

Digitalisation d'objets 3D, application aux sciences du vivant

Olivier Morel⁽¹⁾, Christophe Stolz⁽¹⁾, Frédéric Truchetet⁽¹⁾, Bruno David⁽²⁾, Thèrese Choné⁽²⁾, Eric Verrecchia⁽³⁾

(1) Université de Bourgogne FRE CNRS Laboratoire Electronique Informatique et Image, (2) Université de Bourgogne UMR CNRS Biogéosciences, (3) Université de Neuchâtel, Institut de Géologie

Résumé : Nous proposons ici l'application des techniques d'analyse multirésolution pour l'extraction des stries de croissance d'un mollusque bivalve vivant en grande profondeur près de sources hydrothermales: *Calypptogena*. La première étape consiste à extraire, à l'aide d'un scanner 3D, une image de profondeur de la coquille à étudier. Nous effectuons ensuite une analyse multirésolution afin de ne conserver que les niveaux de détails pertinents à différentes échelles d'analyse. Un traitement approprié ne conserve ensuite que les stries de croissance de l'animal aux résolutions étudiées. La comparaison des résultats permet alors de tirer certaines conclusions quant à l'évolution ontogénétique de l'animal comme des périodicités pouvant être liées à certains événements réguliers dans le milieu. Nous comparons entre autre : La variation intra-individuelle en analysant les deux valves d'un même individu ou deux endroits différents d'une même valve ainsi que la variation inter-individuelle sur un même site géographique.

1. Introduction

Le développement des techniques de digitalisation 3D permet de restituer des formes de plus en plus complexes dans le cadre par exemple, de la conception d'un produit industriel. Dans ce cas, le nuage de points 3D ainsi obtenu sert de base à l'obtention d'un maillage 3D afin de reconstruire un modèle de surfaces paramétriques qui sera comparé au modèle CAO initial. Une autre voie consiste à transformer les points 3D en une image de profondeur que l'on pourra alors traiter par des techniques d'analyse plus classiques. Nous choisissons cette solution pour l'étude de mollusques bivalves vivants à de grandes profondeurs (environ 3300 mètres) à proximités de sources hydrothermales les *Calypptogena*. Leur coquille laisse apparaître des stries de croissances qui résultent de fluctuations du rythme d'accrétion de la coquille au cours du développement de l'animal. Nous recherchons ainsi, grâce à une analyse multirésolution de l'image de profondeur, la présence d'un signal biologique issu de l'information portée par ces stries. Un des avantages de cette méthode est de mettre en évidence les détails d'une image à plusieurs échelles (de précision différente) permettant ainsi d'étudier le motif de répétition des stries de croissance.

Le paragraphe 2 décrit le processus d'acquisition des images de profondeur, le paragraphe 3 fournit un bref rappel des techniques d'analyse multirésolution et le paragraphe 4 présente leur application et les résultats obtenus pour les coquilles.

2. Acquisition des images de profondeur

Nous avons utilisé un scanner tridimensionnel Replica 500 de 3D Scanners (Figure 1a) constitué de trois parties : un projecteur de trait laser, un système d'acquisition des points et un portique trois axes. L'acquisition des images est réalisée par triangulation de la projection du faisceau laser sur l'objet à l'aide de deux caméras CCD. Le volume de travail permis par ce scanner est de 500 mm en X, 500 mm en Y et 275 mm en Z avec un pas de mesure minimal de 50µm en X et en Y. Le déplacement suivant l'axe Z peut être automatiquement ajusté afin d'optimiser la focalisation du trait laser sur l'objet garantissant ainsi une précision de mesure de 20µm.

La Figure 1 montre ainsi une valve d'un spécimen de *Calypptogena* en cours d'analyse et l'image de profondeur correspondante en niveaux de gris. Les spécimens étudiés ont une longueur allant de 100 à 200 mm, la valve montrée ici faisant environ 180x70 mm.

