

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE
EN
MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE APPLIQUÉES

PAR
SERGE RUFIN OKANA

EXTRACTION D'ANNEAUX DE CROISSANCE À PARTIR D'IMAGES
D'OTOLITHES DE POISSONS.

SEPTEMBRE 2000

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Remerciements

La réalisation de ce mémoire de maîtrise fut pour moi une expérience aussi enrichissante qu'inoubliable. Elle a été rendue possible grâce à l'appui de nombreuses personnes.

Tout d'abord, je tiens très sincèrement à remercier mes deux directeurs de recherche, Alain Chalifour et Fathallah Nouboud, sans qui ce mémoire n'aurait jamais existé. Remerciements pour m'avoir proposés un sujet enrichissant, pour leurs idées, leurs suggestions, leur encouragement, leur support, pour m'avoir bien guidé et enfin pour leur rigueur dans la rédaction de ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à tous mes collègues du département de Mathématiques et Informatique, du Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Imagerie et Calcul Scientifique (LIRICS), à Alain Morissette et Robert Ouelette, ainsi qu'à Lise et Manon qui m'ont apporté support et compréhension quand le moment se faisait sentir.

Je désire également remercier les stagiaires Cédric Lambert, de l'Université de Franche-Comté, et Benjamin Deprost, de l'Université de Bourgogne, dont la collaboration lors de cette recherche a été très appréciée.

J'aimerais aussi remercier Kilani Ghoudi, Bruno Remillar et Belkhassem Abdous pour les discussions que nous avons eues à propos de mon mémoire et pour les précieux conseils qu'ils m'ont donnés pour les parties touchant les statistiques.

Remerciements, au gouvernement du Gabon et au C.E.G.E.P. Saint-Jean-sur-Richelieu pour le soutien moral, financier et pour la disponibilité de ses agents.

Merci, du plus profond de mon coeur, à ma famille, à ma mère Romaine, mon

grand-père Omar B, ma tante Philomène, mon oncle Jean-Paul, mon frère Gêrôme, ma soeur Jusline et à ma fiancé Isabelle pour leur amour, leur encouragement, leur support et pour avoir cru en moi tout au long de mes études.

Je tiens finalement à remercier Martin Larose, du Centre Ecologique du Lac St-Jean, pour avoir fourni les otolithes, le personnel du département de Chimie-Biologie et plus particulièrement Nathalie Godbout, pour la préparation des otolithes, Dr Monique Cadrin et Dr Guy Massicotte, pour avoir permis l'utilisation de leur matériel de saisie.

Dédicace

Ce mémoire est dédié à ma tante Philomène. Sans son amour et son support au fil des années, ce mémoire n'existerait pas.

Serge Rufin Okana

Juin, 2000

Résumé

Ce mémoire traite de la détection automatique des anneaux de croissance d'otolithes de poissons juvéniles. En effet, le comptage des anneaux de croissance d'otolithes est largement utilisé en biologie aquatique dans le but d'estimer la structure d'âge des populations de poissons, tant pour la gestion des stocks en milieu naturel (pêcheries, contrôle desensemencements, étude d'impact environnemental), qu'en pisciculture (contrôle de qualité de la croissance).

Ce mémoire est constitué de trois étapes. La première est un prétraitement qui consiste à filtrer les images d'otolithes. Par la suite, le centre de la structure annulaire est localisé automatiquement et finalement la détection des segments d'anneaux de croissance est effectuée le long de directions émanant du centre de l'otolithe.

Table des matières

Chapitre 1. INTRODUCTION	1
Chapitre 2. Aspect biologique	4
2.1. Description des otolithes	5
2.2. Croissance des otolithes	7
2.2.1 Cycle journalier	7
2.2.2 Cycle annuel	9
2.3. Préparation avant les lectures d'âge	10
2.4. Lecture d'âge	12
Chapitre 3. Prétraitement des images d'otolithes	16
3.1. Saisie des images	17
3.2. Lissage des images numérisées	19
3.2.1 Le filtre moyen	21
3.2.2 Le filtre médian	23
3.2.3 Le filtre gaussien	24
3.3. Synthèse	26

Chapitre 4. Détection des anneaux de croissance	27
4.1. Approximation du gradient	28
4.1.1 Seuillage des images convoluées	32
4.2. Non Maxima Suppression (N.M.S)	35
4.2.1 Discussion	37
Chapitre 5. Détection des anneaux de croissance	38
5.1. Détection du centre	39
5.1.1 Méthode 1 : Moyenne sur les intersections des orientations du gradient	39
5.1.2 Méthode 2 : moindres carrés et médiane	41
5.2. Détection orientée des anneaux de croissance.	44
5.2.1 Détection radiale des anneaux	45
5.2.2 Seuillage sur les niveaux de gris.	47
5.2.3 Seuillage sur les normes du gradient	49
5.2.4 Méthode de segmentation de Touzi	51
5.2.5 Collaboration des méthodes	52
Chapitre 6. Analyse des résultats et discussion	58
6.1. Les images numérisées	59
6.2. Les limites du prétraitement	60
6.2.1 Détection du centre	60
6.2.2 Qualité de la détection du centre et des anneaux	63
Chapitre 6. Conclusion	68

Table des figures

2.1	Exemple de trois paires d'otolithes	5
2.2	Exemple de trois otolithes provenant de différentes espèces	6
2.3	Anneaux visibles sur un otolithe de jeune poisson	8
2.4	Illustration d'accroissements journaliers	9
2.5	Représentation des six premières zones de croissance annuelle	10
2.6	Dessin d'un otolithe cassé et brûlé, enchâssé dans de la pâte à modeler sur la platine d'un microscope	12
2.7	Illustration des zones de croissance rapide et lente	13
2.8	Illustration de la relation entre l'accroissement d'un otolithe et l'âge du poisson	14
3.1	Otolithe d'alevin de touladi	18
3.2	Zones d'ombre et de lumière	19
3.3	Processus de convolution	21
3.4	Application du filtre moyen sur un otolithe	22
3.5	Application du filtre médian de taille 3×3 (gauche) et 7×7 sur un otolithe	23
3.6	Application du filtre gaussien de taille 7×7 sur un otolithe	25
4.1	a)	33
4.2	b) et c)	33

4.3	d) et e)	33
4.4	f) et g)	34
4.5	Voisinage 3×3 du point G_r dans l'image des normes du gradient	35
4.6	Image d'origine (gauche) et image issue de la NMS (droite)	37
5.1	Processus de détection du centre	40
5.2	Pseudocentre et voisinage	42
5.3	Histogramme de l'image	43
5.4	Calcul de la droite de régression et de la tangente associée	44
5.5	Localisation du centre sur deux images d'otolithes	45
5.6	Détection radiale des anneaux	47
5.7	Intensité des pixels d'un rayon	48
5.8	Superposition des anneaux et du graphe des niveaux de gris.	48
5.9	Détection des anneaux	49
5.10	Détection des bordures des anneaux	50
5.11	Détection des bordures des anneaux	51
5.12	Détection des contours par l'approche de Touzi	52
5.13	Méthode de collaboration (Otolithe 1)	53
5.14	Méthode de collaboration (otolithe 2)	54
5.15	Méthode de collaboration le long d'un axe	55
5.16	Image des anneaux par la méthode de collaboration	56
5.17	Image des anneaux	56
5.18	Image permettant le comptage des anneaux	57
6.1	Effets de la lumière (à gauche), marques de sablage (au centre) et anneaux visibles (à droite)	59

6.2	Images d'otolithes testées	61
6.3	Troisième image d'otolithe testée	62
6.4	Première image d'arbre testée	62
6.5	Deuxième image d'arbre testée	62
6.6	Détection dans une zone contenant tous les anneaux	64
6.7	Détection des anneaux	64
6.8	Détection des anneaux par seuillage sur les niveaux de gris le long d'un rayon d'angle $\frac{\pi}{2}$ sur un tronc d'arbre	65
6.9	Détection des contours dans une zone	66
6.10	Détection des anneaux d'arbre par seuillage sur le gradient	67

Chapitre 1

INTRODUCTION

La détermination de l'âge exact d'un poisson est essentielle à la compréhension globale de la dynamique des populations. Pour identifier les constantes journalières et annuelles, il est nécessaire de comprendre les relations qui existent entre ces dernières et les cycles de croissance journalier et annuel des poissons. Dans un premier temps, nous décrirons les méthodes utilisées pour déterminer et interpréter les constantes de croissance présentes sur une structure annulaire (otolithe). Dans un deuxième temps, nous présentons une démarche visant la détection automatique des anneaux de croissance en vue de l'estimation de l'âge des poissons juvéniles. Les objectifs principaux de cette recherche sont l'amélioration de la qualité des images, l'estimation automatique du centre d'une structure annulaire que nous supposons, à priori, concentrique et la détection automatique des anneaux de croissance présents dans une image d'otolithe, le long de directions émanant du centre de la structure.

Le mémoire est formé de quatre chapitres. Le premier chapitre porte sur les aspects biologiques du problème, soit la description des otolithes. Nous y décrivons l'otolithe et

son mode de croissance. Par la suite, nous survolons les différentes méthodes utilisées par les biologistes pour extraire les otolithes de la cavité crânienne des poissons, le mode de préparation et finalement les techniques de lecture de l'âge du spécimen.

Le second chapitre traite de la méthodologie de saisie et de numérisation des images d'otolithes, de la qualité de ces images et des techniques utilisées pour améliorer la qualité des images. Cette étape a pour but de diminuer le bruit et d'améliorer le contraste afin de faciliter les traitements ultérieurs.

Le troisième chapitre de ce mémoire est consacré à l'estimation automatique d'un pseudo-centre et du centre de la structure annulaire. Nous y exposons une approche basée sur des principes issus de la géométrie analytique et de la statistique pour atteindre cet objectif. L'estimation du centre sera l'outil de départ que nous utiliserons pour identifier les anneaux dans une image d'otolithe.

Le quatrième chapitre aborde la détection des anneaux de croissance. Nous présentons une technique basée sur la collaboration d'une méthode de seuillage sur les niveaux de gris et d'une méthode de seuillage sur les intensités du gradient le long de directions originant du centre. Cette approche nous permet d'avoir une meilleure approximation du nombre d'anneaux, donc un estimé de l'âge d'un poisson.

Le cinquième chapitre présente des résultats obtenus suite à l'application des al-

algorithmes d'estimation du centre d'une structure annulaire et de la détection des anneaux de croissance à des images d'otolithes de larves de poissons ainsi qu'à des coupes transversales d'arbres. Les performances des algorithmes, ainsi que les travaux futurs, sont discutés dans la conclusion.

Chapitre 2

Aspects biologiques

La détermination de l'âge exact des vertébrés marins et des mollusques est essentielle à la compréhension globale de la dynamique de ces populations. En effet, la connaissance des paramètres de croissance, comme la taille et l'âge, favorise une meilleure analyse des populations de poissons ainsi qu'une gestion efficace des stocks monospécifiques. Dans ces travaux d'estimation et de gestion des populations, la détermination de l'âge est primordiale et s'effectue par le biais de l'étude de plusieurs structures biologiques telles que les écailles, les otolithes, les vertèbres, les rayons épineux des nageoires ainsi que les opercules et les urohyales. Ces structures permettent le calcul de l'âge ou encore l'analyse des paramètres reliés à la croissance et aux conditions de vie des poissons, en vertu des propriétés d'enregistreurs biologiques qui les caractérisent. Toutefois, même si l'utilisation de certaines parties, telles les écailles, présente l'avantage de garder l'animal étudié en vie, l'étude des otolithes permet de déterminer plus précisément l'âge, à cause de leur croissance continue durant le cycle vital et de leur nature acellulaire, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas sujet à la résorption. Dans une première étape, nous définissons les otolithes ainsi que la problématique

de l'interprétation des marques de croissance annuelles et journalières présentes sur les otolithes. Avant la lecture visuelle des marques de croissance, une préparation de l'otolithe est nécessaire. La troisième partie de ce chapitre sera consacrée à la description des méthodes de préparation. Actuellement, toute une panoplie de procédés d'interprétation des âges a été développée à partir des images d'otolithes. Dans la dernière partie, nous présenterons quelques astuces utilisées pour valider ces procédés afin de réduire la marge d'erreur pouvant biaiser les résultats.

