

Décomposition progressive de maillages hexaédriques avec discontinuités : application aux modèles géologiques

Frédéric PAYAN¹, Jean-Luc PEYROT^{1,2}, Sébastien SCHNEIDER², Laurent DUVAL², Marc ANTONINI¹

¹Université Côte d'Azur, CNRS, I3S, 2000 route des Lucioles, 06903 Sophia-Antipolis, France

²IFP Energies nouvelles, 1 et 4 avenue de Bois-Préau, F-92852 Rueil-Malmaison, France

{fpayan,peyrot,am}@i3s.unice.fr, {sebastien.schneider,laurent.duval}@ifpen.fr

Résumé – Nous présentons une technique originale de décomposition progressive en résolution pour maillages hexaédriques structurés. Cette technique prend en compte les discontinuités géométriques potentiellement présentes dans les données issues des géosciences (failles, etc.), afin de préserver leur morphologie au travers des résolutions. Des ondelettes classiques et morphologiques permettent de décomposer un maillage hexaédrique complexe à différentes échelles, tout en maintenant une cohérence géométrique (notamment au niveau des failles) d'une résolution à l'autre.

Abstract – We present an original multiresolution technique for the progressive decomposition of structured hexahedral meshes. Our technique takes into account the geometrical discontinuities that can be present in meshes coming from geosciences, in order to preserve them across the resolutions. Standard and morphological wavelets decompose one complex hexahedral mesh into several scales, while maintaining a geometrical coherency (in particular around faults) from a resolution to a lower one.

1 Introduction

Les maillages hexaédriques sont communément utilisés en géosciences, notamment pour la modélisation géologique des sols [1] (figure 1(a)). Avec les progrès faits récemment dans le domaine de l'acquisition de données, les modèles numériques sont désormais définis par des nuages de points de très haute résolution, rendant compliqués leur stockage et surtout leur transmission. Cela affecte aussi sévèrement l'interactivité (visualisation, manipulation) avec ces données massives [2] sur des machines de capacités "standard". Pour toutes ces raisons, plusieurs algorithmes de compression [3, 4, 5] pour maillages hexaédriques ont vu le jour durant les années 2000.

Malheureusement, aucun ne propose une approche progressive, qui est pourtant un réel avantage pour de nombreuses opérations (transmission, visualisation), en particulier avec les maillages volumineux. À notre connaissance, [6] est la seule méthode qui traite de manière progressive les maillages hexaédriques structurés. Cette méthode présente de plus l'avantage de gérer les discontinuités géométriques, présentes dans les données issues des géosciences (failles, etc.). Cependant, elle n'est qu'un premier pas dans le domaine de la décomposition progressive de maillages hexaédriques, car elle ne prend en compte qu'un nombre limité de configurations de failles.

C'est pourquoi nous avons développé un nouvel algorithme d'analyse/synthèse progressive par ondelettes pour les maillages hexaédriques structurés issus des géosciences. Notre algorithme intègre une technique performante de décomposition multirésolution qui prend en compte les différentes discontinuités pré-

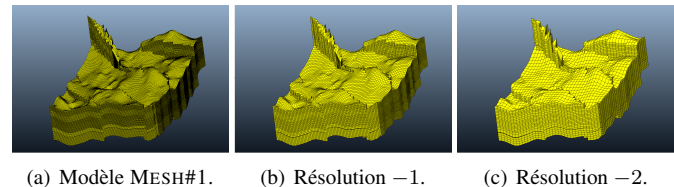


FIGURE 1 – Maillage hexaédrique issu des géosciences (a), et deux résolutions inférieures (b) et (c) obtenues avec notre outil de décomposition progressive.

sentes dans ce type de maillages, afin de maintenir une cohérence géométrique au travers des résolutions (figure 1). Le présent article est principalement focalisé sur le traitement de la géométrie des maillages hexaédriques structurés.

2 Spécificités des maillages d'entrée

Un maillage hexaédrique est une représentation numérique de l'intérieur d'un objet 3D. Il est défini par un ensemble d'hexaèdres (cellules). Un maillage hexaédrique peut être structuré : il dispose dans ce cas d'une topologie implicite, qui permet d'indexer chaque cellule à l'aide d'un triplet (i, j, k) de coordonnées.

