

Chapitre 6

Autour de la décomposition spectrale de la géométrie

Dans cette dernière partie de notre travail⁷⁹, nous avons voulu étudier la robustesse du tatouage face à la compression de la géométrie. Pour cela, nous avons dû sélectionner une méthode de codage de source ne nécessitant pas ou peu de travail sur la connexité (nécessitant généralement le traitement de beaucoup d'exceptions - pour les bords, les trous, etc.) Aussi notre choix s'est-il porté sur les méthodes de compression dites spectrales. En outre, cette représentation permet la transmission de la géométrie de manière progressive, et est à peu près aux maillages ce que la DCT par bloc est aux images. Ce choix se justifie encore par le fait que de nombreuses méthodes robustes de tatouage en image et en audio ont été développées dans un espace transformé, souvent aussi pour profiter de modèles psycho-visuels ou psycho-auditifs.

Après avoir présenté l'espace de la décomposition spectrale, nous développerons ensuite un codeur spectral de la géométrie dont nous détaillerons les variantes suivant qu'elles visent la compression ou la transmission progressive. En effet, nous verrons que deux implantations sont possibles, suivant que l'on requiert ou non des bases fixes de décomposition d'une connexité qui reste arbitraire. Ce codeur nous permettra de tester ensuite une méthode de tatouage simple dans l'espace spectral de la géométrie, dont nous montrerons qu'il résiste à la quantification du codage de source spectral. Dans l'immédiat, nous reproduisons sur la Fig. 6.1 les modèles originaux que nous avons utilisés afin qu'ils servent de référence. L'intérêt de *fandisk* est de n'être pas un objet naturel, et donc de présenter des surfaces planes (les surfaces fonctionnelles de l'objet de CAO) sur lesquelles les artefacts dus à la décomposition spectrale se verront bien mieux que sur des objets naturels comme les trois autres objets.

6.1 Cadre théorique

Nous présenterons tout d'abord l'espace de décomposition spectrale de la géométrie d'un point de vue théorique. Nous reprendrons pour cela le cadre énoncé par Taubin [71] et adapté à la compression par Karni et Gotsman ([56] puis [57]). Ensuite, nous détaillerons les difficultés pratiques d'implantation de tels schémas de représentation, qui bien que parfois

⁷⁹Nous sommes redevables de son aide à Patrice Rondao-Alface pour ce chapitre.

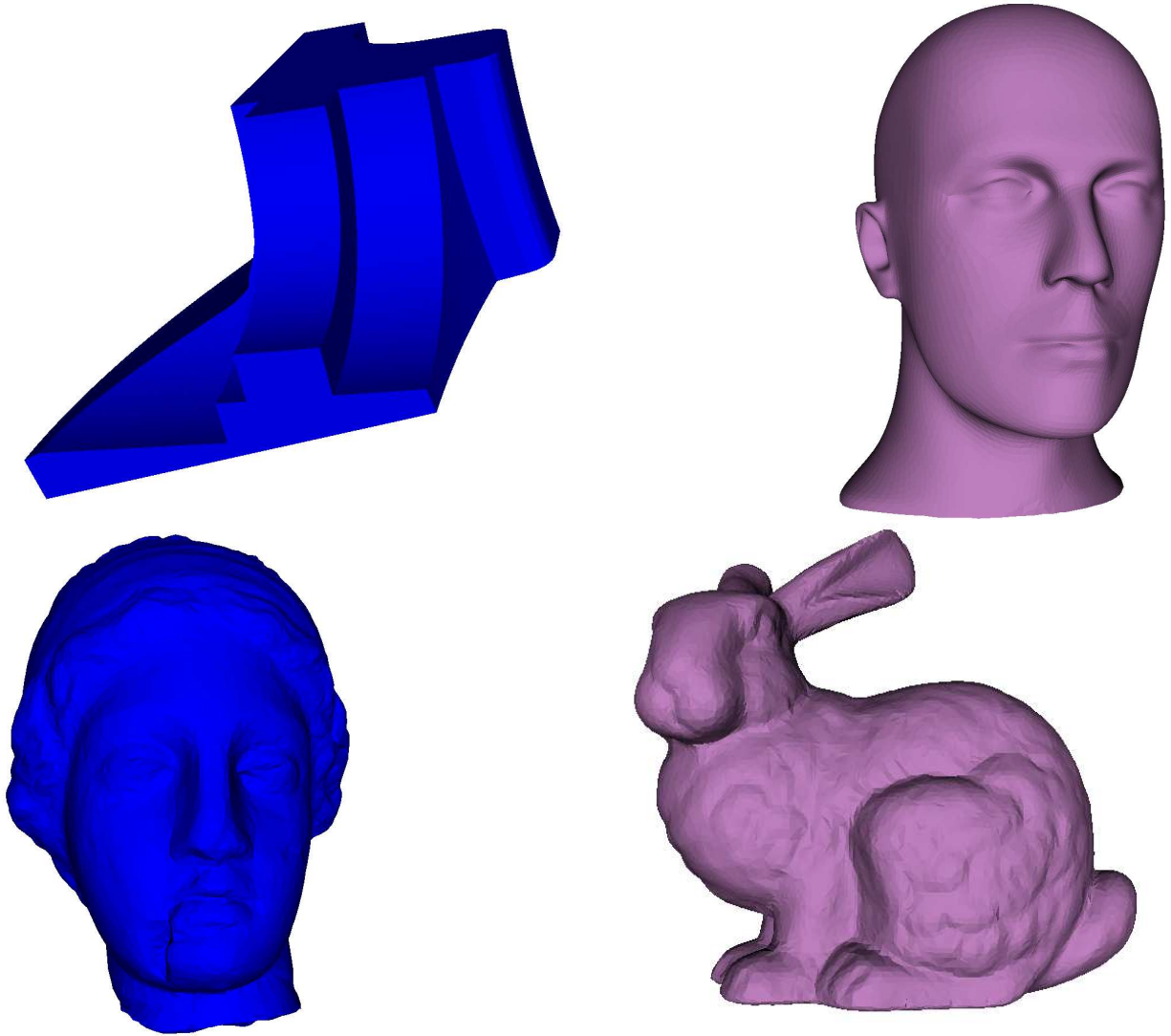


FIG. 6.1 – Modèles originaux utilisés dans cette partie : fandisk, head, venus et bunny.

importantes, ont été généralement minimisées, voire passées sous silence. Nous développerons en conséquence notre propre implantation d'un quantificateur spectral de la géométrie, et nous justifierons nos choix au regard des problèmes que nous avons rencontrés, et que les références ne nous avaient pas laissé imaginer. Du fait de ces difficultés qui nous ont contraints à des adaptations *ad hoc*, nous avons dû nous résigner à développer les bases davantage techniques que théoriques de l'étude que nous nous proposons au départ.

6.1.1 Opérateur laplacien pour le codage de source

Le codage prédictif peut être considéré comme une détection d'innovation filtrée et sa transmission par une compression adaptée à ses statistiques. On commence par transmettre la composante continue du signal, puis les innovations détectées. Dans ce cadre, l'opérateur

laplacien est un détecteur d'innovation efficace et reconnu. Pour l'image 2D, le noyau Δ du laplacien s'écrit :

$$\Delta = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{4} & 0 \\ -\frac{1}{4} & 1 & -\frac{1}{4} \\ 0 & -\frac{1}{4} & 0 \end{pmatrix}. \quad (6.1)$$

La somme des poids du noyau est nulle, ce qui rend la transformation unitaire. Taubin [71] a proposé d'étendre cette approche aux maillages surfaciques tridimensionnels en s'adaptant à la valence locale du sommet en cours de traitement. Le laplacien Δp_i en un sommet p_i s'écrit :

$$\Delta p_i = \sum_{p_j \in p_i^*} w_{i,j} (p_i - p_j) = p_i - \sum_{p_j \in p_i^*} w_{i,j} p_j, \quad (6.2)$$

sous la contrainte d'une transformation unitaire :

$$\sum_j w_j = 1 \quad \forall p_i. \quad (6.3)$$

Le calcul des poids peut faire ou non appel à la géométrie. Le rapport de la longueur de l'arête $p_i p_j$ sur la somme des longueurs des arêtes est un exemple de calcul des poids faisant appel à la géométrie. Pourtant, nous cherchons précisément à transmettre cette géométrie : nous ne pouvons donc utiliser que des poids dont le calcul ne fait pas intervenir la géométrie. Le choix se porte naturellement sur :

$$w_{i,j} = \frac{1}{d_{p_i}} \quad \forall j, \quad (6.4)$$

où d_{p_i} est la valence du sommet p_i . Cet opérateur, ramené à la grille régulière 2D, est la définition du laplacien classique car $d_{p_i} = 4$ pour un pixel. Il est possible de formuler le problème non plus localement comme nous venons de la faire, mais globalement. On forme la matrice laplacienne C , à partir de son terme courant :

$$C_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j, \\ -d_{p_i}^{-1} & \text{si } p_j \in \{p_i^*\} \text{ et } d_{p_i} \neq 0, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (6.5)$$

La matrice C n'est pas circulante dans le cas général : elle l'est uniquement si la connexité est régulière. C'est pourquoi nous retrouvons le cadre de la transformation de Fourier si la connexité est régulière (l'opérateur laplacien est alors stationnaire), et nous nous contentons, suivant la littérature, de parler de décomposition spectrale dans le cas général d'une connexité arbitraire. Dans ce dernier cas, le mot spectral n'est pas tout à fait usurpé : nous verrons qu'il se réfère au spectre de la matrice C .

6.1.2 Décomposition spectrale

C'est pour la première fois dans [42] que la géométrie est décomposée sur une base spectrale (au sens du spectre d'une matrice) dans une optique de transmission de la géométrie.

Naturellement, les poids choisis sont ceux délaissés par Taubin : les inverses des valences. En effet, on diagonalise C pour obtenir la matrice de projection B :

$$\begin{pmatrix} e_0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & e_i & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & e_{N-1} \end{pmatrix} = B^{-1}CB. \quad (6.6)$$

Les valeurs propres e sont des modes propres de déformation définis sur la connexité $\mathcal{E}$. En mécanique, on parlerait de modes de vibration propres car ils sont utilisés pour simuler le comportement d'une surface lorsqu'elle subit un choc. On peut les assimiler à des fréquences, l'analyse de Fourier est ainsi étendue aux données discrètes irrégulièrement échantillonnées. Zéro est une valeur propre, et le vecteur propre associé ne contient que des 1 : la composante continue est donc un plan puisque l'on attribue le même poids à tous les sommets, chaque sommet intérieur est donc placé au barycentre de ses voisins - sur un plan (voir Fig. 6.2). On projette ensuite l'information géométrique constituée des trois vecteurs X, Y, Z sur les vecteurs de base pour obtenir sa décomposition spectrale sous forme de trois vecteurs de coefficients spectraux :

$$\begin{cases} P = BX \\ Q = BY \\ R = BZ \end{cases} \quad (6.7)$$

La reconstitution de l'information géométrique à partir de l'information spectrale se fait naturellement en revenant dans la base spatiale par l'inverse de la matrice de projection :

$$\begin{cases} X = B^{-1}P \\ Y = B^{-1}Q \\ Z = B^{-1}R \end{cases} \quad (6.8)$$

Les fonctions de base sont ici des maillages que l'on vient combiner linéairement entre eux pour obtenir le maillage original. Nous reproduisons sur la Fig. 6.2 les 9 maillages de la base de reconstruction B^{-1} pour le petit maillage au centre de la Fig. 3.6 (possédant 9 sommets) ayant une connexité de subdivision. La composante continue est en haut à gauche, et les 8 autres maillages sont ordonnés par valeurs propres associées décroissantes. Les deux derniers maillages de la première ligne ne sont pas tout à fait plans. Dans une optique de transmission, on enverra tout d'abord les coefficients spectraux relatifs à la composante continue, puis les autres coefficients amèneront progressivement l'innovation géométrique manquante. De récents travaux relient la matrice C à l'inverse de celle de Karhunen-Loeve et discutent l'optimalité d'une telle approche en 1 et 2 dimensions [6]. Toutefois, dans une optique de transmission, on sait qu'il ne faut pas utiliser la base de Karhunen-Loeve : les fonctions de base à transmettre dépendent de l'objet et induisent un surcoût prohibitif de transmission. Nous verrons dans la section 6.3 comment pallier ce problème.

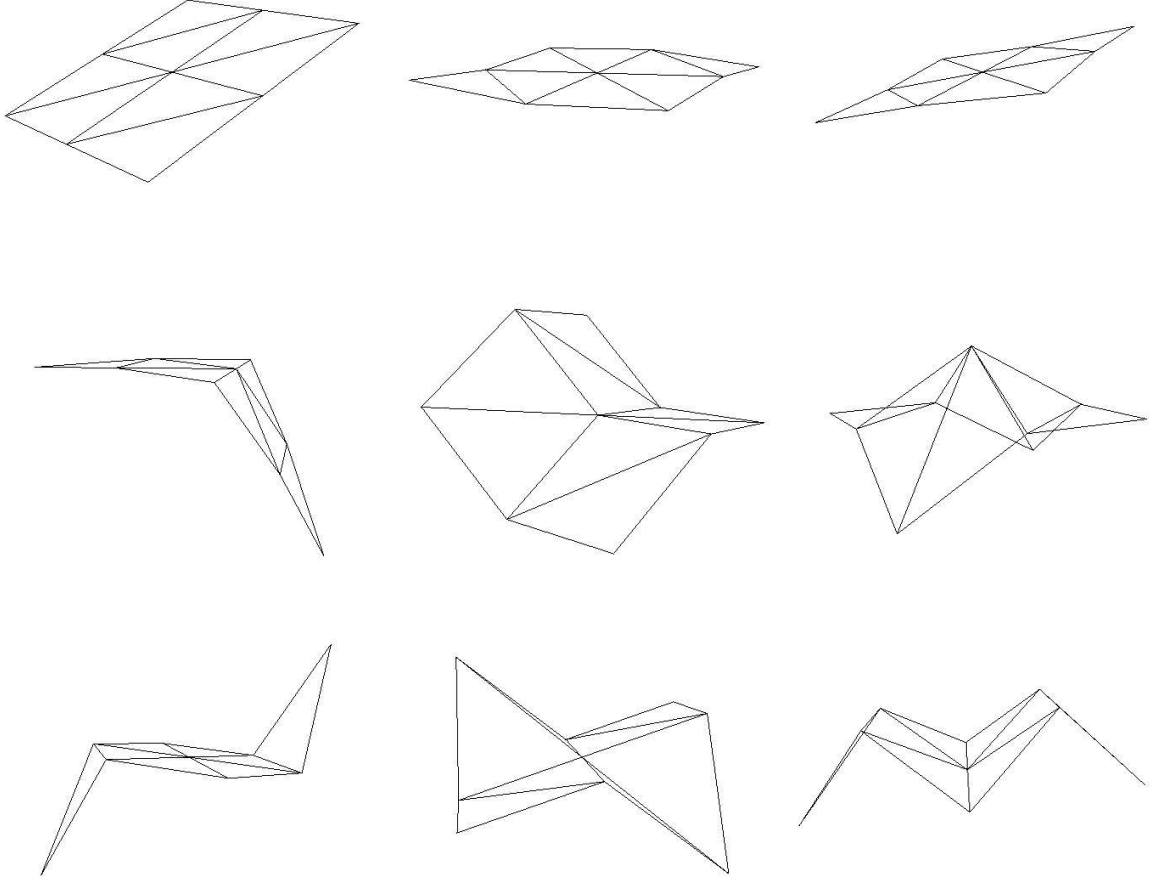


FIG. 6.2 – Les 9 maillages de la base de décomposition spectrale (ordonnés par valeurs propres croissantes). En haut à gauche : le maillage (plan) de la composante continue.