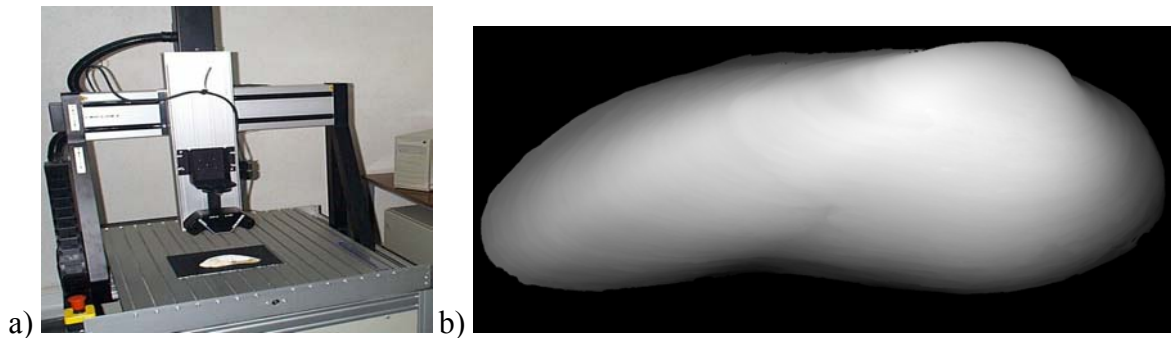


Figure 1 : a) Vue du scanner 3D avec une valve d'un *Calypptogena* b) Image de profondeur

3. Principes de l'analyse multirésolution

Depuis les dix dernières années, les ondelettes et l'analyse multirésolution se sont développées à une très grande vitesse. Aujourd'hui, le traitement et l'analyse d'images ne sauraient se passer d'un tel outil, intervenant dans des domaines de plus en plus variés : de la compression des images (nouveau format de compression JPEG 2000) à la simplification de maillages 3D[1] utilisée en synthèse d'images.

Cette partie décrit brièvement le schéma d'analyse multirésolution, ainsi que l'algorithme employé pour notre étude.

3.1. Schéma d'analyse

Une analyse multirésolution[2,3] se définit comme étant un partitionnement de l'espace des fonctions continues d'énergie finie $L^2(\mathbb{R})$ par une famille de sous-espaces vectoriels V_j emboîtés les uns dans les autres, tels que le passage de l'un à l'autre soit le résultat d'un changement d'échelle. Ces sous-espaces sont appelés des espaces d'approximation à l'échelle j ($j \in \mathbb{Z}$) et vérifient les propriétés suivantes :

$$\bullet \dots \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset \dots \subset V_{j+1} \subset V_j \subset \dots \quad (1)$$

$$\bullet \overline{\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j} = L^2(\mathbb{R}) \quad (2)$$

$$\bullet \bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\} \quad (3)$$

Nous utilisons ici un facteur 2 lors du passage d'un sous-espace à l'autre: cette analyse multirésolution est dite dyadique. Ainsi une fonction f de $L^2(\mathbb{R})$ possède les propriétés suivantes :

$$\bullet \forall j \in \mathbb{Z}, \text{ si } f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2^{-1}x) \in V_{j+1} \quad (4)$$

$$\bullet \forall j \in \mathbb{Z}, \text{ si } f(x) \in V_0 \Leftrightarrow f(x-k) \in V_0 \quad (5)$$

La première propriété caractérise le changement d'échelle d'un sous-espace emboîté à l'autre : l'espace V_{j+1} contient des signaux plus grossiers que l'espace V_j . La seconde montre que si on translate d'un pas entier, on reste dans le même espace.

Il existe une fonction appelée fonction d'échelle qui, par dilatation et translation, engendre une base orthonormée de V_j .

