

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Contexte	1
1.2	Formulation du problème de propagation d'interface	1
1.2.1	Formulation lagrangienne traditionnelle	1
1.2.2	Principe de Huygens avec condition d'entropie	1
1.3	Cadre de la thèse	1
1.4	Représentation par les frontières	1
1.5	Contributions	1
1.6	Organisation du manuscrit	3
2	ALGORITHME DE PROPAGATION D'INTERFACES RÉGULIÈRES PAR MORCEAUX	5
2.1	Traitement des différentes entités BRep	5
2.2	Construction de l'enveloppe des sphères partielle	5
2.2.1	Enveloppe d'une famille de sphères à un paramètre	5
2.2.2	Enveloppe d'une famille de sphères à deux paramètres	5
2.3	Application de la condition d'entropie	5
3	MÉTHODE D'ORDRE ÉLEVÉ POUR LE SUIVI D'UN CARREAU DE SURFACE	7
3.1	Discrétisation spectrale en espace	7
3.1.1	État de l'art	7
3.1.2	Polynômes de Chebyshev	7
3.1.3	Représentation de surfaces	7
3.2	Intégration temporelle	7
3.2.1	Advection dans un champ de vecteurs vitesse donné	7
3.2.2	Approximation de l'enveloppe des sphères partielle	7
3.3	Amélioration de la stabilité	7
3.3.1	Réduction de l'erreur d'aliasing	7
3.3.2	Prévention des singularités géométriques	7
4	DÉFORMATION DE MAILLAGE SURFACIQUE	9
4.1	État de l'art	9
4.1.1	Simulation numérique dans une géométrie déformable	9
4.1.2	Génération de maillage surfacique basé sur un modèle BRep	9
4.1.3	Optimisation/Adaptation de maillage surfacique	9
4.2	Problématiques	9
4.2.1	Lien entre le maillage et le modèle BRep	10
4.3	Déformation de maillage conforme aux faces BRep	10

4.3.1	Limitations	10
4.4	Déformation de maillage trans-carreaux	10
4.4.1	Construction d'une structure d'hypergraphe	10
4.4.2	« Transition » d'un instant au suivant	11
4.4.3	Optimisation de maillage trans-carreaux	11
5	ADAPTATION D'UN MAILLAGE DE SURFACE DYNAMIQUE	13
5.1	Problématique et état de l'art	13
5.1.1	Simulation numérique avec une géométrie déformable	13
5.1.2	Génération de maillage surfacique basé sur un modèle BRep	14
5.1.3	Optimisation de maillage surfacique	15
5.2	Lien entre modèle BRep et maillage trans-carreaux	16
5.2.1	Construction d'une structure d'hypergraphe	16
5.3	Déformation de maillage trans-carreaux basé sur un modèle BRep dynamique	16
5.3.1	Correspondance d'hypergraphes	16
5.3.2	Régénération du maillage contraint	16
5.3.3	<i>Untangling</i>	16
5.3.4	Optimisation par bouger de nœud	16
5.3.5	Optimisation par reconnections locales	16
	BIBLIOGRAPHIE	19

1.1 CONTEXTE

1.2 FORMULATION DU PROBLÈME DE PROPAGATION D'INTERFACE

1.2.1 FORMULATION LAGRANGIENNE TRADITIONNELLE

1.2.2 PRINCIPE DE HUYGENS AVEC CONDITION D'ENTROPIE

1.3 CADRE DE LA THÈSE

1.4 REPRÉSENTATION PAR LES FRONTIÈRES

1.5 CONTRIBUTIONS

1. mise en place d'un *framework* pour résoudre la propagation d'une interface 3d **régulière par morceaux** représentée par un modèle BRep
 - a) mise au point d'un algorithme basé sur le **principe de Huygens** (avec condition d'entropie) pour **adapter dynamiquement la géométrie et la topologie** du modèle BRep de l'interface au cours de la propagation (autrement dit, la validité du modèle BRep est maintenue tout au long de la propagation)
2. utilisation du **formalisme BRep** pour représenter une interface **régulière par morceaux** en propagation en 3d (dans des applications de type interaction fluide-structure, com-