6.1.3 Spectre de la géométrie

En classant les valeurs propres par ordre croissant, on associe dans [42] à chaque triplet de coefficients spectraux sa valeur spectrale S_i :

$$S_i = \|P_i\|^2 + \|Q_i\|^2 + \|R_i\|^2. \quad (6.9)$$

On obtient alors le spectre de la géométrie que nous illustrons sur la Fig. 6.3. On constate que les valeurs spectrales décroissent globalement, et que l'on parvient ainsi à décorréler l'information géométrique en utilisant uniquement l'information de connexité. Toutefois, le spectre de la géométrie ne nous sera plus d'aucune utilité par la suite qu'en tatouage. En effet, dans la section 6.5 nous nous intéresserons aux spectres sur X , Y , et Z pris séparément pour modifier les relations entre les scalaires d'un même triplet spectral.

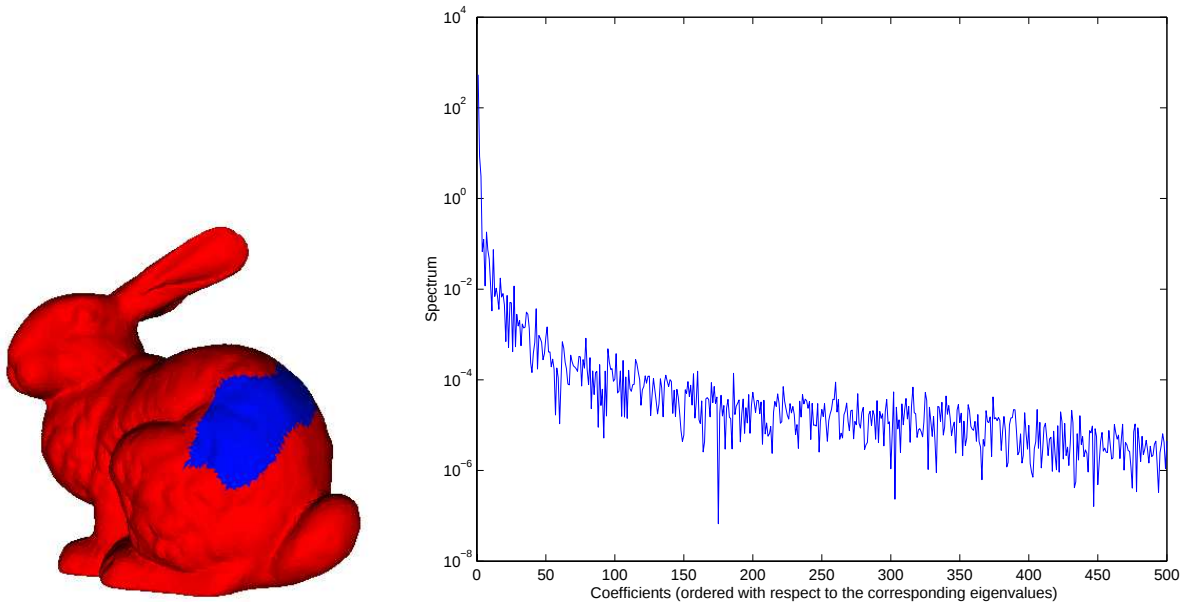


FIG. 6.3 – Le spectre de la géométrie (échelle logarithmique) de la partition forcée (500 sommets).

6.2 Partition du maillage

La décomposition spectrale demande de diagonaliser une matrice carrée dont la taille est N . Pour des maillages complexes de plusieurs dizaines de milliers de points, diagonaliser la matrice C associée est difficile. Il existe des méthodes permettant d'estimer quelques valeurs propres de grandes matrices [68], mais le calcul exhaustif de toutes les valeurs propres peut s'avérer difficile, notamment à cause de problèmes de stabilité numérique. Nous verrons que ce sera l'une des sources des difficultés rencontrées.

6.2.1 Remarques pratiques pour l'implantation

Dans une optique de transmission, le décodeur doit connaître les fonctions de base *avant* que n'arrive le premier coefficient spectral. En pratique, pour respecter cette contrainte de causalité, il faut procéder comme suit :

- Envoi préalable de la connexité,
- Calcul des bases de décomposition,
- Analyse (codeur) ou synthèse (décodeur).

La connexité peut être envoyée arbitrairement, par l'une des méthodes exposées en 3.1. Nous rappelons que nous n'avons pas souhaité traiter ce problème, qui est déjà résolu, en vue de l'étude qui nous intéressait.

En pratique, comme nous l'avons vu, c'est la diagonalisation de C qui pénalise l'algorithme appliqué aux grands maillages, pour deux raisons :

- le temps de calcul devient rédhibitoire,
- des problèmes de stabilité numériques interviennent.

Pour pallier ce problème, la solution proposée dans [42] consiste à diviser le maillage en sous-maillages au moyen d'une partition du graphe de connexité. Chaque partition peut au besoin être traitée séparément sur un processeur. Ainsi, on divise le problème en sous-problèmes dont la taille autorise une exécution raisonnable en machine. Toutefois, même en procédant ainsi le temps de calcul peut s'avérer encore long. C'est la raison pour laquelle nous suivons une autre stratégie issue de [43], fondée sur des bases fixes de décomposition.

6.2.2 Un outil générant des partitions

Afin de créer des partitions, les auteurs de [42] utilisent un outil de partitionnement de graphe appelé MeTiS [44]. Le partitionnement permet de se ramener à des matrices de taille plus modeste (typiquement 500) dont le temps de diagonalisation devient acceptable. Toutefois, MeTiS ne garantit qu'un nombre moyen de sommets par partition. La découpe est guidée par la minimisation de la longueur des bords des partitions. Nous donnons sur la Fig. 6.4 la représentation graphique de telles partitions obtenues avec MeTiS en ayant fixé 480 sommets par partition en moyenne comme but.

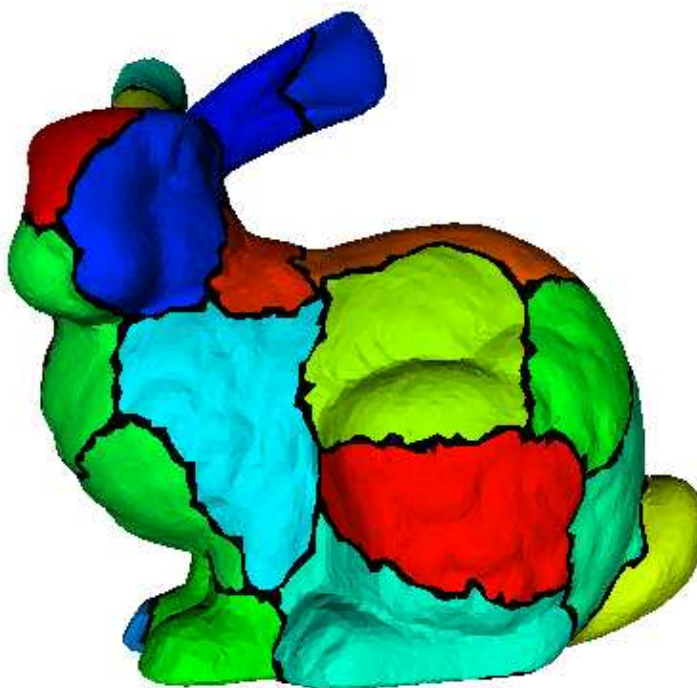


FIG. 6.4 – Découpe du maillage en partition de 480 sommets en moyenne (minimum 446, maximum 531). Les triangles ayant une arête séparant deux partitions sont peints en noir. Les partitions situées à la base de chaque oreille contiennent deux bords (cylindre topologique).

6.2.3 Artefacts visuels dus à la partition

L'utilisation du laplacien place les points en fonction du barycentre de leur voisinage. Lorsque peu de coefficients spectraux sont utilisés pour reconstruire l'objet, les sommets ont tendance à s'organiser d'abord au centre géométrique de la partition, loin de la frontière. Nous illustrons sur la Fig. 6.5 le type d'artefacts se produisant aux frontières des partitions. Pour cela, nous avons reconstruit progressivement une sphère régulièrement échantillonnée. Sur la ligne du haut, la sphère n'a pas été partitionnée : la reconstruction porte sur la totalité de l'objet. Sur la ligne du bas, la sphère a été partitionnée en deux : on observe des effets de bords sur la frontière dus à la partition de l'objet en deux.

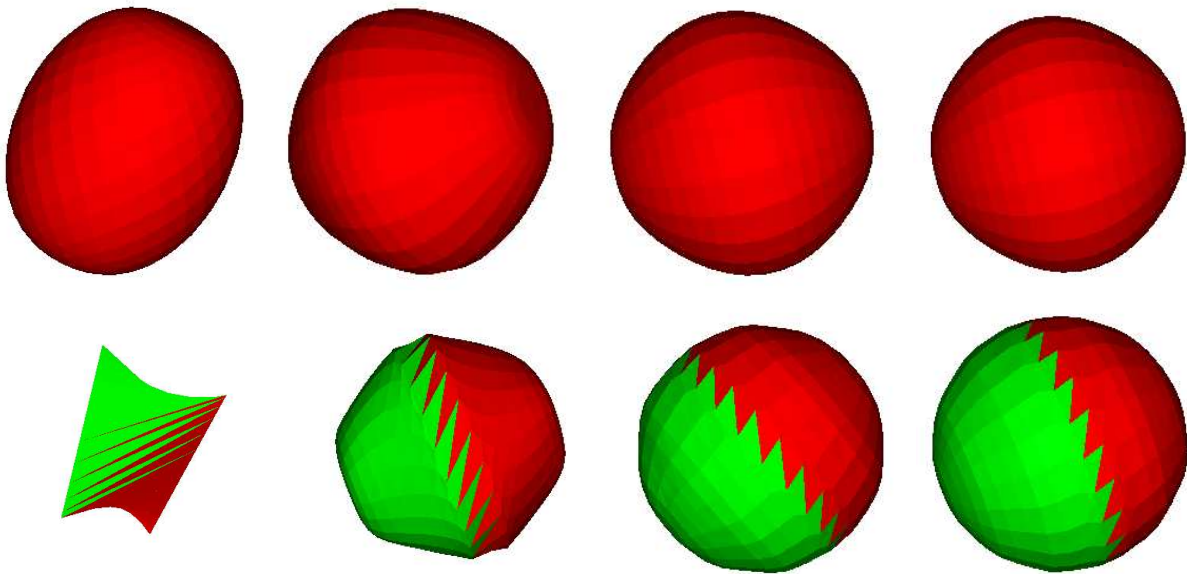


FIG. 6.5 – Artefact visuel dû à la partition du maillage (à diverses étapes de la reconstruction). En haut : la sphère n'est pas partitionnée (1%, 2%, 5%, 10% des coefficients). En bas : La sphère a été partitionnée en deux (1%, 5%, 20%, 30% des coefficients). Les artefacts dus à la partition apparaissent nettement sur la frontière : ces effets de bord mettent un certain temps à disparaître lors de la reconstruction (dans l'image en bas à droite, 30% des coefficients ont été utilisés pour reconstruire l'objet, les artefacts sont encore perceptibles).

C'est la raison pour laquelle sur la Fig.6.6 on constate un tassement des sommets à l'intérieur des partitions : nous avons illustré la reconstruction d'un objet avec peu de coefficients afin de mettre en évidence les artefacts aux frontières des partitions. On notera que ces artefacts se produisent essentiellement au tout début de la transmission progressive de la géométrie : en effet sur la Fig. 6.6 à droite, 2% des coefficients spectraux ont été utilisés pour reconstruire la géométrie, alors qu'à gauche les artefacts sont notablement réduits (objet reconstruit avec 5% des coefficients spectraux), même si le coloriage des partitions permet encore de les distinguer facilement.

Nous verrons plus loin (dans la section 6.3.1) comment nous pourrions pallier sensiblement ces artefacts, par l'introduction d'un recouvrement entre les partitions. Nous détaillons à

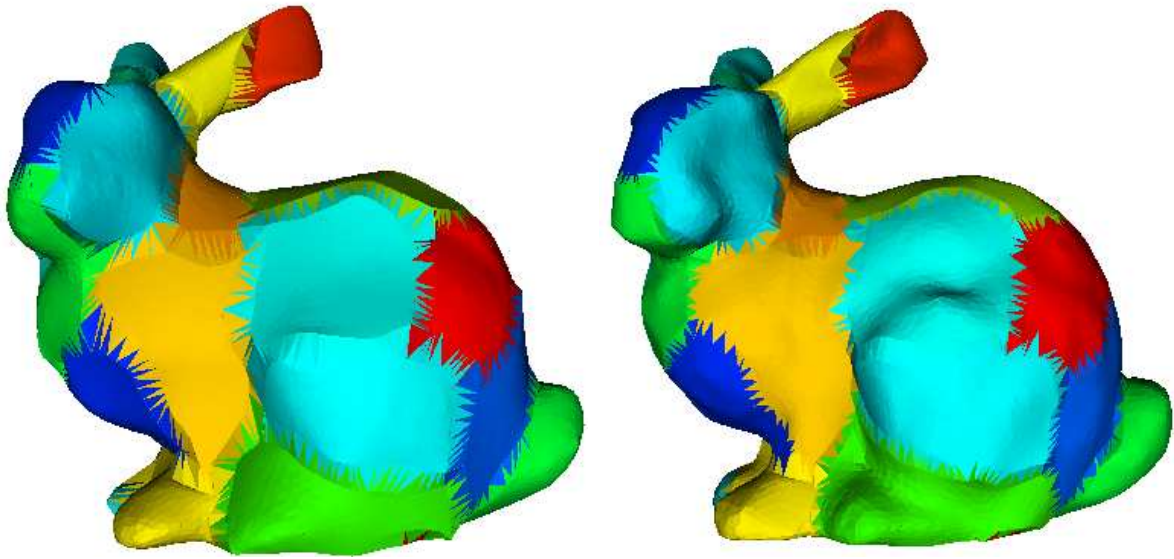


FIG. 6.6 – Artefacts dus à la partition du maillage : au début de la reconstruction, les sommets ont tendance à se placer d’abord au centre de chaque partition (à gauche : 2% des coefficients spectraux, à droite : 5%).

présent la technique consistant à utiliser des bases fixes de décomposition.