En géosciences, cette grille est souvent appelée *pillar grid*, car ces maillages peuvent être vus comme un empilement de cellules hexaédriques le long de "piliers verticaux" (figure 2). Des *nœuds* sont définis le long de chaque pilier, et par défaut à

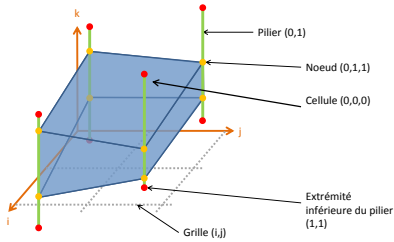


FIGURE 2 – Plus petit maillage hexaédrique structuré décrit selon le principe des piliers.

chaque nœud sont associés 8 sommets, appartenant aux 8 cellules hexaédriques adjacentes (format *Corner Point Grid*).

Cette structure particulière a l'avantage de pouvoir modéliser les discontinuités géométriques rencontrées dans les données issues des géosciences, relatives aux failles souterraines (exemple en figure 1). Ces failles entraînent une disparité dans les coordonnées des sommets autour d'un même nœud. En effet, dans une zone sans faille, les 8 sommets associés à un nœud ont les mêmes coordonnées 3D (figure 3(a)), tandis que dans une zone présentant une faille, ces 8 sommets peuvent avoir des coordonnées différentes (figure 3(b)). Dans le reste de l'article, les sommets adjacents à un nœud donné sont nommés selon la convention indiquée en figure 4.

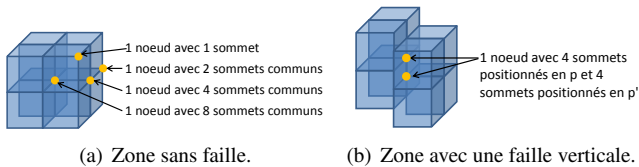


FIGURE 3 – Illustration d'une faille entraînant une discontinuité géométrique dans un maillage hexaédrique.

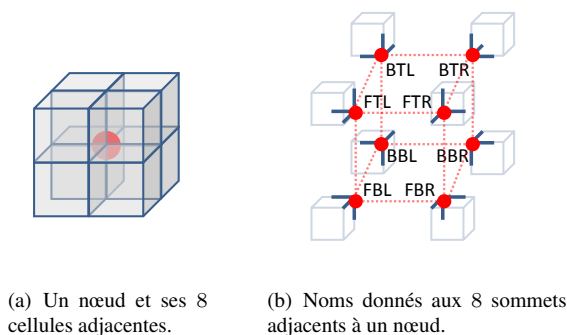


FIGURE 4 – Convention de nommage des sommets autour d'un nœud : (B)ack/(F)ront, (B)ottom/(T)op, (L)eft/(R)ight.

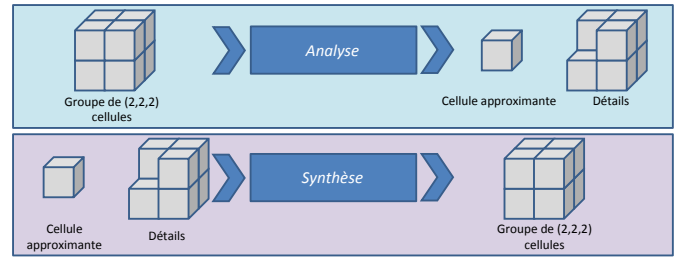


FIGURE 5 – Analyse/synthèse pour maillages hexaédriques.

3 Décomposition hiérarchique proposée

Le but de notre schéma est de décomposer la géométrie des maillages hexaédriques structurés selon le principe de la figure 5, tout en préservant les failles à la résolution inférieure. En répétant cette étape, nous obtenons une représentation multirésolution (par exemple, figure 1).

Les maillages hexaédriques que nous traitons étant définis selon le principe des piliers, les positions des sommets sont inévitablement définies sur ces derniers. Notre analyse se focalise donc uniquement sur les coordonnées z des sommets associés à chaque nœud, et les coordonnées x et y des nœuds décrivant les extrémités de chaque pilier (ces coordonnées étant implicites pour les autres nœuds).

