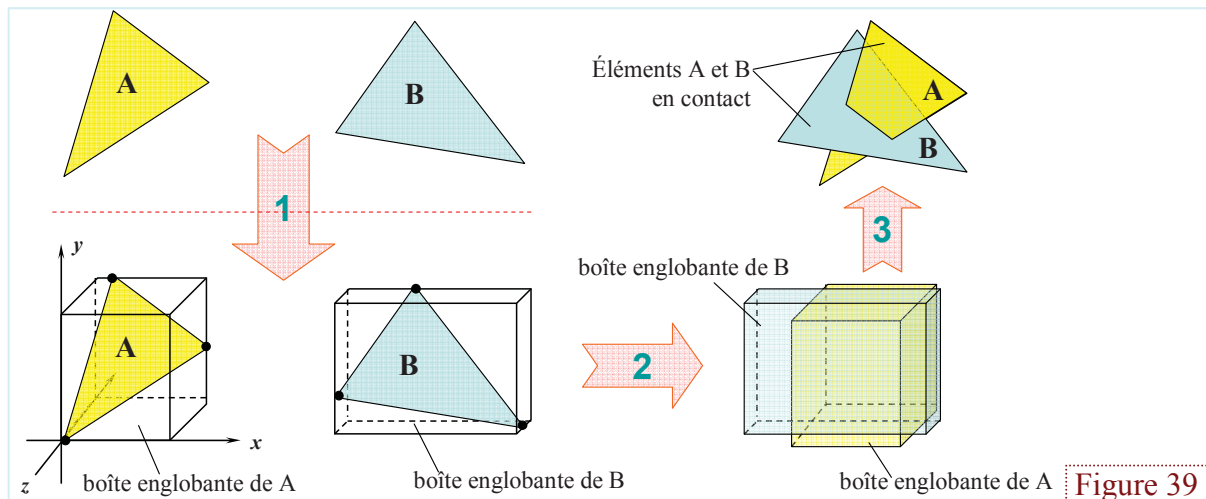
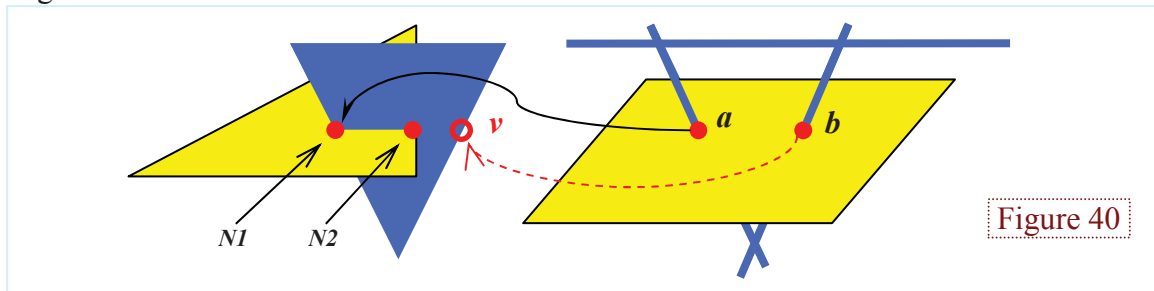


Figure 39



## 4.2 Méthode de calcul de l'intersection entre deux mailles

Cette méthode est illustrée sur la **Figure 40**. Nous avons deux triangles jaune et bleu en intersection. Pour calculer les deux points d'intersection  $N1$  et  $N2$  sur le schéma à gauche, il nous faut appliquer le calcul d'intersection entre le plan et les trois droites du schéma de droite. Le plan jaune passe par le triangle jaune, et les droites bleues passent par les trois arêtes du triangle bleu. Nous obtenons deux points d'intersection  $a$  et  $b$ . Ensuite, nous faisons à l'inverse, pour trouver les points d'intersection entre le plan défini par le triangle bleu et les droites définies par les arêtes du triangle jaune. Nous obtenons alors les nœuds  $N1$  et  $N2$ . Le nœud  $a$  correspond au nœud d'intersection  $N1$ , mais le  $b$  correspond au point  $v$  sur le schéma d gauche. Nous voyons donc que parmi les intersections calculées certaines ne sont pas à prendre en compte et sont à éliminer. Il s'agit des nœuds calculés qui ne sont pas sur les deux triangles simultanément



La **Figure 41** explique la vérification de nœuds d'intersection et les deux possibilités. L'**image (1)** montre un exemple de la première possibilité. Le point d'intersection  $P1$  est calculé par l'intersection entre une droite de l'arête de maille B et le plan de maille A. Mais ce point  $P1$  n'est pas sur l'arête de maille B. Pour réussir à détecter cette configuration, il suffit de tester si la coordonnée  $(x, y, z)$  de  $P1$  est sur l'arête. L'**image (2)** montre la deuxième possibilité de point d'intersection non valide. Les nœuds  $P2$  et  $P3$  sont trouvés par l'intersection entre les droites des arêtes de maille B et le plan de maille A. Mais les deux nœuds ne sont pas sur la maille B. Pour vérifier cela dernier, nous utilisons la méthode proposée par l'**image (3)** et l'**image (4)**. Ces deux schémas montrent deux cas où un point est dans un triangle et où un point est sur le plan déterminé par le triangle mais il n'est pas dans le triangle. Le test de détection de cette configuration consiste à comparer l'orientation des normales des triangles  $A_1A_2A_3$ ,  $A_1A_2P_2$  et  $A_2A_3P_2$ . Si le point est sur la maille, alors les trois normales doivent avoir la même orientation, sinon le point est en dehors.

## 4.3 Calcul de toutes les intersections entre faces

Il s'agit ici d'utiliser les méthodes des sections 4.1 et 4.2 pour déterminer efficacement toutes les intersections entre les faces de deux maillages. Le calcul est constitué de trois étapes principales:

- 1) **Identification de toutes les faces en contact** : Nous créons les boîtes englobantes de chacune des faces des deux maillages ainsi que les deux boîtes qui englobent les deux maillages. Nous comparons les boîtes englobantes des faces aux boîtes englobantes des maillages pour déterminer l'ensemble **F1** des faces du maillage1 en contact avec le maillage2 ainsi que l'ensemble des **F2** des faces du maillage2 potentiellement en intersection avec le maillage1. Pour permettre l'accélération de ce processus de détection d'intersection de boîtes englobantes, j'ai mis en œuvre des algorithmes de décomposition spatiale octree permettant la réduction du nombre des tests d'intersection de boîte englobantes. N'ayant pas totalement fini de programmer ces structures de données et algorithmes, je n'ai pas de tests de rapidité à proposer dans mon mémoire.

- 2) **Identification de paires de faces en contact** : Dès que nous obtenons les deux ensembles **F1** et **F2** nous commençons le calcul d'intersection entre la boîte englobante de chaque face de **F1** et la boîte englobante de chaque face de **F2**. Nous obtenons un ensemble **P** de paires de faces ( $f_1, f_2$ ) où  $f_1$  appartient à **F1** et  $f_2$  appartient à **F2**.
- 3) **Calcul des nœuds d'intersection entre deux dans une paire** : Dans cette étape nous appliquons le calcul des nœuds d'intersection présenté par la section 4.2 sur chaque paire de faces de l'ensemble **P**. A l'issu de cet algorithme, certaine face qui était potentiellement en intersection vont être identifiées comme ne l'étant pas et ainsi retirées de l'ensemble **P**.

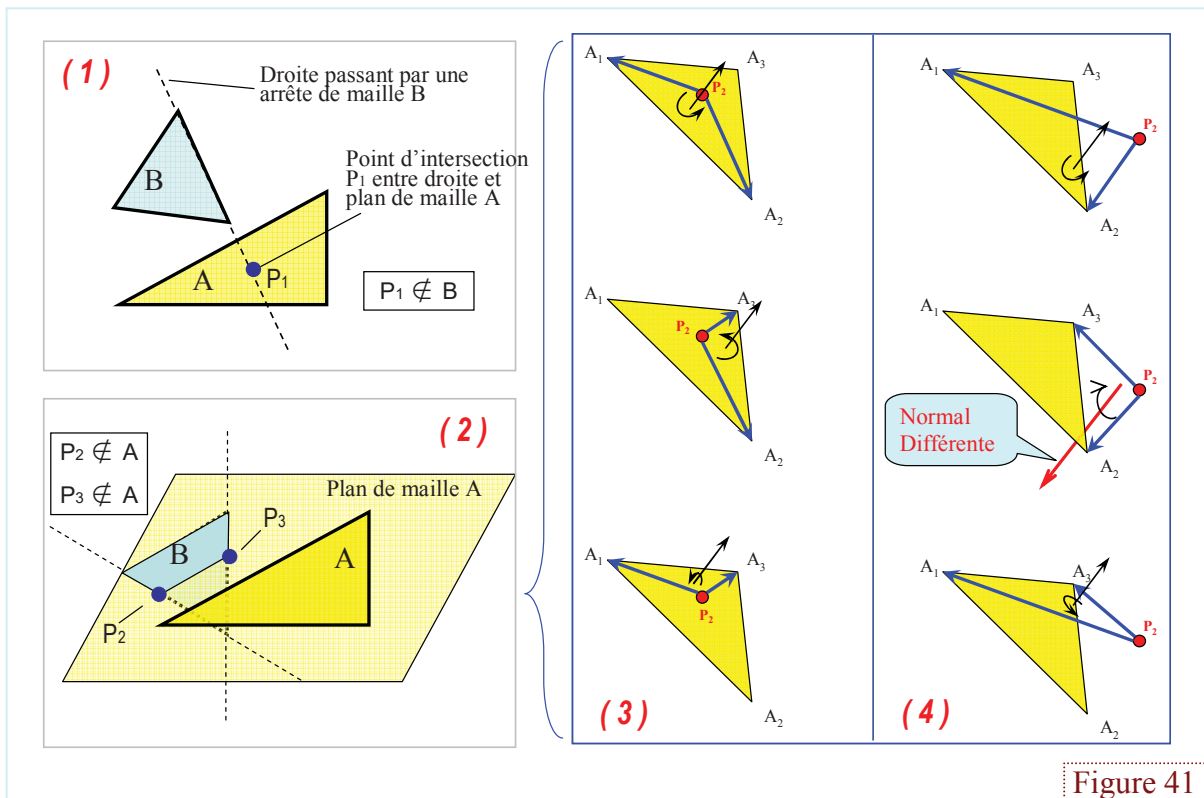


Figure 41

#### 4.4 Construction de la ligne d'intersection

Après le calcul de toutes les intersections, nous avons obtenu à la fois les nœuds en intersection et les faces en intersection. Nous pourrions donc supprimer directement les faces en contact. La **Figure 42** de gauche montre le résultat d'une telle suppression qui fournirait alors un maillage troué et une liste de nœuds isolés dans l'espace. Cet isolement fait qu'il nous sera alors impossible de reconstruire de manière pertinente les arêtes définissant les lignes d'intersection. Le seul moyen pour connaître l'ordonnancement des nœuds est d'utiliser la connectivité des faces en contact. Le schéma de droite montre que les nœuds d'intersection sont positionnés selon les faces. Ces en regardant la connectivité de ces faces que nous allons pouvoir définir les connections entre les nœuds d'intersection.

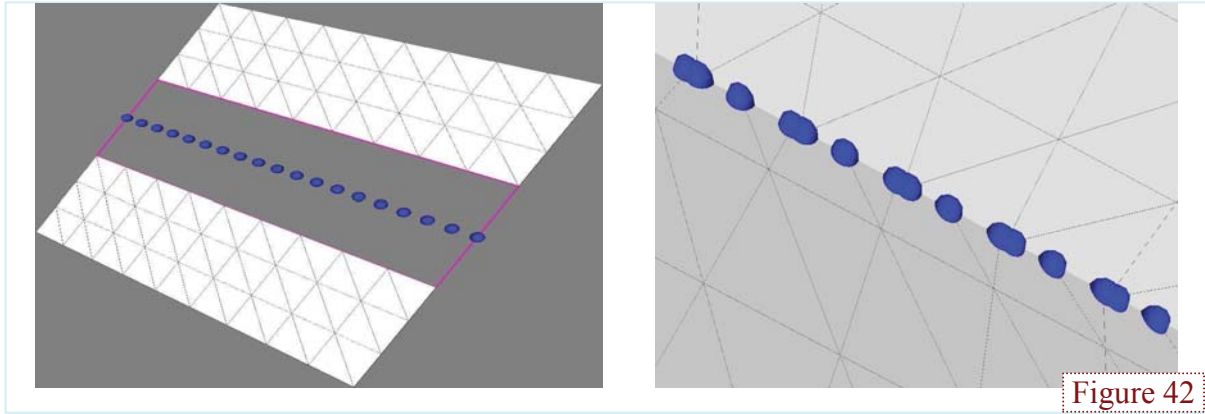


Figure 42

Deux cas d'étude ont été abordés et correspondent aux cas où la ligne d'intersection possède ou non de multiples branches/ramifications.

