

Détection et modélisation des stries de croissance sur les images d'otolithes par démodulation et construction de graphe¹

Growth ring detection and modelling on otolith images by demodulation and graph construction

Abdesslam Benzinou

École Nationale d'Ingénieurs de Brest,
Laboratoire RESO (EA 3380) - CS 73862,
29238 Brest Cedex 3, France,
Email : benzinou@enib.fr

Manuscrit reçu le 4 décembre 2006

Résumé et mots clés

Dans un contexte de raréfaction de la ressource, le développement de systèmes fiables pour la caractérisation des stocks halieutiques est un enjeu majeur pour la gestion durable des écosystèmes marins. Les otolithes, pièces calcifiées situées au niveau de l'oreille interne des poissons, sont classiquement utilisées comme des chronomètres permettant l'estimation de l'âge et de la croissance d'un individu. Cet article traite du problème de la mise au point d'un système permettant l'extraction automatique d'information dans les images d'otolithes par vision artificielle. Nous nous intéressons plus particulièrement au problème de l'invariance des opérateurs locaux de prétraitement et de segmentation, face à des structures de nature multi-échelle dans les images d'otolithes. La solution au concept simple que nous proposons consiste à démoduler l'image en vue de soustraire la non-linéarité de la largeur des accroissements, étant donnée une estimation de la loi régissant la croissance de ces structures. Egalement, nous développons une nouvelle technique de segmentation de ces images, technique qui opère dans un espace transformé et qui est basée sur les principes généraux de groupement perceptif empruntés de la théorie Gestaltiste. À partir d'un même échantillon témoin de 102 images d'otolithes de Plies, nous comparons par la suite l'efficacité de cette technique à celle d'une approche de détection monodimensionnelle, et à celle du modèle « template qualitatif » précédemment développé. La quantification des résultats obtenus laisse voir une certaine supériorité des performances obtenues avec cette approche de segmentation par démodulation et construction de graphe.

Otolithes, Vision par ordinateur, Détection de contours, Opérateurs locaux, Démodulation, Construction de graphe

Abstract and key words

In a resource rarefaction context, developing reliable systems for stocks characterization is of key importance for marine ecosystems management. Otoliths, calcified structures located in the inner ear of the fishes, are classically used to acquire data on age and growth of an individual. This paper deals with the problem of design and realization of a computer vision system for the recognition of patterns on otolith images. The principal problem we will be interested in is the invariance of the local operators facing structures with multi-scale nature (as in otolith images). We propose a

1. Ce travail rentre dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire LASAA de l'IFREMER, centre de Brest.

solution which consists in demodulating the image in order to eliminate the non-linearity of the ring size, given *a priori* knowledge on the law governing the growth of these structures. The result of this work is an alternative of segmentation by graph construction, based on the general principles of perceptive grouping. In addition, we undertake studies of validations of the proposed solution on a reference test image set ($N = 102$) of plaice otoliths, previously aged by one reader. We show the interest of this solution for calcified structure reading while establishing a comparison between our results and those coming from previously developed 1D-approach detection or template-approach one.

Otoliths, Computer vision, Contours detection, Local operators, Demodulation, Graph construction

Remerciements

L'auteur est reconnaissant à A. Ogor du laboratoire LASAA de l'IFREMER pour l'acquisition et la lecture des images et à R. Fablet pour ses discussions fructueuses. L'auteur souhaite également remercier J. Le Bihan, directeur du laboratoire RESO à l'École Nationale d'Ingénieurs de Brest, pour son soutien.

1. Introduction

S Une nouvelle étude canado-américaine prévoit l'effondrement avant 2050 des populations sauvages de toutes les espèces de poissons pêchées commercialement. La publication de cette étude a fait réagir et a souvent renforcé l'inquiétude de bon nombre d'organisations écologiques et scientifiques. Publiée dans le magazine américain Science daté du 03 novembre 2006, cette étude condamne la pollution et la surexploitation des ressources par l'homme. Si la FAO² considère que ce scénario catastrophe est improbable, elle confirme tout de même une diminution alarmante des stocks de poissons et crustacés au niveau international. Dans ce contexte, le développement de systèmes fiables pour la caractérisation des stocks halieutiques est un enjeu majeur pour la gestion durable des écosystèmes marins.

Les otolithes, minuscules concrétions calcaires au niveau de l'oreille interne des poissons, sont classiquement utilisés comme des chronomètres permettant l'estimation de l'âge et de la croissance d'un individu. Servant à l'audition et à l'équilibre, ces pièces s'accroissent par couches concentriques saisonnières ou journalières et forment des stries de l'ordre de quelques microns à quelques centaines de microns (figure 1). De manière générale, l'estimation de l'âge consiste à compter les stries, alors que la détermination de la loi de croissance du poisson résulte de l'étude de l'évolution des distances entre stries successives (taille des accroissements). L'établissement de la courbe de croissance qui associe l'âge à la taille permet d'aborder l'étude démographique des populations de poissons exploitées. Les résultats de cette analyse peuvent conduire à une augmentation ou une diminution de la taille des filets de capture, en vue de protéger les individus jeunes ou inversement accroître la production. La même analyse permet aussi de déterminer plus faci-

lement les périodes durant lesquelles il est intéressant de pêcher et celles durant lesquelles il vaut mieux s'en abstenir.

Cependant, l'identification des stries de croissance dans les laboratoires de lecture de pièces calcifiées reste encore une activité d'analyse en routine assurée par des opérateurs humains³. Cette analyse visuelle représente pour les lecteurs experts un travail de précision, lent et souvent fastidieux. L'interprétation est généralement délicate et peu précise, car sujette à erreur humaine. À ce titre, l'utilisation de techniques de traitement d'images et de reconnaissance de formes conduirait d'une part, à limiter l'intervention de l'opérateur (gain en objectivité, standardisation des mesures) et d'autre part, à acquérir des données morphométriques encore inaccessibles (forme, surface et périmètre des stries de croissance).

Issus du monde du vivant, les otolithes présentent des structures bruitées, au contraste insuffisant, avec une non linéarité de la croissance selon les directions et une variabilité naturelle de tous ces attributs. La figure 2 suivante met en évidence ces différentes caractéristiques. On peut noter en particulier la faible variation d'intensité entre les stries sombres et les stries claires. Les contrastes ne sont pas suffisants pour définir les contours exacts de celles-ci. On peut également noter la non-linéarité de croissance et la nature multi-échelle des structures à détecter. En effet, cette non-linéarité de croissance, traduisant essentiellement un phénomène de ralentissement, induit une variation de la largeur des stries et correspond à une *modulation en fréquence* du signal. De plus, une pièce calcifiée n'étant généralement pas plane, le rayon de courbure des structures qui la composent n'est pas forcément le même en tout point. Cette propriété se traduit sur l'image acquise par un phénomène de *tendance*, terme utilisé pour désigner l'évolution spatiale de la luminance moyenne. La dynamique des niveaux de gris est en ce sens non stationnaire.

2. Organisation mondiale pour l'alimentation et l'agriculture.

3. L'observation se fait à la loupe, au microscope optique ou au microscope électronique à balayage.

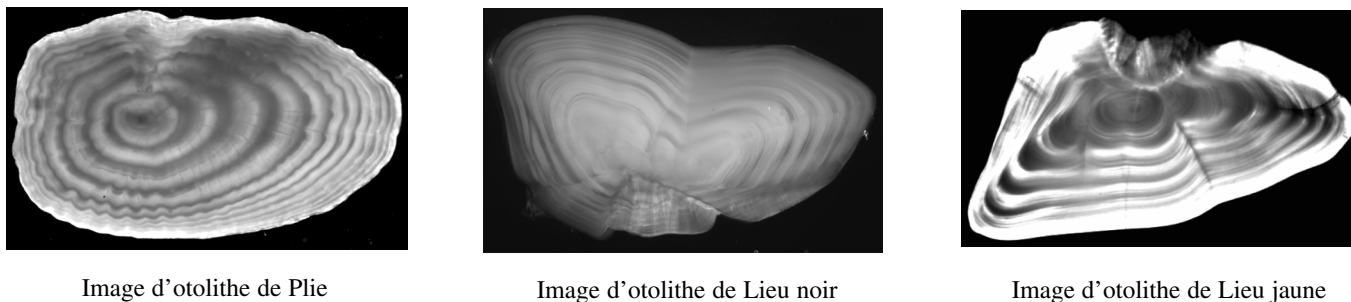
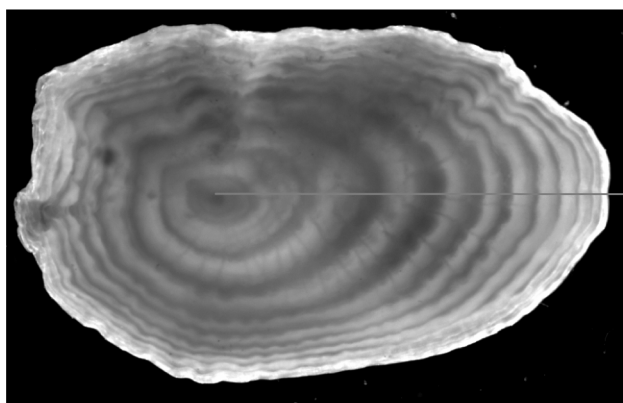
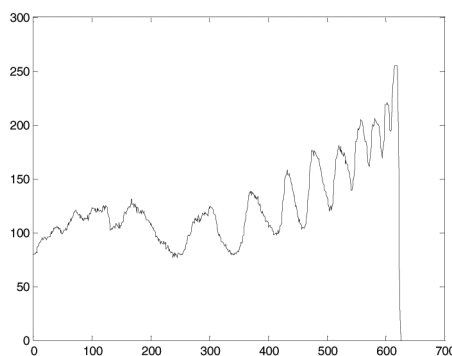