Afin de compléter cette analyse, on définit pour chaque espace d'approximation V_j son complément orthogonal W_j dans l'espace dans lequel il est directement emboîté V_{j-1} :

$$\bullet V_{j-1} = V_j \oplus W_j \quad (6)$$

- $L^2(\mathbb{R}) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j$ (7)

- $\forall j \in \mathbb{Z}, \text{ si } k \neq j \text{ alors } W_j \perp W_k$ (8)

Contrairement aux sous-espaces d'approximation, les sous-espaces W_j , appelés sous-espaces de détails, ne forment pas une famille d'espaces emboîtés, mais les propriétés d'échelle et d'invariance par translation sont conservées. Il existe une fonction appelée fonction d'ondelettes qui, par dilatation et translation, engendre une base orthonormée de W_j .

3.2. Algorithme de Mallat

Cet algorithme est construit à partir de la projection de la fonction f à étudier sur les sous-espaces d'approximation V_j et de détails W_j . En traitement du signal, on ne connaît pas en général l'expression de f , mais plutôt une approximation de f à une échelle donnée. Ainsi, l'objectif de l'algorithme est de calculer, à partir de cette approximation, les détails et les approximations aux résolutions inférieures.

Soit φ la fonction d'échelle qui, par dilatation et translation, engendre une base orthonormée de V_j et ψ la fonction d'ondelettes associée qui engendre de la même manière une base orthonormée de W_j .

Par construction, $\varphi(x)$ est une fonction de V_0 . Comme $V_0 \subset V_{-1}$, il est possible de projeter $\varphi(x)$ sur V_{-1} . Les coefficients de la projection donnent une suite numérique $h[n]$ assimilable à la réponse impulsionnelle d'un filtre numérique.

De la même manière, $\psi(x)$ est une fonction de W_0 et comme $W_0 \subset V_{-1}$, il est possible de projeter $\psi(x)$ sur V_{-1} . Les coefficients de la projection donnent une suite numérique $g[n]$ assimilable à la réponse impulsionnelle d'un filtre numérique.

Notons a_n^j les coefficients de la projection de f sur les sous-espaces d'approximation et d_n^j la projection de f sur les sous-espaces de détails. L'algorithme de Mallat démontre que :

$$a_n^j = \sum_l \tilde{h}[2n-l] a_l^{j-1}$$

$$d_n^j = \sum_l \tilde{g}[2n-l] a_l^{j-1} \quad \text{où } \tilde{h}[n] = h[-n] \text{ et } \tilde{g}[n] = g[-n].$$

Ces relations récursives permettent d'établir l'algorithme d'analyse de Mallat comme le montre le schéma de la Figure 2a.

Ainsi, pour déterminer les coefficients de détails et d'approximations aux échelles successives, il suffit de convoluer le signal par des filtres numériques et d'effectuer des sous-échantillonnages par 2 du signal.