2.1. Description des otolithes.

Les otolithes, aussi appelés "pierres d'oreille", sont des concrétions calcaires présentes dans l'oreille interne des poissons. Chez le poisson, on dénombre trois paires d'otolithes : les sagittae, la plus grosse paire, servent couramment à la détermination de l'âge ([1],[2],[3], [4]), le lapilli et l'asteriscii sont deux paires plus petites. Malgré sa petite taille, le lapilli est souvent utilisé pour calculer l'accroissement quotidien ([5]).



FIG. 2.1: Exemple de trois paires d'otolithes

Ces concrétions calcifiées ont différentes propriétés liées à leur rôle. En effet, elles participent à la fonction d'audition et d'équilibration et à ce titre, elles sont essentielles à la vie du poisson. Leur morphologie et leur structure sont très spécifiques de l'espèce de poisson considérée. Ainsi, grâce à ces deux dernières propriétés, les biologistes peuvent, à titre d'exemple, déterminer l'espèce et la taille des poissons capturés par des prédateurs à partir des otolithes retrouvés dans leurs restes.

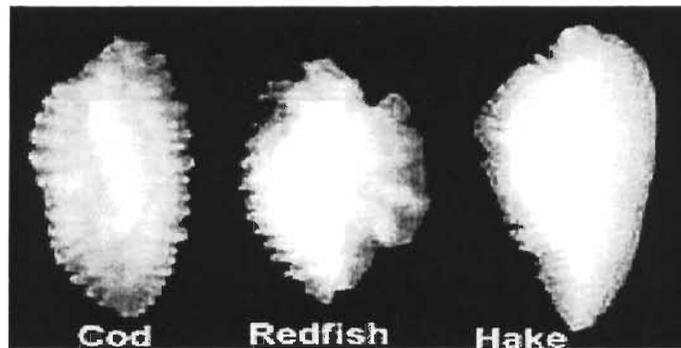


FIG. 2.2: Exemple de trois otolithes provenant de différentes espèces

Cette identification est possible puisque les otolithes résistent mieux à la dégradation que la plupart des autres tissus et qu'ils constituent souvent les seuls restes des poissons qui soient encore identifiables et mesurables, aussi bien sur les sites archéologiques que dans les contenus stomacaux des prédateurs ([6]). Ces propriétés des otolithes ont fait l'objet de multiples recherches scientifiques, lesquelles sont mises à profit pour : estimer l'âge des poissons et leur taux de survie ; établir des modèles de croissance ; définir les indices de stress ; proposer des schémas migratoires ; et caractériser l'appartenance à une nurricerie ([7]).

2.2. Croissance des otolithes

L'otolithe croît par couches successives durant toute la vie du poisson. C'est un phénomène cyclique qui est fonction du métabolisme du calcium et de la synthèse des acides aminés. Ce métabolisme du calcium conduit à la formation des microzonations composées d'une zone d'accrétion large et calcifiée fortement riche en calcium et en cristaux (CaCO_3) et d'une zone de "discontinuité" riche en protéine (otoline) ([8],[9],[10]). La croissance des otolithes est un processus unidirectionnel et s'effectue par la formation successive de nouvelles couches à la surface externe de cette structure, durant toute la vie du poisson, tout en préservant la composition des dépôts déjà existants. De ce fait, ils sont plus durs et moins altérables qu'aucune autre structure du squelette. Toutefois, le taux d'accrétion (l'épaisseur de chacun des dépôts) varie selon le développement ontogénétique et l'état physiologique du poisson, c'est-à-dire son âge. Cependant, plusieurs facteurs environnementaux comme le rythme photopériodique jour/nuit et les variations tant journalières que saisonnières des températures, influencent largement ce taux d'accrétion. Les biologistes et les écologistes soutiennent l'hypothèse d'une croissance des otolithes suivant un cycle journalier et un cycle annuel.

2.2..1 Cycle journalier

Campana ([5]) affirme que chez les téléostéens, l'accroissement journalier s'effectue par dépôt quotidien de couches, tandis que Watabe et al. ([8]) et Morales-in ([11]) décomposent ce processus en deux phases : une phase active de calcification dominée

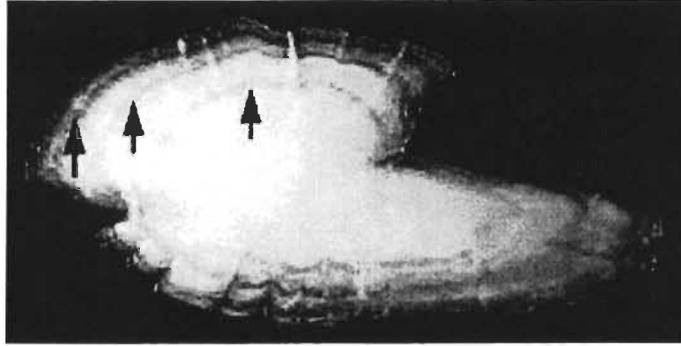


FIG. 2.3: Anneaux visibles sur un otolithe de jeune poisson

par la sécrétion et le dépôt du carbonate de calcium sur la surface de l'otolithe, et une phase de calcification " très ralentie voire interrompue ", marquée par la fabrication de fibres protéiques qui vont recouvrir la surface de la zone d'accrétion. En d'autres termes, les couches ainsi formées représentent chacune une structure bipartite, comprenant une zone large optiquement transparente et une zone étroite et sombre (opaque en lumière transmise). La zone large aussi appelée zone d'accrétion est riche en carbonate de calcium, alors que la zone sombre (zone de discontinuité) est riche en matrice protéique. Comme nous le verrons plus loin, les méthodes de validation des accroissements journaliers reposent sur l'existence de ces microstructures. Aussi, différents procédés de calcul utilisent ces informations (microstructures) pour estimer l'âge des larves et des poissons juvéniles. De plus, ces microstructures sont souvent utilisées en tant qu'indicateurs d'événements liés à l'histoire des individus. En effet, à partir de leur observation on peut obtenir des renseignements précis sur le temps de vie larvaire ([10],[12], [13],[14]), l'âge de la métamorphose chez les poissons plats ([5]), la migration d'un habitat vers un autre ([15]), la durée de la migration des eaux salées vers les eaux douces ([10], [16]) et la date de ponte ([5]).

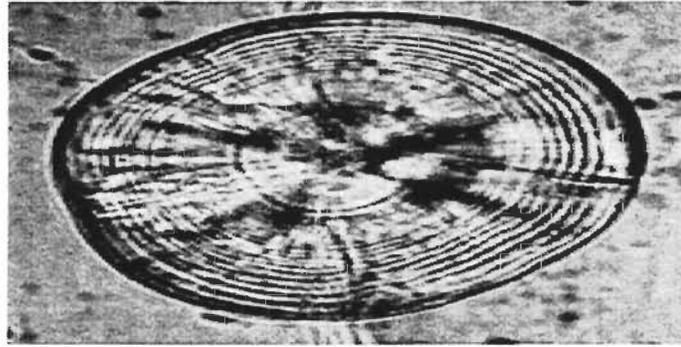


FIG. 2.4: Illustration d'accroissements journaliers

2.2..2 Cycle annuel

Les marques saisonnières se présentent sous la forme d'une alternance d'anneaux clairs et sombres visibles sur l'otolithe entier. Dans la littérature, ces alternances ont souvent été décrites ainsi : annuli, marques annuelles, zones hyalines et opaques, zones translucides et sombres. Nous utiliserons les termes hyaline (translucide) et opaque pour référer à ces alternances. Chaque anneau se compose donc d'une zone translucide (claire) et d'une zone opaque (sombre). Chez de nombreuses espèces, la zone hyaline correspond à une période de croissance réduite alors que la zone opaque reflète un taux de croissance élevé, correspondant à la période où la température de l'eau est élevée ([5],[10],[17], [18]). Toutefois, une certaine variabilité peut exister quant à l'époque d'apparition de ces deux zones, surtout en climat tropical. Il est à noter que l'apparence des annulis observables sur l'otolithe change quelquefois de façon remarquable après la maturité sexuelle du poisson ; les zones opaques deviennent plus étroites et les anneaux sombres plus évidents ([10],[19]). Comme pour les accroissements jour-

naliers, la structure et la composition chimique des annulis sont influencées par des changements physiologiques liés aux fluctuations saisonnières de l'environnement. Effectivement, le taux de croissance du poisson et la formation des structures saisonnières caractéristiques des otolithes semblent être régularisés par la température, la nourriture disponible et la reproduction. Campana ([5]) soutient pour sa part que la variation de la salinité fait aussi partie des paramètres qui ont un impact sur les modifications qui interviennent dans la formation de l'otolithe.

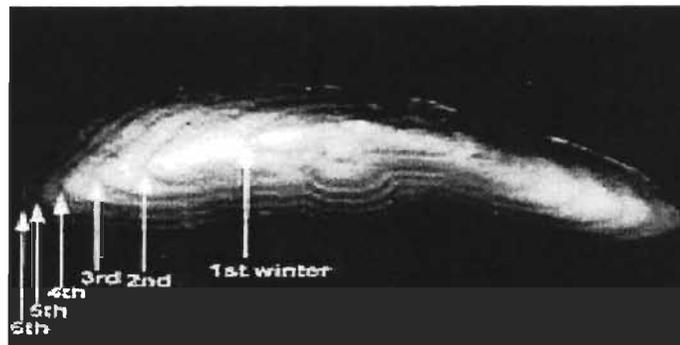


FIG. 2.5: Représentation des six premières zones de croissance annuelle

2.3. Préparation avant les lectures d'âge

Depuis Hickling ([17]), un grand nombre d'auteurs ont déterminé l'âge des poissons à partir des otolithes. Les résultats obtenus ont souvent montré des divergences importantes entre les lectures, ce qui témoigne de la complexité de la structure observée. La difficulté de la lecture des otolithes est souvent liée à leur mauvaise préparation. En effet, l'exactitude des lectures à effectuer va dépendre de la méthode de préparation utilisée. D'une manière générale, les otolithes sont prélevés et conservés à sec. La tech-

nique de préparation mise au point par Bedford ([20]) préconise l'inclusion des otolithes dans des blocs de résine de polyester colorés en noir. Après le démoulage des barres de résine, des coupes transversales fines (0.4 à 0.7 mm) sont effectuées à l'aide d'une tronçonneuse à meule diamantée. Dans ce cas, les coupes doivent impérativement passer par le nucleus, à partir duquel on dénombre les zones hivernales et estivales permettant d'estimer le groupe d'âge. Il est préférable d'effectuer cette opération en passant par le centre si l'on envisage effectuer des mesures. Cependant, pour des spécimens assez âgés, une coupe très fine peut parfois estomper les contrastes entre les zones estivales et hivernales. Avec le temps, ce procédé altère la structure de l'otolithe. D'autre part, de nombreux chercheurs ([21]) ont utilisé des techniques basées sur le ponçage ou la cassure avec ou sans brûlage préalable des otolithes. Dans cette perspective, Heltink et Kuitert ([22]) ont décrit une méthode dite de "Cassé brûlé" comportant deux étapes : premièrement, l'otolithe est cassé au niveau du noyau, puis poli à l'aide d'un papier abrasif, par la suite l'otolithe est légèrement brûlé afin de faire ressortir les anneaux hyalins. Le but de ces manipulations est d'obtenir une image passant par le nucleus. Chaque otolithe est traité individuellement, ce qui rend l'étude de grandes séries longue et fastidieuse. Des comparaisons de lectures effectuées, au laboratoire de Boulogne-sur-Mer en 1990, sur plusieurs paires prélevées en différentes périodes de l'année ont démontré que ces deux méthodes (avec ou sans brûlage) donnent des résultats équivalents dans près de 80 pourcent des lectures et les écarts, le plus souvent limités à un an, sont à peu près aussi nombreux dans les deux sens. La technique de coupes fines exige, cependant, un équipement plus coûteux que celle du brûlage.