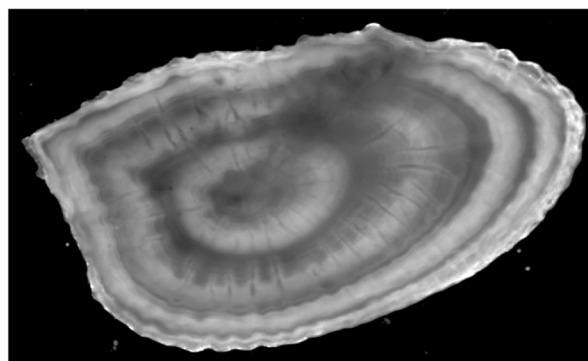
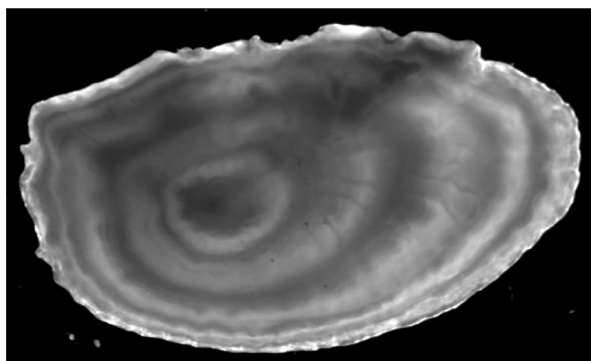
Figure 1. Exemple d'images d'otolithes après grossissement. Ici, l'alternance d'une zone claire et d'une zone sombre représente un an.



(a) Image d'otolithe de Plie de 10 ans



(b) Profil d'intensité le long d'une radiale partant du nucleus et placée sur le plus grand axe d'allongement



(c) Diversités des formes de structures dans deux images d'otolithes de Plie du même groupe d'âge (4 ans)

Figure 2. Caractéristiques des structures dans les images d'otolithes à traiter.

On imagine très bien la difficulté à appliquer des opérateurs locaux de prétraitement et de segmentation invariants par translation sur ce type d'images non stationnaires et à structures de taille variable [Canny, 1986] [Chéhikian, 1989] [Bossart *et al.*, 1997]. Leur utilisation dans un cadre d'analyse multi-échelle se heurte au problème de la détermination automatique d'une suite d'échelles appropriées et de la mise en correspondance des contours [Benzinou, 2000] [Benzinou et Troadec, 2002].

L'analyse de la démarche de l'expert (lecteur de pièces calcifiées), quant il détecte et reconnaît les stries de croissance, montre que le schéma de lecture intègre perception locale et perception globale, un mécanisme très fréquent dans les sciences du vivant. Les stratégies de raisonnement sur lesquelles il s'appuie: (1) la détection du centre d'accrétion, appelé *nucleus*, qui correspond au point de départ de la croissance de l'otolithe et qui apparaît plus sombre que le reste de l'image,

(2) la détection de l'axe (ou des axes) de plus grand allongement de la pièce, qui présente le maximum d'informations et qui constitue généralement l'axe préférentiel de lecture, (3) la localisation des marques de croissance à partir de l'axe de plus grand allongement puis la détection et la reconnaissance des stries de croissance sur toute la dimension de la pièce. Pour ce faire, le lecteur se base sur des données biologiques préalables, en particuliers les deux concepts biomathématiques *gabarits de croissance et morphogénèse* [Murray, 1990] [Troadec, 1992] qui permettent de décrire qualitativement les processus de développement des formes : (a) pour chaque espèce, la croissance de la pièce et donc la *fréquence d'apparition* des stries selon chaque axe est supposée suivre plus ou moins un gabarit donné, gabarit qui peut être décrit grossièrement par un modèle théorique comme celui de Von Bertalanffy, de Gompertz ou celui de forme exponentielle, (b) la structuration du schéma de lecture est aussi basée sur les deux critères de morphologie et continuité globale, critères qui ont principalement trait au concept d'*uniformité* ou *mémorisation des formes* (les anneaux clairs en alternance avec ceux sombres définissent des stries *approximativement concentriques* au nucleus). Le lecteur prête également attention à la présence (fréquente) de fausses marques de croissance, de dédoublements, de taches sombres, d'irrégularités et de discontinuités locales.

S Dans cet article, nous proposons une technique de segmentation d'images d'otolithes basée sur la démodulation de l'image et sur la construction de graphe. Cela consiste à démoduler l'image, étant donnée une loi de croissance représentant l'évolution des tailles des structures, pour soustraire leur non-linéarité de croissance. L'image démodulée résultante pourra ainsi être traitée par un opérateur de détection de taille unique, et segmentée par des techniques de construction de graphe.

Dans la section 2, nous présentons les techniques de prétraitement utilisées pour préparer l'image à une phase de segmentation. Nous détaillons, en section 3, la technique de démodulation et la segmentation par construction de graphe. Notre algorithme de connexion de points de contours par construction de graphe fait référence à certains principes de groupement perceptif, issus de la théorie Gestaltiste. Nous montrerons la

manière d'introduire ces connaissances à côté de la connaissance de l'expert. Nous menons ensuite dans la section 4 une étude de validation de l'approche proposée sur un échantillon témoin de 102 images d'otolithes de poissons Plies. Nous entreprenons de montrer son intérêt et de situer ses limites. De ce travail nous pouvons finalement tirer un certain nombre de conclusions et de perspectives, présentées dans la section 5.

2. Prétraitement des images d'otolithes

Par prétraitement, nous entendons ici les opérations concernant l'homogénéisation du fond de l'image en vue d'une séparation nette des structures de la pièce calcifiée. Il s'agit de filtrer les parasites sur le fond de l'image afin d'avoir un fond uniforme, avec un niveau de gris qui lui serait propre. Ce fond ayant une texture différente de celle de la pièce, se situe dans les niveaux de gris les plus bas. Avec l'effet de la tendance, l'information qui représente la pièce, objet de l'image, se distingue par une différence d'intensité et est constituée de pixels plus clairs que le fond propre de l'image. Une simple analyse de la répartition des niveaux de gris de l'ensemble des points de l'image met généralement en évidence la présence de deux modes qu'il convient de séparer pour isoler l'objet du fond de l'image [Otsu, 1979]. Cependant, compte tenu des divers parasites souvent présents dans le fond, le mode correspondant (premier mode de l'histogramme) sera plus ou moins large selon les diverses luminances de ces parasites. L'acquisition de quelques images dépourvues de pièces calcifiées et la détermination de leurs histogrammes suffit à mettre en évidence cette difficulté. Ces histogrammes révèlent en fait une répartition certes unimodale et à forte concentration du noir, mais à grande largeur de dispersion de telle sorte que le niveau de gris se trouvant dans la queue du mode peut atteindre le niveau maximum de luminance. Dans ces conditions, avec deux composantes qui se chevauchent, on

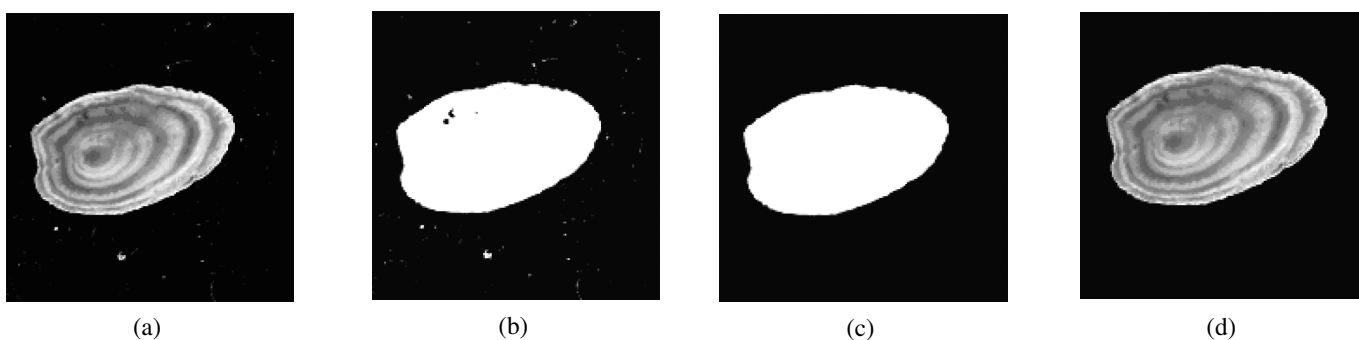


Figure 3. Filtrage des parasites sur l'image brute. (a) Image initiale brute. (b) Résultat de la binarisation automatique de l'image (seuil calculé égal à 78). (c) Masque de sélection. (d) Image filtrée.