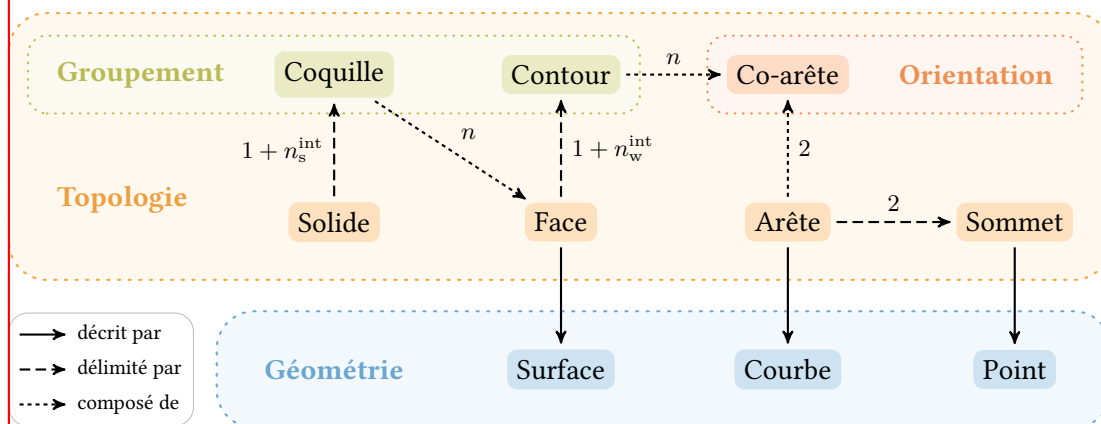
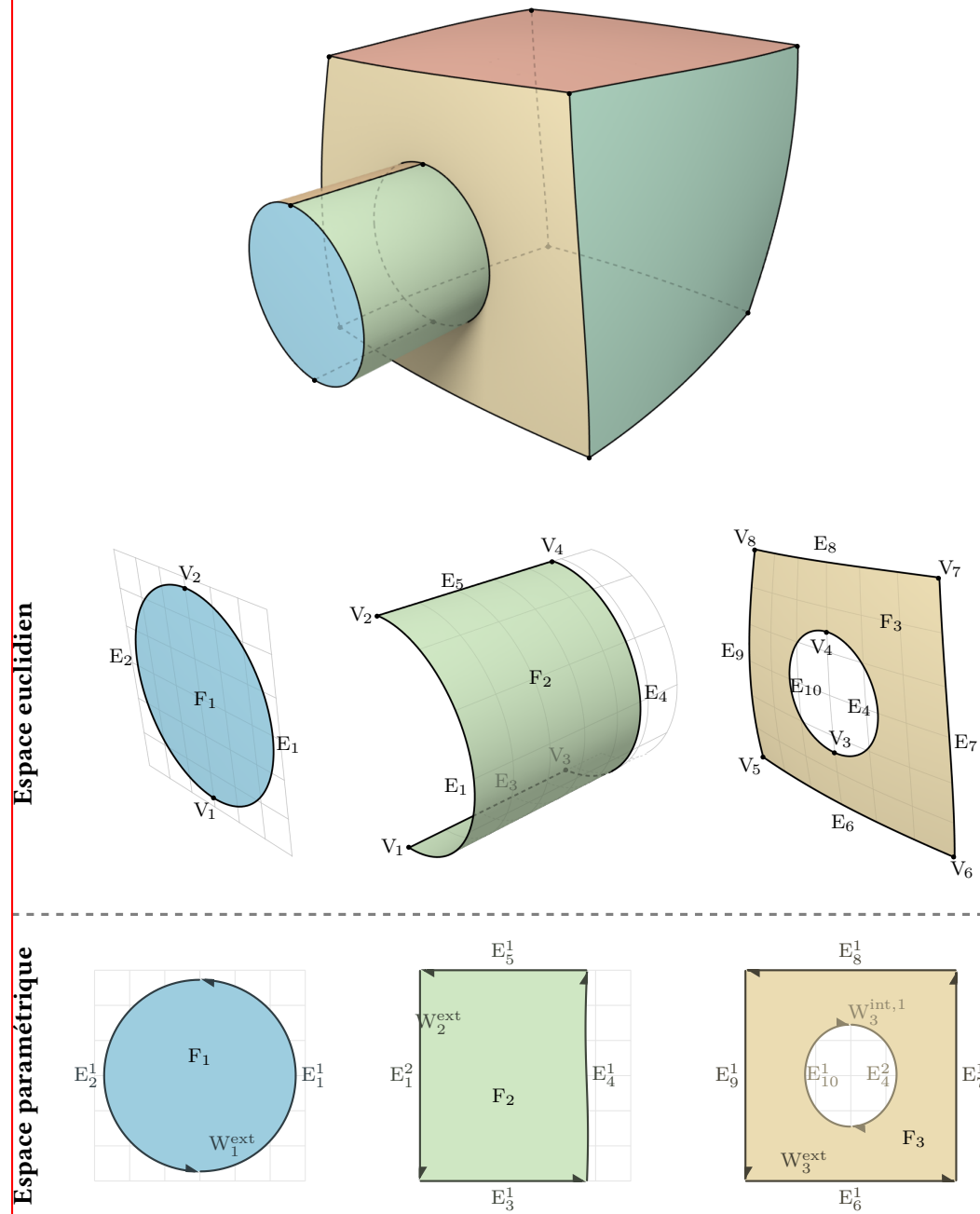


FIGURE 1.1 – Hiérarchie des éléments constituant un modèle BRep.