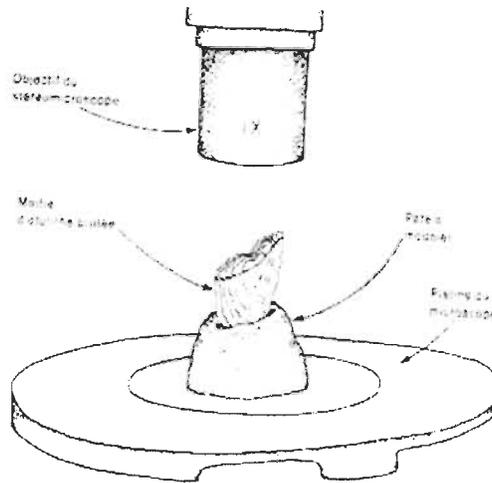


FIG. 2.6: Dessin d'un otolithe cassé et brûlé, enchâssé dans de la pâte à modeler sur la platine d'un microscope

2.4. Lecture d'âge

En général, les coupes fines d'otolithes sont étudiées à la loupe binoculaire sur fond noir. Un mélange composé pour la moitié de glycérine et d'éthanol est utilisé pour éclaircir la loupe et améliorer le contraste. Il est conseillé d'utiliser un éclairage direct rasant, très oblique par rapport à la coupe ([23]), et l'observation des coupes et des moitiés brûlées d'otolithes se fait (Campana [5]), à l'aide d'un microscope de dissection. Pour ce faire, il faudra placer la coupe dans de l'argile ou de la pâte à modeler, de façon à ce que le plan de la cassure se trouve vers le haut. Après avoir étalé une goutte d'huile végétale (exemple giroble) ou d'huile de cèdre sur tout le plan de la cassure le morceau d'otolithe ainsi préparé est déposé sous le microscope avec un grossissement de 10X. Il est important, dans l'estimation de l'âge des individus, de faire une différence entre la

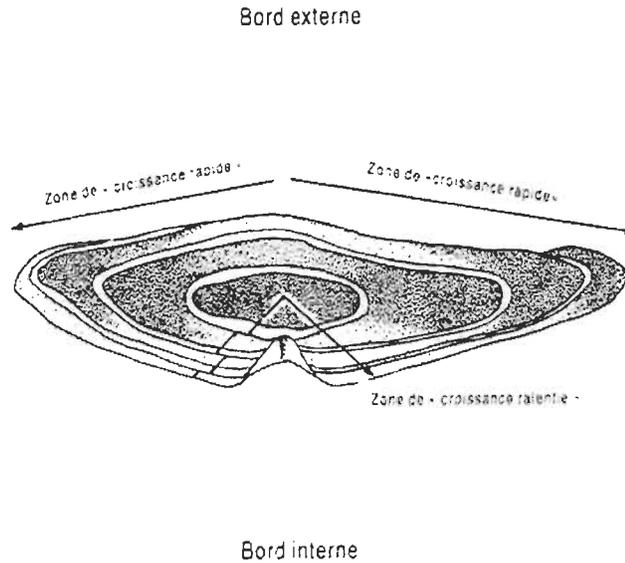


FIG. 2.7: Illustration des zones de croissance rapide et lente

notion de précision et celle d'exactitude. La précision est le degré de reproductibilité, c'est-à-dire le degré de variabilité entre les lecteurs, ou entre les lectures effectuées. L'exactitude, quant à elle, est le degré de proximité par rapport à la valeur exacte et est reflétée par la déviation par rapport à l'âge véritable. Les difficultés de lecture des marques régulières sur les otolithes sont souvent à l'origine des erreurs intervenant dans la détermination de l'âge des poissons juvéniles et adultes, lesquelles peuvent être en partie expliquées, soit par la variation de la température ambiante lors de l'expérimentation en laboratoire, par la préparation des otolithes ou encore par le pouvoir de résolution du microscope. D'après Campana et al. ([24]), un otolithe non préparé biaise le comptage des anneaux (problèmes liés à l'épaisseur de l'otolithe), alors qu'une structure mal préparée peut provoquer l'élimination d'accroissements, faussant ainsi les résultats finaux. Un certain nombre d'auteurs recommandent la prudence quant au choix du microscope. Par exemple, Morales-Nin ([25]) et Radtke ([26]) conseillent l'utilisation

d'un microscope électronique à balayage lors de l'analyse des stries (accroissements) journalières des otolithes de poissons tropicaux. En résumé, il est toujours préférable d'avoir recours à une méthode de validation des procédés choisis à chaque fois qu'elle s'applique à une nouvelle espèce, une nouvelle population ou un nouveau stock.

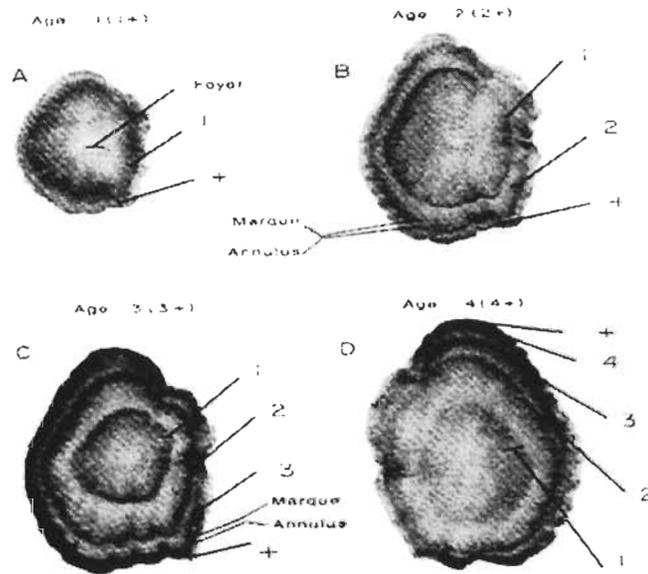


FIG. 2.8: Illustration de la relation entre l'accroissement d'un otolithe et l'âge du poisson

En général, les otolithes croissent en réponse à un cycle d'activité circadien (jour/nuit). Il convient de garder à l'esprit que d'autres périodicités de croissance peuvent être enregistrées et s'ajouter à ce cycle sans pour autant le remettre en question. Les accroissements journaliers peuvent être simples et être constitués de la manière décrite précédemment, ou être composés, c'est-à-dire formés d'une série de lignes plus étroites et regroupées pour ne former qu'un seul accroissement quotidien. Dans ses travaux de 1971 et 1980, Pannella décrit ces éléments, appelés stries subjournalières, comme

des structures dont la périodicité est inférieure à vingt quatre-heures. Campana ([29]) soutient que ces accroissements semblent augmenter avec la fréquence des repas. Cependant, lors de l'estimation de l'âge, ces structures peuvent être considérées par erreur comme des unités de croissance journalière. Hormis le fait que leur distinction est basée de façon subjective sur leur aspect général et leur largeur, la différenciation est difficile et constitue souvent une source d'erreur. La microstructure des otolithes est donc loin d'être sans ambiguïtés. C'est pourquoi toute étude d'évaluation de l'âge basée sur le comptage des anneaux doit inclure des procédures de validation des hypothèses relatives à la chronologie de leur formation. D'une manière pratique, on dispose de moyens qui rendent la vérification de la périodicité des microzonations possible.

Dans les chapitres qui suivent, nous établirons les bases d'une approche de repérage automatique des structures annulaires, en particulier les anneaux de croissance journaliers d'otolithes de poissons de moins de 30 jours, sans aborder la problématique dans son ensemble soit la validation des anneaux repérés.

Chapitre 3

Prétraitement des images d'otolithes

Lors de la préparation des otolithes et de la saisie des images par caméra sur bino-culaire ou appareil photo sur microscope, du bruit peut s'introduire et nuire à la qualité de l'image obtenue, donc à son interprétation. La structure même des otolithes est, de façon inhérente, bruitée par la présence de microzonations qui peuvent être confondues avec les anneaux de croissance à l'interface de ces dernières ou encore par des zones calcifiées plus ou moins opaques. De plus, des artéfacts peuvent être introduits lors de la saisie ou de la préparation, par exemple par un sablage inégal des otolithes, ce qui ne permet pas une mise au point de l'image sur la totalité de l'otolithe. Dans un tel cas, des étapes de prétraitement, aussi appelées procédés de lissage, sont nécessaires pour améliorer la qualité de l'image avant de procéder à l'analyse proprement dite des otolithes, soit la reconnaissance des anneaux. Bien que le fond de l'image et les anneaux de la structure soient identifiables, à un certain niveau d'interprétation visuelle, ils peuvent être confondus sur certaines parties de l'image. Nous présentons sommairement dans ce chapitre une série d'algorithmes de lissage que nous avons appliqués sur des images d'otolithes de poissons juvéniles (fin du stade larvaire) avant de procéder à

un choix justifié d'une méthodologie d'extraction des anneaux que nous présenterons au chapitre suivant. Les algorithmes testés sont le filtre moyen, le filtre médian et finalement le filtre gaussien.

Avant d'aborder la description des algorithmes testés, une première section portant sur la méthodologie de saisie des images originales d'otolithes, traitées dans ce mémoire, est présentée.

3.1. Saisie des images

Les otolithes utilisés dans le cadre de ces travaux ont été gracieusement fournis par la pisciculture du Centre Écologique du Lac Saint-Jean (QC), Canada. Notre étude portera essentiellement sur la détection des anneaux de croissance journalière d'otolithes d'alevins de *touladis*, âgés de 30 jours. Étant donné la taille de ces otolithes, de moins d'un millimètre, il est nécessaire d'utiliser un microscope pour la saisie. Après l'extraction des paires d'otolithes de la tête des poissons, ceux-ci sont déposés, après un trempage au toluène, dans une goutte de résine de type époxy. Le toluène facilite l'adhérence de la résine époxy. Après une période de durcissement d'environ 20 heures à température ambiante, la résine est poncée à l'aide d'un papier abrasif fin (2000/wp) jusqu'à l'apparition des marques d'anneaux. Finalement, une goutte de vernis transparent est appliquée afin de préserver la qualité visuelle de la surface présentant les anneaux et aussi afin d'accroître le contraste entre les zones de croissance. Les otolithes sur lamelles sont ensuite photographiés à l'aide d'un appareil photographique couplé à

un microscope optique (jusqu'à un grossissement de 10X). Les négatifs au contraste de chaque otolithe sont par la suite déposés sur une table lumineuse et saisis à l'aide d'une caméra numérique à haute résolution. Les images(3.1.) ainsi obtenues sont directement exploitables en format PGM par la méthodologie que nous nous proposons de détailler dans les chapitres qui suivent.

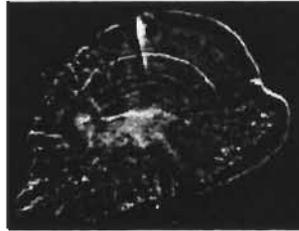


FIG. 3.1: Otolithe d'alevin de touladi

Comme nous pouvons le constater, les images d'otolithes sont inévitablement bruitées. On entend par bruit tout ce qui n'est pas inhérent à la représentation de la structure. Ce bruit peut provenir de différentes sources : phase de préparation des échantillons, phase d'acquisition des images, particularités internes de la structure. Le type de bruit le plus difficile à atténuer est sans doute celui qui provient de la préparation des échantillons. Les opérations de base de cette étape (montage des otolithes sur lamelles, polissage, etc.) entraînent des altérations de la structure annulaire. Le ponçage de la résine à l'aide d'un papier abrasif laisse des marques qui peuvent être problématiques lors de la détection des anneaux de croissance.

