



Rapport de stage DEA  
Instrumentation et Informatique de l'Image

---

**Etude et analyse de l'information 3D  
issue de coquilles de Calyptogena**

---

Olivier Morel

Encadrant : C. Stolz

Période : Mars à juin 2002

Lieu : Laboratoire Le2i  
Université de Bourgogne  
12, rue de la Fonderie  
71200 Le Creusot

# Remerciements

Je tiens à remercier mon encadrant, Monsieur Christophe Stolz, pour son soutien et sa disponibilité, ainsi que Monsieur Patrick Gorria, grâce auquel j'ai pu participer pleinement à la vie de l'équipe du laboratoire.

Mes remerciements vont également en direction de Messieurs Bruno David, Alain Diou et Frédéric Truchetet pour leurs précieux conseils scientifiques.

Enfin, je remercie tous les membres du laboratoire Le2i du site du Creusot ainsi que la joyeuse bande des doctorants pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur permanente.

# Sommaire

<b>Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Mise en situation .....</b>	<b>3</b>
1.1. Environnement de l'étude.....	3
1.2. Acquisition des images .....	3
1.3. Notions sur l'analyse multirésolution.....	4
1.3.1. Introduction .....	4
1.3.2. Schéma d'analyse .....	4
1.3.3. Algorithme de Mallat.....	6
<b>2. Application de l'analyse multirésolution à l'étude des stries de croissances .....</b>	<b>8</b>
2.1. Principe .....	8
2.2. Apports de l'analyse .....	8
2.2.1. Localisation spatiale et fréquentielle .....	9
2.2.2. Utilisation des facteurs d'échelle .....	10
2.3. Choix de l'ondelette.....	11
<b>3. Mise en œuvre du traitement.....</b>	<b>13</b>
3.1. Débruitage de l'image .....	13
3.1.1. Filtrage médian .....	13
3.1.2. Seuillage multi-échelles.....	14
3.2. Sélection d'une bande pour l'analyse.....	15
3.3. Mise en évidence des fréquences.....	17
3.4. Résultats.....	18
3.4.1. Schéma complet de l'étude .....	18
3.4.2. Interprétations .....	18
<b>Conclusion .....</b>	<b>21</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>22</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>24</b>

# Introduction

Le laboratoire Le2i (Laboratoire Electronique, Informatique et Image), en collaboration avec le laboratoire Biogéosciences de l'Université de Bourgogne, mène une étude visant à mieux comprendre les facteurs de croissance du mollusque bivalve *Calyptogena*.

Le motif de répétition des stries apparaissant sur la coquille reflète des éléments de l'environnement influençant la croissance de l'animal.

Le laboratoire Le2i intervient dans cette étude en procédant à l'acquisition des images de profondeur (à l'aide d'un scanner 3D), et au traitement de l'image obtenue.

Le stage s'est donc déroulé selon deux étapes principales : tout d'abord l'acquisition des images de profondeur à l'aide du scanner 3D, puis l'analyse des images obtenues en utilisant l'analyse multirésolution. L'un des avantages de cette dernière est de mettre en évidence les détails d'une image à plusieurs échelles (de précisions différentes), permettant ainsi d'étudier le motif de répétition des stries de croissance.

La première partie de ce mémoire sera consacrée à l'environnement de notre étude et présentera brièvement des notions essentielles concernant l'outil utilisé : l'analyse multirésolution.

En seconde partie, nous développerons davantage l'analyse multirésolution, et nous montrerons comment elle s'applique particulièrement à l'étude des stries de croissance.

Enfin, la dernière partie exposera la démarche suivie, ainsi que les moyens mis en œuvre pour surmonter certaines difficultés, liées notamment à la nature des coquilles.

# 1. Mise en situation

## 1.1. Environnement de l'étude

Le laboratoire Biogéosciences à Dijon nous a fourni des coquilles de *Calyptogena* prélevées le long du mur interne de la fosse d'Amérique centrale lors de deux missions : « Nautimate », au large du Mexique, et « Andinaut », au large du Pérou.



**Figure 1-1 Une valve de Calyptogena**

Ces mollusques vivent à des profondeurs abyssales (à environ 3300 m de profondeur), près de sorties de fluides hydrothermaux. Les conditions particulières générées à proximité de ces endroits entraînent le développement de la faune, et en particulier celui du bivalve *Calyptogena*. Le lien étroit entre la présence de sorties de fluides et celle des coquillages permet de supposer que les stries observées sur la coquille correspondent à des enregistrements des fluctuations des paramètres qui régulent les sorties de fluides hydrothermaux. Ainsi, en étudiant le motif de répétition des stries de croissance de *Calyptogena*, les biologistes espèrent établir une relation avec la sismicité, qui est à l'origine des variations de flux.

Une description plus précise des facteurs de croissance de *Calyptogena* est donnée dans le mémoire [15].

## 1.2. Acquisition des images

Nous avons utilisé le scanner tridimensionnel dont dispose le Le2i. Celui-ci est constitué de trois parties : un projecteur de trait laser, un système d'acquisition du nuage de points et une table de translations à trois axes. L'acquisition des images est réalisée par triangulation de la projection du faisceau laser sur l'objet à l'aide de deux cameras CCD.



**Figure 1-2 Scanner 3D**

L'utilisateur définit la largeur et la longueur de l'objet à numériser, ainsi que les valeurs des incréments : la précision maximale selon les axes X et Y est de 50  $\mu\text{m}$ . Le déplacement du scanner suivant l'axe Z (profondeur ou hauteur de l'objet) peut être automatiquement ajusté par le système afin que le faisceau laser reste bien focalisé. Le système de mesure optique atteint une précision de 20  $\mu\text{m}$  sur la profondeur.

Le résultat de l'acquisition consiste en un tableau de valeurs (profondeur ou hauteur de l'objet) où les indices de ligne et de colonne représentent respectivement la largeur et la longueur de l'image scannée. Cette matrice nous permet de créer une image dite « de profondeur », où le niveau de gris indique la profondeur de l'objet, comme le montre la Figure 1-3.



Figure 1-3 Image de profondeur d'une valve de Calyptogena

### 1.3. Notions sur l'analyse multirésolution

#### 1.3.1. Introduction

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 [16] utilisée en synthèse d'images.

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

#### 1.3.2. Schéma d'analyse

Une analyse multirésolution se définit comme étant une famille de sous-espaces vectoriels emboîtés les uns dans les autres, tels que le passage de l'un à l'autre soit le résultat d'un changement d'échelle. Les sous-espaces  $V_j$  utilisés sont des sous-espaces de l'espace des fonctions continues d'énergie finie :  $L^2(\mathbb{R})$ .

Les espaces  $V_j$  sont appelés des espaces d'approximation à l'échelle  $j$  ( $j \in \mathbb{Z}$ ), et vérifient les propriétés suivantes :

- $\dots \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset \dots \subset V_{j+1} \subset V_j \subset \dots$
- $\overline{\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j} = L^2(\square)$
- $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\}$

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

- $\forall j \in \mathbb{Z}, \text{ si } f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2^{-1}x) \in V_{j+1}$
- $\forall j \in \mathbb{Z}, \text{ si } f(x) \in V_0 \Leftrightarrow f(x-k) \in V_0$

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  $V_j$ .