#### 4.4.1 Cas de mono ligne

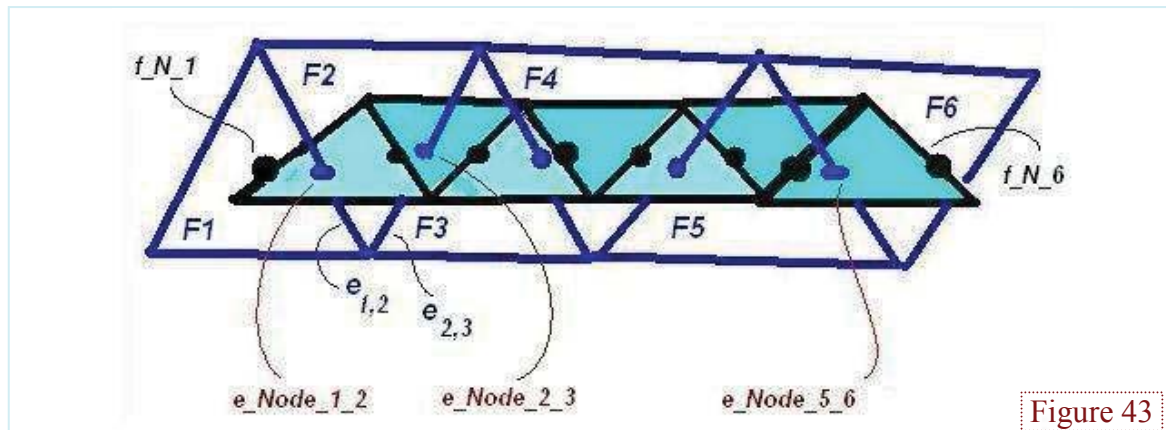


Figure 43

La **Figure 43** montre un exemple où la ligne d'intersection est constituée par une polyligne non ramifiée. Un maillage prioritaire  $M_p$  est choisi (densité plus grande) et on suppose ici qu'il s'agit du maillage bleu vertical. Les nœuds d'intersection sont classés en 2 parties : ceux qui sont produits par les arêtes du maillage prioritaire et par les arêtes du maillage non prioritaire. Ici on suppose que les nœuds d'intersection bleus sont ceux qui sont sur les arêtes du maillage prioritaire  $M_p$ . Les nœuds noirs sont produits par l'intersection des faces du maillage prioritaire  $M_p$  avec les arêtes de l'autre maillage. On définit les nœuds d'intersection sur les arêtes du maillage prioritaire comme  $e\_Node\_f1\_f2$ , où  $f1$  et  $f2$  sont les numéros des faces qui sont liés par l'arête où se trouve  $e\_Node\_f1\_f2$ . Par exemple  $e\_Node\_1\_2$  est un nœud d'intersection sur l'arête associant les faces  $F1$  et  $F2$ . On définit aussi les nœuds d'intersection sur les faces du maillage prioritaire comme  $f\_N\_f^o$ , où  $f^o$  est le numéro de la face où se trouve le nœud  $f\_N\_f^o$ . Par exemple le nœud  $f\_N\_1$  est un nœud d'intersection sur la face  $F1$ . Donc dans chaque face on a deux nœuds d'intersection sur les arêtes et des nœuds d'intersection à l'intérieur de la face. Les nœuds d'intersection seront connectés en utilisant la connectivité des faces. Cela signifie que :

- En global, les nœuds d'intersection sur les arêtes du maillage prioritaire seront d'abord bien ordonnés.
- En local, les nœuds d'intersection sur à l'intérieur des faces du maillage prioritaire seront ordonnés dans chaque face.

Les deux étapes sont effectuées en même temps. Dans la **Figure 43** si on part du nœud d'intersection  $e\_Node\_1\_2$ , le nœud d'intersection  $e\_Node\_2\_3$  est d'abord trouvé, ensuite le nœud d'intersection à l'intérieur de la face  $F2$   $f\_N\_2$  est trouvé. Après la création des arêtes



entre ces nœuds on partira du nœud d'intersection  $e\_Node\_2\_3$  et on trouvera  $e\_Node\_3\_4$ , et ainsi de suite pour ordonner tous les nœuds d'intersection.

Dès que l'on trouve le nœud d'intersection suivant sur l'arête, il faut créer des arêtes entre les deux nœuds d'intersection sur les arêtes, et les nœuds d'intersection sur la face associant les deux arêtes. En fonction du nombre de nœuds d'intersection à l'intérieur de la face, on peut distinguer trois cas (**Figure 44**) :

- (1) Quand il n'y a aucun nœud d'intersection à l'intérieur de la face, alors on crée simplement une arête entre ces deux nœuds sur les arêtes. L'**image 1** montre ce cas où il n'y a que deux nœuds d'intersection  $e\_Node1\_2$  et  $e\_Node\_1\_2$  que l'on connecte directement.
- (2) Quand il y a un seul nœud d'intersection à l'intérieur de la face, alors entre chacun des deux nœuds d'intersection sur les arêtes et le nœud d'intersection à l'intérieur de la face on crée une arête. Par exemple l'**image 2** montre qu'il y a un nœud d'intersection  $f\_N\_2$  sur la face  $F_2$ . On connecte alors  $f\_N\_2$  avec les nœuds d'intersection sur l'arête.
- (3) Quand il y a plus d'un nœud d'intersection à l'intérieur de la face, on les ordonne au fur et à mesure de la distance entre le nœud d'intersection à l'intérieur de la face et le nœud d'intersection sur l'arête. Dans l'**image 3** on a trois nœuds d'intersection sur la face, donc on les ordonne selon la distance entre ces nœuds et le nœud  $e\_Node\_1\_2$ , ensuite le  $e\_Node\_1\_2$  se connecte avec un nœud plus proche sur la face et le  $e\_Node\_2\_3$  se connecte avec le nœud plus loin de  $e\_Node\_1\_2$  sur la face.

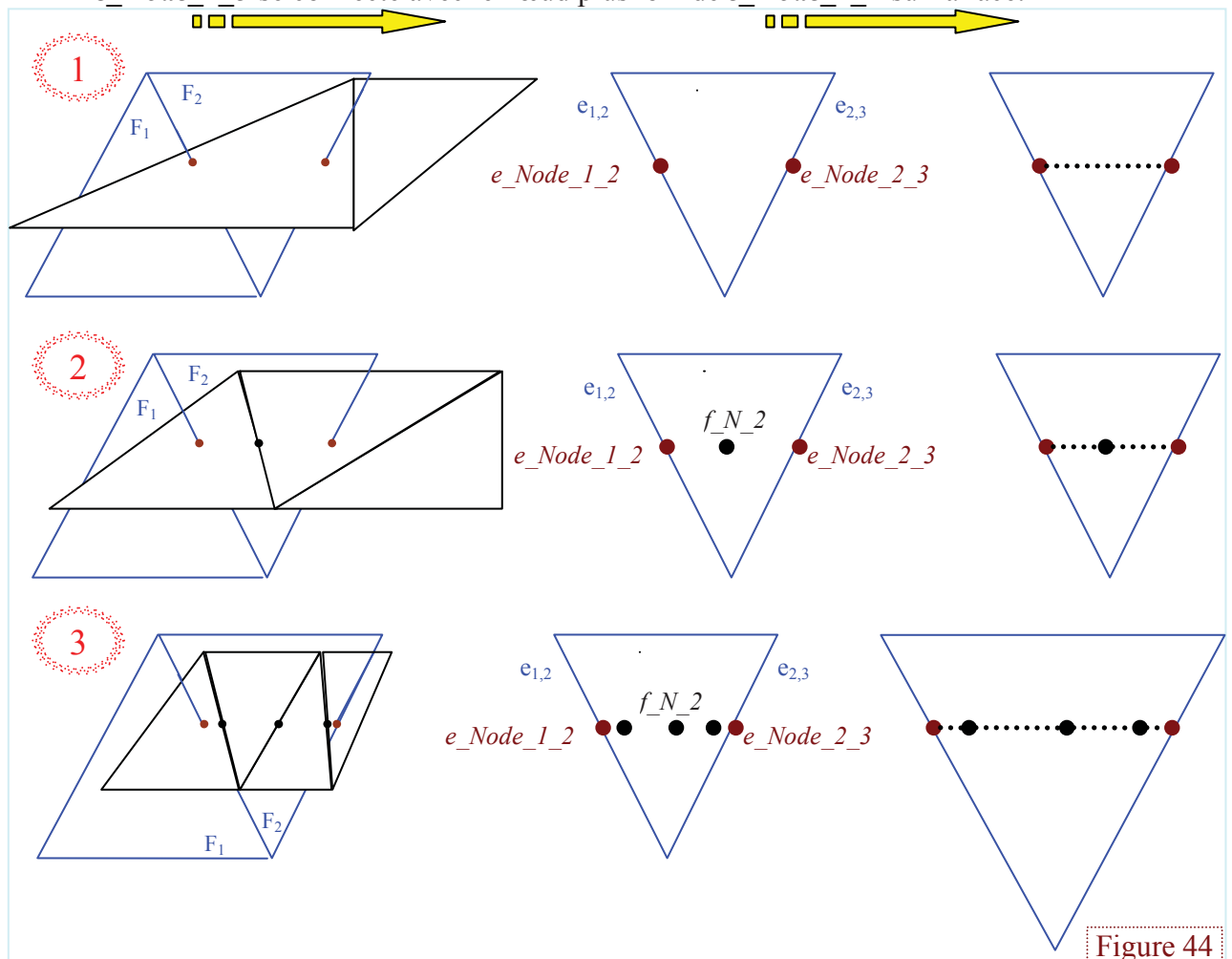
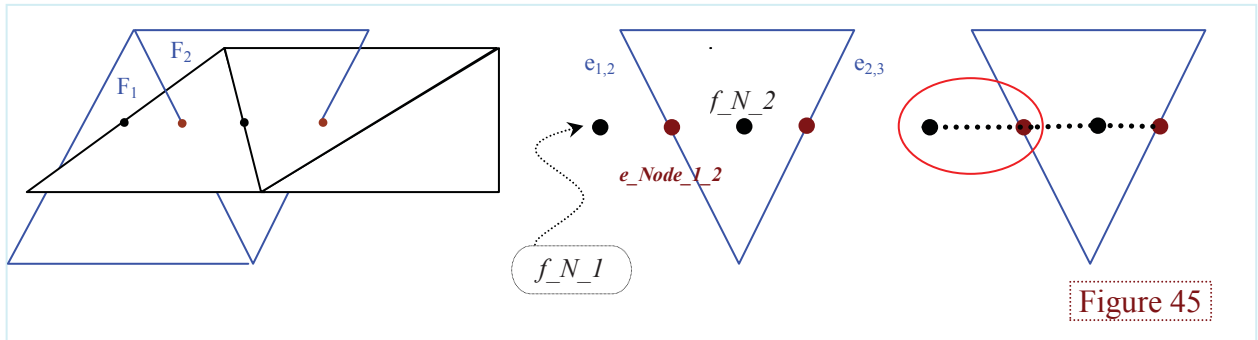


