

Synthèse de textures volumiques anisotropes par inférence 2D/3D

Jean-Pierre DA COSTA^{1,2}, Christian GERMAIN^{1,2}

¹CNRS, Laboratoire IMS, UMR 5218 CNRS, Talence, France

²Université de Bordeaux, ENITAB, Gradignan, France.

jean-pierre.dacosta@ims-bordeaux.fr, christian.germain@ims-bordeaux.fr

Résumé – Nous proposons une approche visant à synthétiser une texture 3D anisotrope à partir d’une texture *exemple* 2D. Cette approche est une extension originale du schéma pyramidal 2D de Portilla et Simoncelli. Elle procède en trois phases : la première consiste en une analyse 2D de l’image *exemple* ; elle conduit à un vecteur de statistiques de référence. La deuxième phase réalise l’inférence 2D/3D i.e. le passage de statistiques 2D à des statistiques 3D. Enfin, la dernière phase réalise la synthèse proprement dite. Elle consiste à imposer les statistiques 3D ciblées à un bloc initial aléatoire selon un schéma pyramidal 3D spécifique. Cette approche est mise en oeuvre avec succès dans le cas particulier de textures de matériaux carbonés observés par microscopie électronique en transmission. Elle conduit à la synthèse de textures volumiques représentatives de la structure 3D des matériaux.

Abstract – We propose a novel approach which aims at synthesizing an anisotropic 3D - i.e. solid - texture from a single 2D example. This approach is an extension of the pyramidal scheme of Portilla and Simoncelli. It proceeds in three main steps: first, a 2D analysis of the example is performed which yields a set of reference statistics. Then, 3D reference statistics are inferred from the 2D ones thanks to specific assumptions. The final step aims at the synthesis itself: the 3D target statistics are imposed on a random 3D block according to a specific pyramidal scheme. The approach is successfully applied to the synthesis of solid textures from 2D images of dense carbons observed by transmission electronic microscopy. Solid textures are provided that are representative of the 3D structure of the materials.

1 Introduction

La synthèse de textures est un champ disciplinaire particulièrement actif et aux applications nombreuses dont la compression d’image, le mapping de textures, ou l’inpainting par exemple. Plusieurs approches pour la synthèse de textures 2D basée sur un exemple ont été proposées dans la littérature. La plupart sont multi-échelles. Certaines méthodes paramétriques [3, 7] visent à synthétiser des textures reproduisant les statistiques d’ordre 1 et 2 de l’exemple. Les méthodes non paramétriques, s’inspirant du formalisme markovien, reposent le plus souvent sur un échantillonnage de l’image exemple [6, 2, 9, 8, 5]. Ces méthodes sont facilement extensibles en 3D, pour peu qu’un exemple 3D soit disponible comme image de référence. La synthèse de textures volumiques à partir d’un exemple 2D est par contre plus délicate. Les approches existantes sont principalement des extensions empiriques d’approches non paramétriques [1, 8, 5]. D’autres s’appuient pour l’inférence 2D-3D sur une étude stéréologique. Jagnow et al. [4] parviennent à une modélisation 3D de la forme et de la distribution des particules observées sur leurs images, ce qui leur permet de procéder à une synthèse volumique.

Nous nous intéressons dans cet article à la synthèse de textures volumiques anisotropes à partir d’une observation 2D unique. En particulier, nous nous concentrons sur l’étude d’images présentant une structure lamellaire, en l’occurrence des images de matériaux carbonés

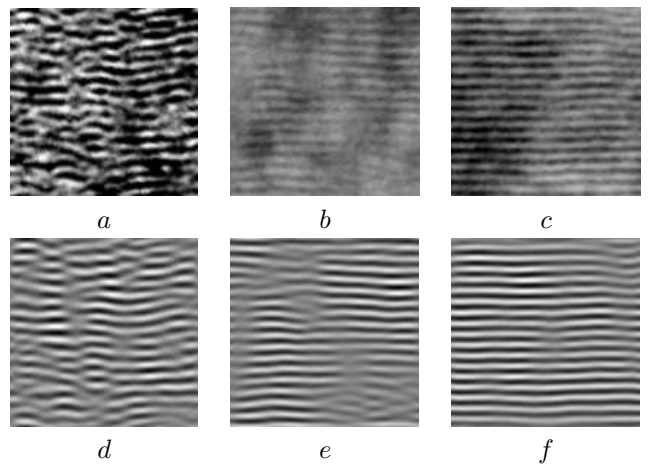


FIG. 1 – Images de carbonés d’anisotropie croissante : images MET (*a-c*) et versions filtrées (*d-f*).

denses observés par MET (i.e. Microscopie Electronique en Transmission). Trois exemples sont fournis à la figure 1. Certaines des techniques non paramétriques citées plus haut sont adaptables à ce type de textures mais l'échantillonnage qu'elles impliquent, coûteux en 2D, devient prohibitif en 3D. L'approche stéréologique, séduisante, paraît également difficile à mettre en oeuvre étant donnée la complexité des structures étudiées.