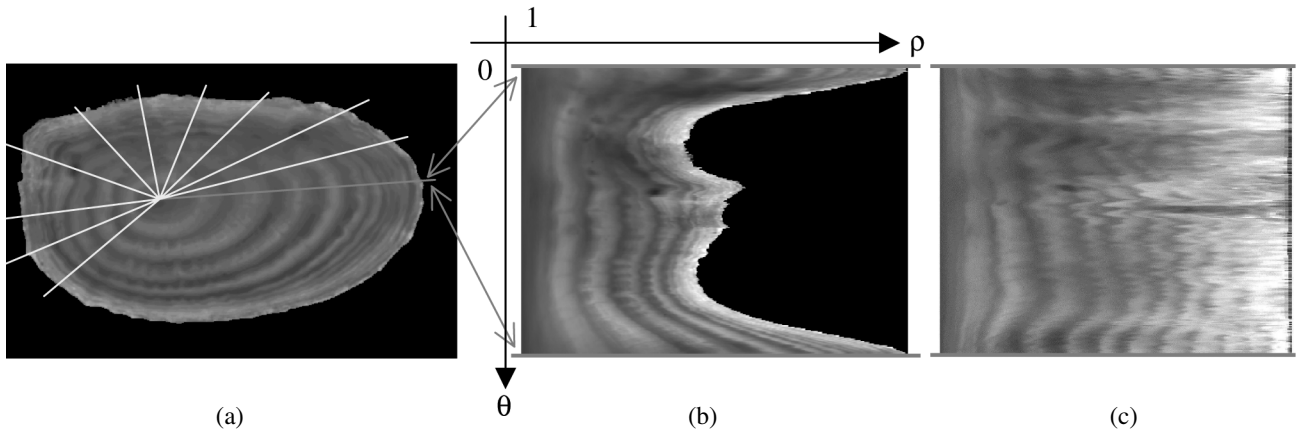


Figure 4. Illustration du principe de la transformée (ρ, θ) par extraction de radiales le long de l'image à transformer. Une radiale est un élément composé des coordonnées de ses deux extrémités et d'un tableau d'intensités. (a) Image originale. (b) Résultat de la transformation (ρ, θ) simple. (c) Image (ρ, θ) étendue.

conçoit aisément que, quel que soit le choix du seuil de binarisation, on ne peut arriver à séparer la classe objet de la classe fond sans commettre d'erreurs de classification (figure 3-b). Cependant, le résultat de ce seuillage automatique par minimisation de la variance (figure 3-b) fait ressortir une composante qui distingue bien la pièce du reste de l'image. Il suffira alors de boucher les trous à l'intérieur de cette composante pour pouvoir définir un masque sélectionnant tous les pixels de la pièce. Cette opération de reconstruction est effectuée à l'aide d'une transformation conditionnelle ou géodésique [Serra, 1982, 1988] [Coster et Chermant, 1989]. À la suite de la phase de bouchage des trous, nous procédons à une opération de labellisation qui consiste à étiqueter les différents objets de l'image. Un simple filtrage permettra enfin de sélectionner la plus grande composante (figure 3-c). Le résultat est un masque qu'on pourra superposer à l'image initiale pour obtenir une image filtrée (figure 3-d).

Par ailleurs, la forme géométrique du masque ainsi obtenu nous permet également de calculer les dimensions du rectangle englobant la pièce, afin d'extraire l'otolithe dans une imagerie aux dimensions réduites, et de calculer le centre d'inertie et les axes principaux afin de déterminer automatiquement l'axe de plus grand allongement de l'otolithe.

3. Démodulation et segmentation

Nous allons maintenant détailler l'approche que nous proposons pour la détection des stries de croissance sur les images d'otolithes, approche basée sur la démodulation de l'image et sur la construction de graphe.

3.1. Transformation de l'image en (ρ, θ) étendue

La transformation d'une image en coordonnées polaires (ρ, θ) est présentée dans [Coster et Chermant, 1989] comme une méthode de représentation analytique des formes. Considérant le centre de gravité d'une forme convexe à analyser comme origine de la transformation, la courbe ouverte résultante peut être assimilée à une signature⁴ (périodique de période 2π) très représentative de la variabilité de la forme. Ici, cette transformation est basée sur le principe de la lecture de l'intensité des pixels se trouvant sur un segment de droite qui est pris comme un vecteur tournant avec un pas angulaire constant. Toutes les radiales partent du centre de l'otolithe (nucleus), comme point de référence de la transformation, vers le bord de l'otolithe. Le point de départ est le grand axe d'allongement de l'otolithe (déterminé auparavant). Les coordonnées du nucleus sont à l'heure actuelle déterminées de manière interactive dans l'attente d'une future automatisation (figure 4 ci-dessus).

Au lieu de conserver la longueur initiale de la radiale et aboutir à une image (ρ, θ) simple, nous l'étendons à la taille, en nombre de pixels, de l'image de sortie pour avoir une image (ρ, θ) étendue ou normée, comme le montre la figure 4 ci-dessus.

L'intérêt d'une telle représentation polaire réside dans sa capacité à mettre en évidence la dynamique de croissance de la pièce calcifiée, et de là à mieux comprendre la morphogenèse des espèces. Cette transformation nous permet également d'avoir les stries sous forme ouverte, ce qui se prête bien à un traitement de détection selon la direction horizontale.

3.2. La focalisation préattentive

Nous avons vu que, pour la lecture d'une image d'otolithe, le lecteur expert ne peut identifier tous les éléments à la fois. Il dirige d'abord son attention sur les événements marquants de la

4. Du type « wave form »

croissance des structures calcifiées, tels que le nucleus et le grand axe de croissance. Cela lui permet d'avoir de l'information sûre guidant sa démarche globale de reconstruction des stries de croissance. Nous reprenons cette idée de focalisation d'attention dans un nouveau procédé d'échantillonnage angulaire lors de la transformation (ρ, θ) étendue (figure 5).

Cela consiste d'une part, à rendre non régulier l'échantillonnage angulaire et d'autre part, à faire en sorte que les informations pertinentes de la zone privilégiée de croissance soient situées au centre de l'image transformée (l'image (ρ, θ) étendue). En échantillonnant deux fois plus dans des secteurs prédéfinis autour du grand axe de croissance, nous rétablissons l'équité avec les radiales les plus petites partant d'un nucleus excentré. Nous obtenons ainsi un agrandissement des secteurs porteurs d'informations pertinentes et nous préservons les stries au niveau de la radiale principale.

3.3. Démodulation et filtrage

En réponse au problème de l'invariance par translation des opérateurs locaux existants, nous proposons de démoduler l'image (ρ, θ) résultante en vue de soustraire la non-linéarité de la largeur des structures à détecter. Précisément, étant donnée une information *a priori* sur la loi de croissance régissant les structures, nous cherchons à corriger l'effet de la modulation en opérant une anamorphose par la loi de croissance réciproque.

Soit $s(t)$ le signal non stationnaire représentant l'information structurelle le long du grand axe de l'otolithe (signal 1D en niveau de gris le long de la plus grande radiale). Ce signal fournit une représentation du signal biologique de croissance du poisson qui est périodique de période 1 an. $s(t)$ peut donc être interprété comme le résultat d'une modulation en fréquence suivant la loi de croissance du poisson $l = \Phi(t)$:

$$s(t) = A \sin(2\pi \cdot t)$$

$$s(t) = A \sin(2\pi \cdot \Phi^{-1}(l)) = s(l)$$

où t est le temps biologique, et l la distance au noyau sur le grand axe de l'otolithe.

Connaissant $\Phi(t)$, le signal $s(l)$ peut donc être démodulé via la relation réciproque $t = \Phi^{-1}(l)$.

Pour les autres radiales, nous adoptons une allométrie linéaire du type: $t = \Phi^{-1}(\frac{L}{L_c} \cdot l_c)$, où L désigne la longueur du grand axe, l_c la distance au noyau sur la radiale courante et L_c sa longueur.

Pour décrire la dynamique spatio-temporelle des structures des images d'otolithes, les biologistes ont recours à des modèles théoriques couramment utilisés, comme le modèle de *Von Bertalanffy* [Pauly, 1979], celui de *Gompertz* [Ricker, 1975] ou le modèle exponentiel [Lagardère, 1989]. Cependant, ce modèle théorique n'est qu'un schéma de croissance générale de l'espèce considérée. Il ne s'agit pas de loi de modélisation précise et rigide de ces phénomènes naturels, mais simplement d'estimation assez grossière de leur évolution. Son paramétrage est généralement obtenu de manière empirique suite à des essais répétés. C'est pourquoi, nous allons lui préférer un modèle statistique moyen calculé sur la base des lois de croissance d'un échantillon d'individus donné (pris comme base d'apprentissage). On calcule à partir des lois individuelles mesurées (figure 6), une loi moyenne que nous employons pour démoduler les signaux extraits des otolithes (figure 7).