FIGURE 1.2 – *Modèle BRep.*

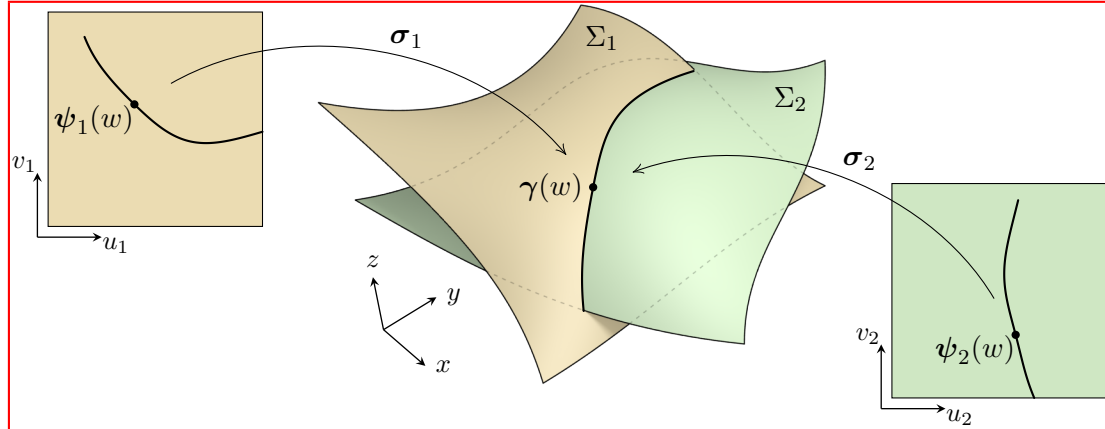


FIGURE 1.3 – Description géométrique d'une arête BRep.

bustion de solide dans un fluide)

3. mise au point d'un algorithme basé sur le **principe de Huygens** (avec condition d'entropie) pour **adapter dynamiquement la géométrie et la topologie** du modèle BRep de l'interface au cours de la propagation
4. (mise en œuvre d'une méthode pseudo-spectrale (i.e. d'ordre élevé) (utilisant les polynômes de Chebyshev comme fonctions de base) pour suivre **efficacement et avec une grande précision** le mouvement de l'interface)
5. mise en œuvre d'une méthodologie pour adapter un **maillage dynamique géométriquement fidèle au modèle BRep dynamique** de l'interface, dans le but de réaliser des simulations EF/VF

1.6 ORGANISATION DU MANUSCRIT

--	--

ALGORITHME GÉNÉRAL POUR LA PROPAGATION D'INTERFACES RÉGULIÈRES PAR MORCEAUX

2

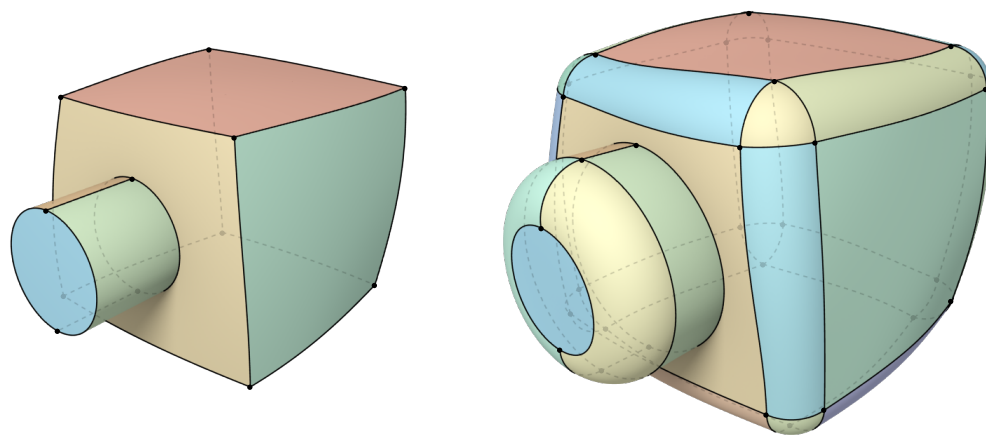
2.1 TRAITEMENT DES DIFFÉRENTES ENTITÉS BRep

2.2 CONSTRUCTION DE L'ENVELOPPE DES SPHÈRES PARTIELLES

2.2.1 ENVELOPPE D'UNE FAMILLE DE SPHÈRES À UN PARAMÈTRE

2.2.2 ENVELOPPE D'UNE FAMILLE DE SPHÈRES À DEUX PARAMÈTRES

2.3 APPLICATION DE LA CONDITION D'ENTROPIE



(a) *Modèle BRep initial.*

(b) *Modèle BRep de l'enveloppe des boules.*

FIGURE 2.1 – ???