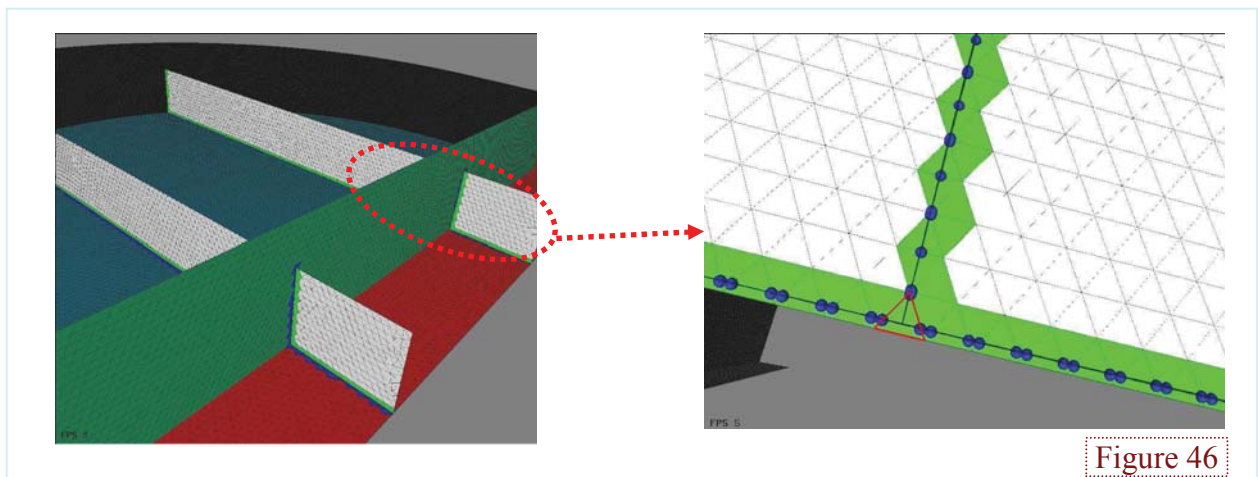
Figure 44

On parcourt donc l'ensemble des faces associées par des arêtes où il y a un nœud d'intersection. Une fois que l'on a fini les traitements sur toutes les faces qui contiennent deux nœuds d'intersection sur leurs arêtes, alors il faut vérifier s'il y a encore des nœuds d'intersection à l'intérieur des faces où il n'y a qu'un nœud d'intersection sur son arête. Ce sont des nœuds d'intersection aux extrémités de la ligne d'intersection. Par exemple dans la **Figure 43** les nœuds d'intersection  $f\_N\_1$  et  $f\_N\_6$  sont des nœuds qui composent les vraies extrémités de la ligne d'intersection. La **Figure 45** montre que le nœud d'intersection à l'intérieur de la face  $F_1$   $f\_N\_1$  est lié au nœud d'intersection sur l'arête  $e\_Node\_1\_2$ .



#### 4.4.2 Cas de multi ligne

Le cas des lignes d'intersection mono-branche présenté dans la section ne permet pas de couvrir tous les cas d'intersections complexes. La capture d'écran de la **Figure 46** montre un modèle qui peut produire une ligne d'intersection composée. Il s'agit ici de cas-test réalisé sur l'exemple d'un modèle industriel développé par EDF R&D. Le modèle 2D d'un caisson d'EDF a été fourni afin de pouvoir identifier des cas spécifiques d'intersection des maillages et valider le démarche générale de l'approche proposée. L'étape critique dans ce cas est de bien lier les nœuds d'intersection au niveau du carrefour. Dans le schéma de droite, le triangle rouge est une face qui décompose la ligne d'intersection.



La **Figure 47** montre un cas à 6 branches. Dans le cas de maillages EF, on se limitera à un maximum de 4 branches.

La **Figure 48** montre les différents cas de carrefour dans notre cas. Les schémas à gauche montrent deux morceaux de maillage au niveau de carrefour. Les lignes vertes sont les lignes d'intersection. Le maillage en haut comporte une ligne d'intersection à 3 branches, et celui en bas représente une ligne d'intersection à 4 branches. Nous pouvons classer les faces où il y a plus de 2 nœuds d'intersection sur l'arête en deux catégories : avec ou sans le point rouge. Ici

le point rouge est un nœud d'intersection à l'intérieur de la face, il est le centre de la décomposition de la ligne composée :

- Avec le point d'intersection à l'intérieur de la face, il suffit de connecter les nœuds d'intersection sur les arêtes avec le point rouge (**images** <1> et <2>).
- Sans le point d'intersection à l'intérieur de la face, alors c'est qu'il y a 4 nœuds d'intersection sur les arêtes. Ici, nous ne parlerons que des cas où il y a au moins 3 nœuds d'intersection sur les arêtes. L'**image** <3> montre le cas où il y a 4 nœuds d'intersection et aucun point d'intersection à l'intérieur. Nous pouvons voir qu'il s'agit de bien connecter les nœuds  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $m_1$  et  $m_2$ . Mais comment trouver les paires de nœuds, par exemple  $(n_1, n_2)$  et  $(m_1, m_2)$  ? La réponse se trouve expliquée sur la **Figure 49** :
  - Trouver parmi les quatre nœuds d'intersection deux sur la même l'arête. Le  $a$  et  $b$  sont les deux nœuds sur l'arête commune.
  - Définir les deux nœuds extrêmes de l'arête commune comme  $Va$  et  $Vb$ , où  $Va$  est plus proche du nœud  $a$  que  $b$ .
  - Définir parmi les deux nœuds d'intersection restant  $a^*$  et  $b^*$ , où  $a^*$  est sur une arête associant au nœud  $Va$ .
  - Créer une arête entre  $a$  et  $a^*$ , créer une arête entre  $b$  et  $b^*$ .

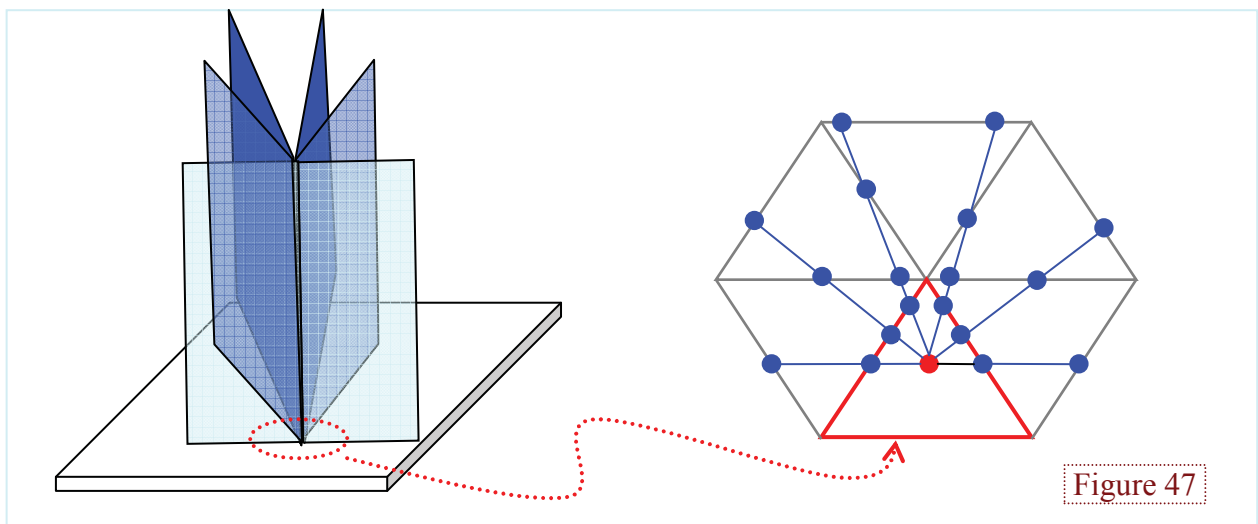


Figure 47

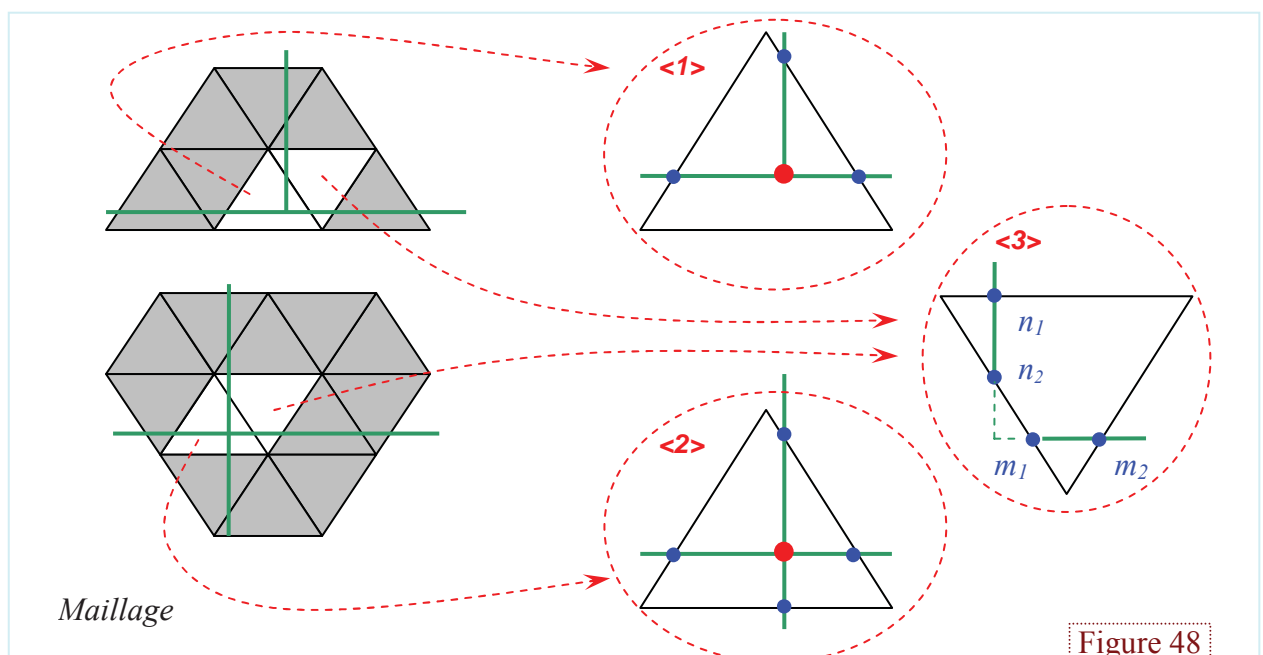


Figure 48

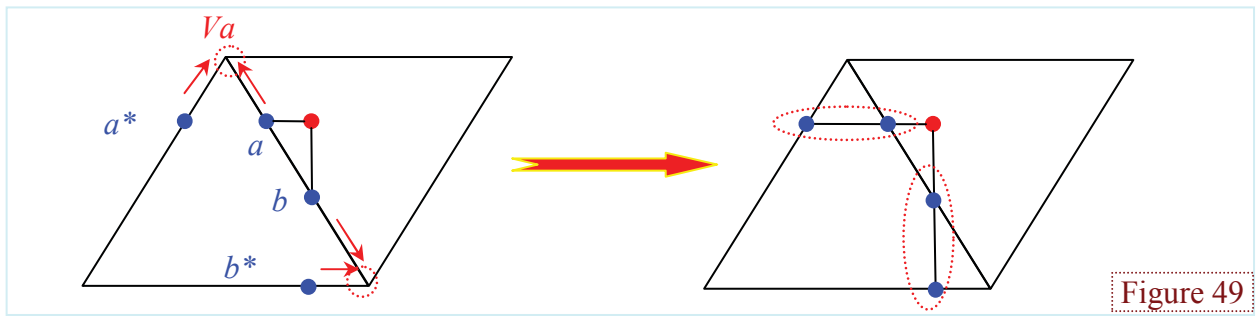


Figure 49

## 4.5 Optimisation de la ligne d'intersection

Après la connexion des nœuds d'intersection pour construire la ligne d'intersection, nous avons observé que les distances entre chaque couple de nœuds d'intersection ne sont pas égales. L'intersection de la **Figure 50.a** produit des nœuds d'intersection qui ne sont pas ordonnés de manière équidistance. On ne peut garder tous ces nœuds sous peine d'obtenir une triangulation avec des triangles très dégénérés.