6.3 Bases de décomposition fixes

La partition du maillage permet de réduire le temps de calcul en diminuant la taille de la matrice C . Une deuxième solution pour cela est de choisir une base de décomposition fixe permettant de précalculer les transformations. Cela permet de réduire le temps de calcul à la fois au codeur et au décodeur. Pour cela, on remplace la connexité originale par une connexité régulière de valence 6 partout sauf sur les bords [43]. Les vecteurs de base sont alors les mêmes pour toutes les partitions. L’économie en temps s’accompagne d’un gain en mémoire du même ordre. Nous avons choisi (d’après [43]) d’utiliser des grilles régulières contenant un nombre au carré de sommets. La paramétrisation de Tutte (cf. section 2.4.4, [75]) d’une telle connexité, avec un nombre variable de sommets, est représentée sur la Fig. 6.7.

Les bases de décomposition spectrale sont alors symétriques, de taille fixée, et peuvent même être codées en dur dans le codeur et le décodeur afin de réduire encore le temps de calcul. Sur une telle structure, on peut procéder à une transformée de Fourier rapide, car alors l’opérateur laplacien est stationnaire presque partout. Afin de décomposer la géométrie partitionnée sur une telle base, il faut résoudre deux problèmes :

- *Augmenter la taille de chaque partition jusqu’au nombre carré immédiatement supérieur au nombre de sommets dans la partition.* En effet, notre boîte noire MeTiS ne fait que viser un nombre moyen de sommets dans les partitions, et nous avons besoin

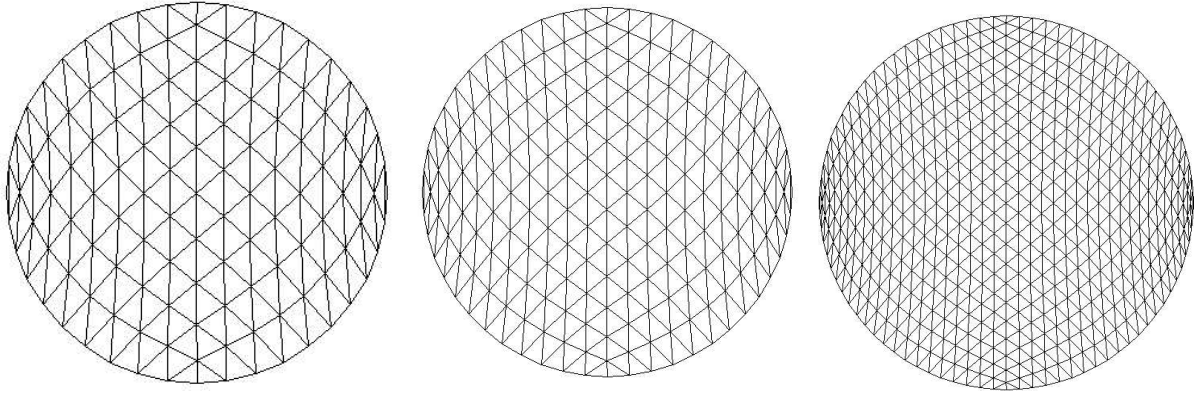


FIG. 6.7 – Paramétrisations barycentriques d’une connexité régulière de valence 6 partout sauf sur les bords (pour un nombre au carré variable de sommets : $11^2 = 121$, $14^2 = 196$, et $23^2 = 529$). Une grille de n^2 sommets en contient $4(n - 1)$ sur les bords. Une telle connexité a des bases de décomposition dont la taille est fixe, et qui peuvent être codées en dur au codeur comme au décodeur. Nous avons utilisé la dernière grille, contenant 529 sommets.

- de partitions dont le nombre de sommets peut être fixé arbitrairement),
- *Etablir une bijection entre les sommets du maillage original et ceux du maillage de connexité régulière.* La suite de la stratégie de [43] consiste à apparier les sommets de la connexité originale avec ceux de la connexité régulière (on vient en quelque sorte assigner de nouveaux voisins, 6 presque partout, à chaque sommet : notre bijection est en réalité un appariement entre les sommets de la base naturelle et ceux de la base fixe).

6.3.1 Augmentation des partitions et recouvrement

Deux approches sont possibles pour augmenter la taille des partitions jusqu’au nombre carré immédiatement supérieur. Nous présentons l’approche originale, due à Karni et Gotsman[43], qui consiste à rajouter des sommets n’apportant pas d’innovation géométrique. Ensuite, nous présentons notre propre approche, qui étend les partitions en les faisant se recouvrir. Nous comparerons plus loin notre approche par recouvrement avec celle de [43] dans le cadre de la transmission progressive de la géométrie.

Augmentation de Karni et Gotsman

Pour augmenter les tailles de leurs partitions, les auteurs de [43] insèrent des sommets fictifs qui n’apportent pas d’innovation géométrique. Ils procèdent en rajoutant autant de sommets qu’il faut en les plaçant au barycentre des points d’un triangle (voir Fig. 6.8). Ces sommets fictifs sont connus implicitement au décodeur. Il suffit d’avoir les mêmes règles implicites d’augmentation au codeur et au décodeur : on sait des deux côtés combien de sommets rajouter et où, pour arriver à augmenter les partitions jusqu’au carré supérieur. Par exemple, on insérera des sommets fictifs dans les premiers triangles de la connexité

originale.

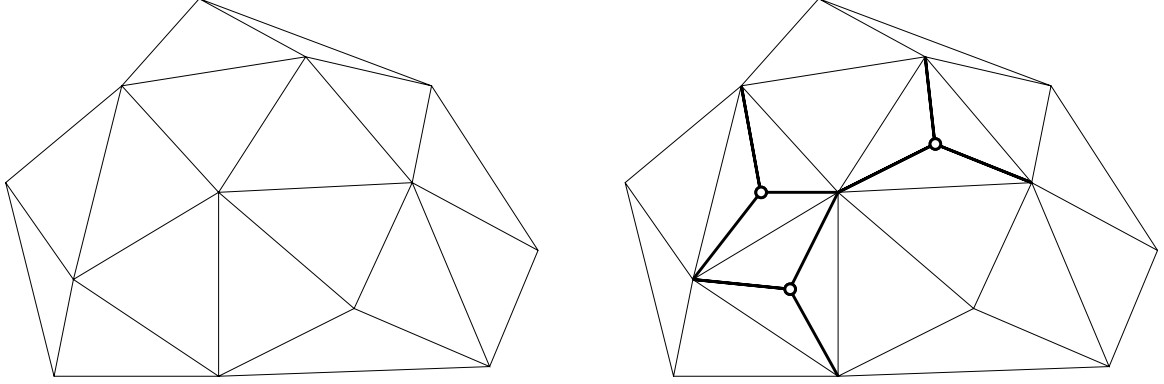


FIG. 6.8 – Augmentation des partitions d’après [43]. On insère implicitement des sommets fictifs qui n’apportent pas d’innovation géométrique, à partir de la connexité originale. Cela vaut tant pour le codeur que pour le décodeur. A gauche, un maillage de 13 sommets, auxquels trois sommets fictifs ont dû être ajoutés (à droite) pour arriver à $4^2 = 16$.

Augmentation par recouvrement

Nous inspirant des transformées avec recouvrement, nous choisissons d’augmenter nos partitions en allant chercher des sommets dans les partitions voisines. Nous procédons par un mouvement en spirale dirigé vers l’extérieur, en conquérant les sommets un-par-un jusqu’à ce que le carré supérieur soit atteint. Nous schématisons notre méthode en Fig. 6.9. Chaque partition augmentée comporte exactement un nombre au carré de sommets (n^2) même si le nombre de sommets sur les bords peut être différent de $4(n - 1)$.

Nos résultats en transmission progressive de la géométrie montreront l’apport de notre approche par recouvrement face aux artefacts visuels dus à la partition du maillage. Nous illustrons visuellement sur la Fig. 6.10 l’apport du recouvrement dans les débuts d’une transmission progressive de la géométrie. Toutefois, ce recouvrement a un coût, que nous avons caractérisé à l’aide de courbes débit/distorsion (cf. Section 6.4.3).

Enfin, lors de la reconstruction, les coordonnées d’un sommet appartenant à plusieurs partitions seront calculées comme le barycentre des contributions de chaque partition pour ce sommet. Nous opérons ainsi un moyennage qui rend plus douce la transition entre les partitions au début de la transmission.

6.3.2 Transfert sur la connexité régulière

Nous souhaitons à présent établir une bijection entre la connexité originale augmentée et la 6-connexité régulière. Cette bijection sera établie dans l’espace paramétrique barycentrique de Tutte. On cherche donc à assigner de nouveaux voisins à chaque sommet de la connexité originale, de manière à ce qu’ils aient tous 6 voisins sauf sur les bords (voir Fig. 6.11).

Soient P_o et P_r les coordonnées paramétriques des sommets de la connexité originale et de la connexité régulière, respectivement. On cherche une bijection b^{opt} parmi toutes les

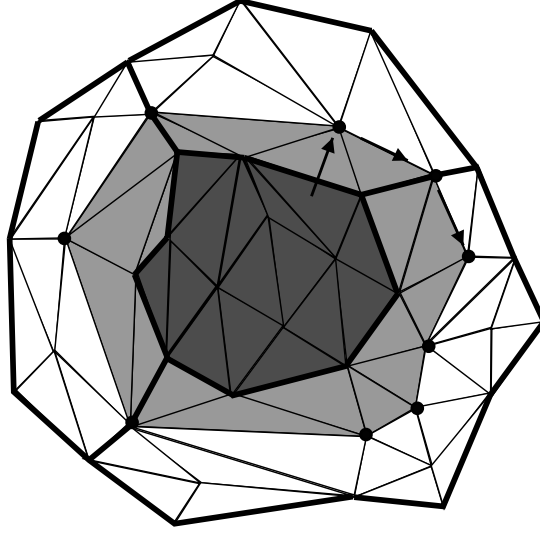


FIG. 6.9 – Augmentation des partitions par recouvrement : on vient conquérir en spirale des sommets situés dans les partitions voisines.

bijections possibles $b : P_o \leftrightarrow P_r$ telle que :

$$b^{opt} = \min_b \sum_i \|P_o(i) - P_r(i)\|^2 \quad (6.10)$$

Deux solutions ont été envisagées. Dans la première, adoptée dans [43], on résout localement l'optimisation en divisant l'espace paramétrique en parties de plus en plus grosses. Considérons maintenant le problème tel qu'il se pose en réalité. Nous devons associer un sommet de P_o avec exactement un autre de P_r , sous contrainte de minimiser la distance paramétrique entre les sommets ainsi appariés.

On peut voir ce problème comme un problème de couplage maximal dans un graphe biparti, ou comme un problème d'affectation. On doit trouver une matrice de permutation des sommets qui minimise l'erreur totale commise dans l'espace paramétrique. Pour cela, on construit la matrice des coûts entraînés par l'assignation d'un sommet $P_o(i)$ de la paramétrisation naturelle à un sommet $P_r(j)$ de la paramétrisation fixe (le coût est la distance paramétrique entre $P_o(i)$ et $P_r(j)$). Les problèmes de couplage maximal dans un graphe biparti sont résolus en général par la méthode de Ford-Fulkerson [29] (pour la maximisation de flot dans un graphe avec puits et source), moyennant une petite extension du graphe biparti pour lui adjoindre une source et un puits (voir [17]). Si l'on le voit comme un problème d'affectation, on pourra utiliser une heuristique du genre de la méthode des Hongrois, que nous ne détaillons pas (voir [1] pour les détails). Pour notre part, nous avons choisi cette dernière voie, en utilisant une heuristique développée dans [41] dont le code source est accessible depuis le réseau.

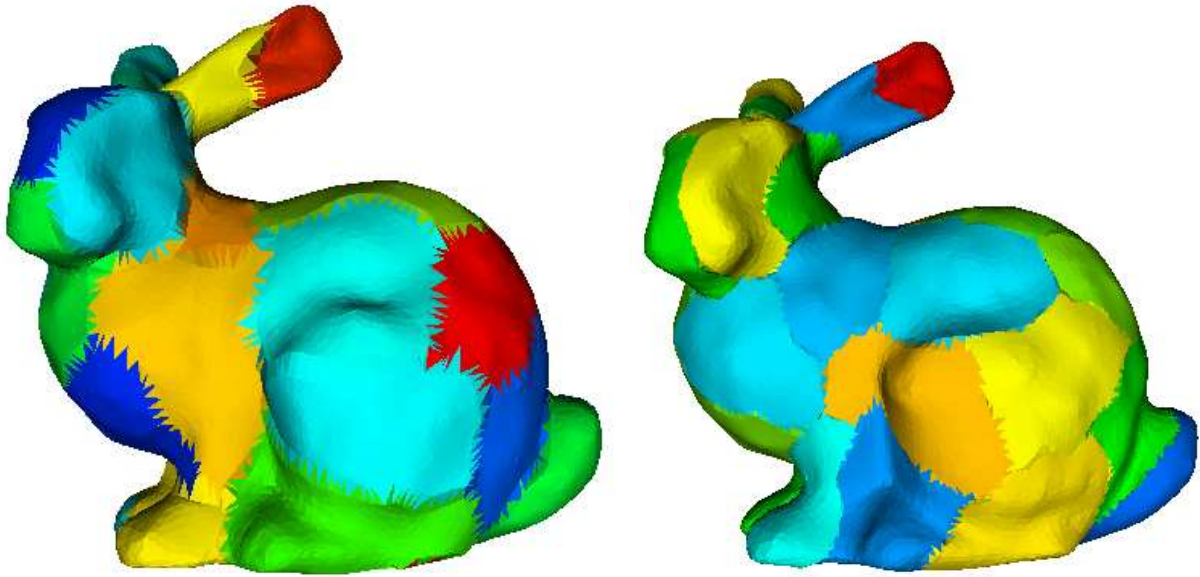


FIG. 6.10 – Effet du recouvrement sur les artefacts visuels dus à la partition du maillage : à droite, l’objet est partitionné en partitions de 500 sommets, puis reconstruit avec 5% des coefficients spectraux sur les bases naturelles. À gauche, la taille moyenne des partitions est de 400 sommets, auxquels sont rajoutés 20% de sommets en plus par augmentation ; le maillage est toujours reconstruit avec 5% des coefficients spectraux sur les bases naturelles. Le recouvrement permet d’atténuer les artefacts aux frontières des partitions. Les coefficients spectraux n’ont pas été quantifiés.