--	--

MÉTHODE D'ORDRE ÉLEVÉ POUR LE SUIVI D'UN SEUL CARREAU DE SURFACE

3

3.1 DISCRÉTISATION SPECTRALE EN ESPACE

3.1.1 ÉTAT DE L'ART

3.1.2 POLYNÔMES DE CHEBYSHEV

3.1.3 REPRÉSENTATION DE SURFACES

3.2 INTÉGRATION TEMPORELLE

3.2.1 ADVECTION DANS UN CHAMP DE VECTEURS VITESSE DONNÉ

3.2.2 APPROXIMATION DE L'ENVELOPPE DES SPHÈRES PARTIELLE

3.3 AMÉLIORATION DE LA STABILITÉ

3.3.1 RÉDUCTION DE L'ERREUR D'ALIASING

3.3.2 PRÉVENTION DES SINGULARITÉS GÉOMÉTRIQUES

--	--

DÉFORMATION DE MAILLAGE SURFACIQUE

Objectif du chapitre: on veut mettre au point une méthodologie pour déformer un maillage de l'interface en propagation en utilisant le modèle BRep dynamique comme support géométrique, afin de pouvoir réaliser des simulations EF/VF dans des domaines de géométrie déformables.

4.1 ÉTAT DE L'ART

4.1.1 SIMULATION NUMÉRIQUE DANS UNE GÉOMÉTRIE DÉFORMABLE

maillage volumique conforme (body-fitted + ALE, Chimère/FLUSEPA) / non-conforme (IBM ...)

4.1.2 GÉNÉRATION DE MAILLAGE SURFACIQUE BASÉ SUR UN MODÈLE BREP

- méthodes indirectes (i.e. Riemanniennes)
 - face par face [1]
 - paramétrisation globale [2, 3, 4]
- méthodes (frontales) directes [5]

4.1.3 OPTIMISATION/ADAPTATION DE MAILLAGE SURFACIQUE

- changements locaux de connectivité
 - bascule d'arête
 - contraction d'arête
- bouger de nœud (direct, i.e. xyz ou indirect, i.e. uv)
 - méthodes heuristiques (lissage laplacien, analogies physiques [6], interpolation (IDW, RBF, ...) ...)
 - lissage basé sur l'optimisation d'une métrique de qualité [7, 8, 9, 10]

4.2 PROBLÉMATIQUES

contraintes :

1. ALE \Rightarrow préserver la connectivité du maillage autant que faire se peut (i.e. déformation pure)

2. le maillage doit être une approximation géométrique fidèle de l'interface (dont la géométrie « exacte » est définie par le modèle BRep)

- solution la plus simple : le maillage interpole la surface BRep aux nœuds (qui sont alors localisés sur des entités BRep et donc sur un ou plusieurs carreaux de surface) \Rightarrow l'écart de corde doit être contrôlé (taille d'élément dicté par le rayon de courbure local, maillage explicite des caractéristiques/singularités géométriques (arêtes vives, coins, ...))

3. maintenir une bonne qualité de maillage (métrique à définir suivant la méthode de calcul) \Rightarrow lissage/optimisation (par déplacements tangentiels pour respecter la contrainte 2)

4.2.1 LIEN ENTRE LE MAILLAGE ET LE MODÈLE BREP

(Solution à la contrainte 2)

A chaque nœud du maillage sont associés

- un pointeur vers l'entité BRep qui le supporte (sommet, arête ou face)
- un jeu de coordonnées paramétriques (i.e. un point (u, v) pour chaque carreau de surface associé à l'entité BRep de support)¹

Les coordonnées (x, y, z) d'un nœud sont alors obtenues en évaluant un ou plusieurs carreaux de surfaces, ce qui garantit que le nœud repose exactement sur la surface BRep (à condition que les coordonnées (u, v) soient situées à l'intérieur ou sur le bord du domaine paramétrique des faces BRep concernées).

4.3 DÉFORMATION DE MAILLAGE CONFORME AUX FACES BREP

4.3.1 LIMITATIONS

- les arêtes BRep douces introduisent des contraintes supplémentaires sur le maillage, sans avoir de signification du point de vue du calcul EF/VF \Rightarrow éléments de mauvaise qualité
- problème de la persistance des entités BRep

\Rightarrow maillage *trans-carreaux*

4.4 DÉFORMATION DE MAILLAGE TRANS-CARREAUX

4.4.1 CONSTRUCTION D'UNE STRUCTURE D'HYPERGRAPHE

Structure intermédiaire qui conserve la définition du modèle BRep sous-jacent [11]

Faces adjacentes qui forment une région surfacique de continuité G^1 rassemblées dans une *hyper-face*

Arêtes adjacentes qui forment une branche de courbe de continuité G^1 rassemblées dans une

¹Rappel : les courbes d'intersection ne sont pas paramétrisées directement mais évaluées de manière procédurale en interrogeant les deux carreaux de surface concernés. Les points d'intersection (qui décrivent les sommets BRep) sont repérés dans l'espace paramétrique de chaque carreau de surface concerné.

hyper-arête

Les nœuds du maillage peuvent traverser les arêtes douces intérieures à une hyper-face
Les hyper-arêtes sont des listes chaînées de (co-)arêtes BRep (potentiellement cycliques). Dans le maillage, elles sont matérialisées par des chaînes d'arêtes dont les nœuds sont contraints (1 seul degré de liberté pour les nœuds intérieurs, 0 pour les éventuels nœuds aux extrémités)