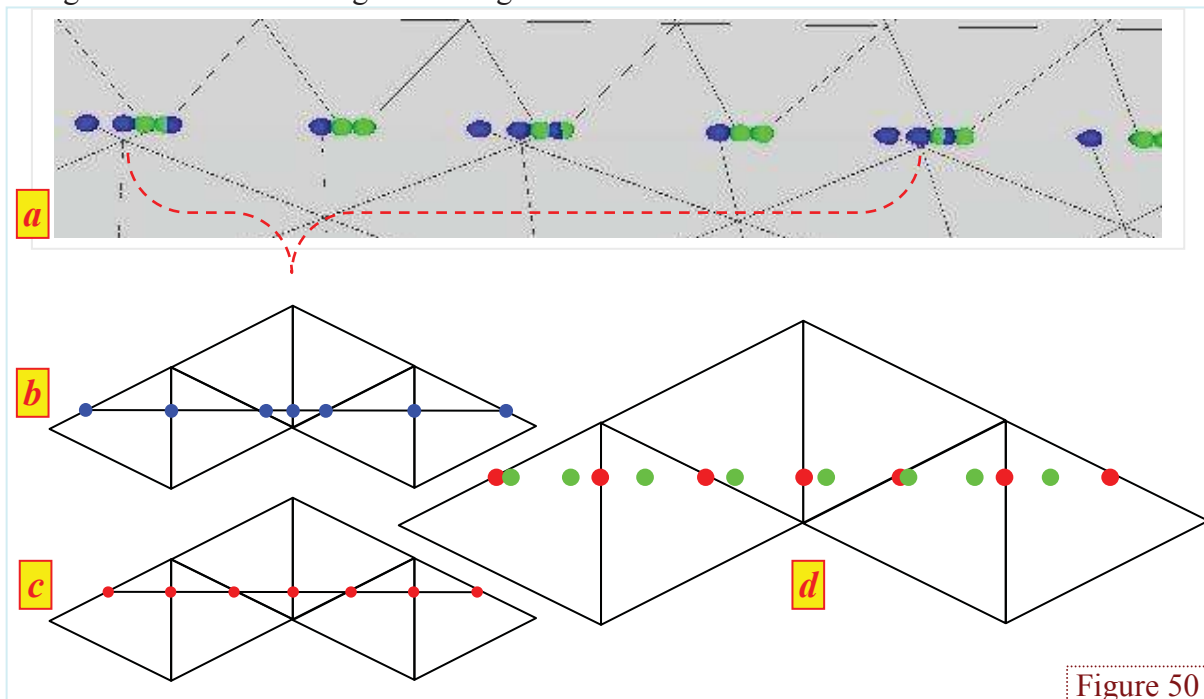


Figure 50

Si nous ne regardons que les nœuds d'intersection sur les arêtes, selon les différentes positions entre les deux maillages on peut avoir les schémas (b) et (c). Le schéma (b) montre ce qui se passe sur la configuration de la capture d'écran (a) où les nœuds qui sont proches les uns des autres doivent être réordonnés. Le schéma (c) montre une configuration où la position relative des deux maillages produit des nœuds relativement équidistants. Malgré la configuration (c) et si nous tenons compte des nœuds d'intersection à l'intérieur des faces (d), alors nous sommes obligés de réarranger et décimer ces nœuds avant de la triangulation. Les deux grands critères pour optimiser cette ligne d'intersection sont la distance et l'angle. Le critère de distance sert principalement à obtenir des nouvelles faces de taille pertinente lors de remaillage.

### 4.5.1 Approche générale

La **Figure 51** montre comment nous optimisons les nœuds d'intersection grâce au critère de distance. Le schéma vert en haut qui commence par une balise **R** est une règle ayant pour unité de base  $D_0$ , le critère de distance donné. Sous cette règle, j'ai représenté les 5 états du processus d'optimisation. A l'état 1, nous voulons examiner le nœud  $n_2$ . Les distances  $d_{1,2}$  et

$d_{1,3}$  sont calculées entre les nœuds  $n1$ ,  $n2$  et  $n1$ ,  $n3$ . Si  $d_{1,2}$  est inférieur à  $D_0$ , alors si  $d_{1,3}$  est supérieur à  $D_0$ , nous bougeons le nœud  $n2$  vers une coordonnée sur la droite définie par  $n1$  et  $n3$ , où la distance entre  $n1$  et cette nouvelle coordonnée est  $D_0$ . On arrive à l'état 2 où  $n2$  a une nouvelle coordonnée. Nous continuons à examiner  $n3$ , les distances  $d_{2,3}$  et  $d_{2,4}$  sont calculées. La  $d_{2,3}$  est inférieur de  $D_0$ , mais la  $d_{2,4}$  est aussi inférieur à  $D_0$ , alors dans ce cas-là le nœud  $n3$  est éliminé. Nous passons à l'état 3, où le  $n3$  est représenté par un cercle pointillé. Pour le nœud  $n4$  nous faisons la même chose, à la fin nous décidons qu'il doit être éliminé aussi. Enfin, les nœuds  $n5$  et  $n6$  sont bougés pour avoir une distance voisine de  $D_0$ .

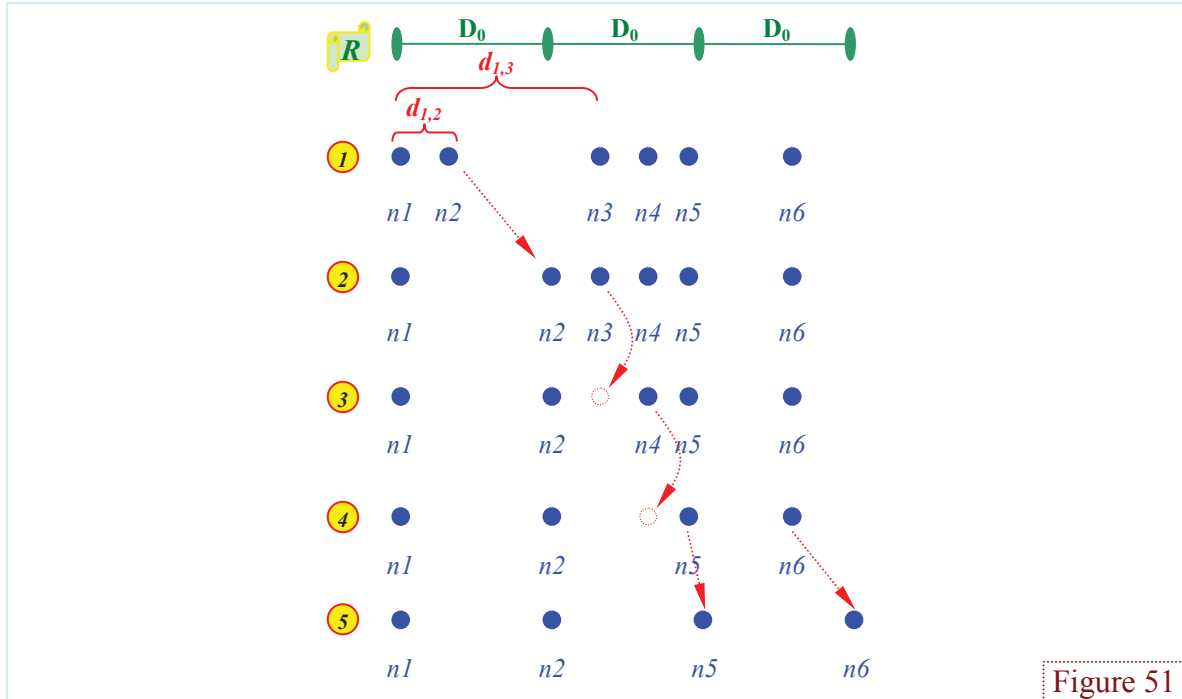


Figure 51

Si par contre au début la distance  $d_{1,2}$  est supérieure à  $D_0$ , alors nous mettons directement le nœud  $n2$  sur la nouvelle coordonnée à une distance  $D_0$  à partir de  $n1$ . Si la distance  $d_{1,2}$  égale  $D_0$ , alors nous ne faisons rien sur ce nœud.

#### 4.5.2 Tests complémentaires et cas particuliers

L'optimisation simple décrite précédemment est faite pour une ligne d'intersection plus ou moins rectiligne ce qui signifie qu'il n'y a ni de nœuds représentant une forme particulière d'un modèle, ni de nœuds produit par une arête non manifold. Dans le cas contraire, avant de bouger ou éliminer le nœud examiné selon la méthode de la section 4.5.1, il faut tester si il est associé à un angle important ou s'il est le 'carrefour' d'une ligne composée.

La **Figure 52** montre les trois cas où nous ne toucherons pas le nœud d'intersection  $n$  lors de l'optimisation. Ces tests sont effectués chronologiquement :

1. Si le nœud  $n$  est sur une arête du bord d'un maillage nous ne le touchons pas puisque si nous l'éliminons ou le bougeons, le modèle sera modifié au niveau de frontière.
2. Si le nœud  $n$  est produit par une arête non manifold d'un modèle, alors nous le laissons sans le toucher, car si nous le touchons la partie en contact ne sera pas cohérente avec la partie d'origine au niveau de la même arête non manifold.
3. Si l'angle formé par le nœud  $n$  et les nœuds  $n-1$  et  $n+1$  est important, nous n'y touchons pas car si nous bougeons ou éliminons le nœud  $n$ , la forme caractéristique du modèle (noir) va être perdue.



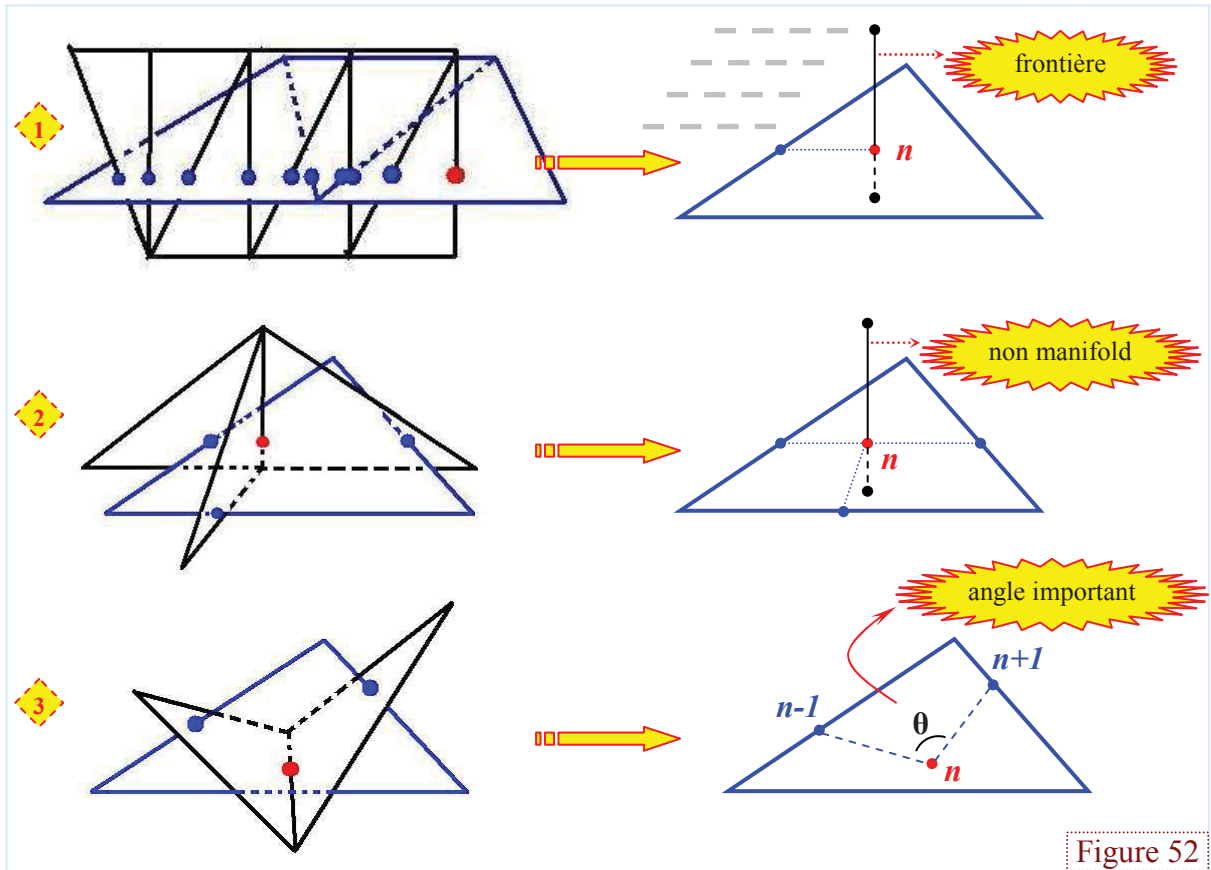


Figure 52

## 4.6 Nettoyage de la zone en contact

Une fois la construction de la ligne d'intersection terminée, nous passons à l'étape de suppression de la zone en contact. Il ne s'agit pas seulement de supprimer les faces qui sont en intersection, mais potentiellement des faces qui sont autour de ces faces en intersection. On fait ainsi apparaître la notion de **n-voisinage** qui rassemble toutes les faces situées à  $n$  rangées de la ligne d'intersection. La suppression se fait de manière itérative. Au fur et à mesure de la suppression, on maintient à jour la liste des arêtes constituant le trou à boucher par la suite.