Nous présentons ici une extension de l'approche paramétrique pyramidale proposée par Portilla et Simoncelli [7]. Elle se fonde sur une extrapolation en 3D des statistiques tirées de l'analyse 2D de l'image exemple et s'appuie, pour la phase de synthèse, sur une décomposition 3D originale. Après avoir exposé brièvement le principe de la synthèse 2D, nous présenterons les spécificités de l'approche 2D-3D et terminerons par quelques résultats de synthèse.

2 Schémas pyramidaux pour la synthèse 2D et 2D-3D

2.1 L'algorithme d'analyse-synthèse 2D

La méthode de Portilla et Simoncelli [7] est une méthode d'analyse-synthèse de textures s'appuyant sur une décomposition multi-échelle orientée, la *pyramide orientée*.

La phase d'analyse consiste à calculer des statistiques d'ordre 1 et d'ordre 2 sur les sous bandes complexes issues de la décomposition d'une image de référence ou *exemple*. Les statistiques considérées sont, à l'ordre 1, moyenne, variance, skewness et kurtosis, et à l'ordre 2 les coefficients d'autocorrélation. Les intercorrélations entre sous-bandes sont également utilisées.

La phase de synthèse consiste à imposer les statistiques déduites de la phase d'analyse à une texture initiale aléatoire. La procédure d'imposition, itérative, repose selon les statistiques considérées soit sur une simple transformation soit sur une descente de gradient. Cette procédure est présentée en détail dans [7].

Les auteurs montrent dans leur article que cette procédure de synthèse s'avère capable de générer des textures naturelles variées, aussi bien des textures fortement structurées que des textures plus stochastiques. Nous montrons dans la section 3 quelques résultats obtenus dans le cas spécifique des images de carbonées.

2.2 Un algorithme original pour la synthèse 2D-3D

Sur son principe, l'extension purement 3D de l'approche de Portilla et Simoncelli [7] est relativement directe même si, en pratique, elle présente peu d'intérêt dans la mesure où il n'est pas toujours facile de disposer d'un échantillon 3D sur lequel s'appuyer pour la synthèse. C'est d'ailleurs

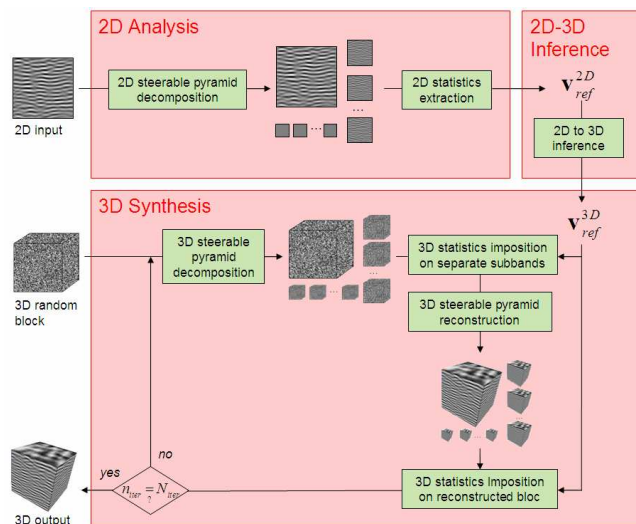


FIG. 2 – Le schéma global d'analyse synthèse 2D-3D.

impossible dans le cas des carbonées pré-graphitiques à l'échelle d'observation considérée.

L'extension 2D-3D que nous proposons est en revanche plus intéressante. Elle se fonde sur un schéma d'analyse synthèse original qui nécessite deux pré-requis importants. Premièrement, il est indispensable de pouvoir inférer les statistiques de la texture volumique à partir des statistiques observées en 2D. Deuxièmement, la décomposition 3D utilisée doit être telle que l'imposition des statistiques des sous-bandes 2D aux sous-bandes 3D ait un sens. Elle doit donc être adaptée à la nature lamellaire des textures volumiques considérées.