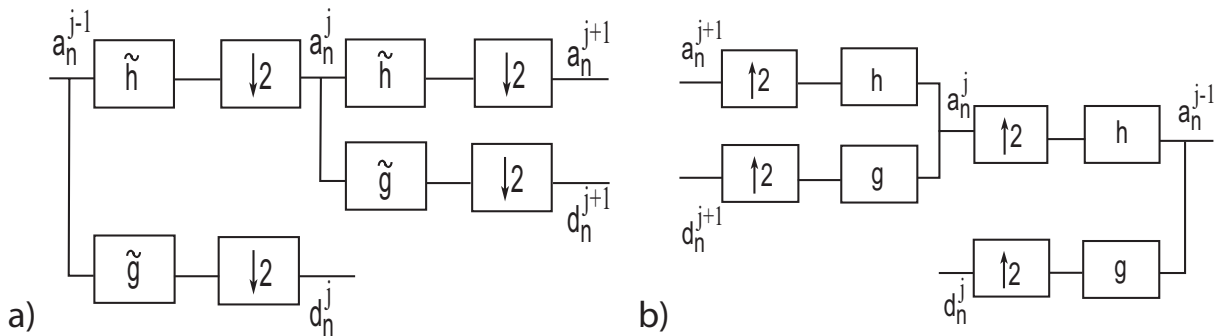


Figure 2 : Algorithme de Mallat : a) analyse, b) synthèse

A l'inverse, l'analyse multirésolution possède des propriétés de reconstruction : à partir de tous les coefficients de détails et de tous les coefficients d'approximation, on peut reconstruire jusqu'à obtenir l'approximation originale. Dans ce cas, l'algorithme de reconstruction est appelé algorithme de synthèse (Figure 2b).

Cet algorithme s'applique aussi en deux dimensions, et dans ce cas le facteur d'échelle n'est plus un scalaire mais une matrice dite matrice de dilatation. L'application à une image permet ainsi d'obtenir quatre imagerie : celle des coefficients d'approximation et celles des coefficients de détails horizontaux, verticaux et diagonaux.

4. Application à l'analyse des *Calyptogena*

L'analyse multirésolution grâce à ses propriétés de localisation temps fréquences est bien adaptée pour l'étude et la détection de zones pertinentes dans une image contenant des stries. De très bons résultats ont ainsi été obtenus lors de l'étude menée par Diou et al.[4] sur des coquillages vivant en eau douce, ayant des stries de croissance prononcées, liées à des phénomènes biologiques connus (certaines espèces sont étudiées en élevage). Dans ce cas, il est plus facile d'attacher des périodicités du signal à des cycles biologiques de croissance connus et contrôlés au cours des élevages.

L'étude des stries de croissance sur les coquilles de *Calyptogena* est plus délicate pour plusieurs raisons. La première est que ces mollusques vivent dans de grandes profondeurs à plus de 3000 m de fond et qu'il est impossible de recréer en aquarium un tel environnement afin de mieux connaître leurs paramètres de croissance. La seconde raison est qu'il a été montré que les stries de croissance enregistrent les fluctuations des sorties de fluides, dont nous n'avons que peu de connaissances concernant leur périodicité éventuelle[5]. Enfin, la troisième raison est que la géométrie des coquilles ne permet pas d'avoir une analyse fiable quelle que soit la direction de croissance du mollusque.

Dans un premier temps nous effectuons un pré-traitement sur l'image de profondeur afin d'atténuer le bruit introduit par le scanner. Celui-ci se traduit entre autre par la présence de pics qui seront aisément supprimé par un filtrage médian. Un seuillage multiéchelle opéré lors de l'analyse multirésolution permet de supprimer le bruit haute fréquence restant dans l'image. Cette méthode s'applique sur les coefficients de détails en effectuant un seuillage des coefficients. En effet, les coefficients de détails à chaque échelle sont déterminés à partir de l'application d'un filtre passe-haut qui a tendance à faire ressortir le bruit. Ainsi, en supprimant à l'aide d'un seuil les coefficients trop petits on peut diminuer le bruit sur les signaux pour la reconstruction[2,6].

4.1. Sélection de la meilleure bande d'analyse

Une fois ces opérations réalisées, nous recherchons la meilleure bande à analyser dans l'image de profondeur. Nous avons utilisé comme fonction d'ondelette, la base "Symlet" introduite par I.Daubechie[7].

Toutefois, la transformée en ondelettes discrète construite à partir du schéma séparable de Mallat a de mauvaises propriétés concernant la sélectivité directionnelle. En effet, à chaque niveau de décomposition, nous avons uniquement trois directions privilégiées liées aux coefficients de détails horizontaux, verticaux et diagonaux. La transformée en ondelettes discrète tend à perdre la continuité des stries lorsque celles-ci sont très courbées.