Toutes les propriétés énoncées ci-dessus caractérisent l'analyse multirésolution dyadique. 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  $V_{j-1}$  :

- $V_{j-1} = V_j \oplus W_j$
- $L^2(\mathbb{R}) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j$
- $\forall j \in \mathbb{Z}, \text{ si } k \neq j \text{ alors } W_j \perp W_k$

Contrairement aux sous-espaces d'approximation, les sous-espaces  $W_j$  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  $W_j$ .

Davantage de notions de bases indispensables pour le traitement numérique sont décrites dans [17] et dans [13] .

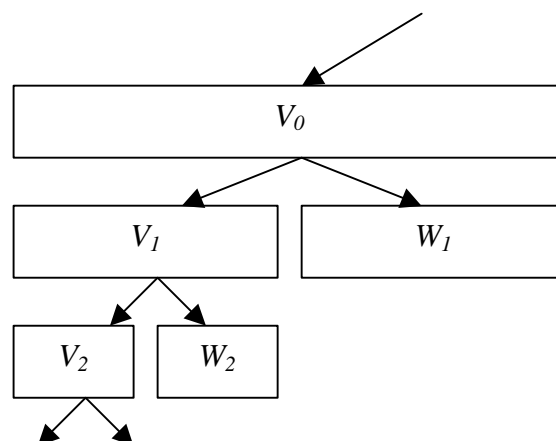


Figure 1-4 Schéma d'analyse multirésolution

### 1.3.3. Algorithme de Mallat

Cet algorithme est construit à partir de la projection de la fonction 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  $\varphi$  la fonction d'échelle qui, par dilatation et translation, engendre une base orthonormée de  $V_j$  et  $\psi$  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 [12] démontre que :

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

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

où  $\tilde{h}[n] = h[-n]$  et  $\tilde{g}[n] = g[-n]$ .

Ces relations récursives permettent d'établir l'algorithme d'analyse de Mallat comme le montre le schéma ci-dessous :

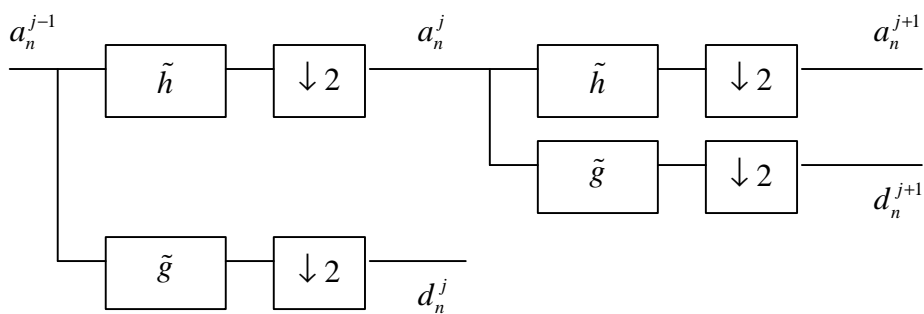


Figure 1-5 Algorithme d'analyse de Mallat

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.



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.

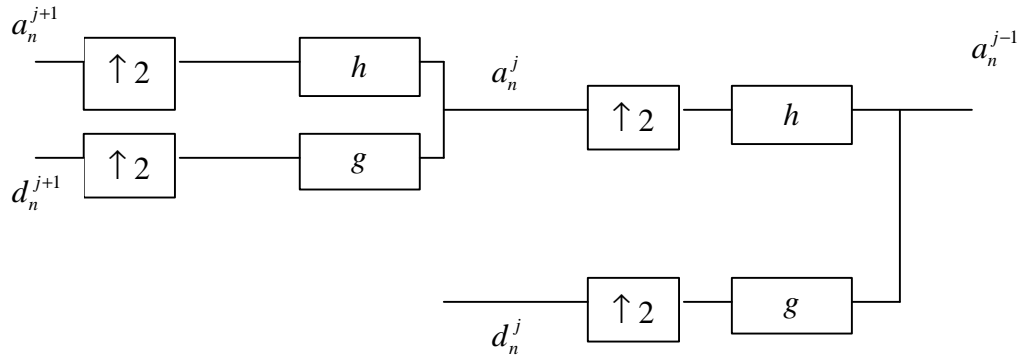


Figure 1-6 Algorithme de synthèse de Mallat

## 2. Application de l'analyse multirésolution à l'étude des stries de croissances

### 2.1. Principe

Notre étude sur l'analyse des stries de croissance de coquilles de *Calypptogena* s'est basée sur les travaux de recherche effectués par Diou et Al. [5]. Cette technique utilise l'algorithme de Mallat pour l'analyse et la reconstruction de l'image. Cependant, pour mettre en évidence la localisation spatiale des stries sans tenir compte de la courbure générale de la coquille, on effectue une analyse multirésolution de l'image puis on reconstruit une image dite image de détails en annulant l'approximation de plus basse échelle et en ne conservant que les coefficients de détails intéressants (Figure 2-1-b).

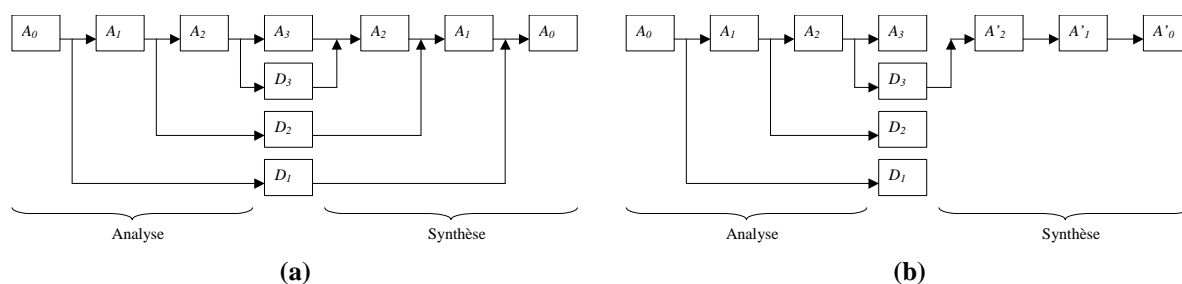


Figure 2-1 Schémas de reconstruction. (a) Reconstruction parfaite. (b) Image de détails en ne conservant que les détails de niveau 3.

Sur la Figure 2-1-a, on retrouve l'image initiale en gardant tous les détails et le niveau d'approximation le plus bas. L'analyse multirésolution permet aussi de calculer l'approximation du signal en reconstruisant à partir des coefficients d'approximation et en annulant cette fois tous les coefficients de détails.

### 2.2. Apports de l'analyse

Pour bien comprendre l'analyse et pour confirmer notre étude, nous avons construit un modèle théorique inspiré d'une bande extraite du coquillage. La modélisation des stries de croissance a été réalisée en considérant un signal constitué d'une succession de rampes et de plats comme le montre la coupe de notre image théorique sur la Figure 2-2-b.

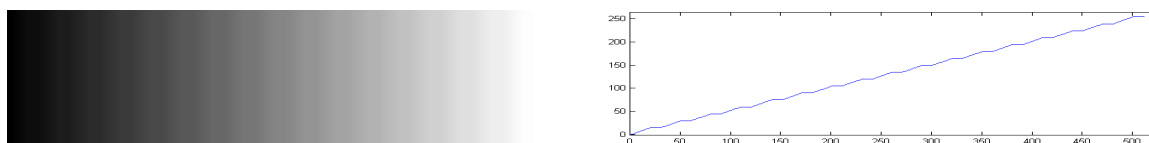


Figure 2-2 Image théorique. (a) Image de profondeur. (b) Coupe horizontale.