Un algorithme d'analyse/synthèse original – Le schéma que nous proposons, illustré à la figure 2 procède en trois phases. La première consiste en une analyse 2D semblable à celle utilisée dans [7] ; elle conduit à un vecteur de statistiques de référence. La deuxième phase, décrite ci-dessous, réalise l'inférence 2D/3D i.e. le passage de statistiques 2D à des statistiques 3D. Enfin, la dernière phase réalise la synthèse proprement dite.

L'inférence 2D-3D – Le problème d'inférence ne se pose ni pour les statistiques d'ordre 1 ni pour les intercorrélations entre sous-bandes. Il est cependant primordial pour toute statistique d'ordre 2 et donc, en particulier, pour les coefficients d'autocorrélation. L'autocorrélation nous renseigne sur la nature de la dépendance entre 2 pixels ou, dans le cas d'une texture volumique, entre 2 voxels. Dans le cas d'une image (resp. d'un bloc) stationnaire elle ne dépend que de l'écart spatial entre les pixels (resp. voxels). L'autocorrélation $r_{3D}(x, y, z)$ de la texture volumique doit donc être déduite de l'autocorrélation $r_{2D}(x, z)$ de l'image de référence.

L'inférence 2D-3D n'est possible que si les structures 3D

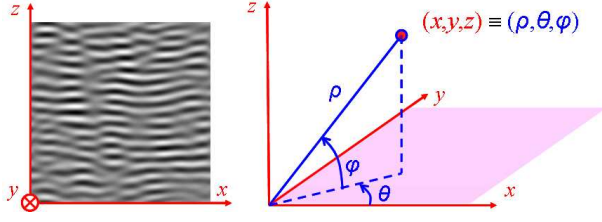


FIG. 3 – Image, repère cartésien et repère sphérique.

observées présentent certaines propriétés d'anisotropie, ce qui est le cas des matériaux carbonés auxquels nous nous intéressons. Cette anisotropie 3D, observée également en 2D (cf. figure 1), découle de l'orthotropie du matériau, propriété selon laquelle les caractéristiques structurales - et donc mécaniques - du matériau sont identiques dans toutes les directions orthogonales à la direction d'orthotropie. En termes d'analyse d'image, cette propriété se traduit simplement par le fait que toute coupe 2D contenant la direction d'orthotropie possède les mêmes propriétés statistiques. La direction d'orthotropie est l'orthogonale aux structures anisotropes observées en 2D, en l'occurrence la direction verticale z (cf. figure 3). Des anisotropies de même nature peuvent être observées également sur d'autres types d'images texturées, les images de grain de bois ou certaines données sismiques par exemple.

Notons (O, x, z) le repère cartésien de l'image *exemple*, x et z se référant respectivement aux directions horizontale et verticale. Notons y la direction orthogonale au plan (O, x, z) de telle sorte que le repère (O, x, y, z) soit orthonormé. L'autocorrélation r_{3D} s'exprime alors en fonction de r_{2D} en passant par les coordonnées sphériques (ρ, θ, φ) de l'espace de sortie et les coordonnées polaires (ρ, φ) de l'espace d'entrée :

$$\begin{aligned}
 r_{3D}(x, y, z) &= r_{3D}^{sph}(\rho, \theta, \varphi) \\
 &= r_{3D}^{sph}(\rho, 0, \varphi) \\
 &= r_{2D}^{pol}(\rho, \varphi) \\
 &= r_{2D}(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi). \quad (1)
 \end{aligned}$$

Elle peut donc être obtenue par simple interpolation de l'autocorrélation 2D.

Décomposition pyramidale 3D – Les statistiques 3D déduites de l'analyse 2D doivent être imposées selon une procédure pyramidale. Nous devons donc disposer d'une décomposition pyramidale adaptée à la nature orthotrope des textures volumiques étudiées. Nous avons vu précédemment que les statistiques spatiales ne dépendaient pas de l'angle θ selon lesquelles on les observait. Pour la même raison, la forme $B_{3D}(\rho, \theta, \varphi)$ des filtres fréquentiels utilisés pour la décomposition 3D (cf. figure 4) doit être déduite