Le bruit lié à l'acquisition des images est souvent dû à l'éclairage utilisé lors de la saisie. Effectivement, lorsque l'on a recours à un boîtier photographique monté sur une loupe binoculaire, il est nécessaire de fournir une source lumineuse de forte intensité, soit des fibres halogènes qui produisent, étant la nature osseuse des otolithes, une forte

reflectance. Cependant, si l'otolithe n'est pas uniformément éclairé, l'image obtenue comporte des zones d'ombre et de lumière (3.1.), ce qui complique son traitement.

Le bruit de quantification et l'échantillonnage dû à la numérisation constitue un facteur plus faible de détérioration des images. Nous avons utilisé deux types de numérisation pour les images d'otolithes : les images ont été soit acquises avec un scanner à plat, de résolution 400 dpi pour les images sur papier photographique ou sur une table lumineuse à numériser pour les négatifs (images 640×480). Cependant, la taille des échantillons sur négatifs que l'on peut acquérir dépend de l'objectif que l'on fixe sur les capteurs utilisés.

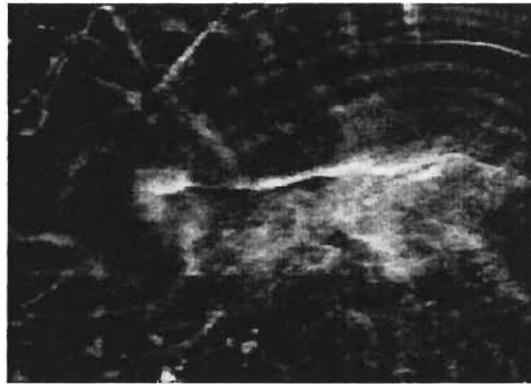


FIG. 3.2: Zones d'ombre et de lumière

3.2. Lissage des images numérisées

Le lissage d'une image consiste à éliminer le bruit pour faciliter le traitement et l'interprétation de cette image. Le lissage d'une image consiste généralement à effectuer une convolution de la fonction d'intensité $I(x,y)$ avec une fonction $f(x,y)$ que l'on appelle la réponse impulsionnelle du filtre. Le processus de convolution consiste simplement à

remplacer chaque niveau de gris par une combinaison linéaire des niveaux de gris des points voisins dont les coefficients de la combinaison sont donnés par la fonction réponse impulsionnelle. Dans le cas d'un signal continu et d'une image infinie, l'image filtrée est obtenue de la convolution de f et de I en tout point (x, y) donnée par :

$$I_f(x, y) = (f * I)(x, y), \quad (3.1)$$

ou de façon plus explicite, par l'expression ;

$$I_f(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x', y') I(x - x', y - y') dx' dy'. \quad (3.2)$$

Dans le cas d'un signal discret, les domaines de I et f sont bornés, le domaine de I est donné par l'intervalle $[-N/2, +N/2]$ et le domaine de f par $[-k/2, +k/2]$, avec $k \leq N$.

Dans ce cas l'équation (3.2) s'écrit ;

$$I_f(i, j) = \sum_{i'=-k/2}^{i'+k/2} \sum_{j'=-k/2}^{j'+k/2} f(i', j') I(i - i', j - j'). \quad (3.3)$$

où (i, j) représentent les coordonnées entières d'un pixel de l'image. L'équation (3.3) revient à calculer le produit scalaire matriciel entre une fenêtre de taille $k \times k$ autour du pixel courant (i, j) et une matrice d'ordre N qui contient les coefficients fournis par la réponse impulsionnelle. Cette dernière matrice est appelée le *masque* de la convolution et la constante k est appelée le *paramètre du filtre*. Si toutes les valeurs du masque sont égales à $1/k$, le lissage consiste à parcourir chaque pixel de l'image et à remplacer la valeur du pixel par la moyenne des intensités prises sur l'ensemble de la fenêtre de taille $k \times k$ autour du pixel ; on parle alors d'un filtre moyen. La figure 3.2. illustre le

processus de convolution.

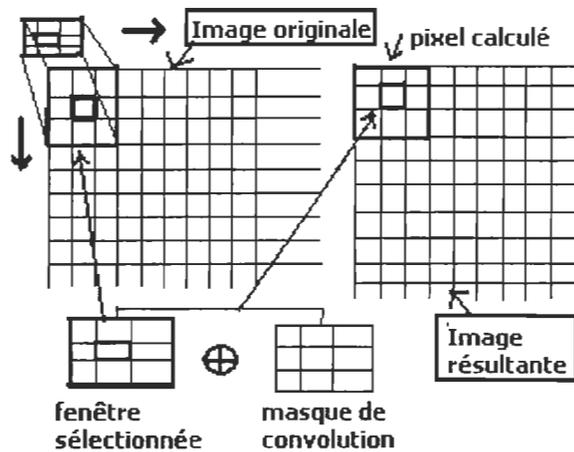


FIG. 3.3: Processus de convolution

Pour les pixels situés sur les bords de l'image, il est nécessaire d'agrandir la matrice de la taille requise par le masque de convolution de l'image en répétant les lignes et les colonnes de pixels de bord pour permettre au processus de convolution de s'exécuter sur l'ensemble de l'image. Abordons maintenant les tests de filtrage annoncés précédemment sur une image d'otolithe juvénile lesquels orienteront un choix de filtrage acceptable.

3.2..1 Le filtre moyen

Le filtre moyen (Box Filter) consiste à attribuer à chaque pixel d'une image la valeur moyenne des intensités lumineuses calculée dans une fenêtre de taille $N \times N$ centrée autour de la position de ce dernier tel que :

$$y(i, j) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I(i, j), \quad (3.4)$$

où $I(i, j)$ est la valeur de l'intensité lumineuse à la position (i, j) de l'image d'entrée et $y(i, j)$ la valeur à attribuer au pixel correspondant dans l'image de sortie. Si tous les pixels d'une fenêtre appartiennent à une même région homogène alors la moyenne correspond à la meilleure estimation de la réflectivité de la région considérée. Par contre, si la fenêtre est centrée à l'intersection de deux régions non homogènes, la valeur moyenne calculée sera une estimation de la réflectivité moyenne des deux régions. Ce type de lissage fait disparaître les lignes et les régions isolées de petites tailles, ce qui peut rendre les contours flous et provoquer une perte de la structure de l'image. Le filtre moyen a été implanté et testé sur des images d'otolithes avec des fenêtres de tailles différentes. L'image 3.2..1 présente le résultat du filtrage moyen avec une fenêtre 7×7 . Nous remarquons bien que ce filtre rend flous les contours.

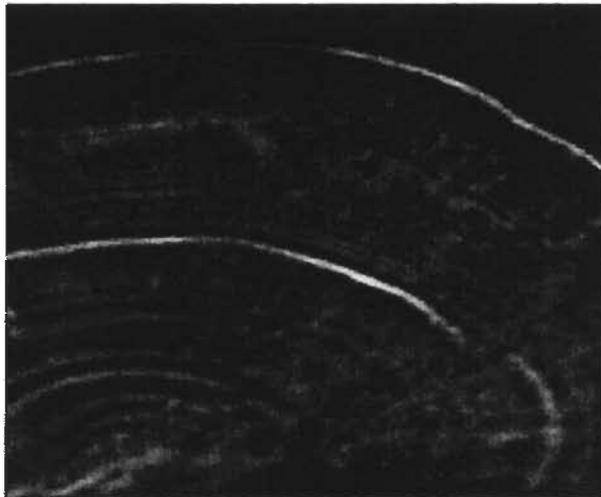


FIG. 3.4: Application du filtre moyen sur un otolithe

3.2..2 Le filtre médian

Le filtre médian revient à remplacer l'intensité de chaque pixel par l'intensité médiane des intensités des pixels voisins. Par exemple, si la valeur du pixel courant est 8 et que son voisinage immédiat est représenté par le tableau ci-dessous :

10.0	9.00	7.00
15.00	8.00	23.00
18.00	16.05	5.21

L'intensité du pixel central sera remplacée par la médiane de l'ensemble des intensités des pixels du masque, soit 10. L'utilisation du filtre médian doit être progressive, c'est-à dire que plus on accroît la taille de la fenêtre, plus on a tendance à enlever des détails dans l'image. Il faut donc effectuer un choix judicieux qui vise un compromis entre une perte de la résolution et la suppression du bruit. Comparativement au filtre moyen, la mise en oeuvre du filtre médian est plus coûteuse du fait qu'elle nécessite un ordonnancement préalable des intensités de niveaux de gris afin de calculer la valeur médiane. Les images 3.2..2 présentent le résultat du lissage avec des fenêtres de taille 3×3 et 7×7 respectivement.

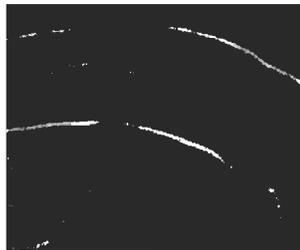


FIG. 3.5: Application du filtre médian de taille 3×3 (gauche) et 7×7 sur un otolithe

A la lumière de tests effectués avec les différentes tailles de masques, nous avons remarqué que plus la fenêtre est grande, plus l'image est floue.

3.2.3 Le filtre gaussien

Nous avons vu avec les filtres médian et moyen qu'il y avait un risque de perdre les discontinuités présentes dans l'image. Un filtre idéal, en terme de capacité de détection de contours, devrait être un filtre qui laisse passer une partie seulement des hautes fréquences, avec une coupure nette entre les fréquences associées au bruit et celles associées aux anneaux. Un tel filtre semble pour l'instant du moins difficile à idéaliser en pratique. Dans le cas d'images d'otolithes, le filtre gaussien pourrait s'avérer être un choix judicieux. En effet, ce filtre passe bas, a l'avantage d'adoucir l'image en sélectionnant de manière progressive les basses fréquences. Une de ses caractéristiques est que sa bande passante peut être modifiée simplement en changeant l'écart-type σ (voir 3.5). Un lissage gaussien s'effectue à l'aide d'un masque dont les coefficients sont calculés à partir de la fonction de densité d'une loi binormale :

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi} \exp \frac{-(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2} \exp \frac{-(y - \bar{y})^2}{2\sigma_y^2}, \quad (3.5)$$

où (\bar{x}, \bar{y}) est le vecteur des moyennes de la distribution et σ_x et σ_y sont les écarts-types en x et en y respectivement. Dans le cas d'un masque de taille 7×7 , avec $\bar{x} = \bar{y} = 0$ et $\sigma_x = \sigma_y = 1.0$, nous obtenons le masque de convolution suivant :

0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
0.00	0.01	0.05	0.08	0.05	0.01	0.00
0.00	0.05	0.21	0.34	0.21	0.05	0.00
0.01	0.08	0.34	0.56	0.34	0.08	0.01
0.00	0.05	0.21	0.34	0.21	0.05	0.00
0.00	0.01	0.05	0.08	0.05	0.01	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Après application de ce masque sur l'image originale nous obtenons l'image transformée suivante :

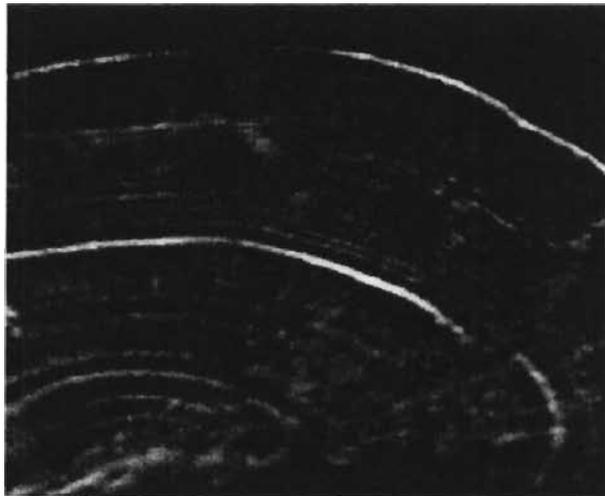


FIG. 3.6: Application du filtre gaussien de taille 7×7 sur un otolithe

Nous constatons que les détails de l'image (figure 3.2..3) sont préservés contrairement aux filtres précédents (voir la figure de droite 3.2..2 et la figure 3.2..1).