### 2.2.1. Localisation spatiale et fréquentielle

Pour analyser une image comprenant des informations fréquentielles, nous aurions pu utiliser la transformée de Fourier. La transformée de Fourier permet une bonne localisation fréquentielle des signaux mais en contre-partie elle perd toute l'information spatiale contenue dans le signal. Ainsi, dans le spectre d'une image, toutes les informations spatiales (ou temporelles) disparaissent, comme les instants de début ou de fin d'un signal fini, ou l'instant d'apparition de singularités. De plus, la courbure générale des coquilles de *Calyptogena* génère une composante continue très importante dans le spectre qui va cacher les informations intéressantes comme le montre le spectre de la coupe horizontale de l'image théorique sur la figure ci-dessous.

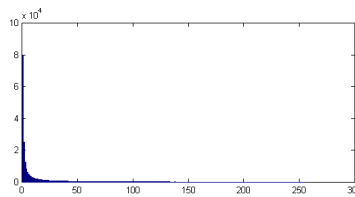


Figure 2-3 Spectre de la coupe horizontale de l'image théorique

L'analyse des signaux par ondelettes se déroule selon une analyse temps-fréquence, donc elle permet d'une part de localiser les stries de croissance, et d'autre part d'évaluer leur fréquence dite instantanée.

Dans la Figure 2-4 nous avons représenté une coupe de l'image de détails reconstruite à partir des détails de niveau 4. L'enchaînement des stries est caractérisé par la succession des passages par zéros du signal et l'amplitude des stries est représentée par l'amplitude du signal de détails.

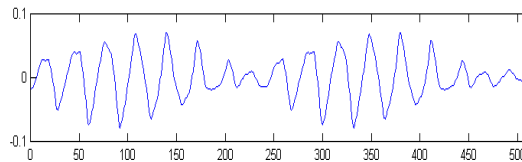


Figure 2-4 Coupe horizontale de l'image de détails reconstruite à partir des détails de niveau 4

L'analyse fréquentielle du signal de détails indique clairement un pic fréquentiel correspondant exactement à la fréquence d'apparition des stries dans l'image théorique comme le montre la Figure 2-5.

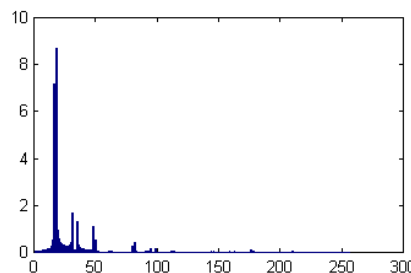


Figure 2-5 Spectre de la coupe horizontale de l'image de détails

En annulant l'approximation obtenue par l'analyse multirésolution, et en ne reconstruisant qu'à partir des coefficients de détails de l'échelle 4, on met en évidence les détails tout en supprimant l'allure générale de la courbe. De plus, le nouveau spectre permet d'extraire la fréquence d'apparition des stries.

L'analyse multirésolution permet également de préserver une localisation spatiale des stries. Cette localisation est définie par les passages par zéros (de négatif vers positif) des signaux obtenus dans l'image de détails. Sur la Figure 2-6, nous pouvons remarquer la bonne localisation des stries :

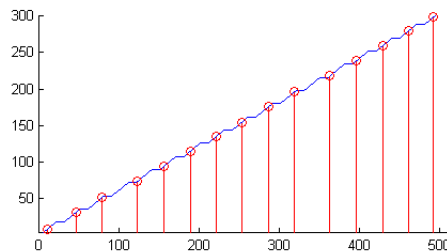


Figure 2-6 Localisation spatiale des stries calculée à partir de l'image de détails

### 2.2.2. Utilisation des facteurs d'échelle

Afin d'enrichir les informations contenues dans l'image, nous avons ajouté au signal précédent un signal de même type mais de fréquence plus rapide. L'analyse multirésolution va nous permettre de définir des échelles pour lesquelles on mettra en évidence le premier ou le second signal.

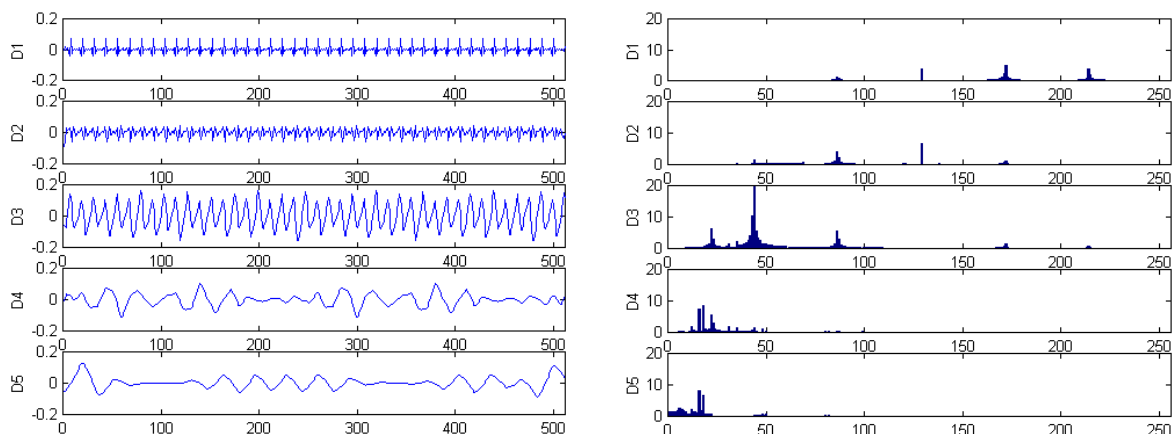


Figure 2-7 Coupes horizontales et spectres associés des images de détails reconstruites en gardant différents niveaux de détails de 1 à 5

En fonction du niveau à partir duquel on reconstruit l'image de détails, on ne met pas en évidence les mêmes types de signaux. Les niveaux de détails 4 et 5 permettent de reconstruire une image avec le signal de plus faible fréquence alors que le niveau de détails 3 met en avant la plus grande fréquence incluse dans le signal.

Sur les niveaux de détails 1 et 2, on voit apparaître des petits pics de fréquence qui sont les harmoniques des deux fréquences principales du signal. Plus on descend dans les échelles, plus les détails de basses fréquences ressortent car l'approximation du signal est de plus en plus grossière.

### 2.3. Choix de l'ondelette

L'analyse rappelée dans le chapitre précédent peut aussi s'appliquer à des fonctions continues de  $L^2(\mathbb{R}^2)$ . Dans ce cas, le facteur d'échelle entre deux niveaux successifs n'est plus un nombre scalaire (égal à 2 dans le cas dyadique), mais devient une matrice dite matrice de dilatation. Pour le passage à 2 dimensions, nous avons utilisé des ondelettes séparables, c'est à dire des ondelettes construites à partir du produit tensoriel d'ondelettes de dimension 1. La matrice de dilatation sera alors :

$$J = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Le facteur de dilatation étant donné par le déterminant de la matrice, nous aurons un facteur de 4. Cela signifie que pour passer d'une résolution à l'autre, une image sera quatre fois plus petite. L'algorithme d'analyse de Mallat devient :