4.4.2 « TRANSITION » D'UN INSTANT AU SUIVANT**4.4.2.1 Correspondance des hypergraphes**

« événements » possibles

4.4.2.2 Régénération du maillage contraint

- nœuds avec 0 degré de liberté \rightarrow coordonnées (x, y, z) du sommet BRep associé (« coin »)
- nœuds avec 1 degré de liberté \rightarrow régénération des chaînes (hyper-arêtes)

4.4.2.3 « Pré-déformation »**4.4.3 OPTIMISATION DE MAILLAGE TRANS-CARREAUX**

méthode directe avec re-projection sur hyper-face/arête

--	--

ADAPTATION D'UN MAILLAGE DE SURFACE DYNAMIQUE

5

Objectif du chapitre: on veut mettre au point une méthodologie pour déformer un maillage de l'interface en propagation en utilisant le modèle BRep dynamique comme support géométrique, afin de pouvoir réaliser des simulations EF/VF dans des domaines de géométrie déformables.

Motivation

1. la précision et la vitesse de convergence du calcul dépendent fortement de la qualité (forme et taille) des éléments du maillage

5.1 PROBLÉMATIQUE ET ÉTAT DE L'ART

5.1.1 SIMULATION NUMÉRIQUE AVEC UNE GÉOMÉTRIE DÉFORMABLE

1. maillage volumique (fluide) conforme à l'interface
 - a) 1 seul maillage *body-fitted* avec formulation ALE (*ref*)
 - principe : frontière = maillage de l'interface, intérieur déformé de façon arbitraire
 - intérêt/avantages : ...
 - contraintes/inconvénients :
 - la qualité du maillage volumique dépend fortement de celle du maillage surfacique, surtout dans les régions proches de l'interface, où ont généralement lieu les phénomènes physiques les plus pertinents
 - la connectivité du maillage doit rester fixe (*à vérifier*)
 - b) plusieurs maillages *body-fitted* qui se superposent
 - méthode Chimère [12, 13], FLUSEPA [14]
 - intérêt/avantages :
 - facilite la génération du maillage volumique lorsque la géométrie est complexe (e.g. hyper-sustentateurs)
 - évite de déformer un maillage 3d
 - contraintes/inconvénients :
 - nécessite de traiter les intersections entre les blocs de maillage
 - limité aux mouvements rigides (*à vérifier*)
2. maillage volumique non conforme à l'interface
 - méthode des frontières immergées [15, 16, 17] : interface représentée explicitement, volume (fluide) traité de façon eulérienne (i.e. maillage fixe)

- intérêt/avantages : évite de générer et déformer un maillage 3d autour d'une géométrie complexe
- contraintes/inconvénients : application indirecte des conditions aux limites

Dans cette thèse,

1. on ne traite que le maillage (surficiel) de l'interface
2. on se concentre sur des maillages triangulaires linéaires par morceaux, mais une extension aux maillages hybrides et courbes envisageable

5.1.2 GÉNÉRATION DE MAILLAGE SURFICIEL BASÉ SUR UN MODÈLE BREP

Essentiellement extension de méthodes standard (i.e. quadtree, Delaunay, avancée de front) 2d plan à des surfaces immergées/plongées dans \mathbb{R}^3

1. méthodes indirectes (Riemanniennes) : on travaille dans l'espace paramétrique en tenant compte de la métrique (anisotrope, Riemannienne) induite par la paramétrisation de façon à ce que le plongement du maillage dans \mathbb{R}^3 respecte les critères prescrits
 - a) conforme à la topologie BRep : on exploite directement les paramétrisations locales (carreaux de surface) du modèle BRep [1] (on maille d'abord les sommets, puis les arêtes et enfin les faces afin de garantir la conformité du maillage)
 - intérêt/avantages : utilisation de méthodes 2d plan robustes et efficaces
 - contraintes/inconvénients : les arêtes BRep douces introduisent des contraintes supplémentaires sur le maillage, sans avoir de signification du point de vue du calcul EF/VF \Rightarrow éléments de mauvaise qualité
 - b) trans-carreaux par (re-)paramétrisation globale :
 - i. [2] :
 - A. on construit d'abord un maillage de référence conforme à la topologie BRep de l'ensemble des faces regroupées
 - B. on bouche artificiellement les éventuels « trous » afin qu'il n'y ait qu'un seul bord
 - C. on plonge ce maillage dans un espace paramétrique global :
 - afin d'obtenir les coordonnées paramétriques globales des nœuds intérieurs, on résout un système d'équations elliptique (opérateur Laplacien combinatoire) avec une condition de Dirichlet pour fixer les nœuds du bord sur un cercle
 - on modifie les coordonnées paramétriques globales des nœuds du bord afin d'améliorer la forme des éléments incidents
 - (on répète le processus jusqu'à ce que la qualité des éléments dans l'espace paramétrique global soit convenable)
 - D. on élimine les éventuels éléments fictifs créés à l'étape 1(b)iB
 - E. on génère un maillage dans l'espace paramétrique global par avancée de front en utilisant le maillage de référence comme approximation géométrique dans l'espace physique
 - F. on retrouve les coordonnées paramétriques locales des nœuds du nouveau maillage