Dans les maillages volumiques du sous-sol, il n'y a pas d'espacement vertical. Pour chaque nœud, les coordonnées z des sommets du haut sont donc les mêmes que celles du bas. Notre schéma traite donc uniquement les coordonnées z des sommets bas (BBR, FBR, BBL et FBL) de chaque nœud.

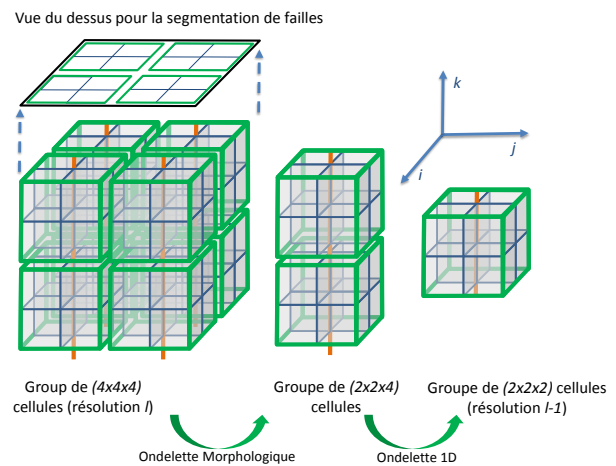


FIGURE 6 – Schéma d'analyse proposé pour la géométrie.

Le schéma général d'analyse comporte 3 étapes (figure 6) :

1. **Segmentation** des failles, effectuée sur la surface supérieure des maillages d'entrée.
2. **Ondelette morphologique** [8] appliquée sur les nœuds.

Elle prend en compte les failles segmentées au préalable, pour préserver leur cohérence au travers des résolutions.

3. **Ondelette 1D** appliquée verticalement sur les coordonnées z des sommets le long de chaque pilier, et sur les coordonnées x et y des nœuds représentant ses extrémités (étape non indiquée sur la figure 6), pour compléter la décomposition "horizontale" faite à la première étape.

Segmentation des failles Pour chaque nœud, douze configurations vues de dessus sont possibles pour décrire les failles en fonction de leur orientation (nord, sud, est, ouest). Elles sont catégorisées par cinq schémas : pas de faille, faille traversante (verticale ou horizontale), en coin (4 orientations possibles), en T (4 orientations possibles) et croisement. Étant donné qu'une configuration de faille se retrouve sur tous les nœuds d'un pilier donné, une simple représentation 2D suffit à représenter toutes les failles d'un maillage, comme illustré sur la figure 7.

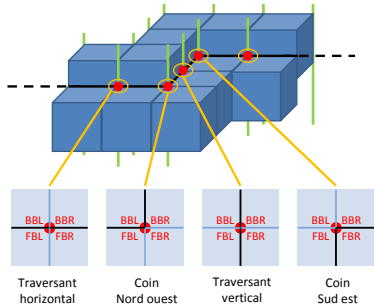


FIGURE 7 – Une faille et sa description "vue du dessus".

Ondelette morphologique Une fois effectuée la segmentation des failles sur le maillage d'entrée, une ondelette morphologique va commencer par prédire la configuration des failles à la résolution inférieure. Pour cela, on va traiter les configurations de failles par bloc de 2×2 configurations voisines pour en prédire une seule à la résolution inférieure. La prédiction est basée sur une fonction logique OU sur chaque bord d'un bloc donné, comme l'illustre la figure 8. Sur cet exemple, pour le bloc en bas à gauche par exemple, on voit, sur le bord gauche, qu'il n'y a aucune faille orientée vers l'ouest : on prédit donc qu'il n'y aura pas de faille active vers l'ouest à la résolution inférieure. En revanche, sur le bord inférieur de ce même bloc, on prédit qu'il y aura une faille vers le sud à la résolution inférieure. Cette technique est appliquée sur tous les bords de tous les blocs d'une résolution pour avoir une prédiction complète des failles à la résolution inférieure. Cette étape divise par 4 le nombre de cellules, horizontalement.