### 4.6.1 Suppression des faces selon le principe de $n$ -voisinage

L'intérêt de supprimer des faces autres que celles directement en intersection est illustré sur la **Figure 54**. L'image [a] montre les nœuds d'intersection calculés. Supposons que seules les faces en intersection soient ensuite détruites (image [b]), la triangulation qui en découlera risque de fournir des triangles dégénérés. Ceci est dû à l'hétérogénéité des distances entre le contour du trou et les nœuds d'intersection (bleus). L'image [c] montre les différentes distances à l'aide de flèches. Pour surmonter ce problème, il faut diminuer la différence relative des  $\delta_i$ . Ce paramètre  $\Delta\delta$  est grossièrement calculé par l'équation suivante :

$$\Delta\delta = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\max}}$$

Puisque la différence  $\delta_{\max} - \delta_{\min}$  est déterminée par la taille de face, alors elle est presque stable. La solution est donc d'agrandir  $\delta_{\max}$ . Pour l'agrandir il s'agit de supprimer plus de faces que les faces en contact afin d'ouvrir une bande assez large. Le schéma [d] montre le trou quand nous supprimons les faces en contact et les faces voisines. Donc nous calculons à

nouveau les distance  $\delta'$ , et l'importance de différence  $\Delta\delta'$  est beaucoup plus petit que  $\Delta\delta$ . Le problème est surmonté. Donc la notion de n-voisinage est introduite. La formule récursive suivante montre comment trouver un ensemble de faces F de qui nous voulons trouver les faces de n<sup>ième</sup> voisine.

$$\begin{cases} \text{Si } n > 1, F_{n\text{-voisinage}} = \text{faces voisines de } F_{(n-1)\text{-voisinage}} \\ \text{Si } n = 0, F_{n\text{-voisinage}} = F \end{cases}$$

La **Figure 53** montre l'ensemble des faces F qui sont bleu le plus foncé au milieu. Ensuite son 1<sup>er</sup> voisinage est l'ensemble de faces qui sont au tour. Et son 2<sup>ième</sup> voisinage est l'ensemble de faces qui sont bleues le plus claires.

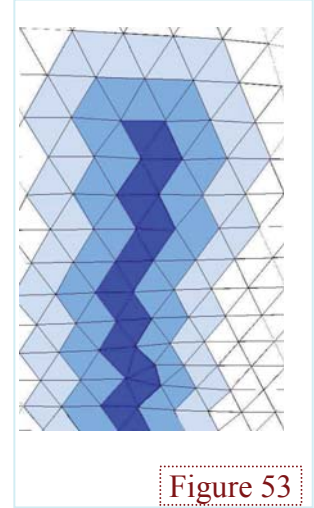


Figure 53

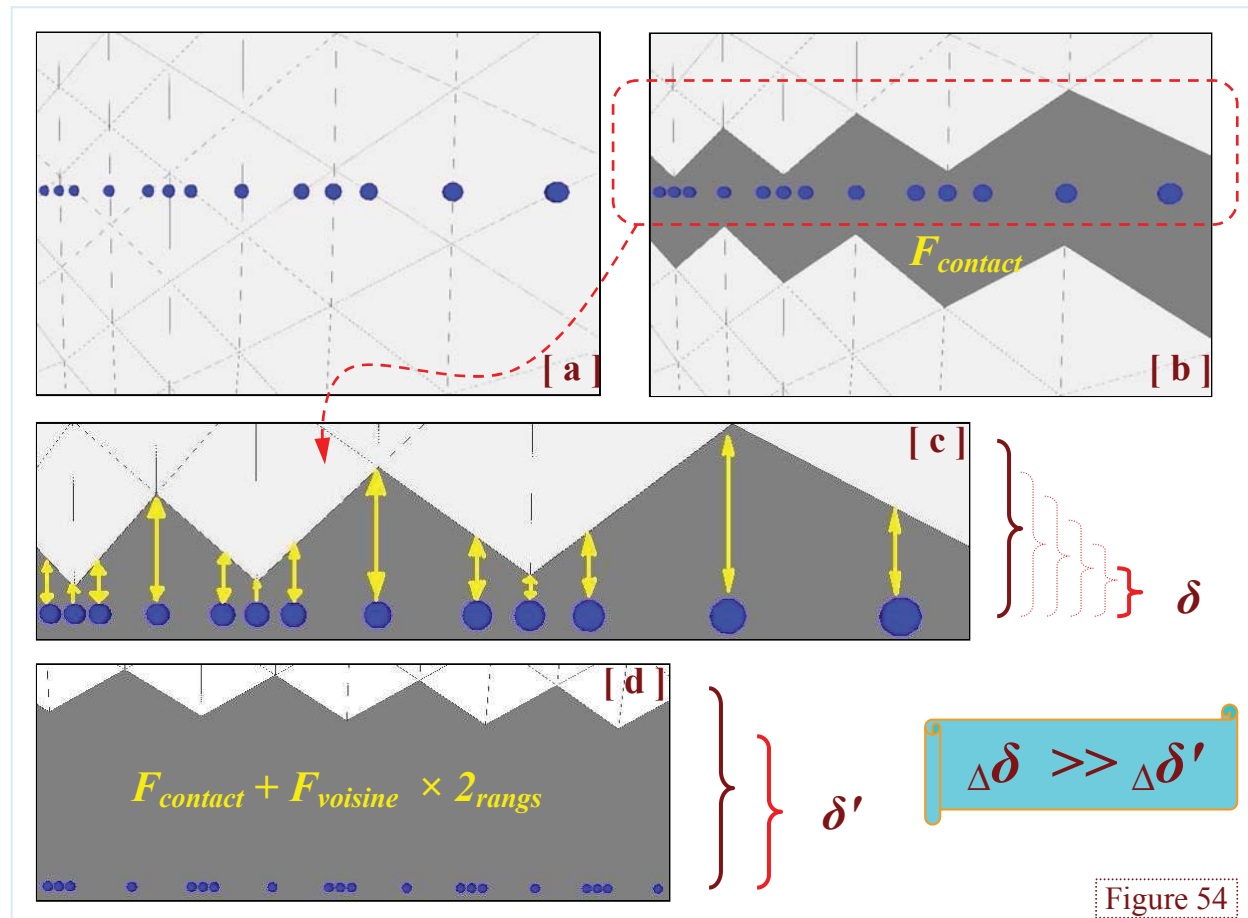


Figure 54

#### 4.6.2 Stockage des arêtes de contour du trou

La suppression récursive des triangles génère un trou dont les arêtes de bord doivent être détectées au fur et à mesure de la suppression. La **Figure 55** montre la mise à jour des différents contours détectés lors suppression de la face. Les arêtes du contour sont colorées rouge. A chaque itération, avant de supprimer les faces en contact, les arêtes associant une face en contact à une face non en contact sont détectées. Dans le cas de la suppression de 1<sup>ière</sup> voisine, les arêtes qui associent une face de une face de 1<sup>ière</sup> voisine et une face non 1<sup>ière</sup> voisine sont collectées. Comme les faces de 0<sup>ière</sup> voisine (face en contact) sont déjà supprimées, nous n'avons pas besoin de vérifier si une arête associant une face en contact et

une face de 1<sup>ère</sup> voisine collectée. Si on ne supprime pas les faces de voisinage inférieur que n-voisinage alors on peut directement collecter les arêtes qui associe une face de n<sup>ème</sup>-voisine et une face de n+1<sup>ème</sup>-voisine. Et ensuite nous pouvons supprimer en une fois les faces de voisinage inférieur à n.

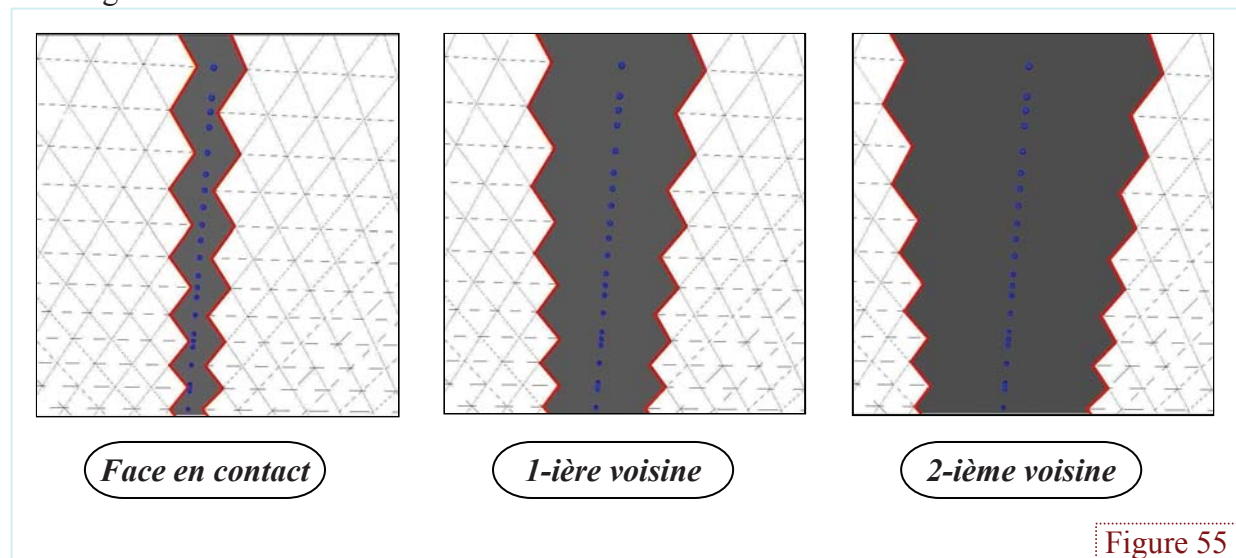


Figure 55

## 4.7 Remaillage

Après le calcul d'intersection, la construction de la ligne d'intersection et le nettoyage de la zone d'intersection nous avons besoin de remailler cette zone sous la contrainte de la ligne d'intersection. C'est une étape de remplissage de trou.

Avant de commencer le remaillage de la zone en contact, j'ai étudié et implémenté dans XDS l'algorithme de remplissage de trou proposé par [LIE 01]. Il s'agit d'un algorithme de triangulation d'un trou sous le critère de l'aire minimale. Pour éviter d'avoir des angles aigües entre les triangles, un critère de contrôler des 'dihedral angles' est également proposé.