6.3.3 Cylindres topologiques

MeTiS ne donne malheureusement aucune garantie quant à la topologie des partitions obtenues, spécialement dans le cas de longues formes élancées (oreille de lapin, patte de cheval, etc.) qui peuvent générer des partitions homéomorphes à des cylindres, même si la grande majorité des partitions obtenues sont homotopes à des disques. Lors de l’assignation, il faut donc composer avec ce bord supplémentaire. Pour cela, nous plaçons le bord supplémentaire au centre de la partition paramétrisée, pour obtenir l’équivalent d’un disque audio physique, avec le trou au centre. Aucun traitement particulier n’est effectué pour les sommets du bord intérieur de la paramétrisation naturelle cylindrique. Les partitions n’ayant pas une topologie de disque posent problème pour la reconstruction progressive de la géométrie avec des bases fixes de décomposition (le problème ne se produit pas avec des bases naturelles). En effet, il faudra en pratique transmettre la quasi-totalité des coefficients spectraux avant que la reconstruction soit visuellement acceptable. Nous illustrons ce problème, que ne semblent pas avoir rencontré les auteurs de [42, 43], sur la Fig. 6.12. En pratique, nous fixons une certaine distance visuelle minimale (calculée par l’Eq. 2.31) qui détermine le nombre de coefficients spectraux à envoyer avant affichage pour chaque partition.

Nous n’avons malheureusement trouvé aucune explication de ce phénomène, et nous sommes contentés de pallier ses désagréments du mieux que nous avons pu. En particulier,

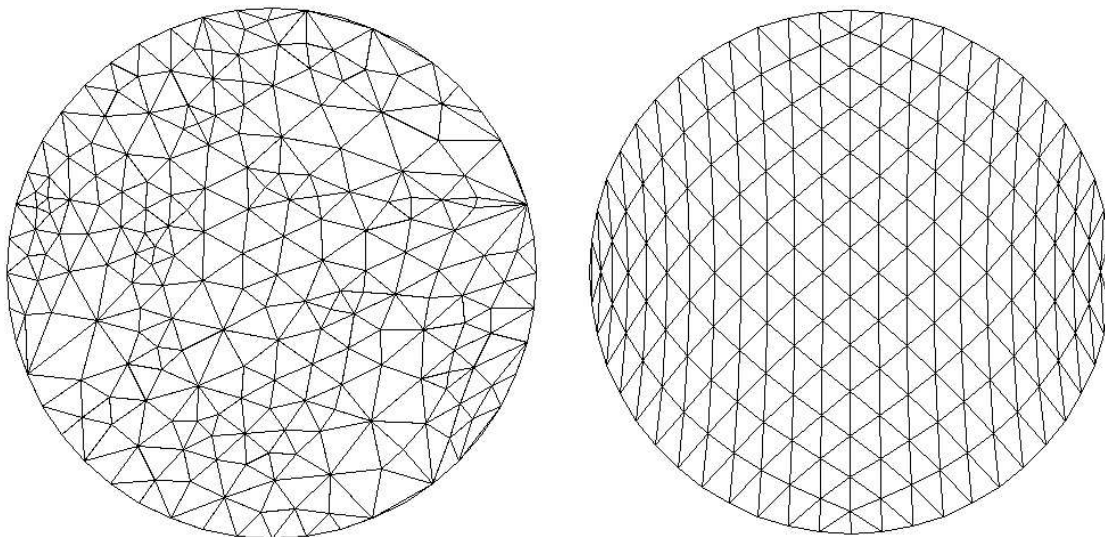


FIG. 6.11 – L'établissement de la bijection entre la connexité originale augmentée (à gauche) et la connexité régulière (à droite) se fait dans l'espace paramétrique barycentrique de Tutte.

ces partitions seront détectées lors de l'insertion du tatouage et ne pourront pas être tatouées. Dans une optique de transmission progressive de la géométrie, il faudrait veiller à placer au début de la transmission l'intégralité des coefficients de ces partitions problématiques. Une convention implicite à ce sujet serait nécessaire entre l'encodeur et le décodeur. Une telle solution devrait être envisagée tant qu'un moyen de partitionner un maillage quelconque en disques topologiques n'aura pas été trouvé.

6.4 Un codeur/décodeur géométrique spectral

Nous avons à présent tous les outils pour construire un codeur et un décodeur fonctionnant fondé sur la décomposition spectrale. De façon à réduire la longueur du message transmis, les coefficients spectraux doivent être quantifiés (idéalement en s'adaptant au signal) et codés de manière entropique. Nous avons fabriqué un codeur de Huffman pour l'occasion [39]. Chaque vecteur de coefficients spectraux est traité de la même manière : ses éléments sont quantifiés uniformément sur 14 bits (comme proposé dans [42]), puis mis en forme dans un train binaire compressé.

6.4.1 Schémas d'implantation

Nous donnons ici les deux schémas fonctionnels reflétant notre implantation tant pour le codeur que le décodeur. En particulier, nous traitons les partitions l'une après l'autre. La mise en forme du train binaire spectral est constituée de tronçons comme suit : les coefficients spectraux étant classés par valeur propre associée croissante dans chaque partition, on vient les ordonner d'abord suivant les partitions, puis par valeur décroissante. Le premier

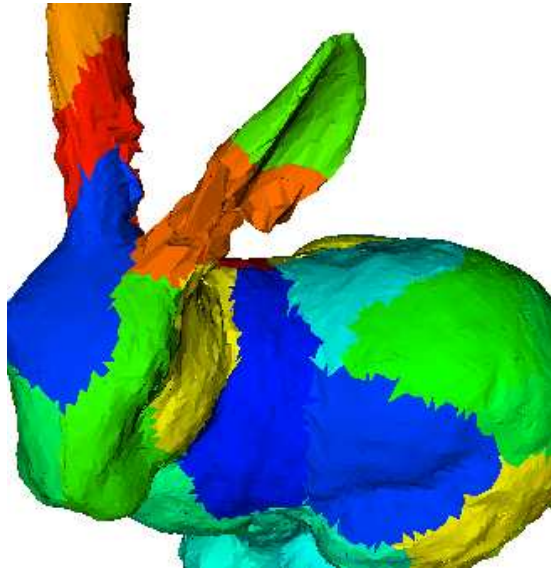


FIG. 6.12 – Mauvaise impression visuelle lors de la reconstruction d’une partition homotope à un cylindre en utilisant des bases fixes (voir chaque oreille), alors que les sous-maillages homotopes à des disques sont mieux reconstruits (à nombre égal de coefficients spectraux pour chaque partition).

tronçon donnera toutes les premières composantes continues des partitions, le second tronçon apportera le second coefficient spectral de toutes les partitions, etc. Nous illustrons la mise en forme du train binaire permettant d’obtenir une transmission progressive de la géométrie sur la Fig. 6.13. Le schéma du codeur est illustré sur la Fig. 6.14, et le schéma du décodeur sur la Fig. 6.15.

6.4.2 Transmission progressive de la géométrie

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats que nous avons obtenus en compression spectrale de la géométrie, et donc aussi en transmission progressive comme la décomposition spectrale le permet. Afin de tracer les courbes débit/distorsion, nous avons choisi de mesurer la distorsion à l’aide d’une distance fondée sur le laplacien géométrique (comme dans [42]), voir Eq. 2.30. Nous donnons nos résultats tant avec des bases naturelles de décomposition, que des bases fixes (ce que n’ont pas fait les auteurs de [43]). Il semble donc que nous soyons les premiers à nous y aventurer. Comme nous l’avons précisé plus haut, la décomposition spectrale permet la transmission progressive de la géométrie. Nous l’illustrons en Fig. 6.16 pour un maillage de CAO permettant de mieux appréhender les artefacts visuels dus à ce type de transmission. On constate, pour ce type d’objets, qu’il faut attendre la fin de la transmission pour disposer d’un objet utilisable qui soit non seulement visuellement satisfaisant, mais aussi numériquement. Sans doute avons-nous ici affaire à un phénomène de Gibbs provoquant des oscillations résiduelles lorsque l’on coupe les hautes fréquences dans une transformée à fenêtre (notre fenêtre est ici une partition).

$(PQR)_1^1$	$(PQR)_1^2$	...	$(PQR)_1^{N_P}$
$(PQR)_2^1$	...		$(PQR)_2^{N_P}$
...			
$(PQR)_z^1$	...		$(PQR)_z^{N_P}$

FIG. 6.13 – Mise en forme des triplets de coefficients spectraux dans le train binaire. On appelle N_P le nombre de partitions contenant chacune z sommets.

6.4.3 Compression et bases naturelles

Nous avons voulu aussi montrer l'apport de notre procédure de recouvrement dans la transmission progressive avec des bases de décomposition naturelles (c'est à dire hors de leur but premier qui était d'augmenter les partitions jusqu'au même nombre de sommets). Nous avons fixé à notre procédure de recouvrement d'atteindre 20% de sommets en plus par partition. Les résultats montrent que si l'apport est indéniable au début de la transmission (voir Fig. 6.10), on paie en revanche un surcoût de transmission (de l'ordre de 2 bits par sommet) dû à un nombre plus important de partitions à transmettre (voir Fig. 6.17 et Fig. 6.18). Toutefois, sur des objets naturels, nous avons pu vérifier que l'œil s'accommode d'un maillage reconstruit avec un surcoût de seulement 1 bit/sommet. Les bases naturelles sont celles offrant le meilleur taux de compression, et sont donc dédiées à des applications d'archivage par exemple, car la lenteur du décodeur interdit leur utilisation pour la transmission avec un rendu progressif.

Les résultats obtenus sont conformes à ceux présentés dans [42], même si notre quantificateur (uniforme) est loin d'être adapté à la distribution des coefficients spectraux. On notera enfin que la métrique visuelle utilisée pour quantifier la distorsion varie avec le maillage et la manipulation considérés (comparer les ordonnées des Fig. 6.17 et 6.18) : on ne peut donc pas établir pour l'heure de valeur de la métrique visuelle universelle pour laquelle déclarer que le maillage est convenablement reconstruit. Une telle valeur dépend encore de chaque maillage. C'est sans doute la raison pour laquelle les résultats sont un peu moins bons. Toutefois, nous disposons à présent d'un codeur de source géométrique spectral, contre lequel nous nous proposons de développer un schéma de tatouage robuste face à ce type de compression de la géométrie. Nous n'avons présenté que les résultats concernant le codage de source de la géométrie, cela afin de pouvoir comparer avec [42].

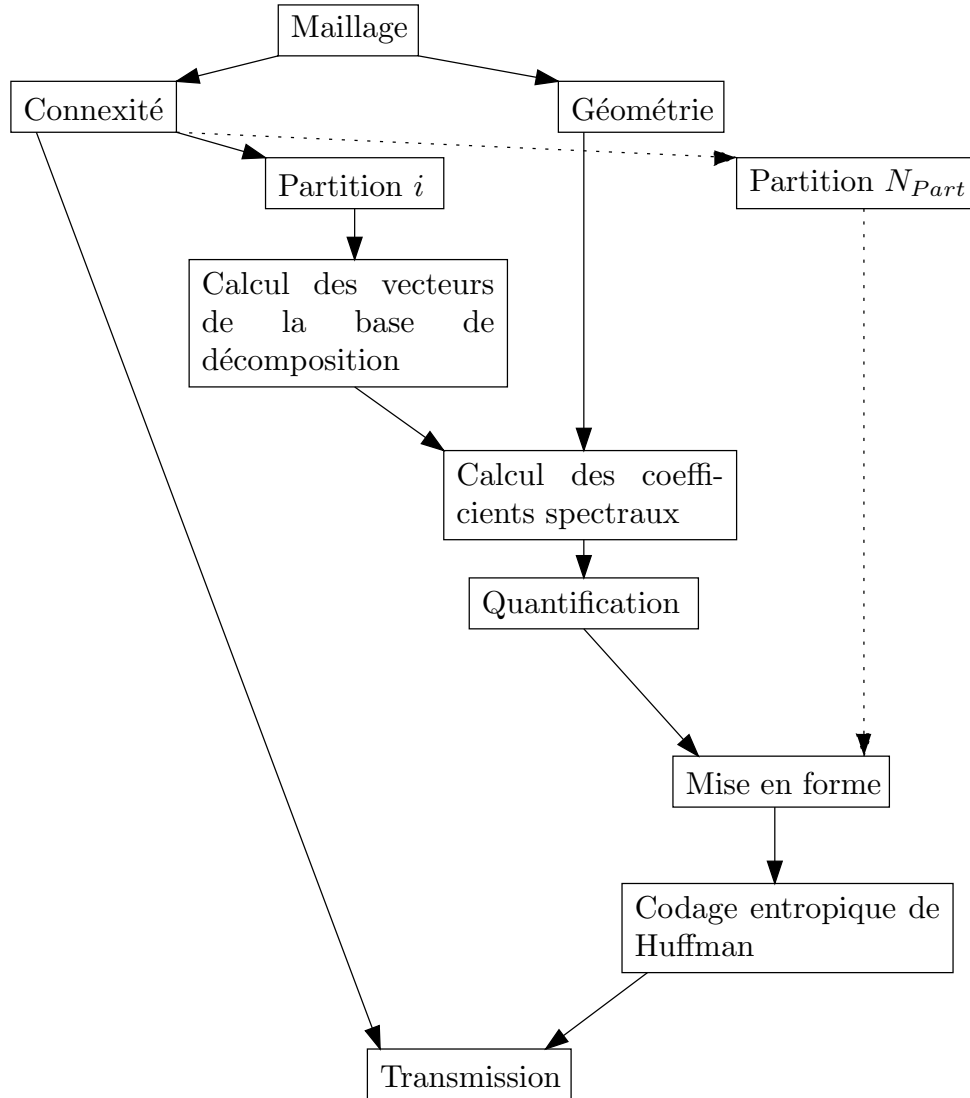


FIG. 6.14 – Schéma du codeur spectral de la géométrie.