3.3. Synthèse

Trois opérateurs de lissage (le filtre gaussien, le filtre médian et le filtre moyen) ont été appliqués avec un masque de taille uniforme 7×7 . D'après les résultats obtenus, le filtre gaussien permet de conserver les discontinuités présentes sur la structure annulaire. L'application des filtres médian (figure de droite 3.2..2) et moyen (3.2..1) entraînent a priori une perte de résolution, laquelle peut nuire à la détection des structures annulaires. Cependant, ces trois opérateurs produisent des images encore floues. Par ailleurs, en faisant varier la taille de la fenêtre, seul le filtre gaussien donne des résultats satisfaisants, soit des détails de l'image mieux conservés. Nous avons donc retenu ce filtre pour notre analyse.

Chapitre 4

Méthodes directes de détection des anneaux de croissance

Après la présentation des méthodes de lissage testées sur les images d'otolithes, il apparaît qu'une solution appropriée, à ce stade de développement, pour atténuer le bruit et conserver les discontinuités présentes dans les images d'alevins soit l'utilisation d'un filtre gaussien comme étape de prétraitement. Dans ce chapitre, nous présentons quelques approches usuelles de segmentation qui reposent toutes sur l'application de l'opérateur gradient à la fonction d'intensité de l'image. Les opérateurs utilisés sont ceux de Sobel, Roberts, Prewitt et la méthode de Non Maxima suppression (N.M.S). L'intérêt d'appliquer une telle approche basée sur le gradient sur une image d'otolithe est la détection des contours des anneaux de croissance (régions de l'image) par seuillage sur la norme du gradient.

4.1. Approximation du gradient

Un contour peut être défini comme étant la frontière entre deux régions de niveaux de gris différents et il présente, généralement, un changement brusque des niveaux de gris. Ainsi, les contours peuvent être détectés par l'identification des variations locales du niveau de gris au voisinage de chaque point de l'image à partir d'opérateurs locaux sensibles aux variations de la fonction d'intensité. Généralement, les contours correspondent aux extréma locaux du gradient ou aux zéros du Laplacien de la fonction de niveau de gris de l'image. On définit le gradient en tout point (i, j) de l'image I comme étant le vecteur $\nabla I(i, j) = \vec{G} = (G_1, G_2)$ dont les composantes sont données par les dérivées partielles suivantes ;

$$G_1(i, j) = \frac{\partial I(i, j)}{\partial i}, \quad G_2(i, j) = \frac{\partial I(i, j)}{\partial j}. \quad (4.1)$$

La norme que nous utilisons dans ce qui suit est la norme euclidienne,

$$G = \sqrt{G_1^2(i, j) + G_2^2(i, j)}. \quad (4.2)$$

La détection des contours peut s'effectuer en calculant le gradient en chaque point de l'image et en repérant les extréma locaux de la norme de celui-ci et en pratique, on retient les points dont la norme du gradient est supérieure à un seuil prédéfini. Classiquement, dans le plan discret de l'image, les composantes du gradient sont calculées en chaque pixel de l'image de coordonnées (i, j) , à l'aide des expressions suivantes ;

$$G_1 = \frac{I(i, j) - I(i + h, j)}{h}, \quad (4.3)$$

$$G_2 = \frac{I(i, j) - I(i, j + h)}{h}, \quad (4.4)$$

où h représente une unité de distance dans l'image et la norme du gradient est calculée comme suit avec $h = 1$;

$$G(i, j) \approx \sqrt{(I(i, j) - I(i + 1, j))^2 + (I(i, j) - I(i, j + 1))^2}. \quad (4.5)$$

Cependant, plusieurs auteurs (Sobel, Roberts et Prewitt) ont proposé des méthodes de calcul du gradient qui reposent sur la convolution de l'image avec des masques approximant les dérivées partielles. Nous présentons dans la section suivante l'application de ces méthodes aux images d'otolithes, afin d'analyser leur potentiel de segmentation des anneaux, avec seuillage sur la norme du gradient.

Chaque opérateur de gradient est représenté par deux masques (H_1, H_2) centrés au point (i, j) de l'image. Les masques H_1 et H_2 sont associés au calcul des dérivées partielles le long des directions canoniques dans l'image. Pour l'opérateur de Prewitt([32]), les masques H_1 et H_2 sont définis par les deux matrices carrées d'ordre 3 suivantes ;

$$H_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

Sobel([30]) propose des masques de convolution de même taille que ceux de Prewitt

mais contenant des valeurs différentes,

$$H_1 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad H_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

et Robert([31]) propose les deux masques d'ordre 2 suivants ;

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ +1 & 0 \end{bmatrix} \quad H_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & +1 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

Considérons une région Z de l'image I , de dimension 3×3 , centrée au pixel $z_5 = (i, j)$

que nous représentons comme sui ;

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

avec $z_i, i = 1 \dots 9$, l'intensité de l'image en un pixel z de Z . Les composantes du gradient G_1 (direction horizontale) et G_2 (direction verticale) sont calculées respectivement au pixel (i, j) à l'aide des convolutions suivantes ;

$$G_1(i, j) = \langle I, H_1 \rangle_{i,j} \quad \text{et} \quad G_2(i, j) = \langle I, H_2 \rangle_{i,j}, \quad (4.9)$$

où H_1 et H_2 sont définis précédemment pour chacune des méthodes. De façon générale, pour un masque donné H on a ;

$$\langle I, H \rangle_{i,j} = \sum_{i'=-k}^{i'+k} \sum_{j'=-k}^{j'+k} H(i', j') I(i - i', j - j'). \quad (4.10)$$

Dans le cas de l'approximation proposée par Prewitt ([32]), les dérivées partielles le long des directions horizontales et verticales, sont calculées au pixel central (z_5) d'une sous région de dimension 3×3 , à l'aide des différences finies ; $G_1 = ((z_7 + z_8 + z_9) -$

$(z_1 + z_2 + z_3)$); $G_2 = ((z_3 + z_6 + z_9) - (z_1 + z_4 + z_9))$. La norme du gradient en ce point est donc donnée par

$$G \approx \sqrt{((z_7 + z_8 + z_9) - (z_1 + z_2 + z_3))^2 + ((z_3 + z_6 + z_9) - (z_1 + z_4 + z_9))^2}. \quad (4.11)$$

La convolution de la région Z avec les deux masques de Prewitt (H_1 et H_2) permet le calcul des composantes du gradient et de sa norme au point z_5 suivant l'expression (4.11). Toutefois, d'après Gonzales et al ([33]), le calcul du gradient basé sur les dérivées partielles a souvent tendance à réhausser le bruit, ce qui est le cas avec l'approximation par Prewitt. Pour pallier à ce phénomène, Sobel ([30]) propose d'utiliser un opérateur qui, en plus de calculer la norme du gradient, permet un lissage de l'image. Le principe de base de cet opérateur est le même que celui de Prewitt. Cependant, l'effet de lissage est obtenu en multipliant par 2 les intensités des pixels situés au centre des lignes et colonnes qui interviennent dans le calcul des composants du gradient, ce qui revient à ajouter un poids aux pixels qui sont les voisins horizontaux et verticaux du pixel central. Dans ce cas, on obtient ;

$$G_1 = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3) \text{ et } G_2 = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_9). \quad (4.12)$$

Les deux composants du gradient (G_1, G_2) (4.12) sont estimés, au point z_5 , par la convolution des masques de Sobel avec la région Z .

Une autre approximation du gradient peut être obtenue par le calcul des variations de niveaux de gris dans les directions diagonales. Pour ce faire, les composantes du gradient ($G_1 = (z_5 - z_9)$ et $G_2 = (z_6 - z_8)$) sont estimées par la convolution de la région inférieure gauche de Z avec les deux masques d'ordre 2 de Roberts ([31]).

4.1..1 Seuillage des images convoluées

Pour chacune des approximations énumérées ci-dessus, nous avons effectué une convolution de ces masques avec l'image d'origine d'un otolithe, en chaque point (i, j) de l'image et la norme du gradient a été calculée en chaque point. Pour chacun des cas, un pixel sera considéré comme faisant partie d'un contour si $G(i, j)$, la norme en (i, j) , est supérieure à un seuil donné.

Nous considérons donc l'image des intensités du gradient et nous appliquons une règle de décision d'appartenance à un contour à chaque pixel de cette image. La valeur moyenne T des intensités du gradient de tous les pixels de l'image est calculée et constitue le seuil de décision. Le seuil ainsi défini permet de sélectionner les points susceptibles d'appartenir à un contour. L'image des contours I_c est alors définie par $I_c(i, j) = L_1$ si $G(i, j) \geq T$ et $I_c(i, j) = L_2$ si $G(i, j) < T$, où $G(i, j)$ est l'intensité du gradient au point (i, j) , L_1 et L_2 les valeurs affectées aux pixels de l'image I_c , et T le seuil prédéfini. Si un pixel appartient au contour alors la valeur $L_1 = 255.0$ dans l'image I_c , sinon, il est rejeté et sa valeur est posée égale à $L_2 = 0.0$.

Nous avons donc estimé la norme du gradient, en tout point d'une image d'otolithe, à l'aide des masques de convolution proposés par Sobel, Prewitt et Roberts. Nous avons ensuite appliqué la technique de seuillage présentée ci-haut à chaque image résultante. Les figures (4.2), (4.3) et (4.4) montrent les résultats des traitements effectués par ces méthodes de détection de contours sur une image d'otolithe (4.1) par approximation de la norme du gradient à l'aide de l'opérateur de Sobel (4.2), de Prewitt (4.3) et de

Roberts (4.4). Les intensités des images de contours (voir 4.2 c, 4.3 e et 4.4 g) prennent essentiellement deux valeurs possibles, soit 255 (blanc) lorsque la norme du gradient est supérieure à un seuil de 40.5 (moyenne des intensités du gradient) et 0.0 (noir) si cette norme est inférieure à ce seuil.



FIG. 4.1: a)

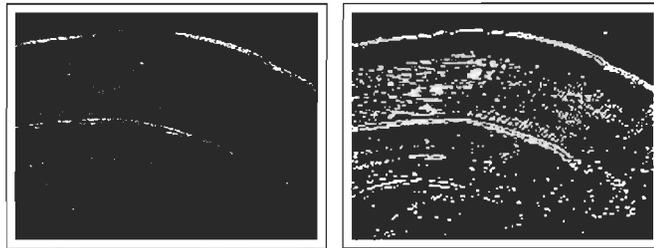


FIG. 4.2: b) et c)

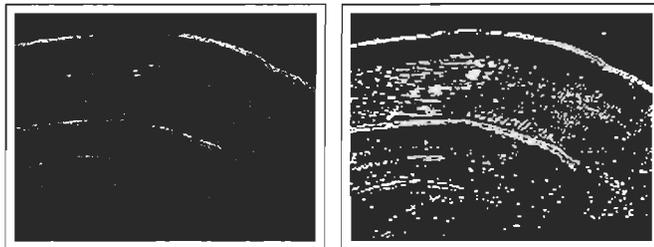


FIG. 4.3: d) et e)

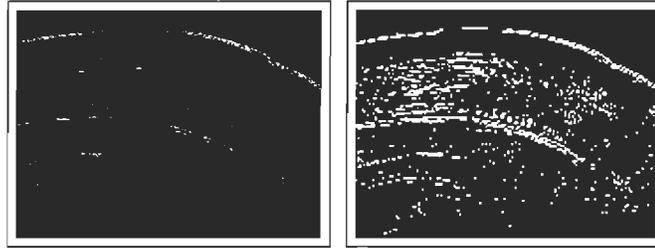


FIG. 4.4: f) et g)

a : image originale
b : image des intensités du gradient à l'aide de sobel c : image des contours à l'aide de sobel
d : image des intensités du gradient à l'aide de Prewitt e : image des contours à l'aide de Prewitt
f : image des intensités du gradient à l'aide de Roberts g : image des contours à l'aide de Roberts

Légende des figures

D'après les résultats obtenus, nous constatons que ces opérateurs donnent des résultats sensiblement identiques. En effet, dans les trois cas les contours des anneaux les plus visibles apparaissent clairement, mais ceux des anneaux plus petits ne sont pas suffisamment identifiables. Il est donc difficile de détecter tous les anneaux de croissance d'un otolithe en utilisant cette méthodologie. A la section suivante, nous présentons une approche de détection des contours basée sur la suppression locale des pixels dont la norme du gradient n'est pas maximale.