Une fois le signal $s(l)$ démodulé (figure 8), nous lui appliquons un filtrage passe-bas g_σ de type gaussien et de large variance σ^2 , afin d'extraire sa composante basse-fréquence (dénommée tendance) que l'on élimine ensuite par soustraction :

$$s_T(t) = (s_D * g_\sigma)(t)$$

$$s_D^{ST}(t) = s_D(t) - s_T(t)$$

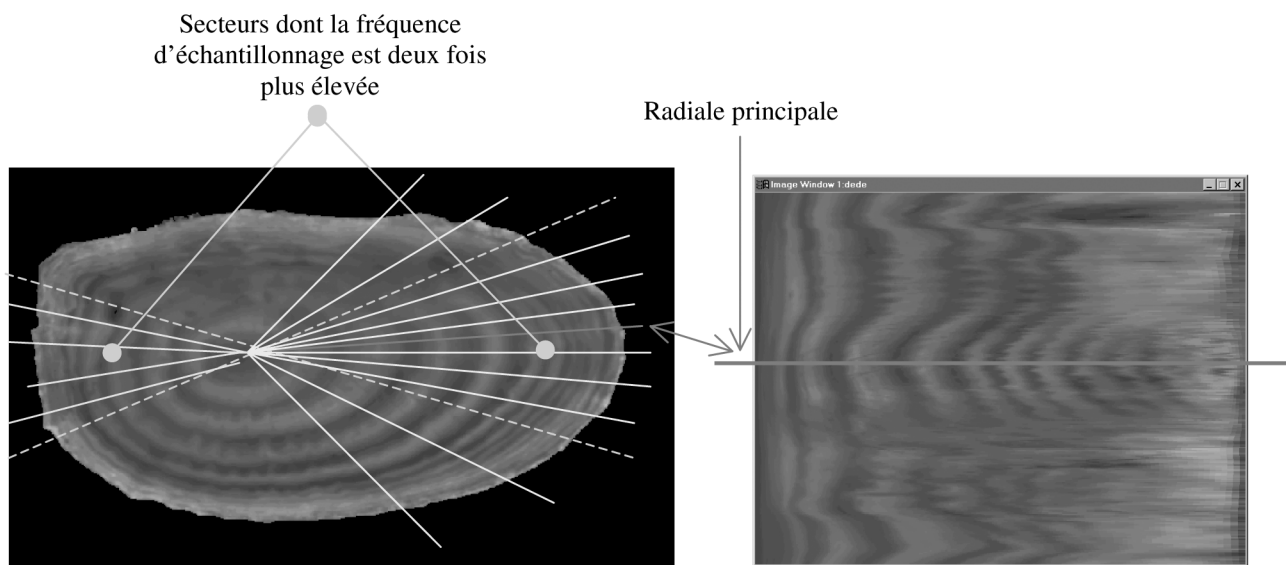


Figure 5. Modification du procédé d'échantillonnage dans la transformation (ρ, θ) étendue.

où $s_D(t)$ désigne le signal démodulé, $s_T(t)$ le signal de la tendance récupérée et $s_D^{ST}(t)$ le signal démodulé et sans tendance.

3.4. Pré-segmentation de l'image démodulée et sans tendance

Nous entendons par pré-segmentation une décomposition préalable de l'image (ρ, θ) étendue en un ensemble d'objets représentant plus ou moins fidèlement les centres médians des stries claires ou sombres, qui correspondent respectivement aux pics et aux vallées d'intensité. Plus précisément, nous cherchons ici à sélectionner un type de structures (pics ou vallées) sur lequel le traitement de reconstruction de graphe sera réalisé.

3.4.1. Détection

Nous utilisons pour cela l'opérateur *chapeau Haut-de-Forme*⁵ bien connu en morphologie mathématique [Serra, 1982, 1988] [Coster et Chermant, 1989]. Cela consiste à retrancher de l'image en niveau de gris son ouvert (obtention des pics) ou bien son fermé (obtention des vallées). La taille du chapeau, et donc des structures qui seront retenues, est relative à celle de l'élément structurant effectuant l'ouverture ou la fermeture. Pour s'adapter à la géométrie de l'image et préserver l'information à l'extrémité de la radiale, information correspondant à la dernière strie, nous avons développé un élément structurant linéaire, non symétrique, orienté vers la gauche. La taille de cet élément est réglée en fonction de la taille de la plus petite strie dans l'image à traiter (figure 9).

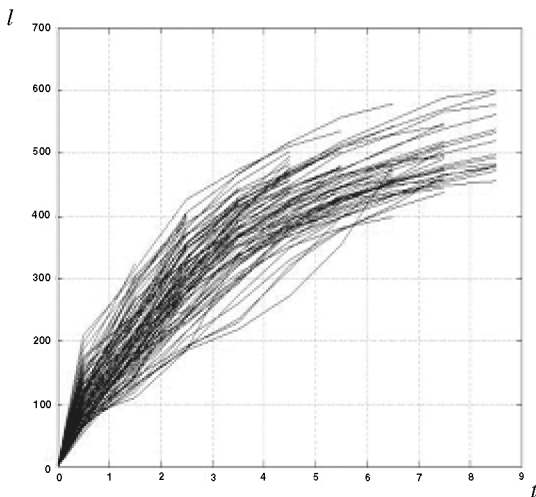


Figure 6. Ensemble des lois de croissance servant comme base d'apprentissage pour le calcul du modèle statistique moyen.

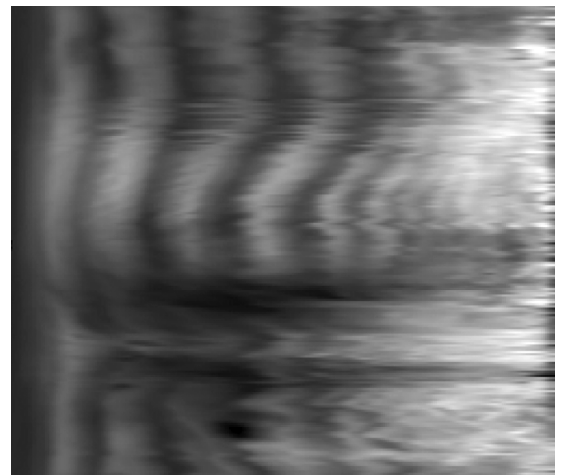


Figure 7. Image (ρ, θ) démodulée obtenue à partir de l'image originale représentée en figure 5.

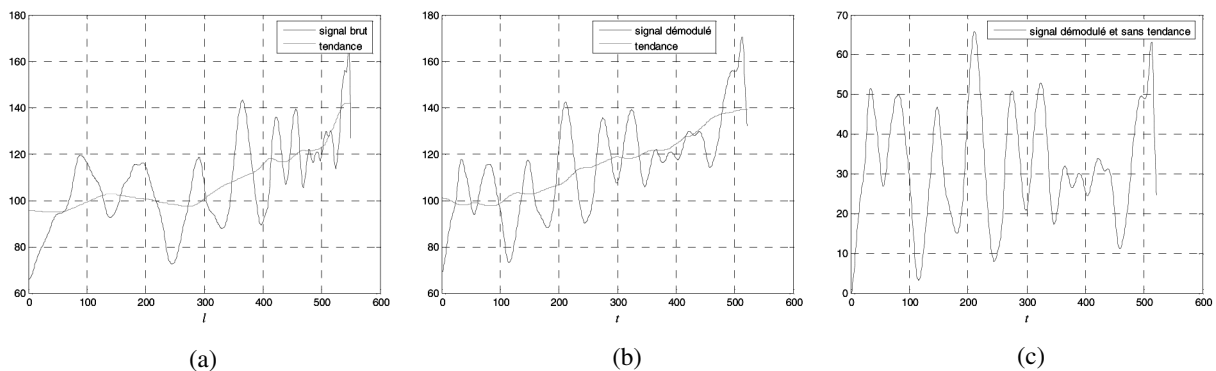


Figure 8. Illustration de l'effet de la démodulation à partir du profil de la grande radiale de l'image originale donnée en figure 5. En (a) est représenté le signal avant démodulation. Remarquons la non-linéarité de la largeur des accroissements. En (b), le signal démodulé montre bien la quasi-suppression de la non-linéarité de la largeur des accroissements. Cela se traduit par un resserrement sur les premières stries tandis que les dernières sont plus espacées. La dynamique des pics et des vallées est redevenue à peu près régulière. En (c) est représenté le signal démodulé et sans tendance.