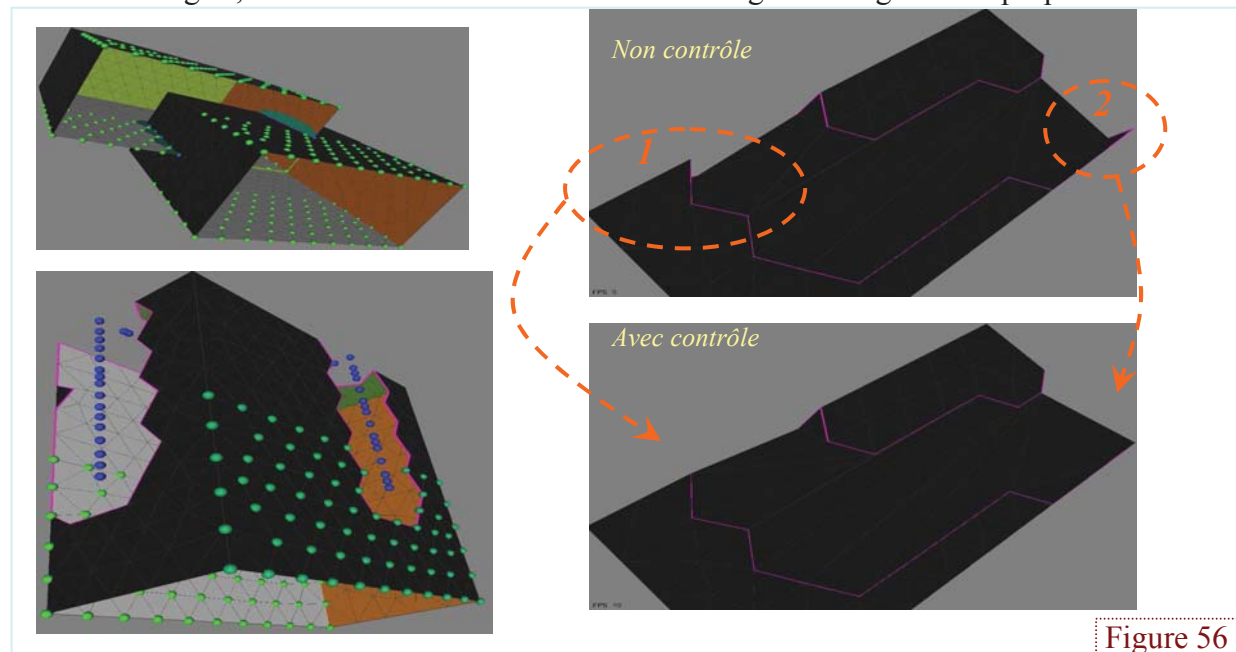


Figure 56

La **Figure 56** montre la différence entre les triangulations avec et sans contrôle selon le critère de « dihedral angle » proposé et implémenté dans XDS. Il s'agit de minimiser l'angle composé par deux mailles créées voisines. L'image à gauche du bas montre un modèle 'cube

ouvert' troué à l'issu du nettoyage de la zone d'intersection montrée par l'image à gauche du haut. Les deux images de droite montrent les résultats du remplissage de trou avec/sans emploi du critère cité ci-dessus. Le résultat de triangulation montrée sur l'image à droite en haut illustre le résultat de remplissage de trou sans contrôle de type 'dihedral angle' avec un problème de maillage des endroits critiques indiqués (génération des mailles de mauvaise qualité). Par ailleurs, ce premier résultat forme un contour concave en approximant mal la géométrie de la forme d'origine (endroits critiques nommés *1* et *2*) contient des faces superposées (endroits critique nommé *2*). L'image du bas présente la triangulation sous le contrôle du 'dihedral angle'. Nous constatons que dans ce dernier cas la triangulation a permis de générer le meilleur maillage par rapport au résultat précédent.

Pour l'analyse Eléments Finis, nous avons besoin de maillages composés par des éléments les plus équilatéraux possibles. Pour cette raison nous avons continué à rechercher des méthodes pour améliorer la forme des triangles. L'article [PER 07] propose un critère **Q** pour détecter les triangles équilatéraux :

$$Q = \alpha \frac{S}{hp}$$

où  $S$  est l'aire du triangle,  $h$  est longueur d'arête plus longue,  $p$  est le périmètre, et  $\alpha$  est une constante égale à  $2\sqrt{3}$  et  $Q \in [0,1]$ .

L'idée est donc de remplacer le critère d'aire minimale, qui donne de mauvais résultats pour le remaillage de zones planes, par le critère de qualité de maille  $Q$ . Le schéma de gauche de la **Figure 57** montre le trou dû à la suppression des faces en contact, et à droite ceux sont deux résultats de remaillage. La zone blanche est le trou remaillé. Celui en haut montre le résultat de remaillage sous critère aire minimale, et celui en bas montre le résultat de remaillage sous le critère **Q maximal**. Le critère aire minimale crée des triangles aigües, et le critère  $Q$  maximal génère des triangles beaucoup plus équilatéraux. Ce nouveau critère est donc très intéressant dans le cas du remaillage d'une zone plane où quelle que soit la triangulation, la zone remaillée aura toujours la même aire.

Nous revenons au problématique de notre recherche, le remaillage de la zone en contact (supprimée les faces en contact) sous la contrainte de la ligne d'intersection. L'idée générale est de couper le trou séparé par une ligne d'intersection en deux sous-trous ou plus suivant la complexité de la ligne d'intersection. L'**image 1** de la **Figure 58** montre la ligne d'intersection au milieu du trou. Pour chaque extrémité de la ligne d'intersection, nous trouvons un nœud plus proche sur le bord du trou, puis nous créons une arête entre cette extrémité de la ligne d'intersection et le nœud plus proche sur le contour. L'**image 2** montre la nouvelle arête créée entre l'extrémité de la ligne d'intersection et un nœud du contour de trou. Donc le trou est coupé en deux sous-trous simples et nous pouvons le remplir à l'aide de l'algorithme de Liepa modifié pour tenir compte du critère d'équilatéralité  $Q$ . L'**image 3** montre que les deux sous-trous sont maillés ce qui revient à remplir le gros trou d'origine sous la contrainte de la ligne d'intersection. Nous faisons le même processus pour toutes les branches de la ligne d'intersection sur les deux maillages, nous pourrions obtenir que les deux maillages soient bien connectés. L'**image 4** montre que la triangulation sous la contrainte de la ligne d'intersection est réalisée pour la zone d'intersection, les deux plans sont bien fusionnés.

Dans le cas où la ligne d'intersection n'est pas simple, c'est-à-dire composée de plusieurs ramifications, l'algorithme de décomposition en sous-trous est adapté de manière à



fonctionner de façon récursive. Ce sera le cas sur l'exemple complexe proposé dans la partie 'Résultats'.

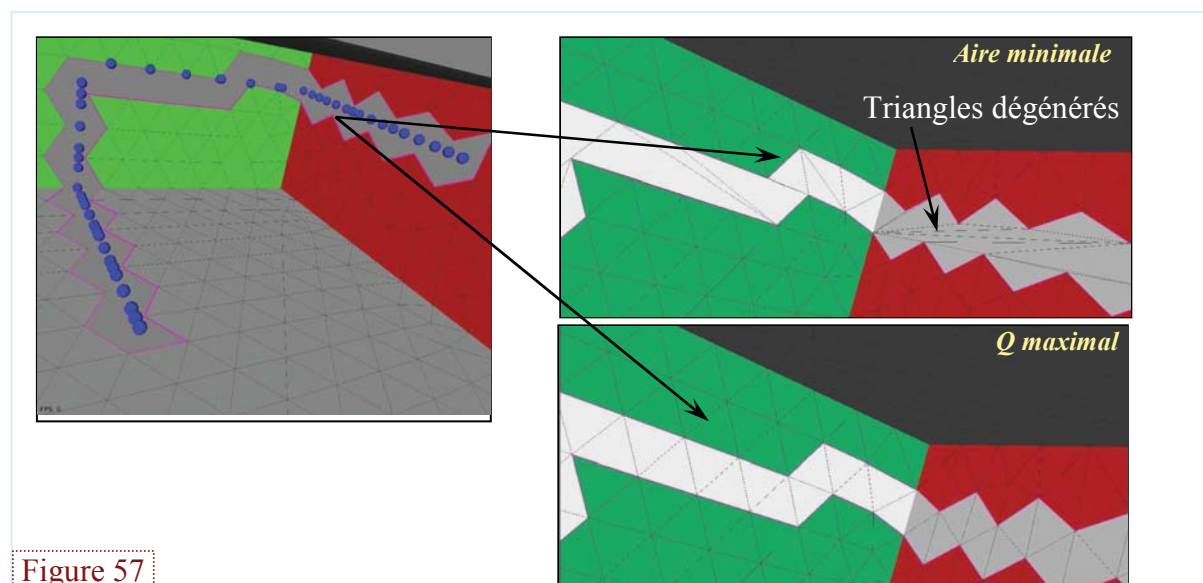


Figure 57

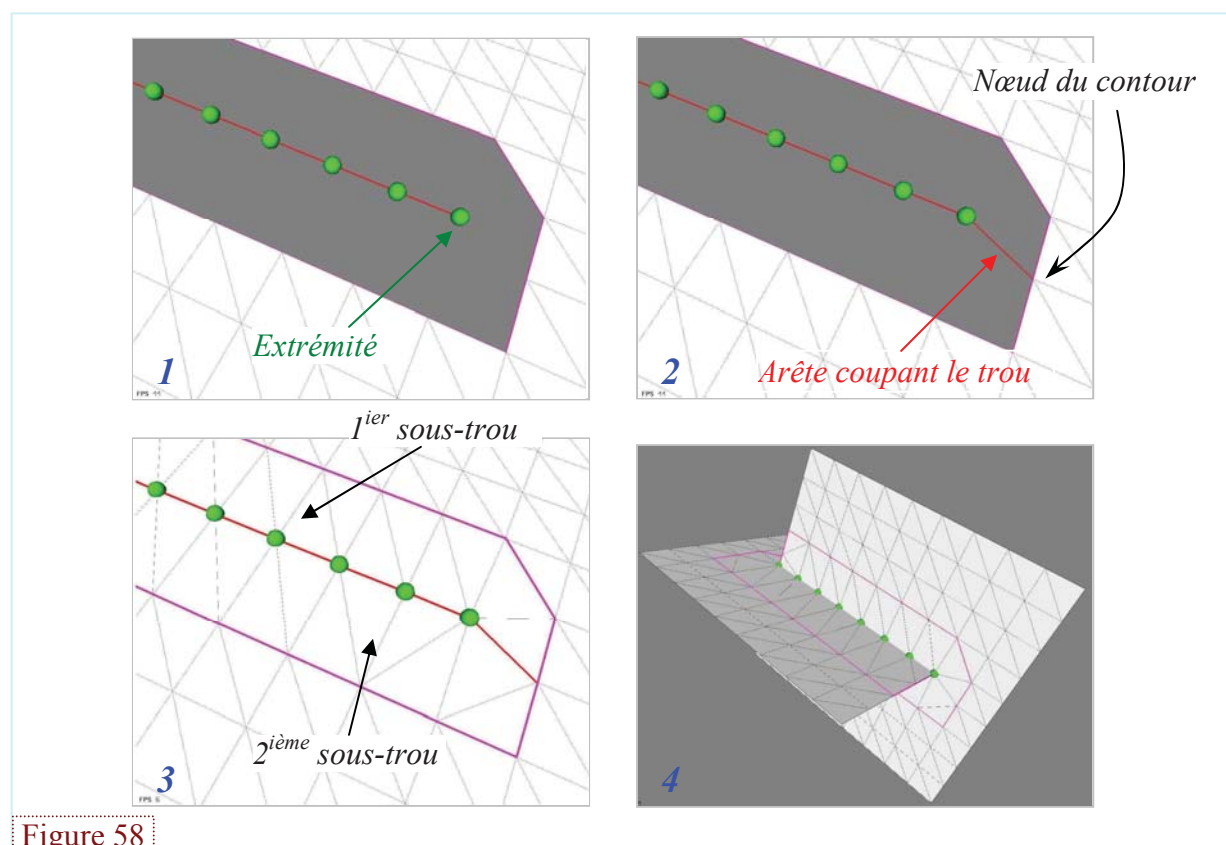


Figure 58

#### 4.8 Optimisation de maillage de zone d'intersection par insertion de nœuds

A l'issue de l'étape de remaillage/triangulation de zone de contact de deux maillages surfaciques, nous obtenons un morceau de maillage qui remplit la zone nettoyée. Suivant la configuration de la ligne d'intersection (une ou plusieurs ramifications), il peut y avoir en sortie plusieurs morceaux de maillage remplissant les différents sous-trous identifiés. Suivant le nombre  $n$  de rangées de faces supprimées avant le remplissage, la triangulation obtenue



peut contenir des triangles allongés et donc inadaptés aux EF. Ceci peut également survenir lorsque les deux maillages à fusionner ont des tailles très différentes. La **Figure 59** nous montre sur le schéma de gauche une triangulation sous la contrainte de la ligne d'intersection. Alors les mailles créées sont beaucoup plus grands que les mailles autour du trou. L'étape de raffinement des morceaux de maillage remplissant les sous-trous est donc nécessaire. L'algorithme de raffinement que nous souhaitons utilisé a été développé par [LIE 01]. L'idée est de diminuer la taille des triangles sur le morceau de maillage créé au fur et à mesure de la taille des triangles autour du trou sur le maillage originale. Pour cela :

1. Il faut d'abord calculer une taille de référence  $\sigma(\mathbf{v}_i)$  qui est la moyenne des longueurs des arêtes liées à tous les nœuds  $\mathbf{v}_i$  du contour du trou. Les arêtes mesurées sont celles existant dans le maillage d'origine.
2. Ensuite il faut effectuer l'opération suivante sur tous les triangles. Pour chaque triangle  $(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j, \mathbf{v}_k)$  nous trouvons le barycentre  $\mathbf{v}_c$ . Nous calculons une valeur d'échelle  $\sigma(\mathbf{v}_c)$  qui est calculée par l'équation suivante :

$$\sigma(\mathbf{v}_c) \leftarrow (\sigma(\mathbf{v}_i) + \sigma(\mathbf{v}_j) + \sigma(\mathbf{v}_k)) / 3.$$

Donc pour chaque nœud  $\mathbf{v}_m$  où  $m = i, j, k$ , nous examinons deux conditions :

Si  $\alpha \| \mathbf{v}_c - \mathbf{v}_m \| > \sigma(\mathbf{v}_c)$  ET  $\alpha \| \mathbf{v}_c - \mathbf{v}_m \| > \sigma(\mathbf{v}_m)$  alors le triangle  $(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j, \mathbf{v}_k)$  est remplacé par les trois triangles  $(\mathbf{v}_c, \mathbf{v}_j, \mathbf{v}_k)$ ,  $(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_c, \mathbf{v}_k)$  et  $(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j, \mathbf{v}_c)$ . Le schéma au milieu de la **Figure 59** montre le découpage du triangle par insertion d'un nœud du barycentre.