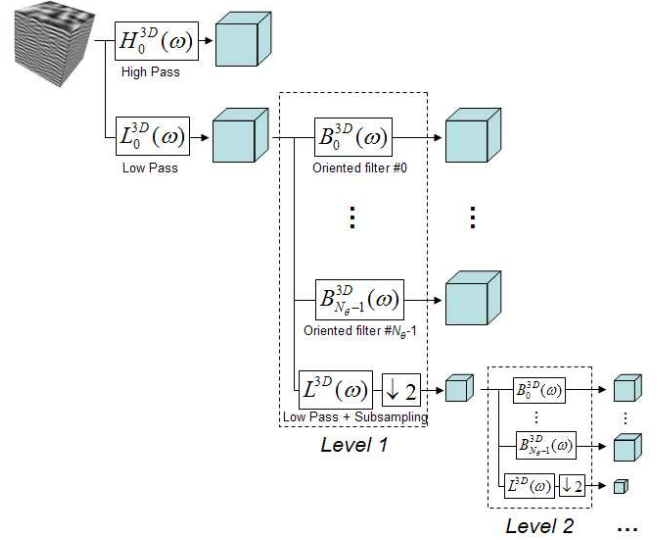


FIG. 4 – Décomposition pyramidale orientée 3D.

des filtres de la décomposition 2D :

$$\begin{aligned}
 B_{3D}(\omega_x, \omega_y, \omega_z) &= B_{3D}^{sph}(\omega_\rho, \omega_\theta, \omega_\varphi) \\
 &= B_{3D}^{sph}(\omega_\rho, 0, \omega_\varphi) \\
 &= B_{2D}^{pol}(\omega_\rho, \omega_\varphi) \\
 &= B_{2D}(\omega_\rho \cos \omega_\varphi, \omega_\rho \sin \omega_\varphi) \quad (2)
 \end{aligned}$$

où $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ et $(\omega_\rho, \omega_\theta, \omega_\varphi)$ sont les coordonnées cartésiennes et sphériques dans l'espace des fréquences. Comme leurs homologues 2D, les filtres 3D sont asymétriques de manière à produire des sous-bandes complexes. L'expression des filtres 2D est détaillée dans [7].

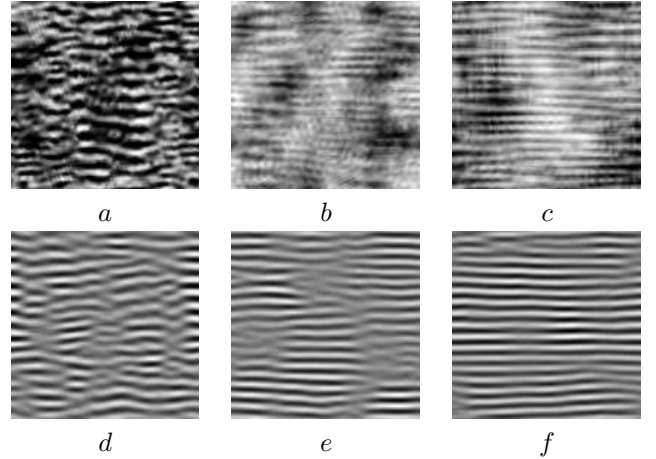


FIG. 5 – Résultats de synthèse 2D obtenus à partir des textures de la figure 1

3 Résultats

Nous présentons à la figure 5 des résultats de synthèse 2D obtenus à partir d'images brutes de trois matériaux

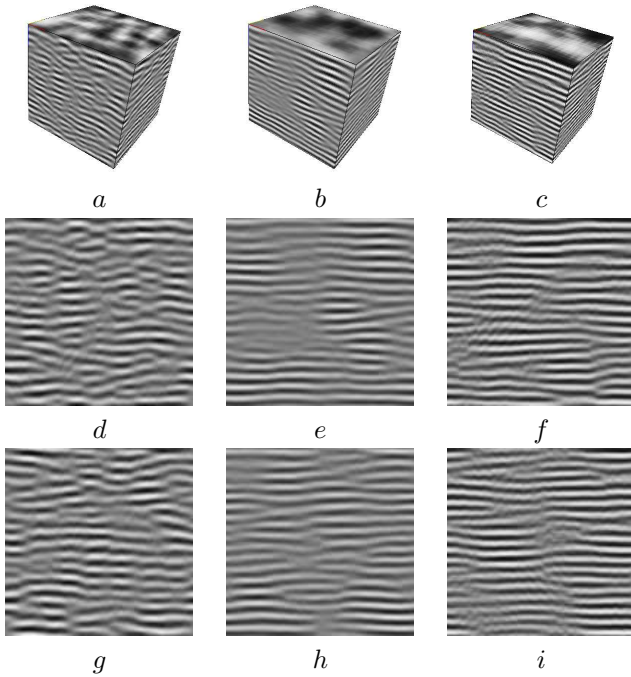


FIG. 6 – Textures volumiques synthétisées à partir des textures 1d à 1f : vues 3D (a-c), vues de face (d-f) et vues de droite (g-i).