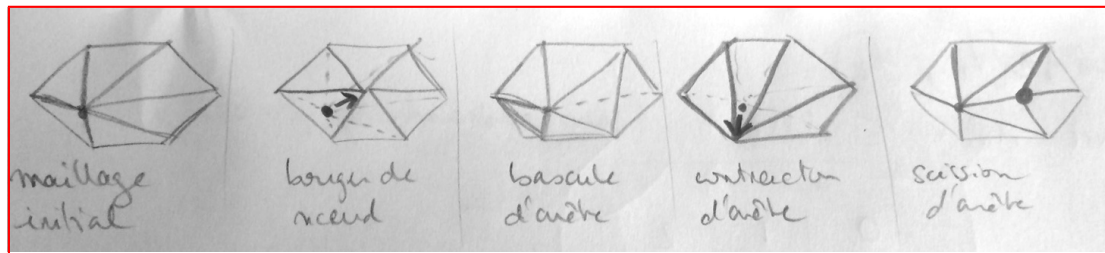


FIGURE 5.1 - ...

ii. [3] :

- A. le domaine paramétrique de chaque face BRep est décomposé en cellules triangulaires s'appuyant sur les contours
- B. chaque cellule (courbe) est en bijection avec un triangle (linéaire) dans l'espace paramétrique global
- C. un maillage du domaine paramétrique global est généré (quadtree-Delaunay)

iii. [4] : ?

- intérêt/avantages : lève les contraintes topologiques du modèle BRep qui ne sont pas pertinentes pour le calcul EF/VF
- contraintes/inconvénients :
 - topologie : limité aux variétés avec un ou plusieurs bords \Rightarrow nécessite un découpage (généralement manuel) de l'interface
 - géométrie : limité aux surfaces quasi-planes et régulières
 - (méthodes pas suffisamment automatisées)

2.

5.1.3 OPTIMISATION DE MAILLAGE SURFACIQUE

1. bouger de nœud (direct, i.e. xyz ou indirect, i.e. uv)

- a) méthodes heuristiques (lissage laplacien, analogies physiques [6], interpolation (IDW, RBF, ...) ...)
- b) lissage basé sur l'optimisation d'une métrique de qualité [7, 8, 9] [10] \rightarrow maillage supporté sur un carreau de surface paramétrique

2. changements locaux de connectivité

- a) bascule d'arête
- b) contraction d'arête
- c) scission d'arête

Le maillage doit être une approximation géométrique fidèle de l'interface (dont la géométrie « exacte » est définie par le modèle BRep)

\rightarrow solution la plus simple : le maillage interpole la surface BRep aux nœuds (qui sont alors localisés sur des entités BRep et donc sur un ou plusieurs carreaux de surface) \Rightarrow l'écart de corde doit être contrôlé (taille d'élément dicté par le rayon de courbure local, maillage explicite des caractéristiques/singularités géométriques (arêtes vives, coins, ...))

5.2 LIEN ENTRE MODÈLE BREP ET MAILLAGE TRANS-CARREAUX

Objectifs :

1. alléger les contraintes sur le maillage inutilement imposées par la topologie du modèle BRep(arêtes douces)
2. représenter fidèlement

5.2.1 CONSTRUCTION D'UNE STRUCTURE D'HYPERGRAPHE

5.3 DÉFORMATION DE MAILLAGE TRANS-CARREAUX BASÉ SUR UN MODÈLE BREP DYNAMIQUE

5.3.1 CORRESPONDANCE D'HYPERGRAPHES

5.3.2 RÉGÉNÉRATION DU MAILLAGE CONTRAINT

5.3.3 UNTANGLEMENT

5.3.4 OPTIMISATION PAR BOUGER DE NŒUD

5.3.5 OPTIMISATION PAR RECONNECTIONS LOCALES

5.3.5.1 Bascule d'arête

Les arêtes contenues dans les chaînes ne peuvent pas être basculées.

5.3.5.2 Contraction d'arête

Soit e l'arête entre les nœuds p_1 et p_2 . Sans restreindre la généralité, on supposera que $ddl(p_1) \leq ddl(p_2)$. Ici, $ddl(p)$ représente le nombre de degrés de liberté du nœud n , i.e.

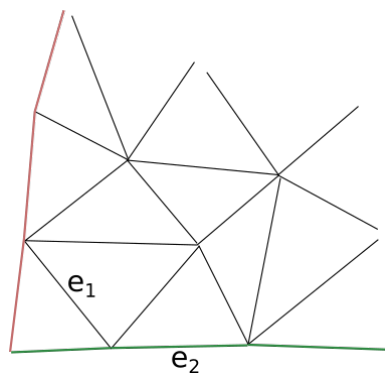
- $ddl(p) = 0$ si n est contraint sur un sommet BRep ;
- $ddl(p) = 1$ si n est contraint sur une hyper-arête (chaîne) ;
- $ddl(p) = 2$ si n n'est pas contraint.