6.4.4 Transmission et bases fixes

Nous donnons sur la Fig. 6.19 une courbe débit/distorsion correspondant à l'utilisation de bases fixes de décomposition. Nous rappelons que [43] ne propose pas les résultats associés à cette technique, et on comprendra sans doute pourquoi au vu de la courbe. En pratique, nous n'avons pas implanté l'augmentation de Karni et Gotsman : nous avons donc demandé à MeTiS des partitions un peu en deçà d'une valeur carrée, afin de recourir le moins possible à l'augmentation par recouvrement (la courbe notée "NO LOT" sur la Fig. 6.19). Ensuite, nous avons fait jouer à plein le recouvrement (courbe notée "LOT") en demandant 20% d'augmentation des partitions en moyenne, et c'est cette différence que les résultats permettent d'apprécier. Les bases fixes, même si elles induisent un important surcoût comme nous verrons, restent les seules à permettre un affichage suffisamment rapide à mesure que

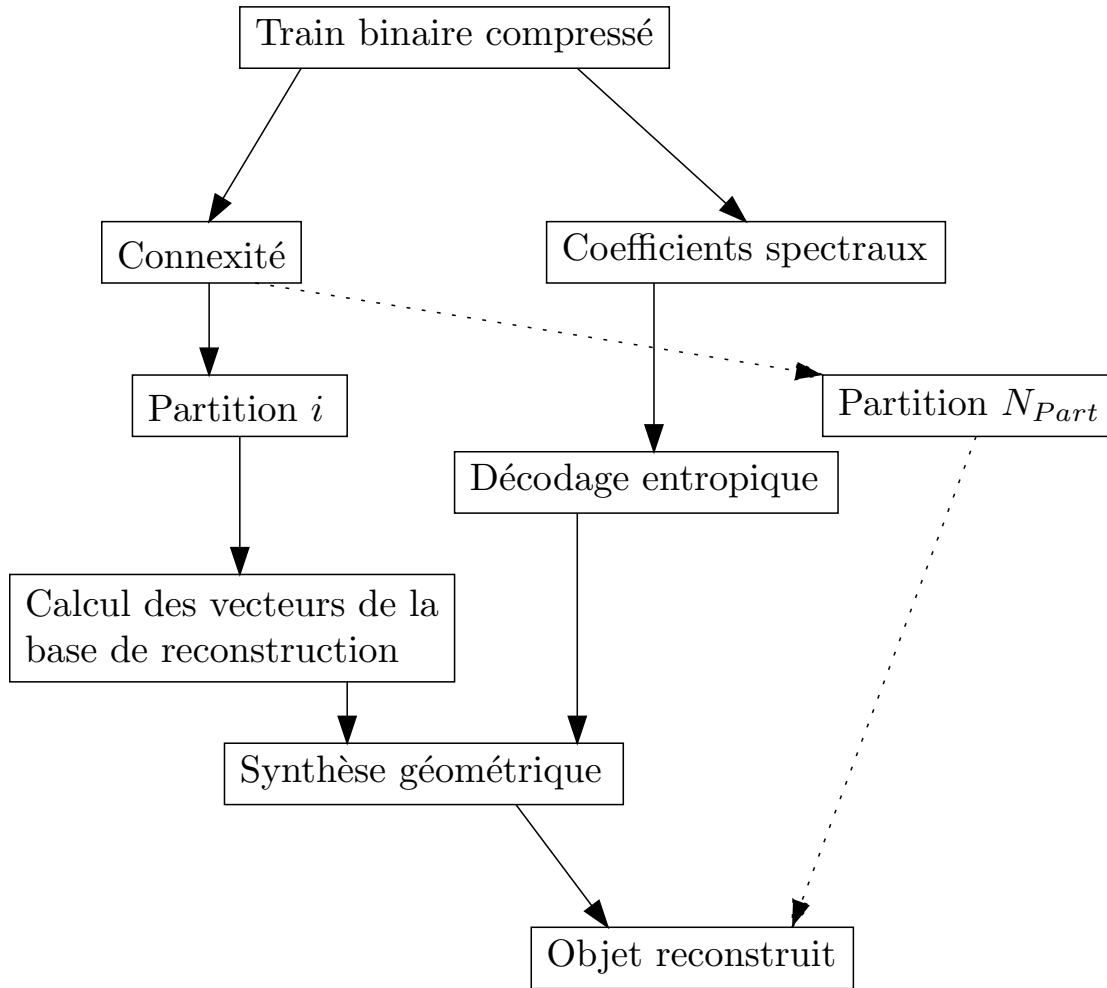


FIG. 6.15 – Schéma du décodeur spectral de la géométrie.

les coefficients spectraux arrivent au décodeur.

Une remarque s'impose encore : pour utiliser le recouvrement, nous devons nécessairement demander à MeTiS des partitions plus petites que si nous ne l'utilisons pas. Ainsi, les risques de créer des partitions homéomorphes à des cylindres s'amenuisent-elles. De fait, sur la Fig. 6.19, le recouvrement a permis de générer seulement deux partitions homotopes à des cylindres, contre quatre sans l'utiliser. Même si le recouvrement améliore la transmission par bases fixes, celle-ci reste de nettement moins bonne qualité que la transmission utilisant les bases naturelles du maillage.

En effet, il apparaît clairement que l'utilisation de bases fixes nécessite un très grand surcoût de transmission. Mais on notera cependant combien le recouvrement améliore les performances de la compression par bases fixes (de l'ordre de 12 bits par sommet). En fait, la compression par bases fixes sans recouvrement ne compresse en réalité que très peu l'information : un maillage non compressé voit chacune des coordonnées de ses sommets codées sur un entier de 32 bits (96 bits/sommets), or on atteint seulement 68 bits/sommets sans recouvrement, et on atteint environ 52 bits/sommets avec (sur la Fig. 6.19). Cela est

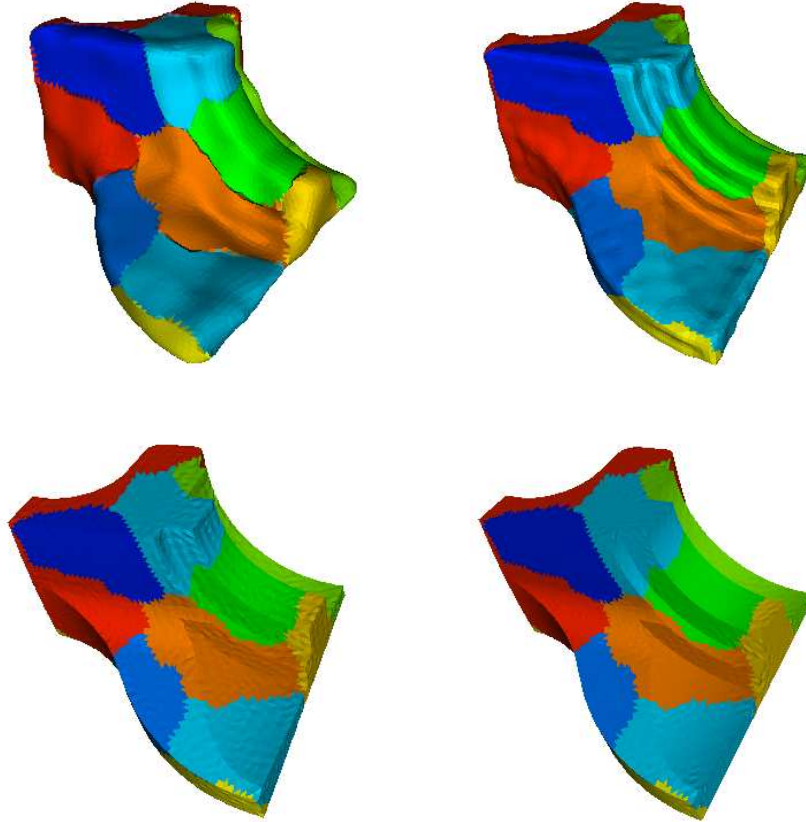


FIG. 6.16 – Visualisation d'un objet de CAO reconstruit à diverses étapes de la transmission. Sur ces objets, on doit attendre la toute fin de la transmission pour retrouver un objet utilisable. La décomposition spectrale n'est pas adaptée à la compression d'une telle géométrie non naturelle. On a représenté une reconstruction avec 5%, 15%, 25%, et 95% des coefficients spectraux. Données : Pratt & Whitney.

dû au fait que l'on cherche à décorréler la géométrie sur une connexité régulière sans rapport avec elle. Or, comme nous l'avons vu, la connexité semble transporter d'elle-même une partie de l'information géométrique - et c'est cette information que nous perdons par l'utilisation de bases fixes de décomposition. La première étude sur la forme contenue dans la connexité est présentée dans [40], et soulève davantage de questions, passionnantes au demeurant, qu'elle n'en résout.

Nous représentons sur la Fig. 6.20 la courbe débit-distorsion en bases fixes pour le modèle *head* (pour comparer avec la Fig. 6.17). Toutes les partitions sont des disques topologiques, contrairement à la Fig. 6.19. Il faut attendre plus longtemps le premier affichage, mais il est de meilleure qualité qu'avec des bases naturelles, et la qualité augmente quasi-linéairement avec la quantité d'information spectrale transmise.

Nous justifions à présent perceptuellement, autant qu'il est possible, notre choix de 14

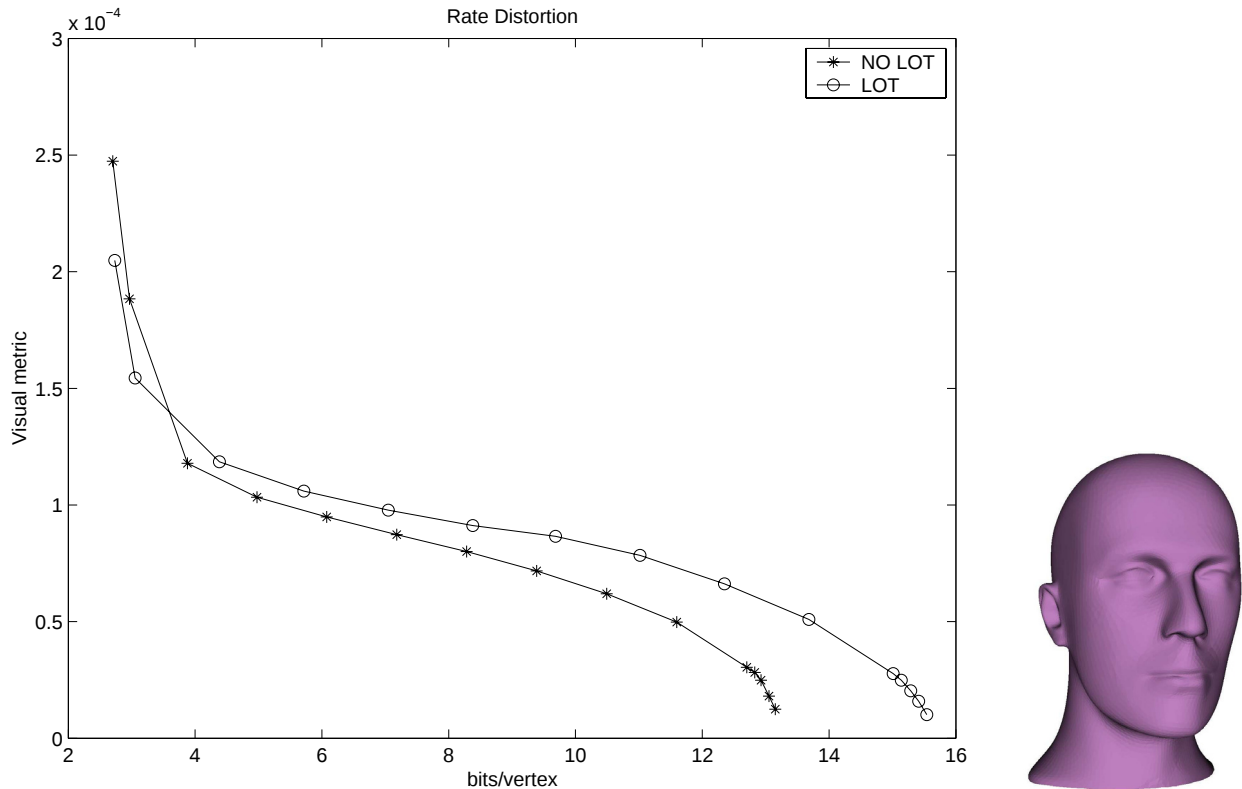


FIG. 6.17 – Résultats en compression spectrale de la géométrie (bases naturelles) : courbes débit/distorsion pour la mesure de l'Eq. 2.30. Le recouvrement (noté LOT) fait intervenir un surcoût en fin de transmission qui compense la meilleure qualité visuelle obtenue au début de la transmission progressive de la géométrie. Les courbes ne s'annulent pas à la fin de la transmission à cause de la quantification des coefficients spectraux. Données : Technical Arts, Co.

bits de quantification. On note sur la Fig. 6.19 que l'on n'atteint pas, en pratique, une reconstruction parfaite à la fin de la transmission. Cela est dû à la quantification. Nous illustrons sur la Fig. 6.21 les artefacts visuels liés à la quantification des coefficients spectraux (bases fixes). En outre, comme le montre le bruit persistant sur le cylindre topologique vert à la base de l'oreille gauche sur la Fig. 6.21, les partitions homotopes à des cylindres sont celles qui souffrent le plus de la quantification des coefficients spectraux. Toutefois, nous croyons que le problème consistant à partitionner un maillage en disques topologiques, s'il est ardu, dépasse de loin notre seul cadre de travail : on pourrait par exemple imaginer de distribuer plus efficacement les calculs de remaillage, de paramétrisation, etc. On peut voir le problème de trouver le schéma polygonal d'un maillage comme un point de départ pour la résolution de celui qui nous occupe. Les disques topologiques sont cependant convenablement reconstruits avec 14 bits de quantification, même sur des bases fixes de décomposition qui décorrèlent pourtant moins bien l'information géométrique.