4.2. Non Maxima Suppression (N.M.S)

La méthode N.M.S consiste à extraire tous les pixels de l'image des intensités du gradient présentant un maximum local dans la direction du gradient. Pour cela, l'image gradient obtenue par l'opérateur Sobel à la section précédente est utilisée comme image de départ de cet algorithme afin d'extraire les contours. L'orientation du gradient est calculée à partir du rapport des dérivées partielles $G_1(i, j)$ et $G_2(i, j)$ obtenues en effectuant un produit de convolution de l'image I avec les masques de Sobel tel qu'indiqué dans la section précédente. La figure (4.5) montre le voisinage immédiat d'un pixel G_r formé des pixels dont la norme du gradient est égale à A, B, C, D, E, F, G et H . Le vecteur \vec{g} est le vecteur gradient au point central G_r . Une première étape consiste à calculer le rapport des gradients directionnels en tout point de l'image tel que :

$$R(i, j) = \frac{G_1(i, j)}{G_2(i, j)}. \quad (4.13)$$

En l'absence d'un contour, les composantes $G_1(i, j)$ et $G_2(i, j)$ sont nulles et aucun

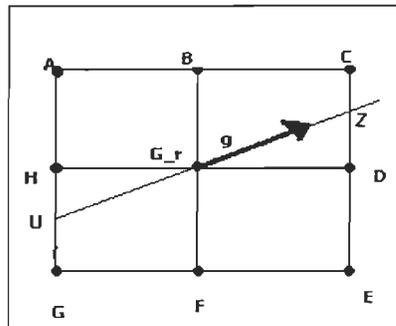


FIG. 4.5: Voisinage 3×3 du point G_r dans l'image des normes du gradient

traitement n'est à effectuer (voir 4.4). La seconde étape consiste à calculer la norme du gradient de tous les voisins du point central situés le long de la direction du gradient et d'appliquer une règle de décision sur l'appartenance d'un pixel à un contour. Par

exemple, à la figure (4.5), les normes du gradient aux points U et Z sont interpolées (linéaire) à partir des intensités des pixels les plus proches (ex : G et H pour U). D'une manière générale, soient U et Z les intensités du gradient le long d'une direction donnée, le point (i, j) d'intensité G_r est dit un *maximum local* si les conditions suivantes sont vérifiées ;

$$G_r \geq U \text{ et } G_r \geq Z. \quad (4.14)$$

Dérêche ([34]) propose d'estimer les valeurs U et Z à l'aide des égalités suivantes :

- si $G_2(i, j) > 0$,

si $R \geq 1$	$U = \frac{(R-1)D+E}{R}$	$Z = \frac{(R-1)H+A}{R}$
si $1 > R \geq 0$	$U = (1 - R)F + RE$	$Z = (1 - R)B + RA$
si $0 > R \geq -1$	$U = (R + 1)F - RE$	$Z = (R + 1)B - RC$
si $R < -1$	$U = \frac{(R+1)H-G}{R}$	$Z = \frac{(R+1)D-C}{R}$

- Sinon, si $G_2(i, j) = 0$ et $G_1(i, j) \neq 0$ (directions horizontales) alors,

si $G_1(i, j) < 0$ et $G_2(i, j) = 0$	$U = H$	$Z = D$
si $G_1(i, j) > 0$ et $G_2(i, j) = 0$	$U = D$	$Z = H$

Par contre, si $G_2(i, j) < 0$, la même procédure est utilisée, mais on permute U et Z . Ainsi, lorsqu'un point (i, j) n'est pas un maximum local, il est supprimé. Il est à noter que le choix des normes qui interviennent dans le calcul de U et Z est fonction de la direction du gradient. Le résultat de l'application de cette méthode à l'image originale est montré à la figure (4.6). Sur cette image les maxima locaux conservent leur intensité d'origine et les autres pixels prennent la valeur zéro.

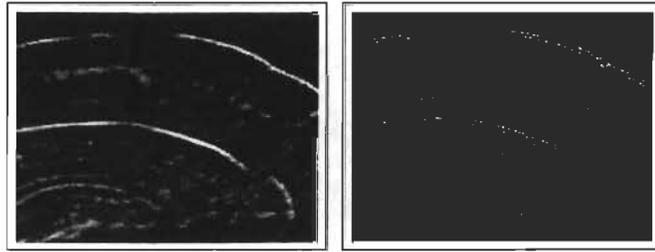


FIG. 4.6: Image d'origine (gauche) et image issue de la NMS (droite)

Récemment, certains auteurs ont proposé des améliorations de cette approche. C'est le cas de Devernay ([35]) qui, en remplaçant l'interpolation simple par l'interpolation quadratique, a réussi à augmenter la précision. Cependant, même s'il est vrai que cette méthode améliore les résultats précédents par l'ajout de certains contours manquants, les résultats ne sont pas encore concluants.

4.2..1 Discussion

À la lumière des résultats présentés, nous concluons que la détection des anneaux de croissance par l'application de l'opérateur gradient, tel que traitée dans ce chapitre, donne des résultats encore sensibles au bruit présent dans ce type d'images. Il est donc nécessaire de développer des méthodes de détection des anneaux plus robustes et qui permettent le traitement local de l'image plutôt que d'utiliser une approche globale. Ces résultats nous ont conduit au développement d'une approche géométrique locale de l'image qui fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 5

Détection des anneaux de croissance : méthode géométrique

Suite à la présentation, au chapitre précédent, de méthodes directes de détection de contours et de l'analyse des résultats suite à leur application à des images d'otolithes, nous présentons deux approches de détection des anneaux de croissance, que nous avons développées, qui exploitent les caractéristiques physiques et géométriques de la structure annulaire. En effet, un anneau de croissance d'otolithe peut être vu comme étant une structure formée de deux contours filiformes séparés par une zone plus ou moins homogène. Le premier opérateur de détection, basé sur le seuillage local des niveaux de gris, consiste à isoler les anneaux le long de directions émanant du centre de l'otolithe ou de la structure annulaire. Le second opérateur de détection est basé sur le seuillage des intensités de la norme du gradient et s'inspire des méthodes appliquées au chapitre précédent. Ce second opérateur permet l'identification des contours des anneaux le long d'un rayon également issu du centre de l'otolithe. Ces deux opérateurs sont présentés formellement et leurs performances sont évaluées et comparées à partir des images traitées précédemment. Finalement, nous proposons une

troisième approche qui consiste à faire collaborer les deux opérateurs de détection des contours. Une première étape commune aux approches envisagées est l'estimation du centre de la structure annulaire à partir de la localisation d'un pseudo-centre estimé par une méthode de moindres carrés. Finalement, le calcul du centre s'effectue à l'aide d'une simple régression linéaire.

5.1. Détection du centre

La méthodologie de détection développée pour la reconnaissance des anneaux de croissance s'appuie principalement sur la localisation du centre de la structure géométrique formée par les anneaux (voir 5.1). Le principe de base de la détection du centre de la structure annulaire est le suivant : *considérons deux pixels appartenant à des anneaux supposés circulaires et concentriques, les droites ayant comme orientation la direction du gradient se rencontreront au centre de la structure annulaire.* A partir de ce principe, nous proposons trois algorithmes : la moyenne sur les intersections des orientations du gradient (Bouvrais et al [37]); la détection d'un pseudo-centre par la méthode des moindres carrés et médianes; et l'estimation finale du centre par la technique de la régression linéaire.

5.1.1 Méthode 1 : Moyenne sur les intersections des orientations du gradient

Le principe de base de la détection du centre proposé par Bouvrais et al ([37]) consiste à tirer au hasard une suite de N pixels P_i dans l'image et d'associer à chaque

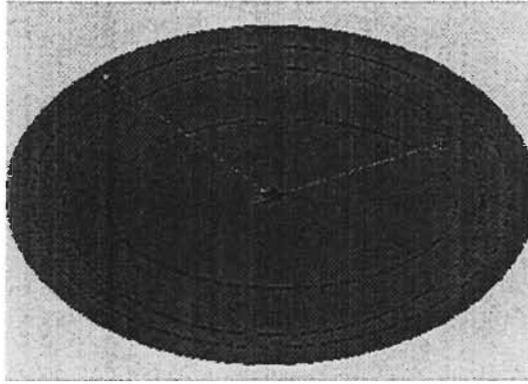


FIG. 5.1: Processus de détection du centre

pixel un angle θ_i correspondant à l'orientation du gradient en ce point. Pour chacun de ces pixels, on considère la droite faisant l'angle θ_i avec l'axe des abscisses. Il en résulte $N - 1$ intersections des $N - 1$ paires de droites ainsi obtenues. Le centre est évalué à partir de la moyenne des coordonnées des $N - 1$ intersections. Par la suite, les points d'intersection dont les coordonnées sont à plus d'un écart-type des moyennes en x et y respectivement sont rejetés et le centre est estimé à partir de la moyenne de ce nouvel échantillon dont les valeurs aberrantes ont été retirées. Afin d'améliorer cette technique, il faut tenir compte qu'un pixel tiré au hasard puisse appartenir à une zone fortement bruitée. Dès lors, l'angle d'orientation calculé peut ne pas refléter l'appartenance à un anneau. Pour chaque pixel P_i tiré au hasard, on retient la valeur de l'angle du gradient du pixel dont l'orientation est la plus près de l'orientation moyenne des pixels voisins dans un masque de dimension 3×3 centré au pixel P_i .

Toutefois, l'application d'une approche basée essentiellement sur l'orientation du gradient donne des résultats moins précis à cause du bruit important qui affecte les images d'otolithes. Dans la section qui suit, nous proposons une approche qui tient

compte des caractéristiques (robustesse au bruit) de ce type d'images.

5.1..2 Méthode 2 : moindres carrés et médiane

La stratégie proposée consiste à localiser, dans un premier temps, une approximation du centre que nous appellerons le *pseudo-centre* de la structure et, dans un deuxième temps, à définir une zone avoisinante ayant une forte probabilité de contenir le centre. Cette zone servira ultérieurement à préciser la position du centre.

La localisation du pseudo-centre et de la zone d'attraction du centre s'effectue à partir de l'image des orientations θ_i du gradient. Une première étape consiste à tirer au hasard M orientations (points de cette image), lesquelles sont idéalement orientées vers le centre. Notons $P_i = (x_i, y_i), i = 1, \dots, M$, les M coordonnées des points de l'image originale correspondant aux M orientations θ_i tirées au hasard et (u, v) le centre recherché. Alors, toutes les droites d'orientation θ_i passant par le centre (x_i, y_i) doivent vérifier l'égalité suivante :

$$\frac{u}{\cos \theta_i} - \frac{v}{\sin \theta_i} = \frac{x_i}{\cos \theta_i} - \frac{y_i}{\sin \theta_i}. \quad (5.1)$$

Notre objectif est d'estimer les coordonnées (u, v) du pseudo-centre de la structure.