Si $ddl(p_1) = ddl(p_2) = 1$, la contraction n'est possible que si e fait partie d'une chaîne, i.e. les nœuds p_1 et p_2 sont contraints sur la même hyper-arête (voir [Figure 5.2](#)).

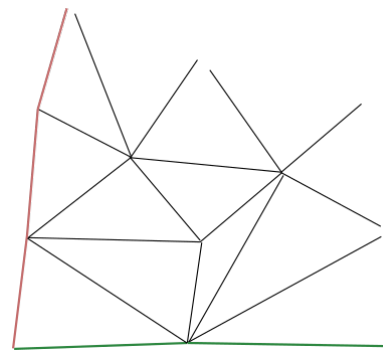
Si $ddl(p_1) < ddl(p_2)$ on contracte e vers le nœud p_1 . Si $ddl(p_1) = ddl(p_2)$ on contracte e vers son milieu. Afin de localiser précisément ce milieu sur la surface BRep (i.e. connaître l'entité BRep qui le supporte, et ses coordonnées paramétriques dans les carreaux de surface concernés), on l'obtient en calculant la projection sur la surface BRep du nœud p_1 translaté d'un vecteur $\frac{p_2 - p_1}{2}$, en suivant la procédure décrite dans la [Section 5.3.4](#).

5.3.5.3 Scission d'arête

On insère un nœud au milieu d'une arête. Comme pour la contraction d'arête, les coordonnées de ce milieu sont une nouvelle fois obtenue par la procédure de projection décrite dans la [Section 5.3.4](#). Cette fois, la projection du déplacement se fait en partant du sommet de l'arête ayant le plus grand nombre de degrés de liberté.



(a) L'arête e_2 peut être contractée, mais pas e_1 puisque ses extrémités sont contenues dans deux chaînes distinctes (en rouge et vert).



(b) Maillage après la contraction de l'arête e_2 .

FIGURE 5.2 – Deux cas possibles pour une arête dont les deux sommets ont un seul degré de liberté.

--	--

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. BOROUCAKI, P. LAUG et P.-L. GEORGE. Parametric surface meshing using a combined advancing-front generalized Delaunay approach. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **49** (1-2) : pp. 233–259, 2000. (cf. pp. [9](#) et [14](#))
- [2] D. L. MARCUM et J. A. GAITHER. Unstructured Surface Grid Generation Using Global Mapping and Physical Space Approximation. Dans *Proceedings of the 8th International Meshing Roundtable*, pp. 397–406, 1999. (cf. pp. [9](#) et [14](#))
- [3] F. NOËL. Global parameterization of a topological surface defined as a collection of trimmed bi-parametric patches: Application to automatic mesh construction. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **54** (7) : pp. 965–986, 2002. (cf. pp. [9](#) et [15](#))
- [4] W. JONES. Toward a global parameterization for quilted CAD entities. Dans *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, p. 611, 2004. (cf. pp. [9](#) et [15](#))
- [5] G. FOUCAULT, J.-C. CUILLIÈRE, V. FRANÇOIS, J.-C. LÉON et R. MARANZANA. Generalizing the advancing front method to composite surfaces in the context of meshing constraints topology. *Computer-Aided Design*, **45** (11) : pp. 1408–1425, 2013. (cf. p. [9](#))
- [6] C. FARHAT, C. DEGAND, B. KOOBUS et M. LESOINNE. Torsional springs for two-dimensional dynamic unstructured fluid meshes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **163** (1-4) : pp. 231–245, 1998. (cf. pp. [9](#) et [15](#))
- [7] L. A. FREITAG, M. JONES et P. PLASSMANN. An efficient parallel algorithm for mesh smoothing. Dans *Proceedings of the 4th International Meshing Roundtable*, pp. 47–58, 1995. (cf. pp. [9](#) et [15](#))
- [8] S. A. CANANN, J. R. TRISTANO, M. L. STATEN ET AL. An Approach to Combined Laplacian and Optimization-Based Smoothing for Triangular, Quadrilateral, and Quadrilateral Dominant Meshes. Dans *Proceedings of the 7th International Meshing Roundtable*, pp. 85–102, 1998. (cf. pp. [9](#) et [15](#))
- [9] X. JIAO, D. WANG et H. ZHA. Simple and Effective Variational Optimization of Surface and Volume Triangulations. Dans *Proceedings of the 17th International Meshing Roundtable*, pp. 315–332, 2008. (cf. pp. [9](#) et [15](#))
- [10] A. GARGALLO-PEIRÓ, X. ROCA et J. SARRATE. A surface mesh smoothing and untangling method independent of the CAD parameterization. *Computational Mechanics*, **53** (4) : pp. 587–609, 2014. (cf. pp. [9](#) et [15](#))
- [11] G. FOUCAULT, J.-C. CUILLIÈRE, V. FRANÇOIS, J.-C. LÉON et R. MARANZANA. Adaptation of CAD model topology for finite element analysis. *Computer-Aided Design*, **40** (2) : pp. 176–196, 2008. (cf. p. [10](#))