Si l'utilisation des bases fixes de décomposition est possible pour des objets naturels, il n'en va pas de même pour les modèles de CAO, qui sont particulièrement affectés par la

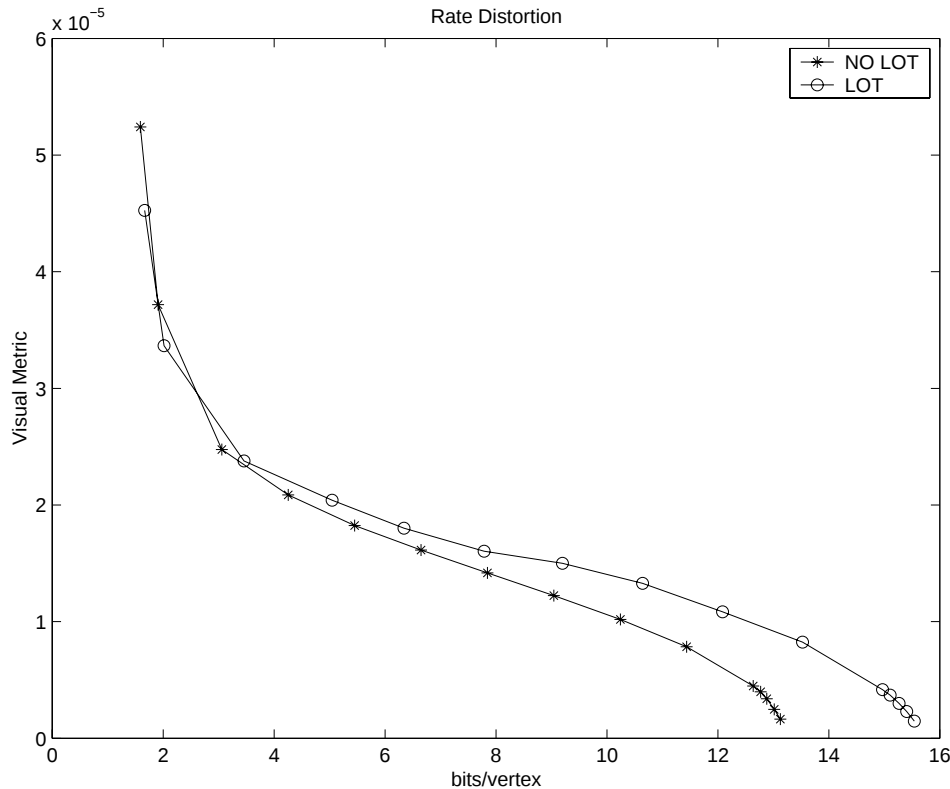


FIG. 6.18 – Résultats en compression spectrale de la géométrie (bases naturelles) : courbes débit/distorsion pour la mesure de l'Eq. 2.30. Le recouvrement (noté LOT) fait intervenir un surcoût en fin de transmission qui compense la meilleure qualité visuelle obtenue au début de la transmission progressive de la géométrie.

quantification des coefficients spectraux, comme illustré sur la Fig. 6.21 pour laquelle on a pourtant utilisé 16 bits de quantification. En particulier, la décomposition spectrale ne permet pas de garantir la parfaite reconstruction des surfaces fonctionnelles de l'objet, et se révèle pour cette raison, croyons-nous, intrinsèquement inadaptée à ce genre d'objets.

6.4.5 Remarques sur la décomposition spectrale

C'était pour des raisons d'implantation et de complexité que Taubin n'avait pas utilisé son opérateur laplacien pour la compression, et nous avons voulu explorer ce qu'il en est avec les moyens d'aujourd'hui. Comme nous l'avons vu, afin de ne pas être limités par la taille du maillage à traiter, il faut le partitionner. Cette première étape introduit des artefacts visuels à la reconstruction sur les bords des partitions.

La qualité de la décorrélation de la géométrie est optimale si l'on utilise les bases naturelles de décomposition, mais au prix d'un temps de calcul plus important, et d'un usage de la mémoire plus dispendieux (il faut stocker toutes les fonctions de base de chaque partition). Seule l'utilisation de bases fixes permet aujourd'hui un temps de calcul acceptable (quelques minutes) et propice à la transmission progressive (en terme de rendu progressif

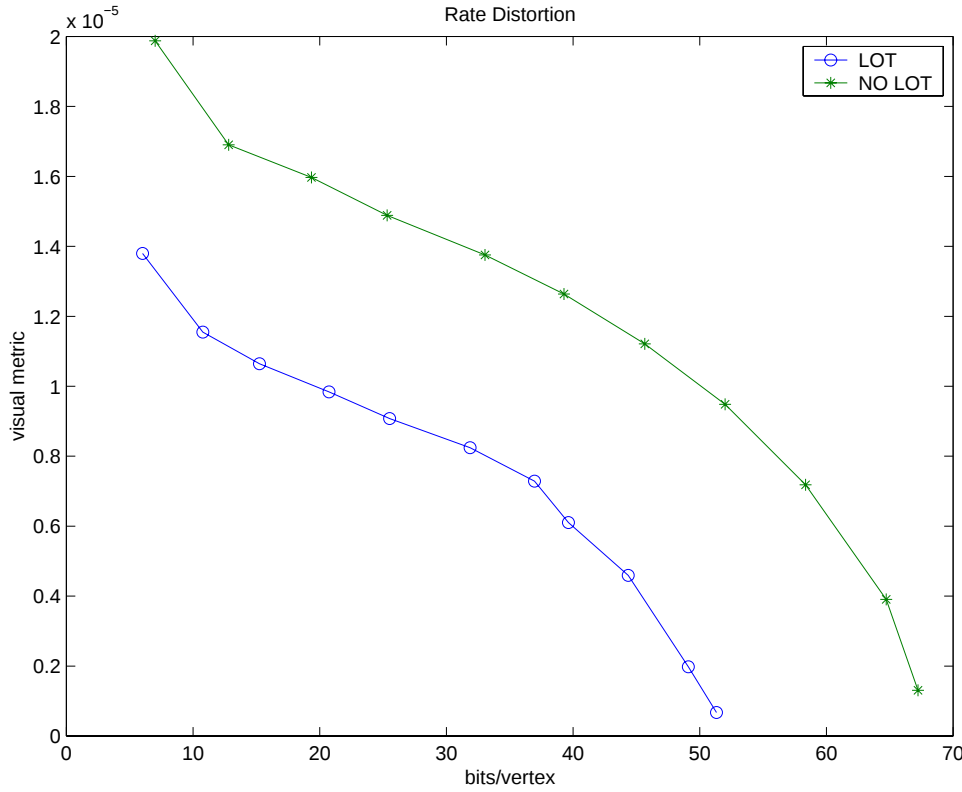


FIG. 6.19 – Résultats en compression spectrale de la géométrie (bases fixes) : courbes débit/distorsion pour la mesure de l'Eq. 2.30. Le recouvrement (noté LOT) améliore la qualité de la transmission, même si la qualité de la décorrélation est bien moindre. Données : Stanford 3D Scanning Repository.

rapide au décodeur). Toutefois, c'est au prix d'un surcoût de transmission important dû à l'inadaptation de la grille régulière aux données géométriques que l'on se propose pourtant de compresser.

C'est en tenant compte des limitations de l'environnement de calcul que l'on optera pour l'une ou l'autre technique. Pour nous, nous avons utilisé des bases fixes de décomposition pour deux raisons supplémentaires :

- Nous souhaitions uniquement tester l'effet de la quantification des coefficients spectraux (nous ne cherchons pas à transmettre efficacement la géométrie),
- L'attaque sur la marque est plus pernicieuse encore que si l'on utilisait des bases naturelles.

6.5 Tatouage spectral de la géométrie

Après avoir présenté précisément notre codeur spectral de la géométrie, nous pouvons aborder la conception d'un schéma de tatouage pour l'espace de la décomposition spectrale de la géométrie. Nous utiliserons pour le tatouage une décomposition spectrale avec les pro-

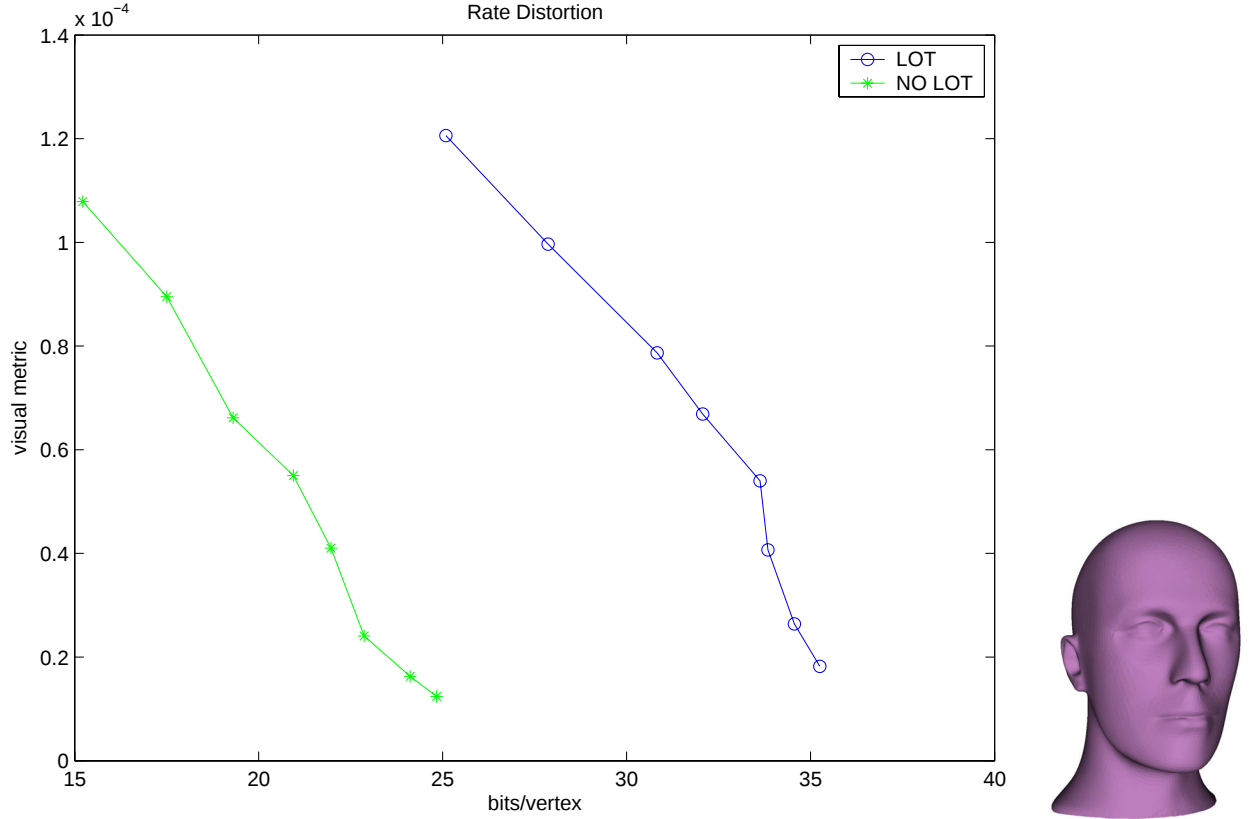


FIG. 6.20 – Résultats en compression spectrale de la géométrie (bases fixes) : courbes débit/distorsion pour la mesure de l'Eq. 2.30. Le recouvrement (noté LOT) améliore la qualité de la transmission, même si la qualité de la décorrélation est bien moindre. Données : Technical Art, Co.

priétés suivantes : utilisation de bases fixes avec recouvrement de 20%. L'utilisation d'un domaine de représentation redondant pour le tatouage n'est pas neuve, voir par exemple [59] pour l'image 2D. Pour nous, nous nous proposons de modifier les relations des coefficients spectraux entre eux. Nous représentons sur la Fig. 6.22 les trois spectres de chaque coordonnée X , Y et Z d'une partition. Comme pour nos travaux en tatouage fragile, nous essaierons de masquer la présence du tatouage à un éventuel pirate, en ne fixant pas de valeur prédéfinie de notre variable de tatouage. Nous détaillons à présent plus précisément notre schéma de tatouage spectral de la géométrie. Ce schéma sera de type substitutif, à l'inverse de celui proposé dans [58] qui, toujours dans l'espace spectral de la décomposition, est de type additif.