Pour cela, notons ;

$$a_i = \frac{1}{\cos \theta_i}, \quad b_i = \frac{-1}{\sin \theta_i}, \quad c_i = \frac{x_i}{\cos \theta_i} - \frac{y_i}{\sin \theta_i}, \quad (5.2)$$

d'où finalement le centre (u, v) doit vérifier l'équation linéaire suivante ;

$$u a_i + v b_i = c_i, \quad i = 1, \dots, M. \quad (5.3)$$

On trouve les coordonnées (u, v) en effectuant une régression linéaire simple des valeurs (a_i, b_i) et (c_i) . Étant donné que les images d'otolithes sont très bruitées, le tirage des M points dans l'image des orientations du gradient est répété K fois afin d'améliorer la qualité de l'estimation. On obtient, ainsi, un échantillon de taille K des coordonnées (u_j, v_j) du pseudo-centre et le pseudo-centre retenu, que l'on note (u_c, v_c) , est obtenu en calculant les médianes de chacune des coordonnées. Finalement, la zone du centre est définie de façon empirique comme étant un voisinage de taille de 50×50 pixels de part et d'autre du pseudo-centre. La figure (5.2) illustre le résultat de cette première étape.

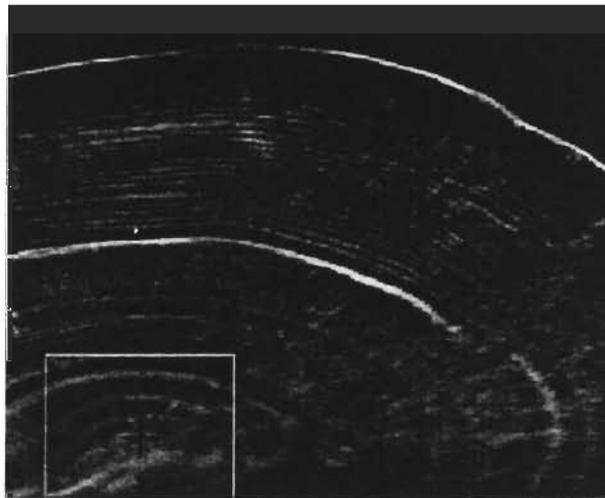


FIG. 5.2: Pseudocentre et voisinage

L'étape qui suit est un raffinement dans la procédure de recherche du centre à partir du pseudo-centre et de la zone du centre définis à l'étape précédente. Cette recherche s'effectue à partir de l'image originale qui après seuillage, a été binarisée. Ce seuillage est

fait à partir de l'histogramme des intensités des niveaux de gris de l'image (5.3). Cette nouvelle représentation de l'otolithe met en évidence des cernes blanches représentant les anneaux, les artefacts ainsi que le bruit présent dans l'image. La technique utilisée consiste à tirer au hasard M (≈ 600) points dans cette image binaire et pour chaque point, une vérification est faite afin de déterminer s'il appartient ou non à un anneau de la structure. Cette vérification s'effectue à l'aide d'un masque 19×19 centré au point traité, dans lequel on compte le nombre de pixels blancs. Si le masque contient plus de 10 pixels blancs (seuil empirique), alors le point traité est considéré comme faisant partie d'un anneau, sinon il est rejeté. Supposons que N points sont retenus suite à ce tirage, alors pour chaque point $P_i = (x_i, y_i)$, pour $i = 1, \dots, N$, une régression linéaire est effectuée sur l'ensemble des pixels blancs du masque. Cette régression fournit donc une droite d'équation $y_i(x) = a_i x + b_i$, laquelle, localement, épouse approximativement la courbure d'un segment d'anneau de croissance. Par la suite, il est possible, à partir de chacune de ces équations, de calculer la direction perpendiculaire à un anneau, et ce, localement. On obtient pour chaque point P_i , une droite d'équation $y_i(x) = -x/a_i + b_i$ où $a_i = y_i + x_i/b$ (voir 5.4).

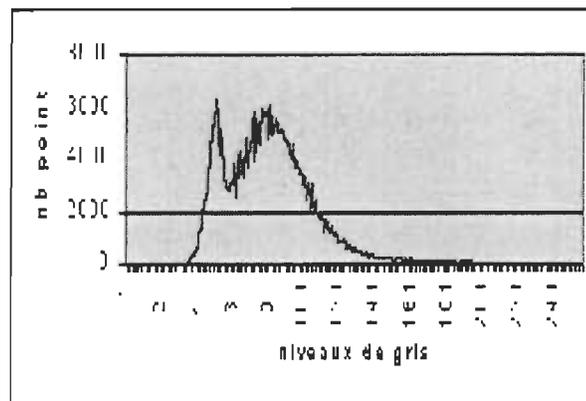


FIG. 5.3: Histogramme de l'image

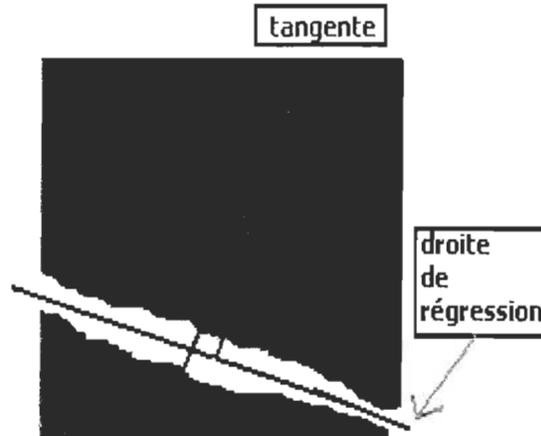


FIG. 5.4: Calcul de la droite de régression et de la tangente associée

Puisque ces droites, du moins en théorie et localement, sont concourantes et passent par le centre, alors l'intersection de toute paire de droites perpendiculaires constitue une approximation du centre de la structure. Afin de s'affranchir du bruit sur l'ensemble de l'otolithe, ne sont retenues que les intersections situées dans la zone du centre définie à l'étape précédente. Finalement, le centre (x_c, y_c) est calculé comme étant la médiane des coordonnées des L valeurs retenues ($L \leq N$) et du pseudo-centre doté d'un poids de $\frac{N}{N+k}$; dans ce cas, N est le nombre de points tirés au hasard pour le calcul du pseudo-centre et k est la taille de l'échantillon utilisé dans le calcul du pseudo-centre à l'étape précédente. On trouve illustré aux figures (5.5) le résultat du calcul du centre suite à l'application de ces deux étapes conjuguées à deux images d'otolithes.

5.2. Détection orientée des anneaux de croissance.

Dans ce chapitre, nous présentons deux approches de détection des anneaux de croissance par seuillage le long de demi-droites dont l'origine est le centre de la structure

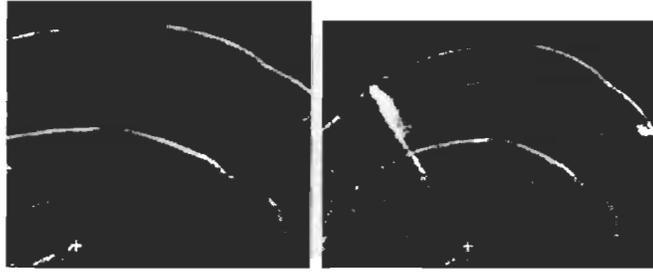


FIG. 5.5: Localisation du centre sur deux images d'otolithes

annulaire. Le premier algorithme est basé sur un seuillage des intensités des niveaux de gris dans des directions privilégiées tandis que la seconde approche consiste à détecter les contours des anneaux par seuillage des intensités de gradient. Ces deux opérateurs de détection sont appliqués à des secteurs d'otolithes et leurs performances sont comparées. Finalement, nous proposons une stratégie de détection basée sur la collaboration entre les deux approches. Nous terminons ce chapitre en présentant une approche issue de la littérature.

Avant d'aborder la description de ces méthodes de détection, nous allons présenter les résultats préliminaires obtenus par Bouvrais et al ([37]) qui sont à la base de la méthodologie que nous avons améliorée et qui fait l'objet de ce chapitre.

5.2..1 Détection radiale des anneaux

Bouvrais et al ([37]) ont développé une approche basée sur la détection radiale des anneaux d'otolithes, dont le principe de base consiste en un seuillage d'angles du gradient le long de rayons issus du centre de la structure annulaire. Le centre fut calculé selon la méthode 1 (Moyenne sur les intersections des orientations). En effet, lorsque

l'on parcourt un rayon sur toute sa longueur, la direction du gradient aux points situés sur les anneaux est, dans le meilleur des cas, dans le même sens que celle du rayon orienté vers le centre. Ainsi, chaque point θ de l'image d'orientation du gradient, sur un rayon donné, est comparé à l'angle α du rayon. Si $|\theta - \alpha| \leq \beta_s$, alors ce point appartient à un anneau. L'angle β_s est un seuil empirique (les tests ont été effectués avec $\beta_s = \frac{\pi}{4}$). Pour améliorer le processus d'estimation des anneaux, cette opération est effectuée sur un secteur (ensemble de rayons) centré sur le rayon courant. En effet, si l'analyse porte sur une section d'otolithe d'angle θ , alors celle-ci est subdivisée en M sous-sections d'angles égaux à $\epsilon = \frac{\theta}{M}$. À chaque rayon principal est associé une section d'angles $\frac{\epsilon}{2}$ de chaque côté de celui-ci. Les valeurs d'orientations des pixels de chaque rayon principal sont parcourues vers l'extérieur de la structure à partir du centre afin de procéder au seuillage. À l'aide de cette procédure, un attribut (binaire) est assigné à chaque pixel (présence ou non d'anneau). Afin d'améliorer la détection, chaque sous-section d'angle ϵ centrée sur chaque rayon principal est subdivisée à l'aide de rayons secondaires émanant du centre et l'analyse est répétée sur l'ensemble des rayons secondaires.

Finalement, pour chaque rayon principal, un score est affecté à chaque pixel en cumulant les réponses binaires sur les rayons secondaires de la sous-section associée. Un seuillage (nombre minimal de pixels ou rayons secondaires) est effectué sur la valeur de ce score, afin de déterminer si un pixel appartient à un anneau circulaire en cette position. La figure (5.6) résulte de l'application de cet algorithme à une image d'otolithe.

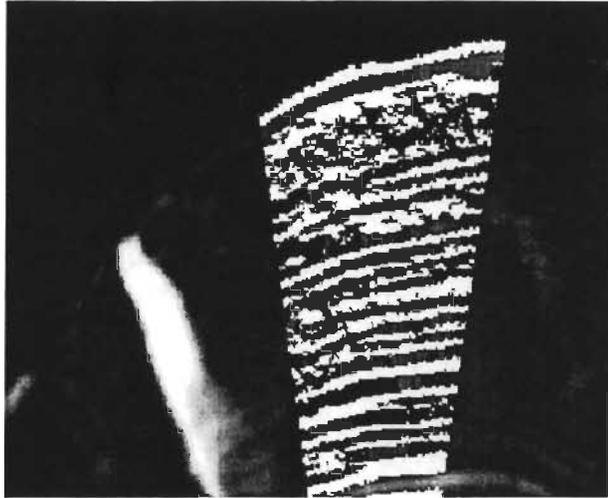


FIG. 5.6: Détection radiale des anneaux

5.2..2 Seuillage sur les niveaux de gris.

Dans un premier temps, considérons l'image originale, soit celle des niveaux de gris, pour laquelle plusieurs rayons ou demi-droites émanant du centre géométrique sont considérés. Pour chacun de ces rayons, une règle de décision d'appartenance à un anneau est appliquée à chacun des pixels. La valeur médiane S des intensités de tous les pixels du rayon est calculée et constitue un premier seuil (5.7). Un pixel, appartenant au rayon d'intensité médiane S , appartiendra à un anneau si son niveau de gris est supérieur ou égal à S . On note comme suit une partition des pixels de l'image ;

$$A = \{(x, y) | f(x, y) \geq S\}, \quad B = \{(x, y) | f(x, y) < S\},$$

où A est l'ensemble des pixels qui peuvent appartenir aux anneaux. La seconde étape de cette approche consiste à raffiner cette première sélection de pixels, soit l'ensemble A . En effet, pour chaque pixel appartenant à A , si une fenêtre glissante 5×5 centrée à ce pixel contient plus de 5 pixels appartenant à l'ensemble A , alors le pixel central est supposé appartenir à un anneau, sinon il est rejeté. Le résultat de l'application de cette

méthode est montré à la figure (5.9) où les pixels blancs appartiennent à des anneaux. La figure (5.8) illustre les similitudes qui existent entre les extremas de la fonction intensité (5.7), les anneaux détectés et leurs contours le long d'une demi-droite d'angle $\frac{\pi}{2}$ à partir du centre géométrique.