- [12] R. L. MEAKIN et N. E. SUHS. Unsteady aerodynamic simulation of multiple bodies in relative motion. Dans *9th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, p. 1996, 1989. (cf. p. 13)
- [13] Z. J. WANG et V. PARTHASARATHY. A fully automated Chimera methodology for multiple moving body problems. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **33** (7) : pp. 919–938, 2000. (cf. p. 13)
- [14] P. BRENNER. Three-dimensional aerodynamics with moving bodies applied to solid propellant. Dans *27th Joint Propulsion Conference*, p. 2304, 1991. (cf. p. 13)
- [15] C. S. PESKIN. The immersed boundary method. *Acta numerica*, **11** : pp. 479–517, 2002. (cf. p. 13)
- [16] J. HOVNANIAN. *Méthode de frontières immergées pour la mécanique des fluides. Application à la simulation de la nage..* Thèse de Doctorat, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2012. (cf. p. 13)
- [17] K. WANG, J. GRÉTARSSON, A. MAIN et C. FARHAT. Computational algorithms for tracking dynamic fluid–structure interfaces in embedded boundary methods. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **70** (4) : pp. 515–535, 2012. (cf. p. 13)
- [18] C. CLENSHAW. A note on the summation of Chebyshev series. *Mathematics of Computation*, **9** (51) : pp. 118–120, 1955. (Pas cité)
- [19] H. WENGLE et J. H. SEINFELD. Pseudospectral solution of atmospheric diffusion problems. *Journal of computational Physics*, **26** (1) : pp. 87–106, 1978. (Pas cité)
- [20] M. A. LACHANCE. Chebyshev economization for parametric surfaces. *Computer Aided Geometric Design*, **5** (3) : pp. 195–208, 1988. (Pas cité)
- [21] S. CAMPAGNA, P. SLUSALLEK et H.-P. SEIDEL. Ray tracing of spline surfaces: Bézier clipping, Chebyshev boxing, and bounding volume hierarchy – a critical comparison with new results. *The Visual Computer*, **13** (6) : pp. 265–282, 1997. (Pas cité)
- [22] J. P. BOYD. *Chebyshev and Fourier Spectral Methods*. Dover Books on Mathematics. Dover Publications, Mineola, NY, seconde édition, 2001. (Pas cité)
- [23] J. MASON et D. HANDSCOMB. *Chebyshev Polynomials*. CRC Press, 2002. (Pas cité)
- [24] A. RABABAH. Transformation of Chebyshev–Bernstein polynomial basis. *Computational Methods in Applied Mathematics*, **3** (4) : pp. 608–622, 2003. (Pas cité)
- [25] C. CANUTO, M. Y. HUSSAINI, A. QUARTERONI et T. A. ZANG. *Spectral Methods. Fundamentals in Single Domains*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. (Pas cité)
- [26] O. P. BRUNO, Y. HAN et M. M. POHLMAN. Accurate, high-order representation of complex three-dimensional surfaces via Fourier continuation analysis. *Journal of Computational Physics*, **227** (2) : pp. 1094 – 1125, 2007. (Pas cité)
- [27] A. GIL, J. SEGURA et N. M. TEMME. *Numerical Methods for Special Functions*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA, 2007. (Pas cité)
- [28] R. PEYRET. *Spectral Methods for Incompressible Viscous Flow*, volume 148. Springer Science & Business Media, 2013. (Pas cité)

- [29] A. BOWYER. Computing dirichlet tessellations. *The Computer Journal*, **24** (2) : pp. 162–166, 1981. (Pas cité)
- [30] D. F. WATSON. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes. *The Computer Journal*, **24** (2) : pp. 167–172, 1981. (Pas cité)
- [31] W. CHO, N. M. PATRIKALAKIS et J. PERAIRE. Approximate development of trimmed patches for surface tessellation. *Computer-Aided Design*, **30** (14) : pp. 1077–1087, 1998. (Pas cité)
- [32] P. J. FREY et H. BOROUCHAKI. Geometric surface mesh optimization. *Computing and Visualization in Science*, **1** (3) : pp. 113–121, 1998. (Pas cité)
- [33] X. JIAO, A. COLOMBI, X. NI et J. HART. Anisotropic mesh adaptation for evolving triangulated surfaces. *Engineering with Computers*, **26** (4) : pp. 363–376, 2010. (Pas cité)
- [34] F. ALAUZET, B. FABRÈGES, M. A. FERNÁNDEZ et M. LANDAJUELA. Nitsche-XFEM for the coupling of an incompressible fluid with immersed thin-walled structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **301** : pp. 300–335, 2016. (Pas cité)