6.5.1 Schéma de tatouage

Notre méthode de tatouage agit de la même manière sur toutes les partitions, décomposées chacune sur des bases fixes. Les 3 vecteurs X, Y, Z de N coordonnées sont transformés en vecteurs spectraux P, Q, R , ordonnés suivant les valeurs propres croissantes. Chaque triplet

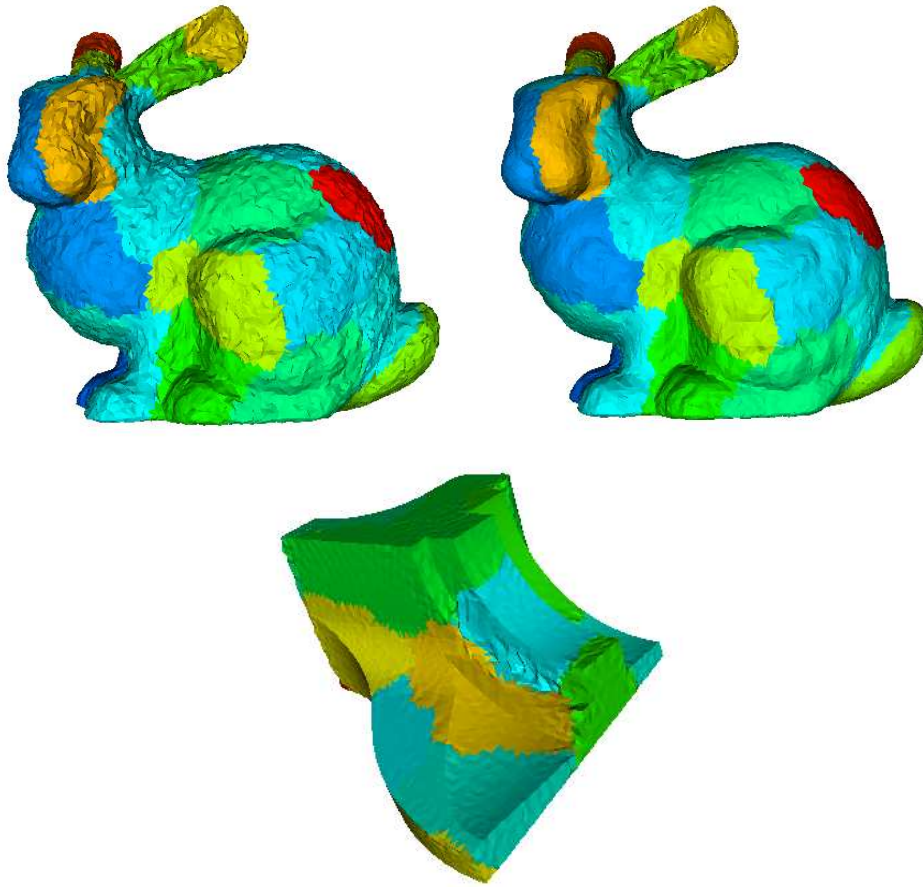


FIG. 6.21 – Artefacts liés à la quantification des coefficients spectraux en utilisant des bases fixes : en haut à droite, 12 bits de quantification ; en haut à gauche, 14 bits. L’effet de la quantification est particulièrement sensible sur les partitions homéomorphes à des cylindres. En bas : modèle de CAO reconstruit à l’aide de bases fixes, avec 16 bits de quantification des coefficients spectraux. La décomposition spectrale, à cause de la perte due à la quantification, est inadaptée à ce genre d’objets.

spectral P_i, Q_i, R_i est considéré séparément pour y cacher un bit. On procède simplement en déplaçant la valeur médiane du triplet de part ou d’autre de la moyenne du minimum et du maximum. Pour des raisons d’imperceptibilité, on ne peut pas effectuer de déplacement trop important : ce déplacement sera donc rapporté à un facteur r . Nous avons fixé expérimentalement $r = 10$. Le tatouage se fait sur les coefficients non quantifiés.

On s’étonnera à bon droit du caractère sommaire, voire grossier, de notre procédure d’insertion de la marque. Cependant, nous souhaitons tester notre méthode de tatouage face à la compression géométrique spectrale de la géométrie. Une telle compression, comme nous l’avons vu, ne peut être efficace qu’en utilisant des bases naturelles de décomposition. Par contre, afin de gagner en temps de calcul, nous avons construit un espace de tatouage fondé sur des bases fixes de décomposition. Ne connaissant pas les interactions entre le passage d’une base naturelle de décomposition à une bases fixe, nous avons préféré débiter

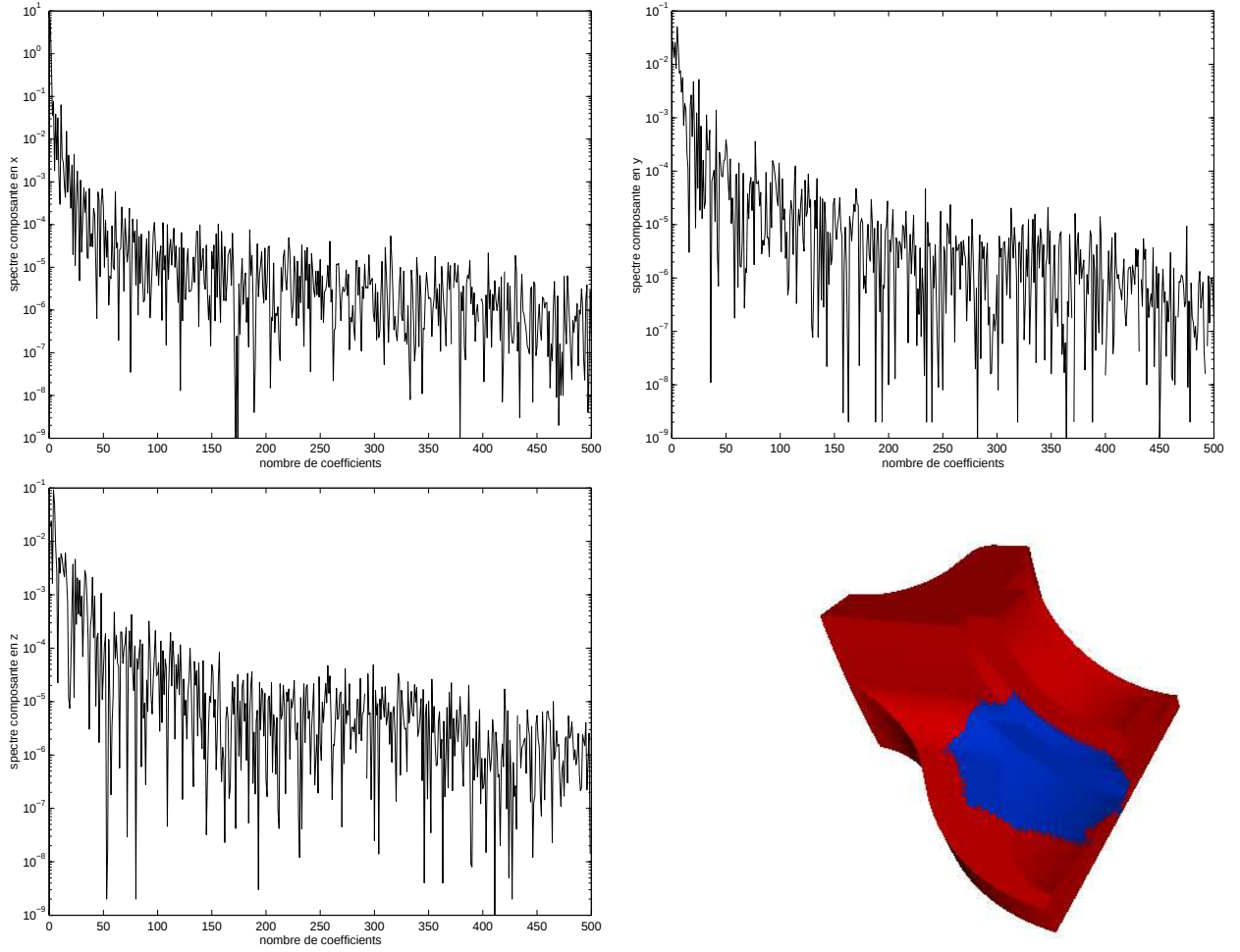


FIG. 6.22 – Spectres de chaque coordonnée X, Y et Z d'une partition d'un modèle de CAO. Notre schéma de tatouage modifiera les relations des coefficients spectraux entre eux.

notre étude avec une manipulation sensible des coefficients spectraux. Nous reconnaissons là l'aspect le moins achevé de notre étude.

Afin d'assurer l'imperceptibilité du tatouage, on ne peut pas tatouer tous les triplets (à commencer par la composante continue). Si chaque partition contient N_P sommets (autant de triplets spectraux), on commencera à tatouer à partir du triplet numéro t_0 . On peut ainsi définir la force d'insertion f en fonction du rapport entre le numéro du premier triplet porteur d'information, et le nombre de sommets dans la partition :

$$f = \frac{t_0}{N_P} \quad (6.11)$$

La stratégie de codage de canal que nous avons mise en œuvre est fondée sur une simple répétition. Chaque bit est donc répété n_r fois par partition, avec :

$$n_r = \left\lfloor \frac{N_P - t_0}{64} \right\rfloor \quad (6.12)$$

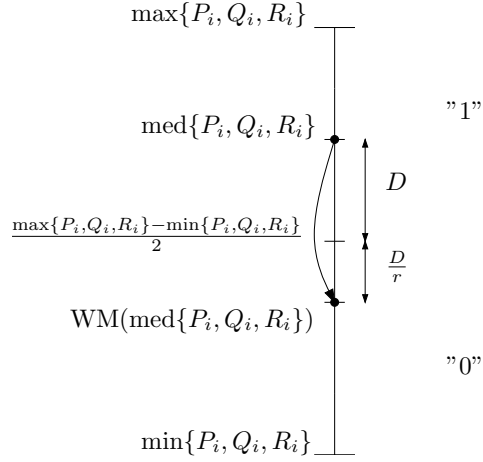


FIG. 6.23 – Schéma de tatouage spectral : un triplet spectral permet de cacher un bit.

Toutefois, entre chaque répétition, une clef secrète modifie l'ordre dans lequel les bits sont inscrits. Cela permet à la fois de garantir le secret (en le faisant porter sur les numéros des bits cachés), et surtout de donner à chaque bit caché la même chance d'être relu. A la détection, la clef permet de relire immédiatement la marque. Nous utilisons alors une simple stratégie de détection à la majorité : la valeur du bit relue est celle ayant été détectée le plus souvent.

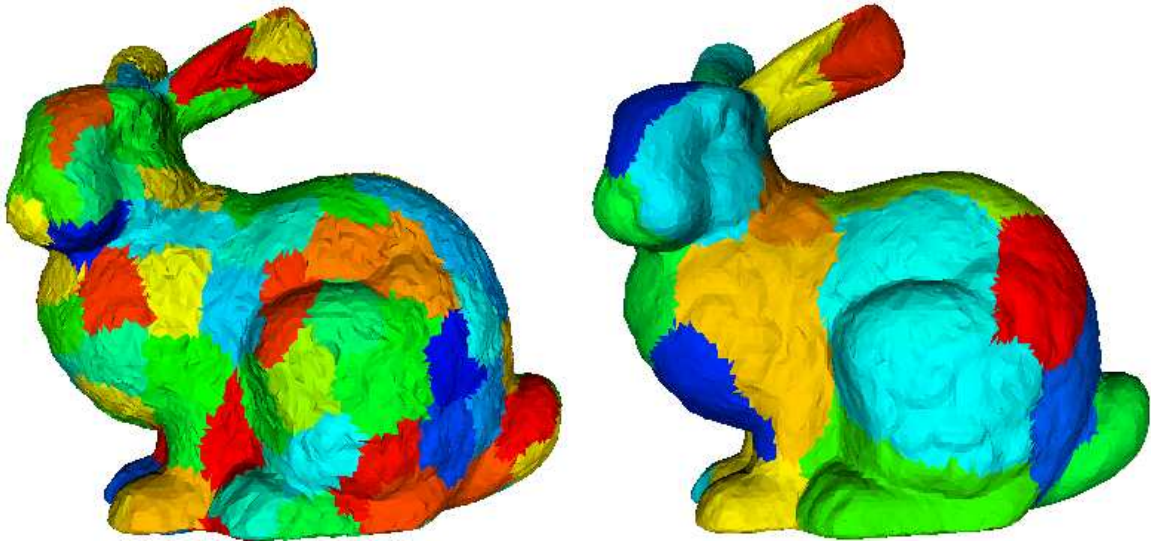


FIG. 6.24 – Tatouage, à force égale, du même objet avec une taille de partition $N_P = 100$ (gauche) et $N_P = 500$ (droite).

Enfin, nous avons vérifié la cohérence entre les tailles de partition en compression et en tatouage. Sur la Fig. 6.24, nous montrons le même objet naturel tatoué avec une taille de partition de $N_P = 100$ sommets et $N_P = 500$. Nous vérifions que la taille de partition que

nous avons employée en compression peut encore servir au tatouage. On observe un effet du tatouage bien plus visible s'il y a moins de sommets par partition. Nous conserverons donc notre taille de partition autour de 500 sommets ($23^2 = 529$ avec des bases fixes). On peut ainsi imaginer un codeur/tatoueur géométrique spectral effectuant le travail de tatouage directement après la projection de la géométrie sur les bases de décomposition, et avant la quantification.

6.5.2 Force et distorsion

Nous cherchons à présent à évaluer la distorsion introduite par notre schéma de tatouage. Pour cela, nous traçons la courbe de la distorsion en fonction de la force d'insertion. Nous mettons aussi en évidence l'apport du recouvrement dans un tel contexte. Les Fig. 6.25 et Fig. 6.26 montrent l'effet du tatouage sur la distorsion, avec et sans recouvrement. En particulier, on constate que le recouvrement permet de tatouer des fréquences plus basses à distorsion égale. Nous pensons que ce résultat est dû au fait que nous tatouons les moyennes/hautes fréquences, dont le recouvrement se fixe précisément pour objectif de limiter les perturbations erratiques aux frontières des partitions. Nous rappelons que dans le cadre des bases fixes de décomposition, nous opérons un moyennage des coordonnées des sommets appartenant à plusieurs partitions.

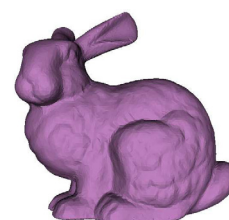
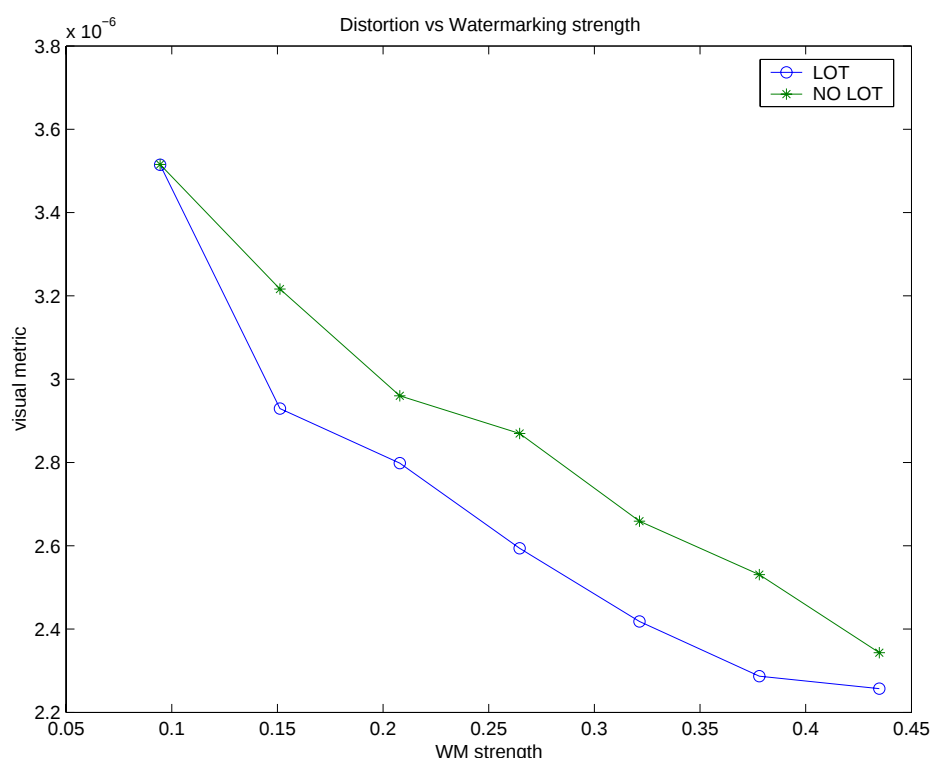


FIG. 6.25 – Courbe force/distorsion pour un modèle naturel, avec et sans recouvrement.