5. « Top-Hat »

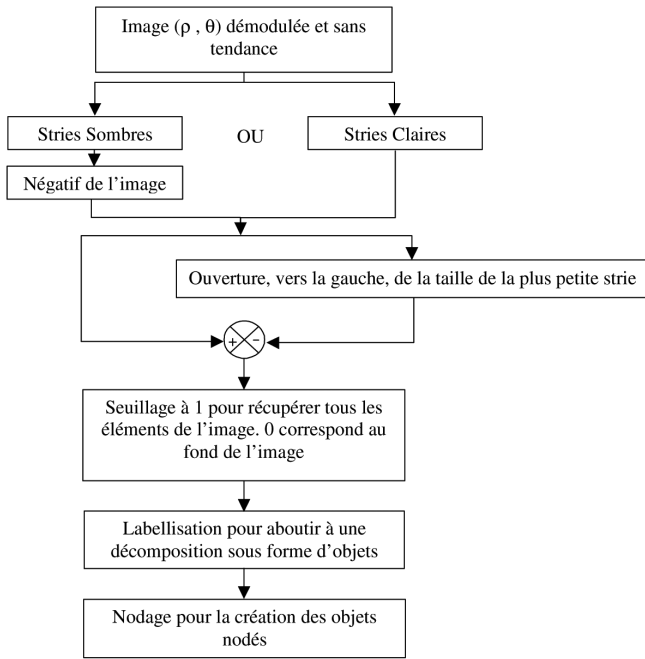


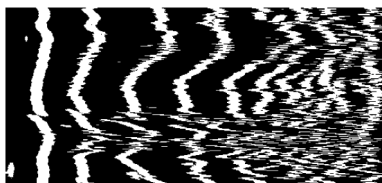
Figure 9. Chaîne de pré-segmentation.

L'estimation automatique de la largeur de la plus petite strie est assurée de façon non linéaire à partir de la loi de croissance *a priori*. En effet, connaissant $l = \Phi(t)$, la longueur L du grand axe de l'otolithe permet d'estimer grossièrement l'âge par : $Age = \Phi^{-1}(L)$. Par conséquent, la taille de la plus petite strie T_{ps} est grossièrement estimée via la relation :

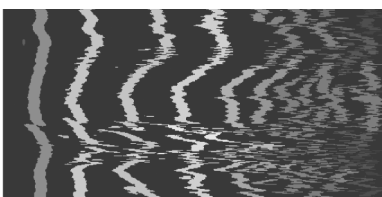
$$T_{ps} = \frac{L - \Phi(Age - 1)}{2}$$



(a) Obtention des stries claires de l'image démodulée représentée en figure 7



(b) Résultat de la binarisation automatique par seuillage à 1



(c) Étiquetage des objets détectés

Figure 10. Illustration de l'algorithme de détection.

Cette étape se termine par une binarisation (par seuillage à 1, le niveau zéro étant réservé pour le fond de l'image) puis labellisation afin d'étiqueter les objets détectés (figures 9 et 10).

3.4.2. Nodage

À l'issue de l'étape de détection, le résultat est une première décomposition de l'image en objets connexes, chacun étant différencié par une étiquette. À partir de l'image résultante, est effectuée ensuite une opération de nodage pour la création des objets nodés. Cela consiste à découper l'image en un nombre de secteurs horizontaux (64 secteurs par exemple) et à chercher les points d'intersection entre la médiane de chaque secteur et les objets de l'image (figure 11). Un nœud est donc défini comme une structure de données contenant les coordonnées et l'étiquette d'un point. Ces points sont les centres des objets traversés par la médiane (milieu) d'un secteur. Par conséquent, un objet nodé est tout simplement une liste de nœuds de même étiquette [Pavlidis, 1980, 1982]. Nous éliminons enfin tous les objets qui n'ont qu'un seul nœud (figure 13).

3.5. Construction du graphe

La construction du graphe, dernière étape du traitement avant de revenir dans le repère cartésien, consiste à relier les objets nodés afin de reconstituer complètement les stries de l'otolithe. Nous allons nous appuyer sur certains principes du groupement perceptif, chers à la théorie Gestaltiste, et sur le concept d'*uniformité* ou *mémorisation des formes* auquel fait référence le lecteur expert dans son schéma d'interprétation et de reconnaissance des structures (voir § 1). Cette propriété, transposée dans un repère (ρ, θ) , se traduit approximativement par un parallélisme des stries entre elles. Les principes du groupement perceptif quant à eux sous-entendent des règles de la structure et de la forme «Gestalt», comme (1) **la proximité**: les éléments proches les uns des autres ont plus facilement tendance à donner naissance à une forme les rassemblant en un même groupe, (2) **la similitude**: les éléments similaires ont plus de chance de se regrouper que ceux qui ne le sont pas, (3) **la continuité**: le système visuel favorise la bonne continuation des éléments visuels qui composent les formes, (4) **la symétrie**: à un stade très précoce du traitement, le système visuel porte également beaucoup d'intérêt à la propriété de symétrie ou parallélisme des formes à percevoir, (5) **la fermeture**: le système visuel apprécie davantage les courbes fermées, (6) **la prégnance ou la bonne forme**: nous avons tendance à privilégier la perception de la forme la plus simple et la meilleure dans la mesure du possible. Nos perceptions dépendent non seulement des caractéristiques des éléments, mais également des interactions spatiales qu'entretiennent ces éléments entre eux. En fait, *le tout serait plus grand que la somme des parties* [Grossberg et Mingolla, 1985] [Kanizsa, 1997].

L'algorithme de reconstruction des formes que nous proposons ici se base sur deux principes de connexion :

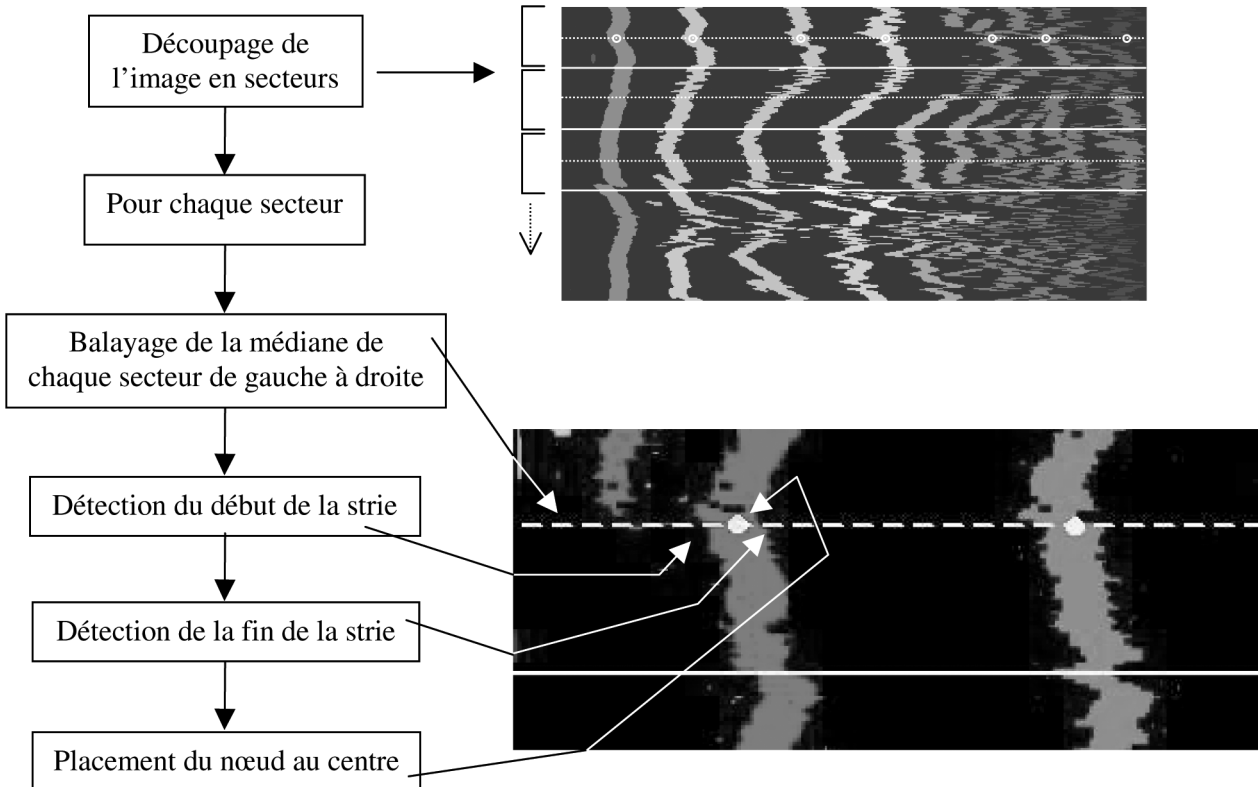


Figure 11. Obtention des nœuds et des objets nodés.

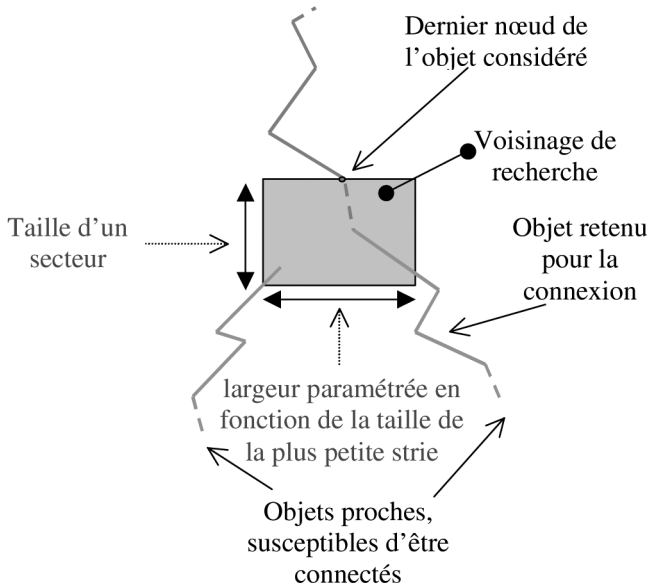


Figure 12. Principe de pré-connexion par proximité.