Pour que notre analyse donne les meilleurs résultats possibles, nous allons extraire une bande de l'image, telle que les directions des stries soient les plus semblables tout au long de l'imagerie. Cependant, la sélection doit s'effectuer selon plusieurs critères. Tout d'abord, la

direction d'analyse doit s'adapter à la réalité biologique de l'objet à étudier : elle est définie par un segment allant du rebord palléal (rebord externe de la coquille) au crochet (zone d'articulation des deux valves, qui est aussi la zone où la fabrication de la coquille a initialement démarré chez la jeune *Calyptogena*). Ensuite, il faut sélectionner une portion où les stries sont à la fois prononcées, et orientées selon une direction connue afin que l'une des trois images de détails (horizontale, verticale, diagonale) révèle correctement leur configuration géométrique.

Nous avons remarqué que les stries de croissance étaient plus prononcées lorsqu'elles étaient orthogonales à la direction indiquée par la ligne rebord palléal-crochet (Figure 3a) de la coquille de *Calyptogena*. Dans ce cas, ce sont les détails horizontaux de l'imagette qui sont les plus importants. Nous allons donc chercher à minimiser le critère suivant[8] :

$$c(\theta) = \frac{\hat{\sigma}_{col}}{\hat{\sigma}_{lig}}$$

où $\hat{\sigma}_{col}$ est la moyenne des écart-types suivant les colonnes et $\hat{\sigma}_{lig}$ est la moyenne des écart-types suivant les lignes.

Le critère est calculé à partir de la reconstruction de l'image de détails. Plus les détails sont parallèles aux colonnes et plus ils sont prononcés d'une ligne à l'autre, plus le coefficient $c(\theta)$ sera petit.

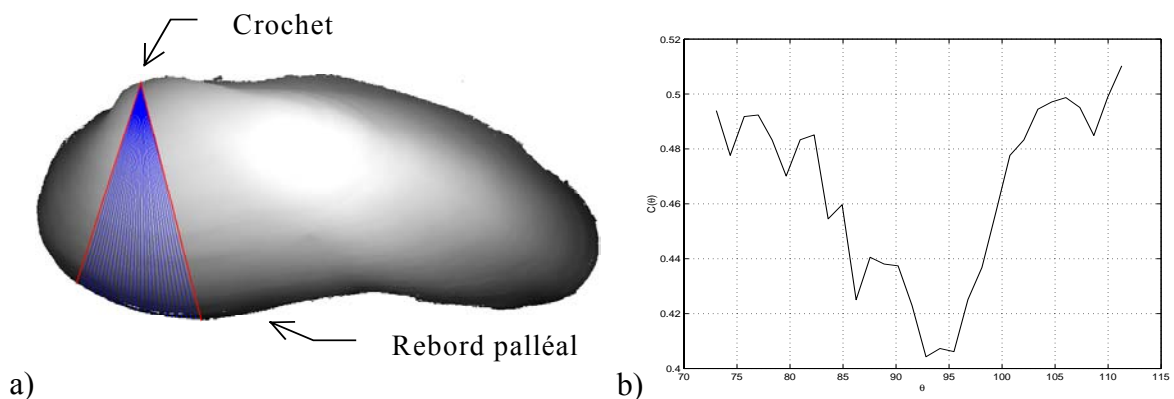


Figure 3 a) Exemple de sélection angulaire b) Courbe obtenue à l'aide du critère

La Figure 3b donne un exemple de résultat obtenu sur une plage angulaire d'environ 30°; Ici la bande qui sera extraite correspondra à un angle d'environ 92°.

4.2. Résultats

La méthode précédente est appliquée à des valves prélevées le long du mur interne de la zone de subduction qui borde l'Amérique centrale et l'Amérique du Sud lors de deux missions océanographiques du submersible "Nautile": "Nautimate" au large du Mexique et "Andinaut" au large du Pérou. Pour chacune des coquilles, une fois la meilleure bande extraite, nous effectuons sur cette bande une analyse multirésolution afin de sélectionner l'échelle la plus pertinente que nous reconstruisons. De là une analyse spectrale menée sur les lignes de l'image obtenue permet d'obtenir un spectre moyen mettant en valeur certaines fréquences caractéristiques vraisemblablement dues à des fluctuations périodiques de l'environnement de l'animal.