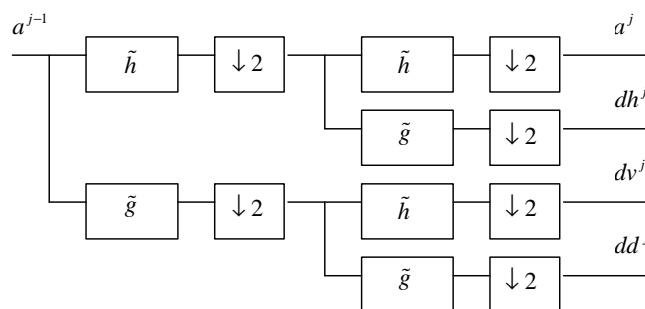
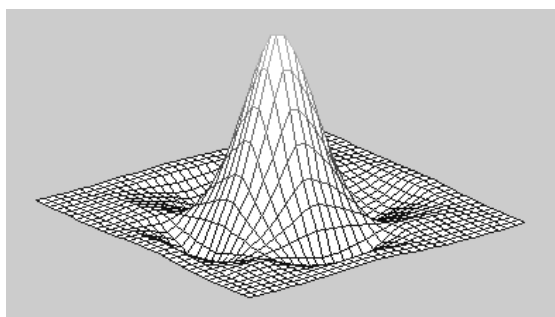


Figure 2-8 Schéma d'analyse de Mallat pour le cas 2D séparable

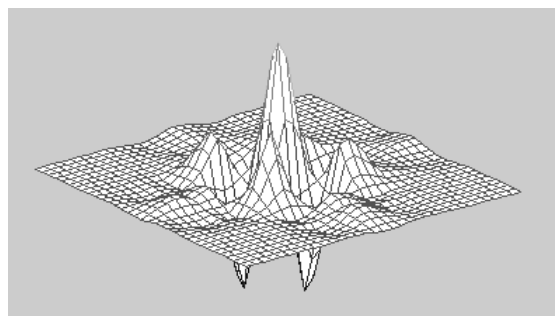
D'une résolution à l'autre, nous avons une image des coefficients d'approximation avec trois images des coefficients de détails : les détails horizontaux ( $dh$ ), les détails verticaux ( $dv$ ) et les détails diagonaux ( $dd$ ).

Durant notre étude, nous avons utilisé le logiciel « Matlab 5.3 » avec la boîte à outils « Wavelet Toolbox » [14]. Cette boîte contient de nombreux outils dédiés à l'analyse en ondelettes et propose plusieurs types d'ondelettes. Nous avons utilisé l'ondelette appelée « symlet », ondelette créée à partir des ondelettes de Daubechies [4]. Les « symlets » sont des ondelettes orthogonales, donc elles préservent l'énergie de l'image d'une résolution à l'autre. Cette propriété est intéressante pour pouvoir interpréter physiquement les coefficients de détails ou d'approximations durant l'analyse et la synthèse. De plus, étant construites à partir des ondelettes de « Daubechies », elles sont à support compact, ce qui réduit la taille des filtres. Enfin, comme leur nom l'indique elles ont l'avantage d'être pratiquement symétriques.

A partir des filtres  $h$  et  $g$  on peut remonter à la fonction d'échelle et à la fonction d'ondelette en utilisant l'algorithme cascade :



**Figure 2-9 fonction d'échelle (Symlet)**



**Figure 2-10 fonction d'ondelette (Symlet)**

### 3. Mise en œuvre du traitement

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, l'analyse multirésolution est bien adaptée pour l'étude et la détection de zones pertinentes dans une image contenant des stries. L'analyse avait donné de très bons résultats lors de l'étude menée par Diou et al. [5] 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.

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 des profondeurs abyssales à plus de 3000 m de fond et qu'il est impossible de recréer un tel environnement afin de mieux connaître leurs paramètres de croissance. La seconde raison est qu'il a été montré, comme le rappelle le premier chapitre, que les stries de croissance correspondent à des enregistrements des fluctuations des sorties de fluides, dont nous n'avons que peu de connaissances concernant leur périodicité éventuelle. 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 ce chapitre, nous allons voir dans un premier temps le pré-traitement effectué sur l'image afin d'atténuer le bruit, qui pourrait engendrer de mauvais résultats. Puis, nous appliquerons un critère pour choisir la meilleure bande à analyser sur l'image du coquillage. Enfin nous montrerons comment mettre davantage en évidence les fréquences et nous présenterons les résultats obtenus sur différents échantillons.

#### 3.1. Débruitage de l'image

##### 3.1.1. Filtrage médian

Après avoir scanné la coquille de *Calyptogena*, il arrive qu'on trouve des pics sur l'image de profondeur. Ces pics peuvent être facilement supprimés en appliquant un filtrage médian avec un masque carré de taille  $5 \times 5$ .

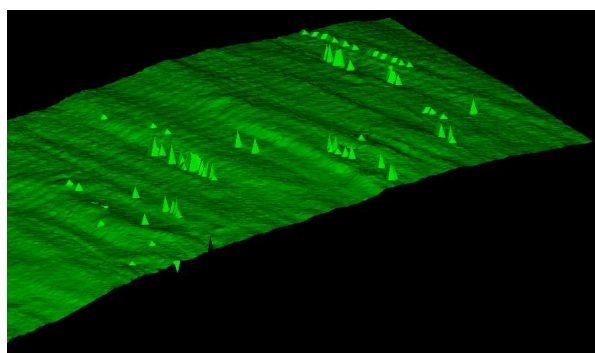


Figure 3-1 Extrait d'une image de la coquille

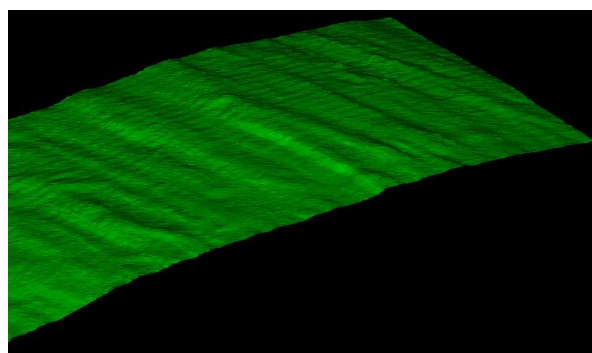


Figure 3-2 Extrait après filtrage médian

### 3.1.2. Seuillage multi-échelles

Nous utilisons une méthode de seuillage multi-échelles permettant de réduire le bruit à l'aide du schéma classique de l'analyse multirésolution. 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.

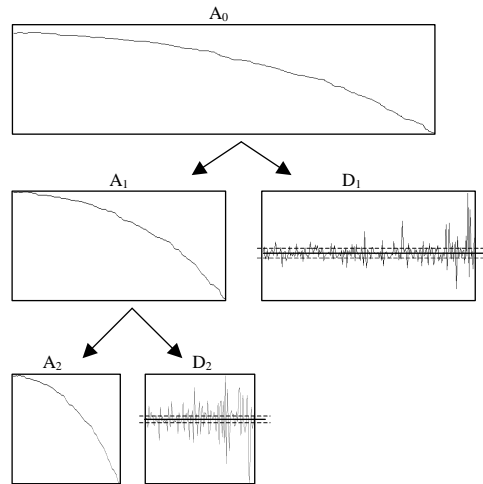


Figure 3-3 Principe de débruitage par seuillage des coefficients de détails

Dans un premier temps, on calcule une estimation de la variance du bruit à l'aide de la formule démontrée dans [13] d'après les travaux de Donoho et Johnstone :

$$\tilde{\sigma} = \frac{M_I}{0.6745}$$

où  $M_I$  est la valeur médiane des valeurs absolues des coefficients d'ondelettes de l'image  $I$  à l'échelle la plus fine.