1. une pré-connexion par proximité des objets les plus proches. Cela permet de reconstituer les discontinuités locales,
2. une connexion par parallélisme des nœuds les plus éloignés. En se basant sur le principe de la mémorisation des formes, cette connexion tente d'utiliser l'information de forme des stries voisines pour reconstituer la globalité de chaque strie.

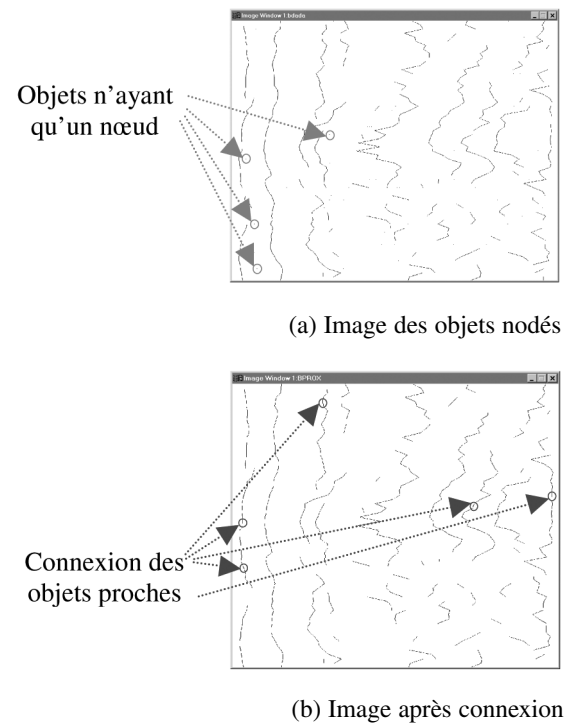


Figure 13. Illustration de la pré-connexion.

3.5.1. Pré-connexion par proximité

La connexion des objets proches va se faire selon des critères de distance et de direction (figure 12). En effet, la recherche d'un objet à connecter se fait dans un voisinage rectangulaire, paramétré par la taille de la plus petite strie. Dans le cas où plusieurs objets

se présentent dans ce voisinage de recherche, nous choisissons l'objet le plus proche de la verticale du nœud considéré (figure 13).

3.5.2. Connexion par parallélisme

Notre point de départ est constitué des éléments sûrs que nous obtenons par focalisation sur le grand axe de croissance (ces éléments sont ainsi situés sur la médiane de l'image). Pour donner une chance de reconstruction égale à toutes les stries, on va sélectionner à chaque fois le plus petit élément dans l'ensemble des stries à compléter. Cet élément est reconstruit nœud par nœud (figure 14) selon les critères énoncés ci-dessous :

Cas (1) : un objet (une strie incomplète) qui possède deux voisins dont un seul est plus grand que lui. Dans ce cas de figure, on prolonge la strie d'un nœud (soit un secteur) parallèlement au plus grand objet.

Cas (2) : un objet dont les deux voisins sont plus grands que lui. Dans ce cas, on suit l'axe médian défini par les deux objets voisins pour prolonger la strie d'un nœud.

Cas (3) : un objet qui ne possède pas de voisin plus grand que lui (un seul voisin de même taille). Dans ce cas, l'objet est prolongé verticalement d'un nœud.

Cas (4) : un objet qui ne possède qu'un seul voisin, plus grand que lui. L'objet est ici prolongé parallèlement à son voisin d'un nœud.



En plus, dans le repère cartésien d'origine, les stries sont supposées fermées, chaque objet du côté haut de l'image doit en principe être relié à un autre objet du côté bas de l'image, qui lui correspond. C'est pourquoi nous allons à chaque fois alterner une reconstruction vers le haut (d'un objet sélectionné parmi les éléments sûrs) et une reconstruction vers le bas (d'un autre objet sélectionné parmi les éléments sûrs). Ceci est illustré par la chaîne de traitement donnée sur la figure 15 suivante.

3.6. Remodulation et transformation (ρ, θ) inverse

Cette étape finale se fait en deux temps : la remodulation de chaque radiale à partir des objets connectés (les stries recons-

truites) et le passage en coordonnées cartésiennes des points de l'image (ρ, θ) remodulée résultante (figure 16).

4. Résultats et discussion

Pour mettre en évidence l'efficacité de l'algorithme proposé, nous avons mené une étude de validation sur un ensemble d'images d'otolithes dont l'âge a préalablement été estimé par un lecteur expert. Il s'agit du même échantillon témoin de 102 images d'otolithes de Plies que nous avons utilisé pour expérimenter le modèle « *template qualitatif* » décrit dans [Troadec *et al*, 2000]. Le terme erreur utilisé par la suite est relatif à un éventuel désaccord avec la lecture de cet expert.

La récapitulation des résultats obtenus et leur comparaison avec ceux provenant d'une approche de détection monodimensionnelle [Welleman et Storbeck, 1995] et ceux du template qualitatif sont illustrées dans le tableau 1 ci-après.

Pour les otolithes de poissons jeunes (entre 1 et 3 ans), la technique proposée fournit tout aussi rapidement une estimation exacte (0% d'erreur) de l'âge et une modélisation satisfaisante des stries, qui peut être utilisée pour un calcul automatique de la croissance. Ces résultats sont nettement supérieurs à ceux obtenus avec la méthode de détection monodimensionnelle existante, où le pourcentage d'erreur atteint 50% au groupe d'âge 2. Pour les groupes d'âge de 1 à 5 ans, on note une concordance de 90% en moyenne avec celle de l'expert, contrairement à 80% pour la technique utilisant le template qualitatif. Aussi, l'amplitude maximale d'erreur est réduite à -1 ans contrairement à ± 2 ans pour la méthode monodimensionnelle et -2 ans pour celle du template. Pour les otolithes de poissons plus âgés (de 5 à 8 ans), cette concordance décroît avec un pourcentage d'erreur de 30% et une amplitude maximale de ± 2 ans. Ces erreurs viennent d'une sur- ou sous-estimation de l'âge par l'algorithme développé, ce qui correspond à des stries périphé-

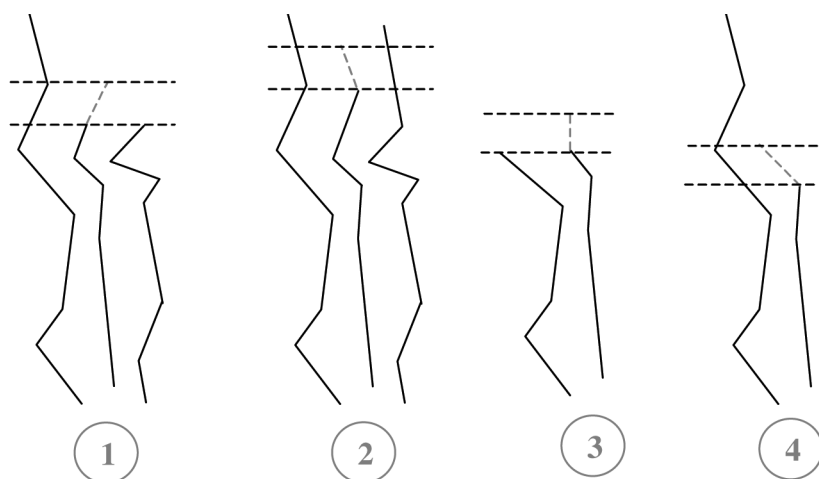


Figure 14. Les différentes possibilités dans l'algorithme de connexion des stries.