3. Après le traitement d'insertion de nœuds sur tous les triangles, la taille des mailles sera réduite, mais les triangles deviennent très aigus. Déjà les trois triangles générés sur le schéma milieu de la **Figure 59** sont très plats, parce que le nœud  $m$  associe trois triangles, du coup la moyenne des angles associés le nœud  $m$  est  $360^\circ / 3 = 120^\circ$ . Pour réparer les triangles plats, nous pouvons faire du swap d'arête entre deux triangles associés par une arête commune  $e$ . Le schéma de droite de la **Figure 59** montre le swap d'arête sous le critère de Delaunay. Nous calculons le cercle circonscrit passant par les deux nœuds de l'arête  $e$  et un nœud  $T$ . Donc si 4<sup>ième</sup> nœud  $V$  est à l'intérieur du cercle, alors nous allons remplacer l'arête  $e$  par l'arête définie par le nœud  $V$  et  $T$ . On réitère ensuite les étapes 2 et 3 jusqu'à ce que plus aucun nœud ne soit ajouté.

Cet algorithme possède le défaut de potentiellement générer des configurations où des nœuds ne sont connectés qu'à trois faces. Il n'a pas encore été implémenté ni testé.

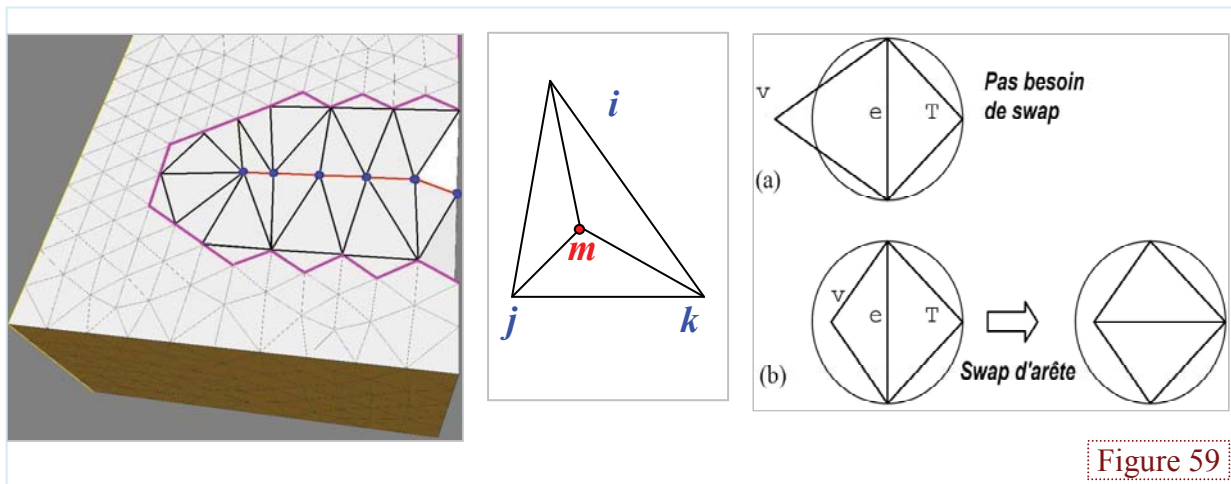


Figure 59

## 4.9 Transfert d'informations sémantiques

Cette étape n'a pas encore été traitée mais j'espère avoir des résultats à montrer pour la soutenance. L'idée peut s'expliquer facilement sur la **Figure 57**. Une fois la triangulation effectuée et les nouveaux points insérés, cette étape consistera à affecter les nouveaux triangles dans les partitions existantes du modèle géométrique. Il s'agit sur cet exemple de dire si les nouveaux triangles doivent être colorés en rouge ou en vert.

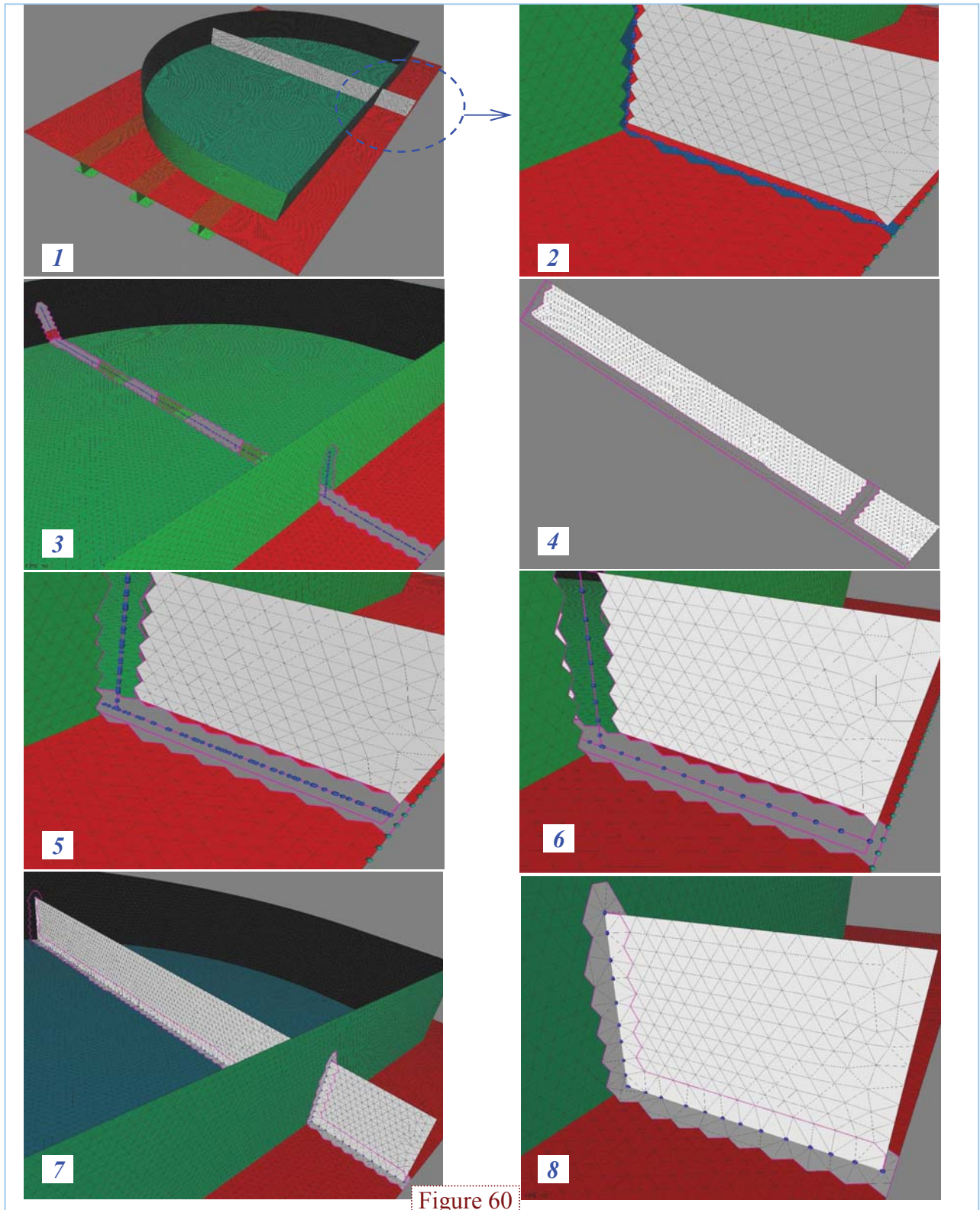


Figure 60

## 5. Résultats

Dans cette section nous allons montrer certains résultats obtenus en mode Face/Arête et en mode Face/Face.

### 5.1 Mode Face/Arête

L'exemple présenté ici par la **Figure 60** porte sur le problème d'assemblage conforme de deux maillages indépendants : maillage 2D d'un caisson auquel on souhaite assembler un autre maillage 2D d'un raidisseur plan et un caisson cylindrique comme présenté en introduction sur la **Figure 6**. La ligne d'intersection entre les deux est ici complexe. L'algorithme commence tout d'abord par calculer tous les points d'intersection entre toutes les faces (**Figure 60-images 1 et 2**). Les faces contenues dans la première bande en intersection sont ensuite supprimées faisant ainsi apparaître un certain nombre de trous (**Figure 60-images 3 et 4**). Les nœuds d'intersection obtenus sur l'**image 5** sont ensuite optimisés pour réduire leur nombre et éviter la création de triangles dégénérés. Le résultat de cette optimisation est présenté sur l'**image 6**. Enfin, les bords des trous obtenus sont utilisés conjointement au morceau de la ligne d'intersection pour définir un ensemble de sous-trous qu'il faut alors remplir selon le critère d'équilatéralité  $Q$  (**Figure 60-images 7 et 8**). Sur cet exemple, le caisson est divisé en **22** sous-trous et le raidisseur en **7** sous-trous.

Sur cet exemple, il resterait encore à transférer les informations sémantiques présentes sur les bords des trous pour pouvoir les affecter automatiquement aux nouveaux triangles ainsi créés. De façon pratique, il s'agit de savoir si les triangles gris doivent appartenir aux groupes rouge, vert clair ou vert foncé correspondant en pratique à des conditions limites (efforts, déplacements) différentes.

### 5.2 Mode Face/Face

L'exemple porte ici sur la fusion de blocs de pierre. Ces pierres constituent les restes d'une porte italienne. Elles sont déconnectées et en plusieurs morceaux initialement posés sur le sol. Ces pierres ont été scannées par le laboratoire MAP pour obtenir leur maillage à partir des nuages de points. Maintenant nous voulons fusionner ces pierres pour retrouver la porte entière en un seul maillage triangulaire.

L'**image 1** de la **Figure 61** montre plusieurs morceaux de pierres composant une porte italienne. Alors il s'agit de fusionner les morceaux de pierres pour retrouver le modèle de la porte. Dans cet exemple, il n'y a pas d'intersection entre elles, mais elles sont tout simplement mises ensemble, et une surface d'une pierre touche celle d'une autre pierre avec des intersections locales possibles du fait des irrégularités de la surface de contact. Les morceaux ont été déjà positionnés les uns par rapport aux autres. Dans un premier temps, il s'agit de détecter l'intersection entre chaque couple de pierres en contact. L'**image 2** montre les faces potentiellement en contact après identification en utilisant notre algorithme sur les boîtes englobantes. Les **images a** et **b** montrent indépendamment les faces en contact des deux morceaux de pierres. L'**image 3** montre le nettoyage de la zone en contact par suppression d'une seule rangée autour de la zone de contact. Et les **images c** et **d** montrent indépendamment l'ouverture de trou sur les deux maillages. L'**image 4** montre le résultat de la triangulation entre les deux anneaux (contour violet de trous) pour connecter les deux maillages. Ici, le trou a tout d'abord été fermé en joignant les deux morceaux par un triangle selon un critère de distance minimale et ceci afin de se retrouver dans une configuration similaire aux précédentes, c'est-à-dire une configuration où le trou se trouve sur un maillage et non entre deux maillages.