Puis, nous utilisons la valeur de seuil donnée par Donoho et Johnstone que nous appliquons à chaque niveau de détails avant de reconstruire :

$$T_j = \tilde{\sigma} \sqrt{2 * \ln(N_j)}$$

où  $N_j$  est le nombre de coefficients.

Le seuillage utilisé est un seuillage de type doux (Figure 3-4) pour atténuer l'effet du bruit sur les discontinuités.



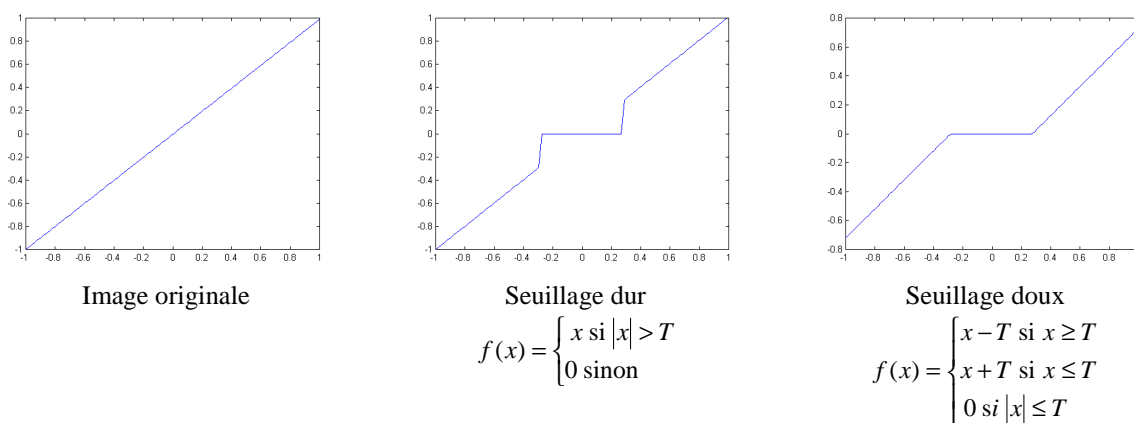


Figure 3-4 Seuillage dur et seuillage doux

### 3.2. Sélection d'une bande pour l'analyse

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 le plus semblables tout au long de l'imagette. Cependant, la sélection doit s'effectuer selon plusieurs critères. Tout d'abord, la direction d'analyse doit correspondre à la nature biologique de l'objet à étudier : elle est définie par un segment allant du rebord palléal vers le crochet de la coquille (élément qui relie les deux valves et qui est le point initial caractérisant la naissance de Calyptogena, Figure 3-5). 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 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 [2] :

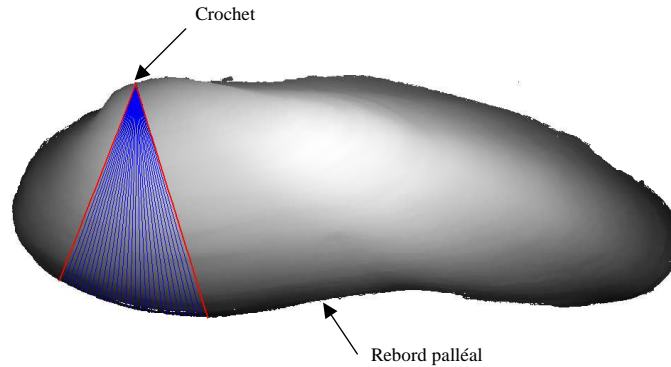
$$c(\theta) = \frac{\hat{\sigma}_{col}}{\hat{\sigma}_{lig}}$$

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 des 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.

Le programme effectué sous Matlab, utilise en entrée l'image, le point de crochet et les deux angles délimitant le domaine à étudier.

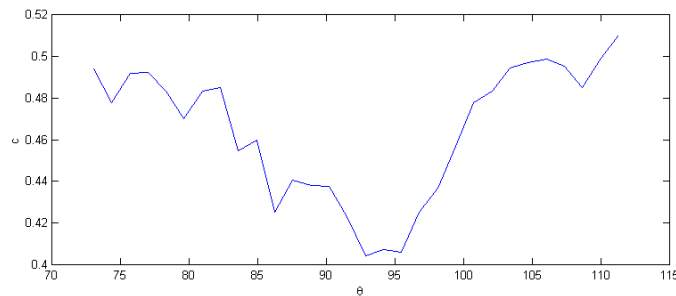


**Figure 3-5 Sélection de la meilleure bande d'analyse**

Pour chaque direction d'analyse, l'algorithme effectue les opérations suivantes :

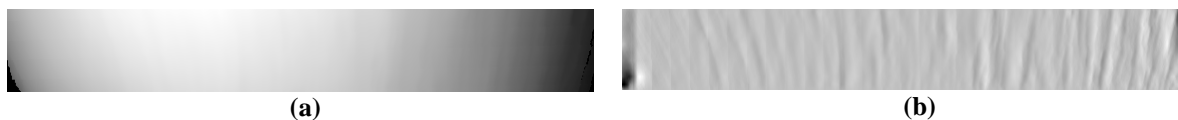
- Rotation de l'image : de centre le crochet et d'angle l'angle de la nouvelle direction
- Extraction de la bande : de longueur égale à la distance crochet-rebord parallél
- Calcul de l'image de détails
- Calcul du critère

Nous obtenons la courbe suivante (Figure 3-6) qui indique l'angle où l'étude semble la plus appropriée.



**Figure 3-6 Courbe représentant la valeur du critère en fonction de l'angle**

Pour l'angle correspondant à la valeur minimum du critère, nous obtenons une image de détails construite à partir du rebord parallél en direction du crochet du coquillage présentée sur la Figure 3-7-b.



**Figure 3-7 Bande extraite. (a) Image originale. (b) Image de détails reconstruite**

### 3.3. Mise en évidence des fréquences

Après avoir sélectionné la bande à étudier, nous appliquons l'analyse multirésolution, telle qu'elle a été décrite dans la partie 2. La coquille utilisée dans cette partie est la valve référencée NM09CII5 provenant de l'expédition Nautimat au large du Mexique.

Lorsqu'on souhaite extraire des informations de type fréquentiel sur le signal, il est très utile d'utiliser une fenêtre de pondération afin de diminuer l'influence des bords de l'image qui présentent des sauts de discontinuité très importants. Cette technique appelée apodisation du signal, consiste à multiplier le signal original par une fonction qui est maximum au centre et qui décroît vers 0 sur les bords (Figure 3-8). Nous avons utilisé la fenêtre de Hanning qui est défini dans le cas d'un signal de dimension 1 par :

$$w[k] = \frac{1 - \cos(2\pi \frac{k}{n+1})}{2} \text{ pour } k \in [1, n]$$

La fenêtre utilisée en 2 dimensions est obtenue par un produit tensoriel :

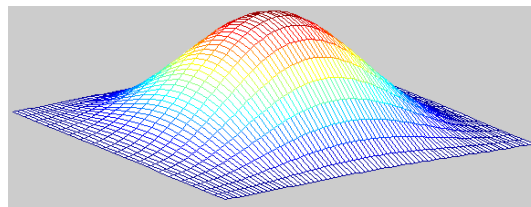


Figure 3-8 Fenêtre de Hanning 2D

Comme le rappelle [8], l'apodisation permet de supprimer les effets de bord du signal ainsi que de mettre en valeur les pics de fréquences, mais leur localisation est un peu moins précise. Dans les figures ci-dessous, nous avons représenté les spectres d'une coupe horizontale de l'imagette (Figure 3-7-a) avec et sans l'apodisation :