d’anisotropie croissante. La qualité des images synthétisées (5a à 5c) est convaincante. Elles présentent cependant des artefacts qui apparaissent d’autant plus fortement que la texture est structurée (5b et 5c). Ces artefacts sont dus à l’utilisation de la transformée de Fourier rapide (FFT) dans l’ensemble du schéma de synthèse. En effet, l’utilisation de la FFT repose sur la périodicité supposée des images, périodicité qui n’existe pas en pratique : on ne passe pas de façon continue du bord droit au bord gauche ou du bord bas au bord haut. Les bords se comportent donc comme des discontinuités. L’application préalable d’un filtre passe-bande sur les images brutes permet d’éliminer ces discontinuités, rendant ainsi les images circulairement continues (figures 1d à 1e), tout en atténuant le bruit haute-fréquence et les fluctuations basse-fréquence non pertinents pour l’étude de ce matériau. L’utilisation des images filtrées pour la synthèse permet d’éliminer les artefacts, cf. figures 5d à 5f.

La figure 6 montre les résultats de synthèse 2D-3D obtenus à partir des images 1d à 1e. Les textures volumiques produites sont ici aussi exemptes d’artefacts de circularité. De plus, elles présentent des propriétés d’anisotropies conformes à celles observées en 2D comme on peut l’apprécier aussi bien sur les vues de face (figures 6d à 6f) que sur les vues de droite (figures 6g à 6i). Il conviendra, dans les prochains travaux de procéder à une comparaison quantitative des blocs synthétisés et des images ayant servi d’exemples.

4 Conclusion

Nous avons proposé une approche multi-résolution pour la synthèse de textures volumiques à partir d’un exemple 2D. Cette approche, adaptée aux textures lamellaires, a été appliquée aux textures anisotropes de matériaux carbonés. Les blocs 3D produits ont montré des propriétés d’anisotropie en adéquation avec les statistiques observées en 2D. Ils ont par ailleurs été utilisés comme fonction cibles d’un algorithme de simulation atomique non abordé dans ce résumé. Les propriétés des structures atomiques générées se sont avérées conformes aux connaissances actuelles sur ces matériaux.

Remerciements

Les auteurs remercient la société Snecma Propulsion Solide, Groupe Safran, d’avoir fourni les images ayant servi à l’élaboration et au test des algorithmes.

Références

- [1] J.M. Dischler, D. Ghazanfarpour, and R. Freydier. Anisotropic solid texture synthesis using orthogonal 2d views. In *Computer Graphics Forum 17 (Proc. Eurographics 1998)*, pages 87–95, 1998.
- [2] A.A. Efros and T.K. Leung. Texture synthesis by non-parametric sampling. In *Proceedings of ICCV*, 1999.
- [3] D.J. Heeger and J.R. Bergen. Pyramid-based texture analysis/synthesis. In *SIGGRAPH ’95 : Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 229–238, 1995.
- [4] R. Jagnow, J. Dorsey, and H. Rushmeier. Stereological techniques for solid textures. *ACM Trans. Graph.*, 23(3) :329–335, 2004.
- [5] J. Kopf, C.W. Fu, D. Cohen-Or, O. Deussen, D. Lischinski, and T.T. Wong. Solid texture synthesis from 2d exemplars. In *SIGGRAPH ’07*, page 2, 2007.
- [6] R. Paget and I.D. Longstaff. Texture synthesis via a noncausal nonparametric multiscale markov random field. *IEEE Transactions on Image Processing*, 7(6) :925–931, 1998.
- [7] J. Portilla and E.P. Simoncelli. A parametric texture model based on joint statistics of complex wavelet coefficients. *Int. J. Comput. Vision*, 40(1) :49–70, 2000.
- [8] L.Y. Wei. Texture synthesis from multiple sources. In *SIGGRAPH’03 : Conf. on Sketches and Applications*, 2003.
- [9] L.Y. Wei and M. Levoy. Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization. In *SIGGRAPH ’00 : Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 479–488, 2000.