Ondelette 1D L'étape suivante de notre schéma d'analyse consiste à appliquer une transformée en ondelette 1D le long des piliers pour calculer les coordonnées z des nœuds conservés à la résolution inférieure. Cette étape divise par 2 le nombre de cellules, verticalement. Nous avons choisi un schéma lifting en ondelette de Cohen-Daubechies-Feauveau interpolante

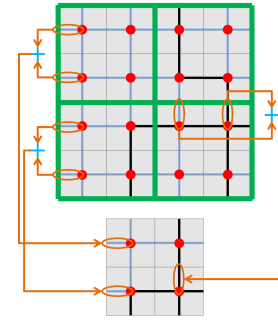


FIGURE 8 – Préservation par ondelette morphologique de la cohérence des failles (en noir) d'une résolution à l'autre.

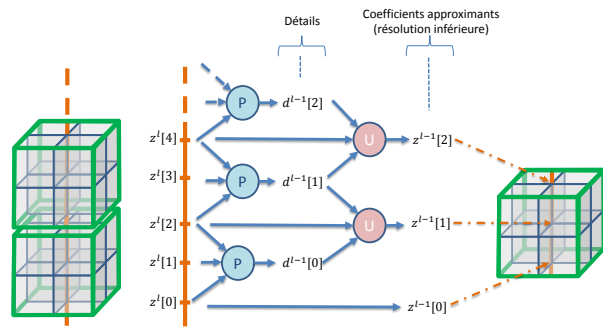


FIGURE 9 – Schéma lifting appliqué sur les coordonnées z des sommets le long des piliers.

linéaire ou CDF(2, 2) [9]. Le principe général est décrit par la figure 9. La dernière étape de notre schéma consiste à appliquer ce même schéma lifting sur les coordonnées x et y des nœuds représentant les extrémités de chaque pilier.

À la fin de toutes ces étapes, on passe à la résolution inférieure d'un maillage hexaédrique donné, avec 8 fois moins de cellules, tout en calculant en parallèle les détails éliminés lors de l'analyse. Notre schéma est totalement réversible, permettant de reconstruire le maillage original à partir du maillage de résolution inférieure et de l'ensemble des détails calculés lors de l'analyse.

4 Résultats expérimentaux

Les figures 1 et 10 présentent des résultats obtenus avec notre schéma d'analyse sur des modèles géologiques réels. On peut observer que les résolutions inférieures obtenues avec notre schéma approchent fidèlement les maillages d'origine. On observe notamment que les failles sont bien préservées.

Pour juger de la qualité des résolutions inférieures obtenues, nous avons comparé nos résultats avec des résolutions obtenues à l'aide du standard de compression JPEG2K 3D [10]. Ce dernier n'étant pas dédié aux maillages volumiques, nous avons comparé uniquement la surface supérieure des maillages. La fi-

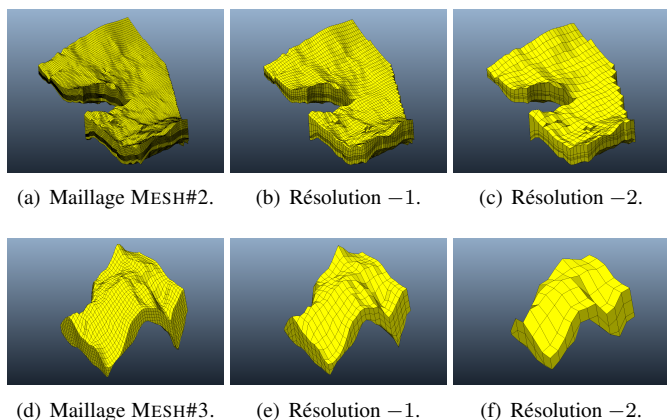


FIGURE 10 – Différentes résolutions générées.

Figure 11 montre l'une de ces comparaisons. On voit clairement que notre approche produit des résolutions inférieures beaucoup plus satisfaisantes pour notre type de maillages.

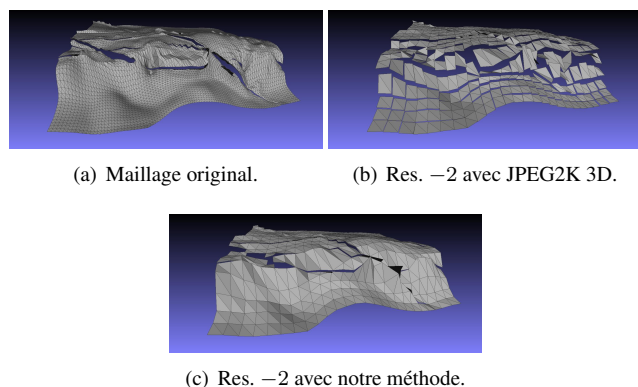


FIGURE 11 – Comparaison visuelle d'une résolution obtenue avec JPEG2K 3D (b) et avec notre méthode (c).