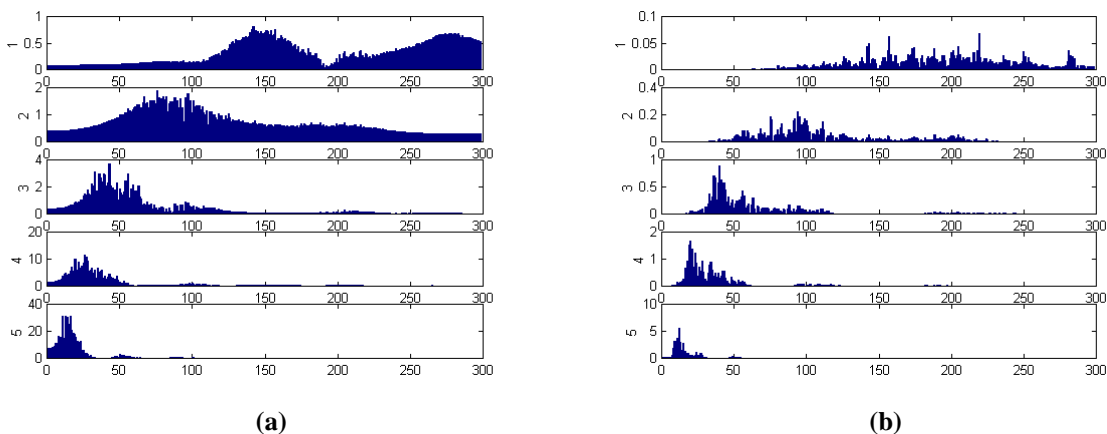


Figure 3-9 Spectres d'une coupe horizontale de l'imagette de détails. (a) Sans apodisation. (b) Avec apodisation.

## 3.4. Résultats

### 3.4.1. Schéma complet de l'étude

Nous présentons ici, le schéma global mis au point concernant l'étude des stries de croissance sur les coquilles de *Calyptogena*.

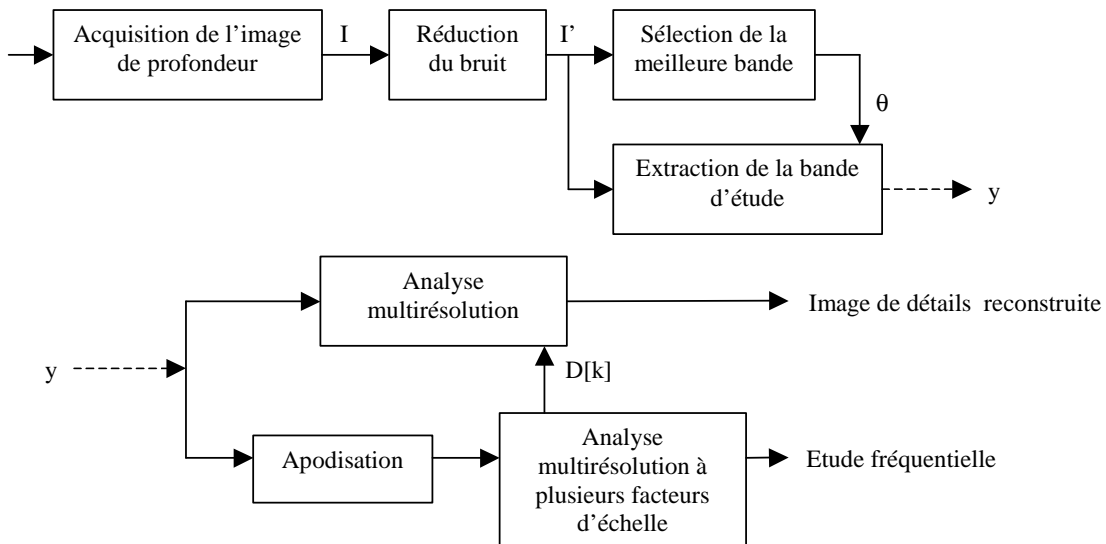


Figure 3-10 Schéma complet de l'étude

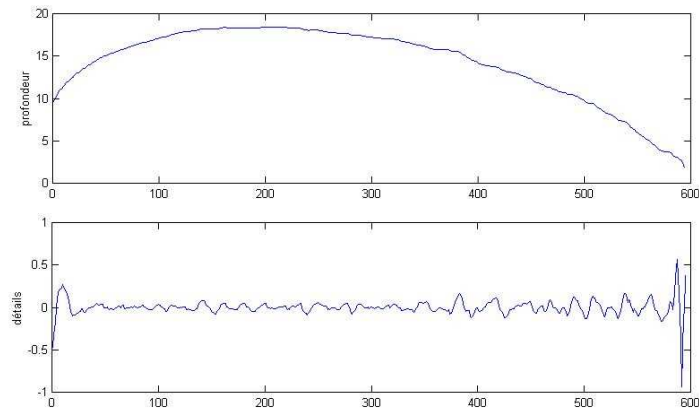
Après l'acquisition de l'image de profondeur  $I$  de la coquille, nous réduisons le bruit à l'aide des algorithmes présentés en 3.1 pour obtenir une image  $I'$ . Ensuite, l'algorithme de sélection de la meilleure bande permet d'obtenir le meilleur angle  $\theta$  pour extraire une bande de l'image  $y$ . Pour permettre une étude fréquentielle plus facile, nous effectuons une apodisation du signal pour ensuite appliquer l'algorithme d'analyse multirésolution. Cette étude permet de déterminer les facteurs d'échelle  $k$  où le signal est le plus représenté. La reconstruction de l'Image de détails reconstruite est réalisée en ne conservant que les détails  $D[k]$ .

### 3.4.2. Interprétations

Nous avons appliqué l'étude précédemment citée sur deux spécimens de *Calyptogena* extraits du même lieu. Les images de profondeur des coquilles ont une résolution selon la hauteur et la largeur de  $100 \mu\text{m}$ .

Nous présentons quelques interprétations sur une valve du *Calyptogena* NM09CII5. Puis nous résumerons les résultats obtenus sur l'autre valve ainsi que ceux obtenus sur un autre individu issu du même endroit (*Calyptogena* NM09CII4).

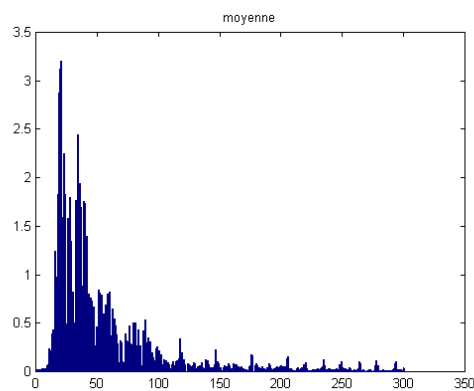
Sur la Figure 3-11, nous pouvons remarquer des oscillations importantes aux extrémités du signal de détails qui caractérisent les effets de bord de la transformation. Le signal de détails a des fluctuations plus importantes au niveau des « accidents » du profil, lieu où les stries de croissance sont le plus prononcés.



**Figure 3-11 Profil de la coquille de Calyptogena et courbe des détails associée**

L'analyse fréquentielle sur les courbes de détails correspondant aux différents profils de l'image permettent de mieux rendre compte des pics de fréquences associés à la répartition des stries. L'information du signal est portée principalement le long de l'axe crochet-rebord parallél, donc on le retrouve sur les lignes de la bande extraite de l'image.