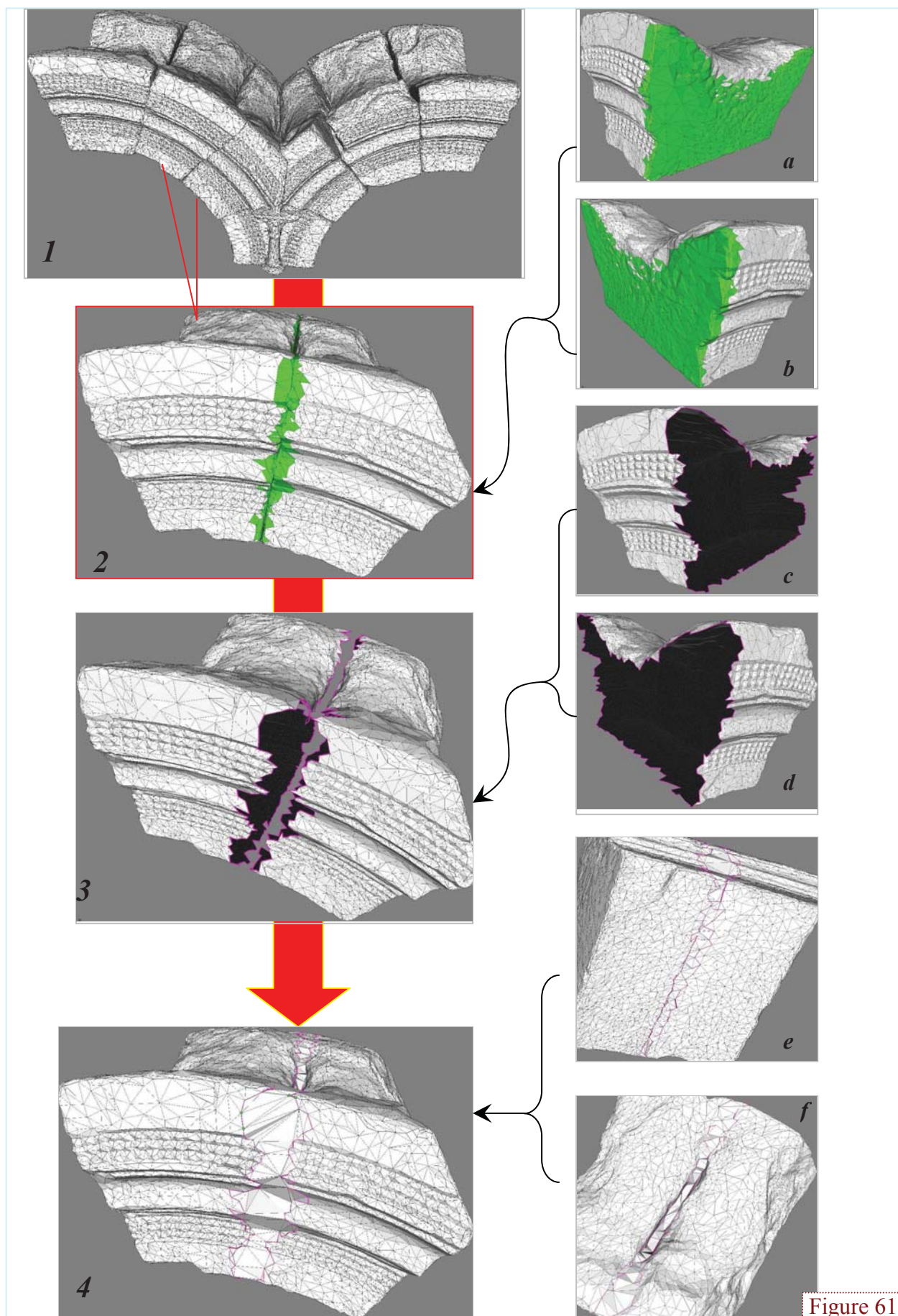


Figure 61

## 6. Conclusion et perspectives

« Au cours de ce stage de recherche, un certain nombre d'algorithmes pour l'assemblage de maillages triangulaires de type 2D ont été proposés à l'issue de l'analyse des contraintes de préparation/ modification rapide des modèles numériques sur l'exemple des études opérationnelles réalisées à EDF R&D.

Les modes d'assemblage de maillages de type « face/arête » et « face/face » ont été identifiés et considérés. Les algorithmes traitant ces cas d'assemblage ont été implémentés dans le logiciel XDS libre développé initialement par l'équipe IMS du laboratoire LSIS de l'ENSAM. Ces algorithmes ont été évalués à travers différents cas-tests (dans le domaine d'architecture, laboratoire MAP) et validés sur un certain nombre d'exemples industriels (maillages 2D) fournis par EDF R&D.

Les étapes de calcul d'intersection et de nettoyage des mailles/zone/lignes en contact, faisant partie des éléments des algorithmes proposés, ont été testées. Les résultats de ces tests montrent que ces étapes sont robustes. La détection et le calcul des intersections au niveau des mailles pourraient toutefois être améliorées grâce à la structure de décomposition spatiale octree (actuellement, en cours de développement). L'étape de construction de la ligne d'intersection « multi-branche » a été limitée au cas de quatre sous-branches maximum (à l'issue de l'analyse des besoins d'EDF).

L'algorithme de triangulation produit dans les cas des géométries 2D simples les résultats satisfaisants. Cependant, quelques problèmes ont été rencontrés et traités au niveau du passage des arêtes vives. La figure 62 présente ce type de configuration. Pour améliorer le comportement de l'algorithme vis-à-vis de ce problème, on propose d'ajouter un critère supplémentaire concernant les angles vifs. Les triangulations effectuées donnent globalement les meilleurs résultats par rapport à l'approche proposée par [LIE 01] qui rencontre des problèmes lors du traitement des maillages plans.

De plus, l'utilisation du critère d'équilatéralité  $Q$  ainsi que l'optimisation de ligne d'intersection au niveau de la distribution des nœuds ont permis d'améliorer la forme des triangles. Cet aspect est très important, car il vise à satisfaire des critères de qualité de maillage pour le calcul EF.

En terme de perspectives, il est nécessaire d'implémenter et de tester l'algorithme d'insertion de nœuds discuté dans la section 4.8. Cette partie de traitement de zone re maillage est indispensable car elle permet de répondre aux critères de qualité de maillage en produisant un maillage « adaptatif » a priori afin d'assurer la transition cohérente entre les maillages fusionnés de finesse différente. La figure 60 illustre cet aspect. Il serait intéressant de pouvoir « enrichir » la zone de transition pour réaliser le meilleur raccord entre les maillages fusionnés. Un calcul de déformation des maillages proposé dans [PER01] permet en partie de traiter ce type de problème.

Concernant le problème de transfert d'informations sémantiques (maintien et mise à jours des groupes d'entités de maillage), cet aspect est en cours de développement.

A long terme, on envisage également de traiter des besoins industriels en terme de manipulations de maillages quadratiques et volumiques couramment utilisés à EDF. »



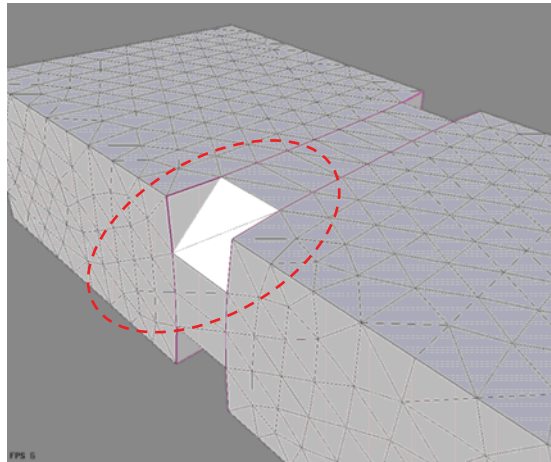


Figure 62

## Bibliographie

- [ANG 01] A. Hliaoutakis « *Semantic Similarity Measures in MeSH Ontology and their application to Information Retrieval on Medline* » PhD Thesis, Nov.2005
- [CHOU 01] Chouadria R, Véron P « *Identifying and re-meshing contact interfaces in a polyhedral assembly for digital mock-up* » Engineering with Computers, vol. 22, pp. 47-58, 2006
- [CHOU 02] Chouadria R, Véron P « *Identification des contacts dans un assemblage de modèles polyédriques* » Conf. 'CPI 2003' Integrated Design and Production, Meknès, Maroc Oct. 2003.
- [DEL 01] Delaunay, B. « *Sur la sphère vide* », Bul.Acad. Sci.URSS class Sci. Nat., 793-800. 1934.
- [GRAY 01] Graysmith J.L , Shaw C.T « *Automated procedures for Boolean operations on finite element meshes* » Engineering Computations: Int. J. for Computer-Aided Engineering, Vol. 14, Number 7, 1997, pp.702-717(16)
- [GOE 01] L.C.G.Coelho, M. Gattass and L.H.Figueiredo « *Intersection and Trimming Parametric Meshes on Finite-Element Shells* ». *International journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol 47 pp.777-800 (2000).
- [HUG 01] Hugues Hoppe, Tony DeRose, Tom Duchampy, Mark Halsteadz, Hubert Jinx, John McDonaldx, Jean Schweitzer, Werner Stuetzlex « *Piecewise Smooth Surface Reconstruction* » International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, p.p.295-302, 1994.
- [JIM 01] Jimenez P, Thomas F, Torras C « *3D collision: a survey* ». Comput Graphics 25:269–285, 2001
- [JIN 01] Jin X, Lin J, Wang C.C.L, Sun H « *Mesh fusion using functional blending on topologically incompatible sections* » Springer-Verlag, April 2006

- [JUL 01] Julian M. Smith, Neil A. Dodgson « *A Topologically Robust Boolean Algorithm Using Approximate Arithmetic* » 22nd European Workshop on Computational Geometry, 2006
- [KIT 01] Kitamura Y, Smith A, Takemura H, Kishino F « *A realtime algorithm for accurate collision detection for deformable polyhedral objects* ». Presence: Teleoperators & Virtual Environments, February, Vol. 7, No.1, 1998, pp.36-52
- [LAN 01] Lanquetin S, Foufou S, Kheddouci H, Neveu M « *Deux algorithmes d'intersection des surfaces de subdivision* » Bourgogne University 47870
- [LIE 01] LIEPA.P « *Filling Holes in Meshes* » ACM International Conference Proceeding Series 2003
- [LIN 01] Lin MC « *Collision detection geometric models: a survey* ». In: Proceedings of IMA conference on Mathematics of surfaces 1998
- [LIRA 01] W.W.Lira, L.C.G.Coelho and L.F.Martha « *Multiple intersections of finiteelement surface meshes* » Proceedings, 11th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, pp.355-366, September 15-18 2002
- [LIU 05] Y-S. Liu, H. Zhang, J-H. Yong, P-Q. Yu, J-G. Sun « *Mesh Blending* », The Visual Computer, vol. 21, pp. 915-927, 2005.
- [LIV 01] Livio De Luca « *Relevé et Multi-Représentation du Patrimoine Architectural; Définition d'une approche hybride de reconstruction 3D d'édifice* » Thèse de Doctorat de l'ENSAM 2006.
- [LOH 01] Löhner R., Parikh P., « *Generation of Three-Dimensional Unstructured Grids by the Advancing-Front Method* », International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.8, p.1135-1149, 1988
- [MIN 01] M. Panchetti, J-P. Pernot, Véron P. « *Simplification de modèles polyédriques à partir d'informations extraites d'une image* », in: GTMG 2006, Cachan, France, 2006
- [PER 01] PERNOT.J-P, MORARU.G and VERON.P « *Repairing triangle meshes built from scanned point cloud* » Journal of Engineering Design, 2007
- [TURK 01] Turk, G., O'Brien, J.: « *Modelling with implicit surfaces that interpolate* ». ACM Trans. on Graph. 21(4), 2002, pp. 855–873,
- [VER 01] Véron P. « *Techniques de simplification de modèles polyédriques pour un environnement de conception mécanique* » Ph.D Thesis, Doctorat de Mécanique de l'I.N.P.G., Grenoble, Nov.1997