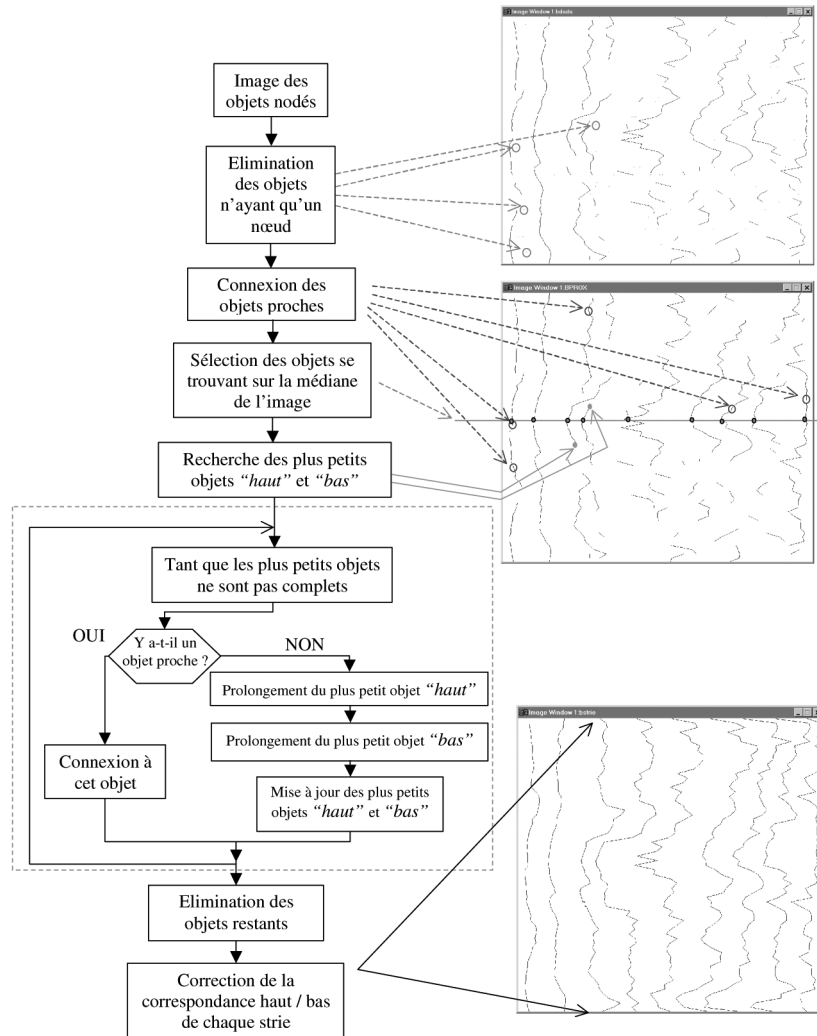


Figure 15. Chaîne complète du traitement de connexion.

 Tableau 1. Comparaison des performances de la méthode proposée avec celles de la méthode monodimensionnelle et celles du template qualitatif. R désigne le pourcentage de réussite, c.-à-d. de bonne classification. A_M désigne l'amplitude d'erreur maximale.

N = 102	Méthode Monodimensionnelle	Template qualitatif	Algorithme proposé
1 à 3 ans	R = 50 % $A_M = [-2, +1]$	R = 100 % $A_M = [0, 0]$	R = 100 % $A_M = [0, 0]$
1 à 5 ans	R = 50 % $A_M = [-2, +2]$	R = 80 % $A_M = [-2, 0]$	R = 90 % $A_M = [-1, 0]$
5 à 8 ans		R = 20 % $A_M = [-5, +1]$	R = 70 % $A_M = [-2, +2]$

riques qui sont très fines et très resserrées. La méthode de template qualitatif, elle, présente un pourcentage d'erreur qui atteint 80% et une amplitude maximale de -5 ans.

Quant aux sources d'erreur dans l'estimation de l'âge par l'algorithme proposé, nous relevons :

1. la sensibilité de la transformation polaire au mauvais pointage du nucleus. Ce pointage étant pour l'instant manuel, des modifications plus ou moins significatives de la géométrie des structures de l'image transformée peuvent apparaître si ce nucleus, centre de la transformation, est mal positionné. En effet, une déformation des stries recherchées dans l'image

(inclinaison des structures et perturbation de leur parallélisme) se répercute naturellement sur la forme des résultats de la reconstruction (figure 17).

2. la sensibilité à la sélection des objets sur la médiane de l'image. En effet, le point de départ de la connexion proprement dite sont les éléments détectés sur le grand axe de croissance, qui seront prolongés par la suite en vue d'avoir des stries complètes. Une détection erronée des éléments de stries sur cet axe se traduit directement par une sur- ou sous-estimation de l'âge (figure 17),

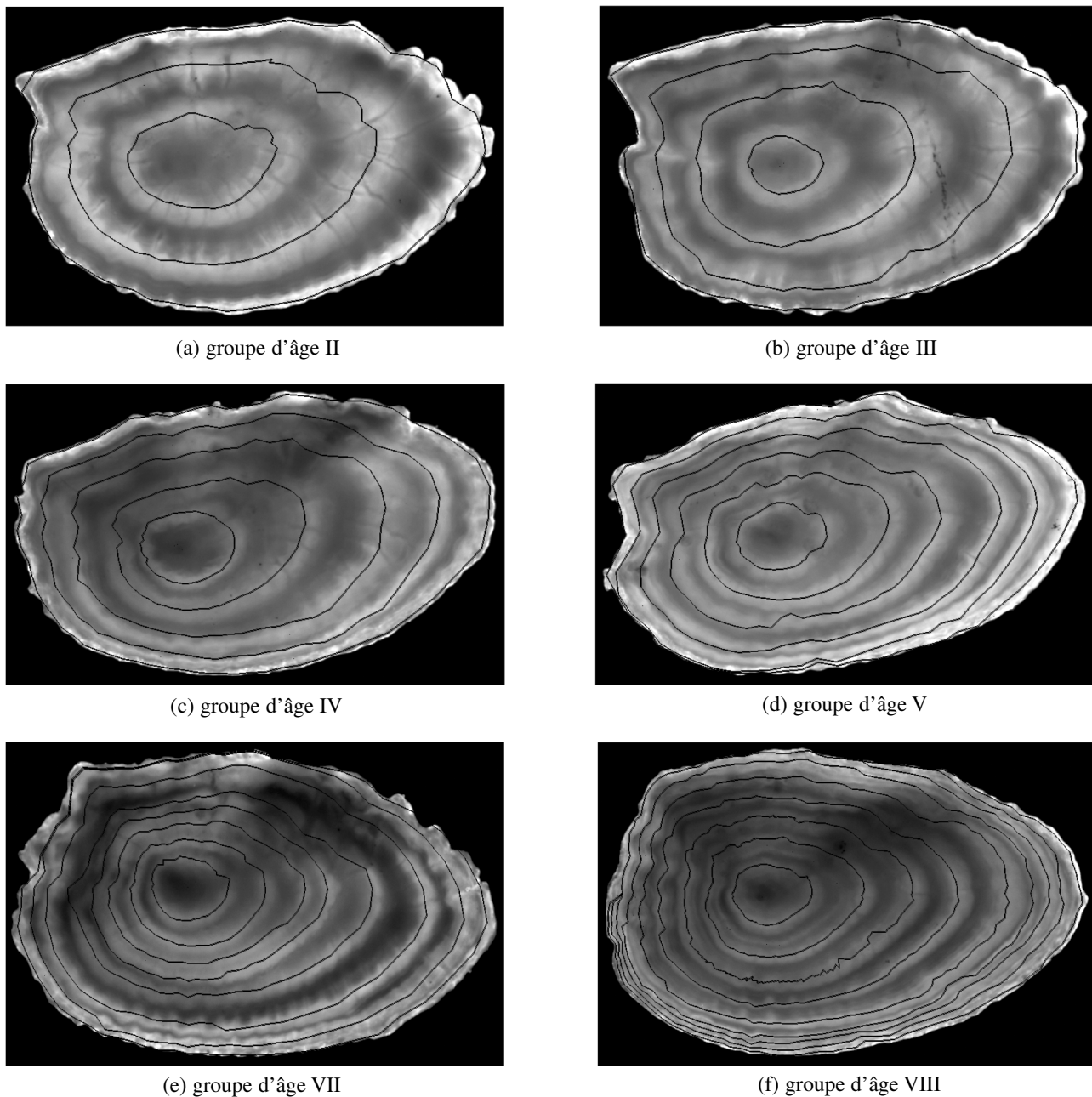


Figure 16. Exemples de résultats obtenus avec l'algorithme développé.

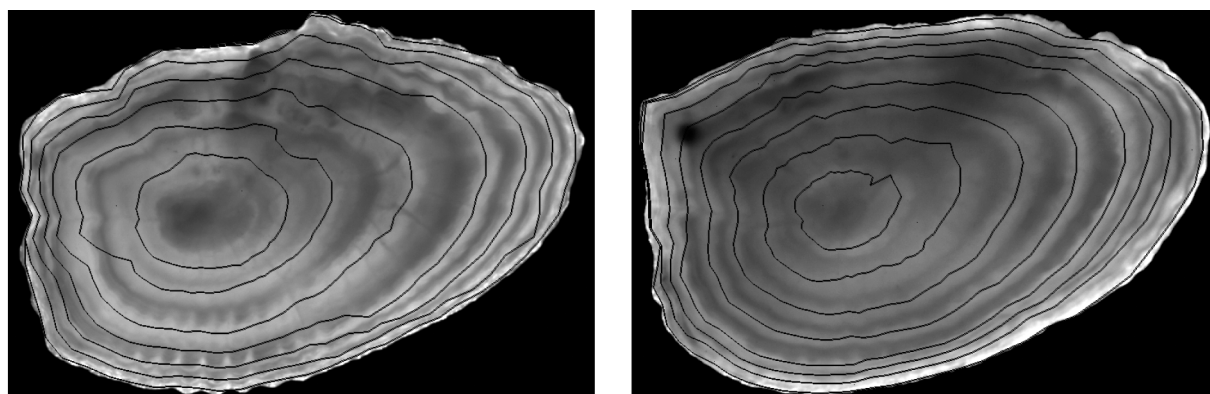


Figure 17. Illustration des problèmes de la sensibilité au mauvais pointage du nucleus et de la sensibilité à la sélection des éléments de stries sur la médiane de l'image. Dans l'image représentée à gauche, on note la présence d'un graphe erroné au voisinage de la première strie partant du nucleus. Dans l'image représentée à droite, l'avant-dernière strie partant du nucleus n'a pas été détectée.