La moyenne des analyses spectrales sur les profils de la bande extraite (Figure 3-12) laisse apparaître un premier pic représentant une période d'environ 2.9 mm.



**Figure 3-12 Spectre moyen sur l'image des détails**

Un autre de pic de fréquence assez important apparaît ; il correspond pratiquement à une harmonique du premier pic. L'effet de l'apodisation se retrouve sur les petits pics suivants qui sont répétés de manière régulière.

La périodicité principale donnée par le spectre semble être reproduite sur l'autre valve du coquillage, ainsi que sur une valve d'un autre individu recueilli au même endroit. Les résultats sont présentés dans le tableau récapitulatif Figure 3-13.

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

**Figure 3-13** Tableau récapitulatif des caractéristiques des coquilles de *Calyplogena*

Les détails de l'étude sur ces trois coquilles sont donnés dans l'annexe B.

## 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 du coquillage. En effet, après avoir effectué l'analyse jusqu'à un certain niveau d'approximation, on reconstruit 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.

En raison de la configuration géométrique des coquilles et de la faible amplitude des stries, nous avons été confrontés à plusieurs difficultés. Dans un premier temps, nous avons dû effectuer un pré-traitement sur les images pour éliminer du bruit, apparaissant, suite à l'acquisition des images. Puis, en raison de la géométrie particulière des coquilles, et de la transformée en ondelettes 2D discrète, nous avons été amenés à sélectionner une petite bande de l'image pour appliquer le traitement. La direction de croissance de la coquille nous a conduits à sélectionner une bande respectant cette contrainte. Afin de choisir la bande la plus appropriée nous avons utilisé un critère de sélection.

Nous avons pu repérer 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 d'une autre région, mais beaucoup d'entre eux ont des coquilles dont les stries sont très faiblement prononcées. La première perspective de ce travail est donc de développer davantage l'interprétation biologique des signaux obtenus afin d'exploiter au maximum les informations obtenues par l'analyse multirésolution.

Une autre perspective est d'améliorer le type de l'analyse multirésolution. En effet, la transformée en ondelettes discrète selon le schéma de Mallat a de mauvaises propriétés directionnelles et nous oblige à sélectionner une bande d'analyse adaptée. Dans l'annexe A, nous proposons d'autres schémas d'analyse multirésolution qui améliorent les propriétés directionnelles des ondelettes en deux dimensions.

## Bibliographie

- [1] R.H. Bamberger, M.J.T. Smith, « A filter bank for the directional decomposition of images : theory and design. », *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol 40, N°4, pp. 882-893, April 1992.
- [2] P. Brunet, T. Sliwa, Y. Voisin, A. Diou, « Automatic detection of growth rings of trees », *submitted to ICARCV, Singapour*, 2002.
- [3] J-P. Cocquerez, S. Philipp, « Analyse d'images : filtrage et segmentation », *Masson*, 1995.
- [4] I. Daubechies, « Ten lectures on Wavelets », *SIAM, Philadelphia, PA*, 1992.
- [5] A. Diou, C. Dumont, O. Laligant, M. Toubin, F. Truchetet, E. P. Verrecchia, M. A. Abidi, « Multiscale analysis of range image : its use for growth increment characterization », *Optical Engineering*, Vol. 38 No. 12, pp. 2016-2021, December 1999.
- [6] M.N. Do, M. Vetterli, « Pyramidal Directional Filter Banks and curvelets », *IEEE (ICIP), Thessaloniki, Greece*, 2001.
- [7] D.L Donoho, « Wedgelets : Nearly-Minimax Estimation of Edges », *Stanford University and U.C. Berkeley*, Aug 1997.
- [8] M. Durnerin, « Une stratégie pour l'interprétation en analyse spectrale. Détection et caractérisation des composantes d'un spectre », *thèse de l'institut national polytechnique de Grenoble*, 1999.
- [9] F. C. A. Fernandes, « Directional, Shift-Insensitive, Complex Wavelet Transforms with Controllable Redudancy », *thesis, Rice University*, Jan 2002.
- [10] C. Gasquet, P. Witomski, « Analyse de Fourier et applications », *Dunod*, 1990.
- [11] N. Kingsbury, « The dual-tree complex wavelet transform : A new technique for shift invariance and directional filters », *Proc. 8th IEEE DSP Workshop, Bryce Canyon*, Aug 1998.
- [12] S. Mallat, « A theory for multiresolution signal decomposition : the wavelet representation. », *IEEE Trans. PAMI*, vol 11, N°7, pp. 674-693, Jul 1989.
- [13] S. Mallat, « Une exploration des signaux en ondelettes », *Ellipses-Les éditions de l'école Polytechnique*, 2000.
- [14] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J-M. Poggi, « Wavelet Toolbox », *Matlab User's Guide*, 1997.



- [15] 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)*, pp. 56-91, 1995.
- [16] M. Toubin, «Caractérisation et simplification de modèles numériques de scènes réelles par approche multiresolution dans un contexte multi-capteurs», *thèse de l'université de Bourgogne*, 2000.
- [17] F. Truchetet, « Ondelettes pour le signal numérique », *Hermes*, 1998.

## **Annexes**

A. Présentation d'autres transformées en ondelettes .....	1
B. Etude sur les coquilles de Calyptogena NM09CII5 et NM09CII4 .....	3

# Annexe A

## Présentation d'autres transformées en ondelettes

Lors de l'analyse de l'image de profondeur de la coquille *Calyptogena*, nous avons été confrontés à plusieurs problèmes liés en partie au choix de la transformation pour l'analyse multirésolution. En effet, malgré toutes ses propriétés intéressantes, la transformée en ondelettes discrète possède certains inconvénients comme par exemple une mauvaise sélection directionnelle.

Dans la première partie de cette annexe, nous évoquerons les trois principaux défauts de la transformée en ondelettes discrète. Puis, les parties suivantes seront consacrées à l'introduction de méthodes permettant de remédier en tout ou partie aux problèmes soulevés. Les parties 2 et 3 seront respectivement consacrées à la DTCWT et à la PDFB.

### A-1 Inconvénients de la DWT

La transformée en ondelettes discrète ou DWT (Discrete Wavelet Transform) est issue du schéma classique d'analyse donné par Mallat.

Un des premiers inconvénient de cette transformation est qu'elle n'est pas invariante par translation. En effet, les sous-échantillonnages induits par la DWT génèrent une importante sensibilité aux translations : si un signal d'entrée est légèrement translaté, ses coefficients lors de la transformée seront complètement modifiés.

Le second inconvénient est le manque de sélection directionnelle. En 2D, la DWT séparable est construite à partir du produit tensoriel et crée des partitions du domaine fréquentielle en trois sous-bandes. Cela ne permet de distinguer que trois types d'orientation des détails : horizontal, vertical et diagonal. Ce problème est majeur pour l'analyse des stries de croissance puisque ces dernières présentent des contours qui sont par endroit très courbés : la reconstruction de l'image de détails génère alors des discontinuités le long de ses bords.

Le dernier problème est l'absence d'information de phase. Cette information s'avère intéressante pour exprimer le comportement local d'une fonction.

### A-2 La DTCWT

Pour améliorer l'invariance par translation et les faibles qualités directionnelles de la DWT, Kingsbury [11] a introduit la transformation en ondelettes nommée : DTCWT (Dual Tree Complex Wavelet Transform). Il a montré que l'utilisation du schéma classique de l'analyse de Mallat avec des filtres à coefficients complexes pouvait apporter des informations de phase mais ne permettait pas de reconstruction parfaite.