Le Tableau 1 récapitule les résultats obtenus sur deux individus prélevés lors de la mission mexicaine. Nous avons ainsi d'une part confirmé la présence d'un même signal périodique sur une même coquille (NM09CII5), et nous avons d'autre part retrouvé ce signal sur une seconde coquille du même site (NM09CII4). L'exacte correspondance des périodes relevées sur les deux valves de l'individu NM09CII5 démontre que le traitement mathématique du signal est

robuste: il n'introduit pas d'erreur aléatoire dans la mesure de ce paramètre. La similitude des périodes enregistrées entre les deux individus du même site (2,8 et 2,9 mm respectivement) montre que les deux spécimens affichent la même réponse en terme de potentiel d'accroissement.

	NM09CII5 (valve 1)	NM09CII5 (valve 2)	NM09CII4 (valve 2)
Meilleur angle θ	92,8°	91,4°	96,7°
Distance crochet-rebord palléal	5,99 cm	6,28 cm	4,85 cm
Période correspondant au pic principal	2,9 mm	2,9 mm	2,8 mm

Tableau 1 récapitulatif des caractéristiques des coquilles de *Calyptogena*

5. Conclusion

L'utilisation de l'analyse multirésolution pour l'étude des stries de croissance de coquilles de *Calyptogena* se justifie pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle permet de mettre en évidence les éléments qui semblent se détacher de la courbure globale de la coquille. En effet, après avoir effectué l'analyse jusqu'à un certain niveau d'approximation, nous reconstruisons un signal de détails en faisant abstraction de l'approximation de l'image, et en ne conservant que les détails pertinents pour notre étude. Par ailleurs, l'analyse possède de bonnes propriétés dans les domaines espace-fréquence et permet de conserver ces deux informations pour l'étude du signal.

Nous avons repéré ainsi un pic de fréquence approximativement commun à deux spécimens provenant du même site. Il reste désormais à approfondir l'aspect biologique de ces pics afin de pouvoir les associer ou non à des paramètres naturels. L'inconvénient ici, est le faible nombre d'échantillons provenant de ce lieu de prélèvement. Nous avons davantage de spécimens provenant du Pérou, mais beaucoup d'entre eux ont des coquilles dont les stries sont très faiblement prononcées. Une seconde perspective est d'améliorer l'analyse multirésolution en utilisant un schéma d'analyse qui améliore les propriétés directionnelles des ondelettes en deux dimensions.

Références

1. M. Toubin, "Caractérisation et simplification de modèles numériques de scènes réelles par approche multirésolution dans un contexte multicapteurs", Thèse, Université de Bourgogne (2000).
2. S. Mallat, "Une exploration des signaux en ondelettes", Les éditions de l'école polytechnique (2000).
3. F. Truchetet, "Ondelettes pour le signal numérique", Hermes (1998).
4. A. Diou, *et al.*, "Multiscale analysis of range image: its use for growth increment characterization", *Opt. Eng.* **38** (12), 2016-2021 (1999).
5. C. Rinaldi, "Les stries de croissance de *Calyptogena* : analyse de leur signification et des relations avec les facteurs de l'environnement", Erasmus-research report, Observatoire de Villefranche sur Mer / Università di Bologna (1995).
6. D.L. Donoho et I. Johnstone, "Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage", *Biometrika* (81), 425-455 (1994).
7. I. Daubechies, "Ten Lectures on Wavelets", Conference on Wavelets and Applications at Lowell, MA, SIAM, Philadelphia, PA (1992).
8. P. Brunet, T. Sliwa, Y. Voisin et A. Diou, "Automatic detection of growth rings of trees", submitted to ICARCV, Singapour (2002).