3. la dépendance vis-à-vis du gabarit de croissance. En effet, la loi de croissance *a priori* adoptée pour la démodulation de l'image n'est qu'une estimation grossière de l'évolution de la dynamique spatio-temporelle des otolithes étudiées. La variabilité naturelle de cette dynamique au sein du même groupe d'âge peut sensiblement réduire le bénéfice attendu de la démodulation. Cela se traduit par des structures périphériques qui demeuraient resserrées, ce qui induit certaines erreurs dans la reconstruction des stries et de là dans l'estimation de l'âge. C'est pourquoi nous nous attachons dans l'état actuel de notre travail à la recherche d'une méthode permettant d'extraire automatiquement, sur chaque individu (otolithe), cette loi de croissance...

Soulignons que le temps moyen de traitement par image, relevé sur un ordinateur Pentium muni d'un processeur 2100 Mhz et équipé de 512 Moctets de RAM, est de 23 secondes. Ce temps est relevé pour l'instant sans optimisation notable de l'aspect algorithmique. Il dépend notamment de la taille de l'otolithe (donc de l'âge) de façon presque proportionnelle. Le logiciel de traitement utilisé est Matlab R13 de la société MathWorks.

5. Conclusion et perspectives

Nous avons proposé dans cet article une méthode de segmentation des images d'otolithes dont les structures sont de nature multi-échelle. Basée sur la démodulation et la construction de graphe, cette méthode originale se présente comme une alternative à la méthodologie traditionnelle de détection de contours par opérateurs locaux. Également, nous avons porté une attention particulière à la manière d'introduire nos connaissances biologiques préalables. Les résultats obtenus sont très encourageants même si l'approche développée n'est pas encore prête à 100% pour le traitement en routine des images d'otolithes. En fait, l'algorithme donne une estimation très précise de l'âge d'otolithes de poissons plus jeunes, mais des améliorations restent à faire pour le traitement des otolithes âgées. Pour être prête à une utilisation en routine, cette technique nécessite l'appui de l'extraction automatique de la loi de croissance biologique individuelle. Ce besoin nous a conduit à amorcer une approche d'extraction automatique de cette loi, utilisant une technique de transformation temps-fréquence [Fablet *et al.*, 2003]. Les perspectives que nous proposons à ce niveau concernent essentiellement la difficulté de la localisation et de la description simplifiée de la composante recherchée dans la représentation. Quant à la part de subjectivité, présente dans cette méthode d'estimation de l'âge et de la croissance, elle se limite à la stricte initialisation de la position du nucleus, qui se fait actuellement d'une manière interactive malgré la tentative d'automatisation initiée dans [Cao et Fablet, 2006]. Il semble donc nécessaire de poursuivre la recherche dans cette direction afin d'aboutir à un algo-

ritme plus efficace et concluant. Par ailleurs, la bonne adéquation de l'algorithme développé nous permet de confirmer que le principe proposé d'intégration de connaissances *a priori* sur la croissance et la morphogenèse des structures à détecter est capital en segmentation d'images de pièces calcifiées. L'extension des méthodes développées au traitement d'autres otolithes plus complexes peut se faire, à notre avis, selon le même fil conducteur, en introduisant là aussi les connaissances *a priori* pertinentes.

6. Références

- [Benzinou, 2000] A. BENZINO, « Vers un système de vision par ordinateur pour la reconnaissance de structures sur des pièces calcifiées (otolithes et statolithes). Application à la détermination de l'âge et de paramètres de croissance de poissons et de céphalopodes », *Thèse de Doctorat*, 27 janvier 2000.
- [Benzinou et Troadec, 2002] A. BENZINO et H. TROADEC, « Estimation de l'âge assistée par ordinateur », chapitre VI, in: *Panfili J., de Pontual H., Troadec H., Wright P. J. (éd.), Manuel de sclérochronologie des poissons, co-édition Ifremer-Ird*, pp. 196-236, 2002.
- [Bossart *et al.*, 1997] P.-L. BOSSART, D. DAVID, J.-M. DINTEN et J.-M. CHASSERY, « Détection de contours réguliers dans des images bruitées et texturées : une approche par contours actifs multi-échelle », *Traitement du Signal*, 1997, Vol. 14, No. 2, pp. 209-225.
- [Cao et Fablet, 2006] F. CAO and R. FABLET, « Automatic morphological detection of otolith nucleus », *Pattern Recognition Letters*, 27(6): 658-666, 2006.
- [Canny, 1986] J. CANNY, « A Computational Approach to Edge Detection », *IEEE Transactions on PAMI: Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, Vol. 8, No. 6, pp. 679-698.
- [Chéhikian, 1989] A. CHEHIKIAN, « Binarisation d'images : deux solutions à ce problème », *Traitement du Signal*, 1989, Vol. 6, No. 1, pp. 59-68.
- [Coster et Chermant, 1989] M. COSTER et J. L. CHERMANT, « Précis d'analyse d'images », *Presses du CNRS*, Paris, 1989.
- [Fablet *et al.*, 2003] R. FABLET, A. BENZINO, C. DONCARLI, « Analyse et modélisation temps-fréquence robuste appliquées à l'interprétation d'images de pièces calcifiées », *19^e Colloque GRETSI sur le Traitement du Signal et des Images (GRETSI'03)*, Paris, France, 8-11 septembre 2003, vol. 2, pp. 499-502.
- [Grossberg et Mingolla, 1985] S. GROSSBERG and E. MINGOLLA, « Neural Dynamics of Perceptual Grouping: Textures, Boundaries, and Emergent Segmentations », *Perception & Psychophysics*, 1985, Vol. 38, No. 2, pp. 141-171.
- [Kanizsa, 1997] G. KANIZSA, « La grammaire du voir. Essais sur la perception », *Diderot*, Paris, 1997.
- [Lagardère, 1989] F. LAGARDERE, « Influence of Feeding Conditions and Temperature on the Growth Rate and Otolith-Increment Deposition for Larval Dover Sole *Solea solea* L. larvae », *Rapp. P. v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer*, 1989, Vol. 191, pp. 390-399.
- [Murray, 1990] J. D. MURRAY, « Mathematical Biology », *Springer-Verlag*, Second Printing, 1990.
- [Pauly, 1979] D. PAULY, « Gill Size and Temperature as Governing Factors in Fish Growth: a Generalization of Von Bertalanffy's Growth Formula », *Ber. Inst. Meereskd. Christian-Albrechts Univ. Kiel*, 1979, No. 63, 156 pages.
- [Pavlidis, 1980] T. PAVLIDIS, « Structural Pattern Recognition », (2nd Ed.), *Springer-Verlag*, Berlin, Germany, 1980, *Springer Series in Electrophysics 1*.
- [Pavlidis, 1982] T. PAVLIDIS, « Algorithms for Graphics and Image Processing », *Springer-Verlag*, New York, USA, 1982.



- [Otsu, 1979] N. OTSU, « A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, No. 1, 1979, pp. 62-66.
- [Ricker, 1975] W. E. RICKER, « Computation and Interpretation of Biological Statistics of Fish Populations », *Bull. Fish. Res. Board Can.*, 1975, No. 191, 382 pages.
- [Serra, 1982] J. SERRA, « Image Analysis and Mathematical Morphology », *Academic Press*, London, 1982.
- [Serra, 1988] J. SERRA, « Image Analysis and Mathematical Morphology: Theoretical Advances », (Serra J., Ed.), *Academic Press*, London, 1988.
- [TroaDEC, 1992] H. TROADEC, « Reconnaissance de structures sur des pièces calcifiées par imagerie numérique dans un but de suivi d'un stock halieutique », *Thèse de Doctorat en Biomathématiques de l'Université Paris 7*, 1990, 259 pages.
- [TroaDEC et al., 2000] H. TROADEC, A. BENZINOU, V. RODIN, J. LE BIHAN, « Use of a deformable template for two-dimensional growth ring detection of otoliths by digital image processing: Application to plaice (*Pleuronectes platessa*) otoliths », *Fisheries Research*, Volume 46, Issue 1-3, 1 May 2000, pp. 155-163.
- [Welleman et Storbeck, 1995] H.C. WELLEMAN and F. STORBECK, « Automatic Ageing of Plaice (*Pleuronectes platessa* L.) Otoliths by Means of Image Analysis », *In: Recent Developments in Fish Otolith Research*, (Secor D. H., Dean J. M. and Campana S.E., Ed.), 1995, pp. 271-282.



Abdesslam **Benzinou**

Abdesslam Benzinou obtient une thèse de doctorat en traitement du signal et de l'image à l'Université de Bretagne Occidentale en janvier 2000. En 2001, il est nommé Maître de Conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB) et exerce ses activités de recherche au sein du laboratoire RESO. Actuellement il est responsable de l'équipe « Vision et photonique », composante du laboratoire. Ses travaux de recherche portent sur la conception et la mise au point de systèmes de vision artificielle dédiés en particulier aux applications biomarine et biosanté.