L'arbre dual implanté par Kingsbury est construit à partir de deux schémas en parallèles où les sous-échantillonnages sont effectués de manière différente : en conservant à la fois les échantillons pairs et impairs, et en appliquant des bancs de filtres appropriés. Les deux parties duales permettent d'une part de définir un nombre complexe qui apporte l'information de phase, et d'autre part d'améliorer l'invariance par translation.

En dimension 2, la DTCWT se traduit par un arbre à quatre branches où la combinaison des éléments permet de retrouver 6 directions d'analyse, de  $-75^\circ$  à  $75^\circ$ , alors que la DWT n'en a que 3 ( $90^\circ, 45^\circ, 0$ ). L'inconvénient de cette analyse, est qu'elle est redondante.

### **A-3 La PDFB**

Nous avons vu que l'utilisation de filtres séparables 2D dans la DWT conduisait à un manque de précision directionnelle. Bamberger et Smith [1] ont introduit la DFB (Directional Filter Bank) qui décompose l'espace suivant plusieurs directions en utilisant des bancs de filtres quinconces (QFB) et des matrices d'échantillonnage et de rotations adaptées. Cette technique permet de détecter des orientations particulières mais elle ne fournit pas de décomposition multi-échelles. Do et Vetterli [6] remédient à ce problème en combinant la DFB avec la pyramide laplacienne pour obtenir une implémentation multi-échelle : PDFB (Pyramidal Directional Filter Bank). Par contre, cette analyse n'apporte pas d'informations de phase.

### **A-4 Conclusion**

Le domaine de la transformée en ondelettes se développe de manière spectaculaire. Les applications sont très variées, et il est parfois difficile d'appliquer un nouveau schéma à un problème particulier. En effet, dans le cadre de l'étude des stries de croissance, nous recherchons un schéma permettant de mieux discerner le contour des stries quelque soit le degré de leur courbure.

Cela nous a conduit à rechercher des informations concernant la DTCWT et la PDFB : techniques utilisées respectivement dans la détection de textures et dans la compression d'images. La DTCWT semble plus appropriée pour notre problème mais il s'agit de comparer les apports de cette technique au schéma d'analyse classique.

L'annexe ne présente ici que deux outils susceptibles de répondre à une partie du problème, mais il existe bien d'autres techniques pour suivre des courbures comme les wedgelets définis par Donoho [7]. La CWT (Complex Wavelet Transform) est peut-être une piste à suivre, car Fernandes [9] démontre que cette transformée répond particulièrement bien aux problèmes soulevés par l'utilisation de la transformée en ondelettes discrète classique.

## Annexe B

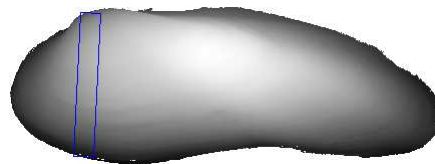
### Etude sur les coquilles de *Calypptogena* NM09CII5 et NM09CII4

L'étude sur les coquilles a été réalisée en conservant la même précision du scanner (100  $\mu\text{m}$ ) suivant les axes X et Y. Nous présentons tout d'abord les deux valves de l'individu nommé NM09CII5, puis nous présentons l'individu NM09CII4. Les deux spécimens proviennent du Mexique.

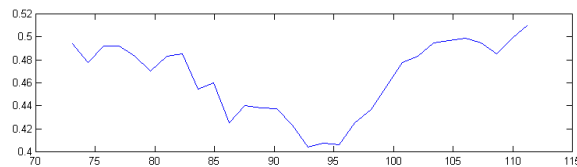
#### B-1 NM09CII5

##### a) Première valve

*Image de profondeur :*



*Sélection de l'angle :*



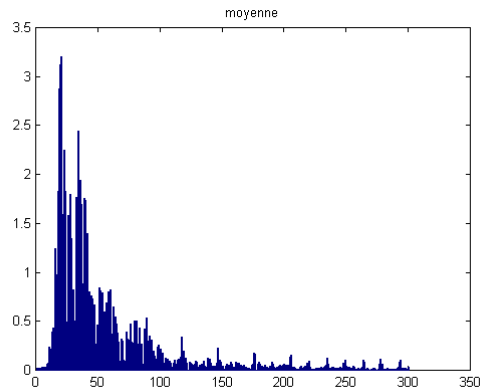
Nous avons trouvé un angle de  $92.8^\circ$ , ce qui va donner une longueur de la bande égale à 5.99 mm.

*Image de la bande prélevée et image de détails reconstruite :*



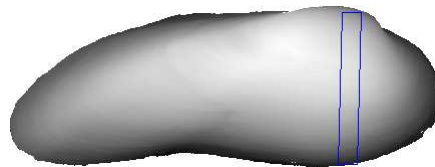
*Etude fréquentielle :*

Le premier pic observé sur la moyenne des spectre suivant les lignes de l'image de détails est situé à environ 20, soit équivalent à une période de 2.95 mm.

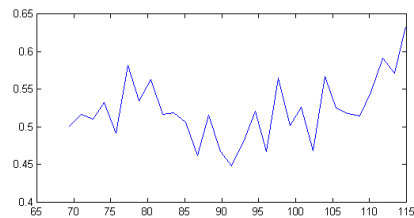


### **b) Deuxième valve**

*Image de profondeur :*



*Sélection de l'angle :*



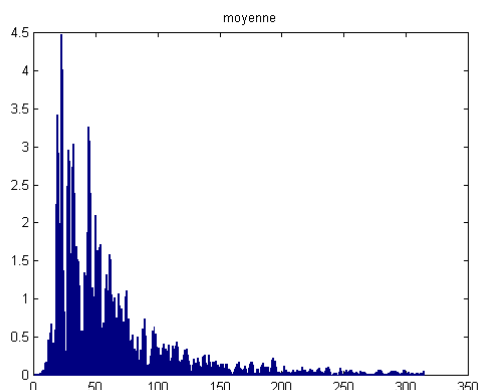
Nous avons trouvé un angle de  $91.4^\circ$ , ce qui va donner une longueur de la bande égale à 6.28 mm.

*Image de la bande prélevée et image de détails reconstruite :*



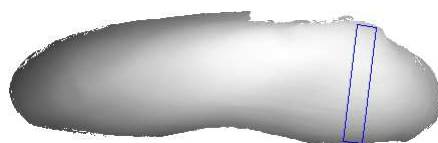
*Etude fréquentielle :*

Le premier pic observé sur la moyenne des spectre suivant les lignes de l'image de détails est situé à environ 21, soit équivalent à une période de 2.9 mm.

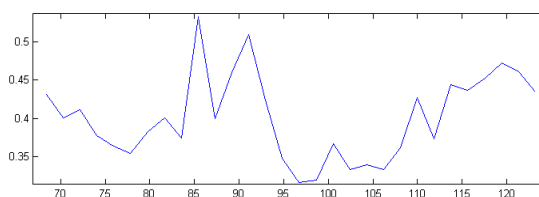


## **B-2 NM09CII4**

*Image de profondeur :*



Sélection de l'angle :



Nous avons trouvé un angle de  $96.7^\circ$ , ce qui va donner une longueur de la bande égale à 4.85 mm.

*Image de la bande prélevée et image de détails reconstruite :*



*Etude fréquentielle :*

Le premier pic observé sur la moyenne des spectre suivant les lignes de l'image de détails est situé à environ 17, soit équivalent à une période de 2.8 mm.