La métrique de distorsion que nous avons employée ne permet pas de fixer une même valeur limite d'imperceptibilité, ni pour les différentes manipulations (compression géomé-

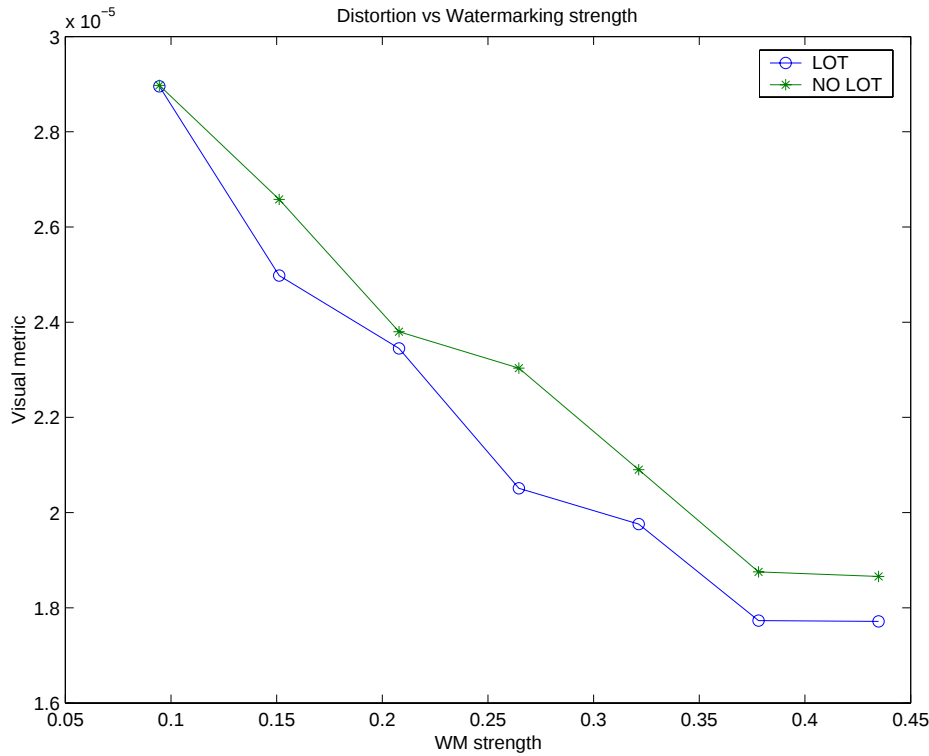


FIG. 6.26 – Courbe force/distorsion pour un modèle de CAO, avec et sans recouvrement.

trique ou tatouage), ni pour les différents modèles. En cela, le traitement de la géométrie se distingue encore du traitement du signal sur des données régulièrement échantillonnées : nous ne disposons toujours pas d'outil permettant une comparaison fiable entre deux objets, comme le PSNR entre deux images. En conséquence, la mesure que nous utilisons ne peut servir qu'à l'évaluation ponctuelle de la distorsion : pour une manipulation donnée sur un objet particulier, on ne pourra que mesurer l'influence de tel ou tel paramètre. Nous ne nous autoriserons donc pas à comparer ce qui ne peut l'être.

Nous avons donc fixé empiriquement, pour chaque objet, la force maximale de tatouage à la limite de l'imperceptibilité. Par exemple, nous avons fixé la force de tatouage à 0.33 pour le modèle de la Fig. 6.25, et à 0.4 celle du modèle de CAO de la Fig. 6.26 (le tatouage se voit toutefois toujours sur ces modèles, quelle que soit la force de tatouage employée, car les surfaces fonctionnelles planes trahissent la moindre modification). Ce type de modèle se prête mal aux manipulations par décomposition spectrale, mais permet de mieux mettre en évidence les artefacts dus au tatouage, comme illustré sur la Fig. 6.27 (à comparer avec l'objet naturel de la Fig. 6.24).

6.5.3 Résultats

Nous présentons à présent les résultats que nous avons obtenus pour diverses attaques : translation, mise à l'échelle uniforme, rotation, lissage par laplacien, ajout de bruit et compression spectrale par quantification et codage entropique. Notons tout d'abord que les calculs

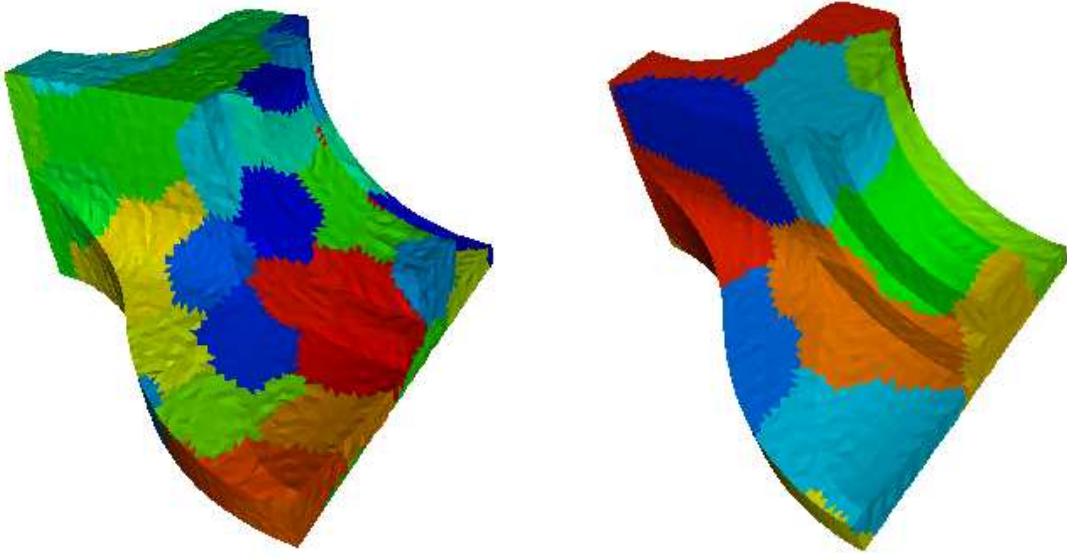


FIG. 6.27 – Artefacts dus au tatouage pour un modèle de CAO : $N_P = 100$ (gauche) et $N_P = 500$ (droite). La force de tatouage est la même pour les deux images que pour la Fig. 6.24

de décomposition se font dans le repère de référence de l'objet, et qu'une rotation efface donc potentiellement la marque. Un préalable à la relecture de la marque serait le recalage de l'objet à tester sur l'objet original. Pour cela, on peut utiliser différentes méthodes [15, 10, 26], et les auteurs de [58] proposent de recalculer l'objet en se servant des 5 premières valeurs propres de la décomposition spectrale. Nous n'avons malheureusement pas eu l'opportunité d'implanter un tel recalage, et les résultats doivent donc s'entendre indépendamment de perturbations de la connexité. Nous exposons en Fig. 6.28 les résultats obtenus pour diverses attaques uniquement géométriques. On voit en particulier que la robustesse à la rotation n'est effective que pour de petits angles de rotation.

Objet	Bunny	Horse	Venus	Head
Bruit	0.44%	0.37%	0.25%	0.25%
Lissage (itérations)	20	20	20	20
Translation	OK	OK	OK	OK
Mise à l'échelle	0.2	0.2	0.2	0.2
Rotation	<15°	<15°	<15°	<15°
Quantification spectrale (bits)	14	14	14	14

FIG. 6.28 – Résultats obtenus en tatouage spectral face à diverses manipulations géométriques. Nous avons relevé les valeurs limites pour lesquelles les 64 bits ont été correctement relus.

Enfin, nous montrons sur la Fig. 6.29 la proportion de bits correctement relus en fonction

du nombre de bits de quantification des coefficients spectraux du codeur géométrique spectral (bases naturelles). Nous représentons les courbes correspondant à un tatouage avec et sans recouvrement entre partitions. On constate que la marque est correctement relue à partir de 14 bits de quantification, ce qui est la limite inférieure d'utilisation du codeur. Nous pouvons donc déclarer notre schéma de tatouage robuste face à une telle compression géométrique. En outre, le recouvrement n'influence quasiment pas la relecture.

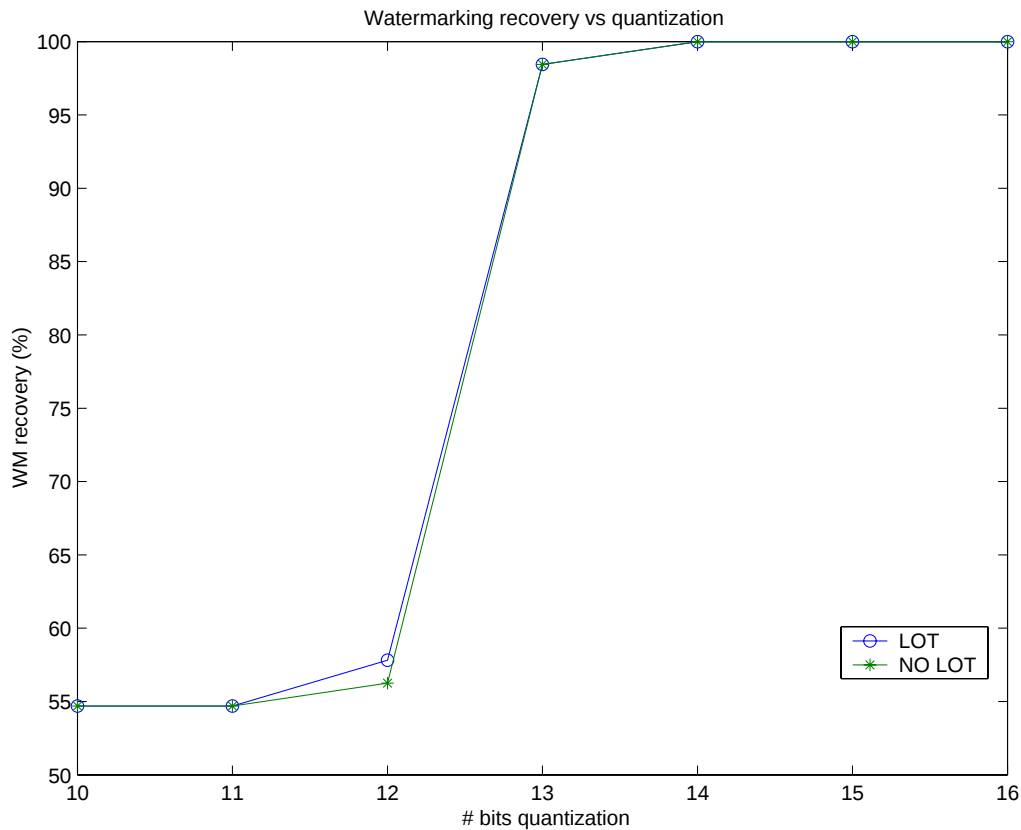


FIG. 6.29 – Robustesse de notre schéma spectral (bases fixes) face à une compression géométrique spectrale (bases naturelles). La marque est correctement relue à partir de 14 bits de quantification des coefficients spectraux, ce qui est la limite inférieure d'utilisation de notre codeur géométrique spectral.

Il va de soi que si l'on souhaite en sus une robustesse face à des attaques modifiant la connexité, on devra, en l'état, procéder à un recalage sur l'objet original. Le schéma de tatouage n'est alors plus aveugle, et nécessite de revoir les détails du cadre applicatif. Notons que Patrice Rondao-Alface tente dans ses travaux de thèse à l'UCL de se passer d'un tel recalage, et de retrouver directement sur le modèle à tester une zone tatouée à partir des seules caractéristiques différentielles de l'objet (ombilics, etc.) Il s'agit en quelque sorte de tatouage de seconde génération (fondé sur le contenu) pour les objets 3D.

6.6 Conclusion

Nous confessons bien humblement le caractère encore exploratoire de ces travaux sur la décomposition spectrale des objets surfaciques 3D. Comme nous l'avons vu, il nous a fallu trouver des solutions ad hoc aux problèmes soulevés par l'implantation de références restées parfois évasives sur ces difficultés. Nous pensons particulièrement aux problèmes de partition homotopes à des cylindres, et à l'assignement d'une connexité fixe à une géométrie définie sur une connexité arbitraire.

Malgré tout, il nous a été possible de développer un codeur/décodeur géométrique spectral, adapté à la compression (avec des bases naturelles de décomposition) et à la transmission progressive de la géométrie (avec des bases fixes). La réalisation de ce codeur nous a permis de développer une nouvelle approche, fondée sur le recouvrement entre partitions. Nous avons montré l'apport du recouvrement dans le cadre de la transmission progressive de la géométrie, et le (léger) surcoût induit en compression.

Des contraintes temporelles nous ont interdit de procéder au développement d'une méthode de tatouage plus élaborée. En particulier, nous aurions souhaité rendre l'insertion adaptative (autant que possible), et implanter une méthode de recalage qui aurait permis de tester la robustesse de notre schéma de tatouage face à des attaques modifiant la connexité (simplification, coupe, etc.) Toutefois, cette approche par recalage présente l'inconvénient majeur de rendre la méthode de tatouage non aveugle. Nous avons évoqué une approche visant à s'affranchir de ce problème.

Pourtant, nos résultats en tatouage sont plutôt encourageants : la robustesse naturelle de notre schéma permet de s'affranchir de plusieurs attaques géométriques. En outre, si l'on devait malgré tout considérer une approche par recalage (des axes d'inertie dans le cadre d'une analyse en composantes principales, ou en utilisant les 5 premières valeurs propres comme dans [58]), les résultats face à la rotation montrent que l'on peut sans doute se contenter d'un recalage même médiocre pour aligner l'objet à tester sur l'objet original.