Pour mettre en évidence un autre intérêt de notre schéma d'analyse, le tableau 1 présente des taux de compression obtenus avec deux codeurs entropiques populaires (gzip et bzip2) que l'on applique directement sur les maillages volumiques ou sur les différentes sous-bandes de coefficients calculés au cours de notre décomposition hiérarchique. On peut observer que les taux de compression sont plus élevés lorsque l'on utilise notre schéma d'analyse. Ceci met en évidence que notre schéma tend à rendre parcimonieuses les données géométriques des maillages, ce qui permet de réduire la quantité d'information à stocker pour les représenter.

TO \ CE	gzip	bzip2, avec la taille de bloc		
		0,10 Mo	0,50 Mo	0,90 Mo
Sans	3,09	2,33	3,28	3,51
Notre proposition	3,11	4,05	4,19	4,25

TABLE 1 – Taux de compression pour différents codeurs entropiques (CE), avec ou sans transformée en ondelettes (TO).

5 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté un schéma original de décomposition progressive en ondelettes pour maillages hexaédriques structurés issus des géosciences, qui a la capacité de prendre en compte toutes les discontinuités géométriques dues aux failles. Notre schéma permet de maintenir une cohérence de ces failles dans les résolutions inférieures. Ce schéma, combiné à des codeurs entropiques, nous permet aussi d'obtenir des taux de compression plus intéressants qu'en l'absence de décomposition. Ceci montre l'intérêt d'aborder la compression de ces maillages hexaédriques de manière progressive. Dans le futur, on s'attellera au développement d'un codeur géométrique prenant en compte les statistiques des sous-bandes de coefficients produits par notre schéma d'analyse pour optimiser la compression de ces données.

Références

- [1] G. Caumon, G. Gray, C. Antoine, and M.-O. Titeux, "Three-dimensional implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes: Theory and application to a regional model of La Popa basin, NE Mexico," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 3, pp. 1613–1621, Mar. 2013.
- [2] R. K. Perrons and J. W. Jensen, "Data as an asset: What the oil and gas sector can learn from other industries about "big data"," *Energy Pol.*, vol. 81, pp. 117–121, Jun. 2015.
- [3] M. Isenburg and P. Alliez, "Compressing hexahedral volume meshes," *Graph. Model.*, vol. 65, no. 4, pp. 239–257, Jul. 2003.
- [4] P. Lindstrom and M. Isenburg, "Lossless compression of hexahedral meshes," in *Proc. Data Compression Conf.*, Snowbird, UT, USA, Mar. 25–27, 2008, pp. 192–201.
- [5] C. Courbet and M. Isenburg, "Streaming compression of hexahedral meshes," *Vis. Comput.*, vol. 26, no. 6–8, pp. 1113–1122, 2010.
- [6] L. Chizat, "Multiresolution signal compression: Exploration and application," M.S. thesis, ENS Cachan, Jul. 2014.
- [7] K.-A. Lie, *An Introduction to Reservoir Simulation Using MATLAB - User Guide for the Matlab Reservoir Simulation Toolbox (MRST)*, Dec. 13, 2016, SINTEF ICT, Departement of Applied Mathematics.
- [8] L. Jacques, L. Duval, C. Chaux, and G. Peyré, "A panorama on multiscale geometric representations, intertwining spatial, directional and frequency selectivity," *Signal Process.*, vol. 91, no. 12, pp. 2699–2730, Dec. 2011.
- [9] F. Payan and M. Antonini, "Temporal wavelet-based compression for 3D animated models," *Comput. Graph.*, vol. 31, no. 1, pp. 77–88, Jan. 2007.
- [10] ITU-T T.809, "JPEG2000 image coding system: Extensions for three-dimensional data," May 2011, ISO/IEC 15444-10:2011.