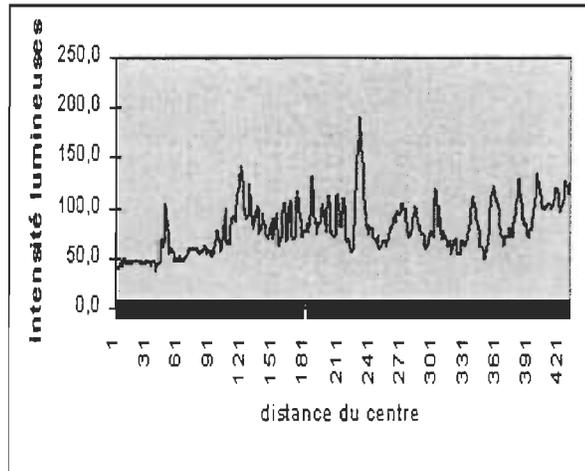


FIG. 5.7: Intensité des pixels d'un rayon

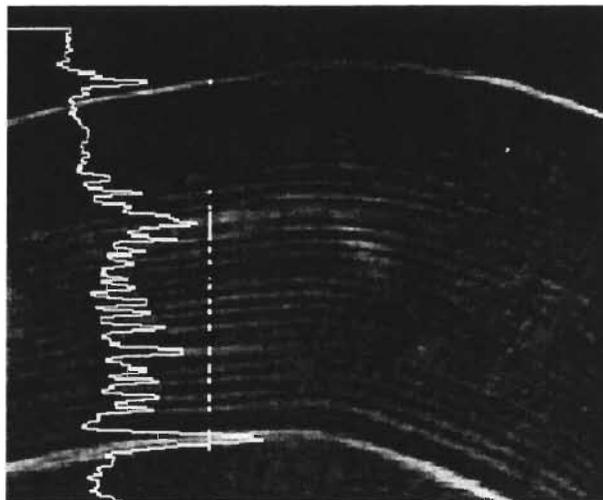


FIG. 5.8: Superposition des anneaux et du graphe des niveaux de gris.

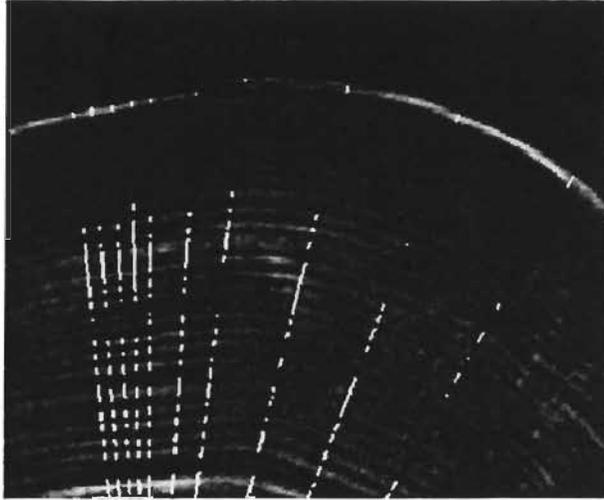


FIG. 5.9: Détection des anneaux

5.2..3 Seuillage sur les normes du gradient

La seconde approche repose sur l'application de l'opérateur du gradient sur un voisinage local de chaque pixel de l'image des niveaux de gris, le long de rayons dont l'origine est le centre de la structure. La position des frontières ou bordures des anneaux correspond aux pixels dont l'intensité du gradient est supérieure à un seuil donné. Parmi les opérateurs de calcul du gradient (Prewitt, Robert et Sobel), nous avons opté pour l'opérateur de Sobel défini à l'aide d'un masque 3×3 . Dans un premier temps, un seuil est fixé expérimentalement. Cependant, nous avons constaté qu'aucun seuil a priori fixé pour l'ensemble des rayons ne permettait une détection probante des bordures des anneaux. Conséquemment, nous avons utilisé un seuil variable, calculé en fonction des valeurs des intensités du gradient le long de chaque rayon ou axe retenu dans l'analyse. Donc, pour chaque direction émanant du centre, la moyenne μ et l'écart-type σ des normes du gradient ont été calculés et le seuil est fixé à la valeur suivante ;

$$S = L - \frac{\sigma}{3}, \quad (5.4)$$

où L est le maximum observé et σ est l'écart-type. Le facteur $\frac{1}{3}$ a été déterminé empiriquement. Dans un premier temps, tous les pixels dont l'intensité du gradient est supérieure ou égale à S sont retenus comme pixels appartenant aux bordures. Dans un deuxième temps, une analyse locale est effectuée à l'aide d'un voisinage 3×3 centré en tout pixel dont l'intensité du gradient est comprise entre μ et S . Si le pixel central est un maximum local dans cette fenêtre, alors nous concluons qu'il appartient au contour d'un anneau. Les figures (5.10 et 5.11) illustrent les résultats obtenus à l'aide de cette approche.

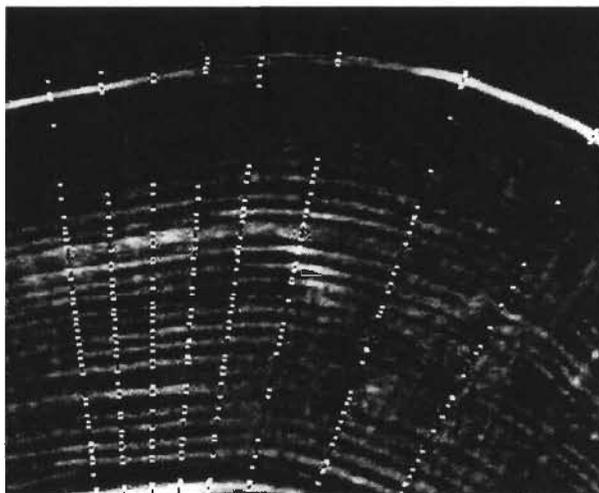


FIG. 5.10: Détection des bordures des anneaux

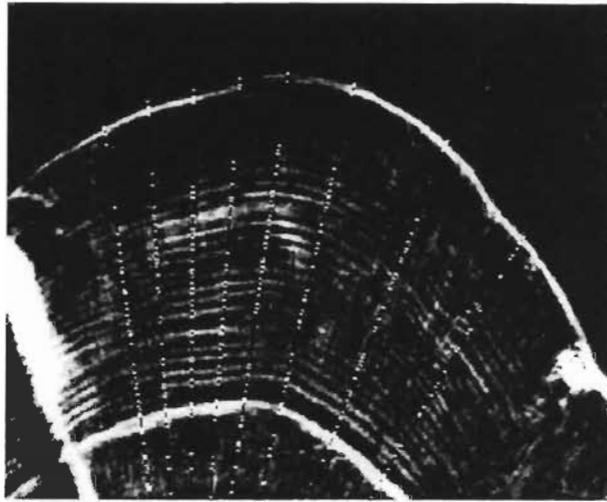


FIG. 5.11: Détection des bordures des anneaux

Afin de confirmer la pertinence de cet opérateur de détection de contours, une autre méthode a été testée. Cette méthode (Touzi [36]) est basée sur le calcul du contraste dans le voisinage de chaque pixel.

5.2..4 Méthode de segmentation de Touzi

L'approche proposée par Touzi ([36]) consiste à calculer le contraste dans une fenêtre centrée à chaque pixel de l'image de niveaux de gris, pour déterminer les pixels de contours. En effet, pour une fenêtre homogène le contraste $r = \min(\frac{m_1}{m_2}, \frac{m_2}{m_1}) \approx 1$, avec m_1 et m_2 les intensités moyennes de deux sous-fenêtres, obtenues en divisant la fenêtre courante selon une direction (verticale, horizontale et les deux diagonales) passant par le pixel central. Ainsi, s'il existe deux sous-fenêtres avec un contraste proche de 0, le pixel central est considéré comme un point de contour. Nous avons appliqué ce principe à l'ensemble des pixels le long de directions issues du centre, dans le but d'identifier les contours des anneaux d'otolithes. Pour chaque pixel, la fenêtre utilisée est de 5×5 pixels. Comparativement au seuillage sur les intensités du gradient (voir figures 5.10

et 5.11), les contours obtenues (voir la figure 5.12) ne délimitent pas clairement les bordures des anneaux. Cette méthode n'a pu fournir des résultats meilleurs que ceux obtenus précédemment.



FIG. 5.12: Détection des contours par l'approche de Touzi

5.2.5 Collaboration des méthodes

Les deux méthodes décrites précédemment (voir sections 5.2.2 et 5.2.3) donnent des résultats satisfaisants. Plutôt que de privilégier un de ces opérateurs de détection, nous avons opté pour une collaboration de ces derniers afin d'améliorer l'estimation du nombre d'anneaux de croissance. Pour cela, nous appliquons le seuillage sur les intensités du gradient à l'ensemble B des points n'appartenant pas aux anneaux (voir section précédente). Ce qui permet la détection des contours des anneaux constitués par les éléments de A et ceux des anneaux qui n'ont pas été trouvés lors du seuillage sur les niveaux de gris. Les figures (5.13 et 5.14) montrent les anneaux et les contours détectés par la méthode de collaboration.

Ce choix de procédure de collaboration est motivé, dans un premier temps, par le fait que dans les zones moins bruitées de l'image, zones pour lesquelles les anneaux

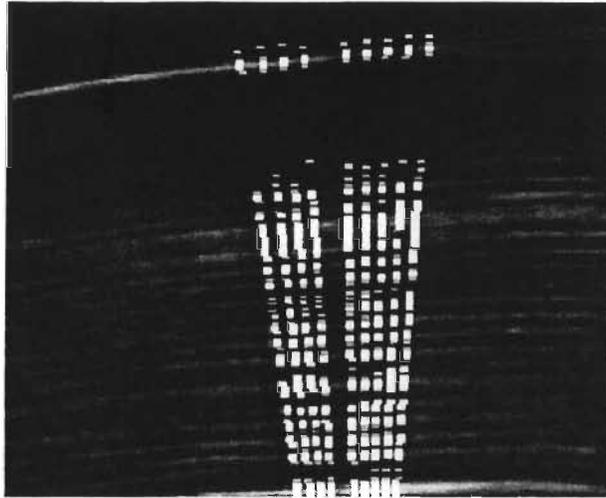


FIG. 5.13: Méthode de collaboration (Otolithe 1)

sont identifiables, les résultats des deux opérateurs sont similaires (voir les figures 5.9, 5.11 et 5.15). En effet, sur la portion de l'image originale présentée à la figure (5.15), nous comptons 15 anneaux (blanc) détectés contre 34 contours (noir). De plus, on note que certains contours obtenus à l'aide du seuillage sur les intensités du gradient ne correspondent à aucun anneau détecté (voir les figures 5.9, 5.11 et 5.15); d'où l'avantage de réaliser une collaboration des deux opérateurs. Deuxièmement, dans les parties fortement bruitées le seuillage sur les intensités du gradient est plus performant. En effet, comparativement au premier opérateur, le second opérateur permet l'identification d'un grand nombre de contours. Cependant, la détection d'artéfacts et des faux anneaux y est aussi accentuée. De plus, l'opérateur ne trouve pas toujours les deux contours de chacun des anneaux (voir figure 5.15). Pour toutes ces raisons, il est donc difficile d'estimer correctement l'âge du poisson.

Nous avons donc tenu compte des performances des deux opérateurs dans les régions

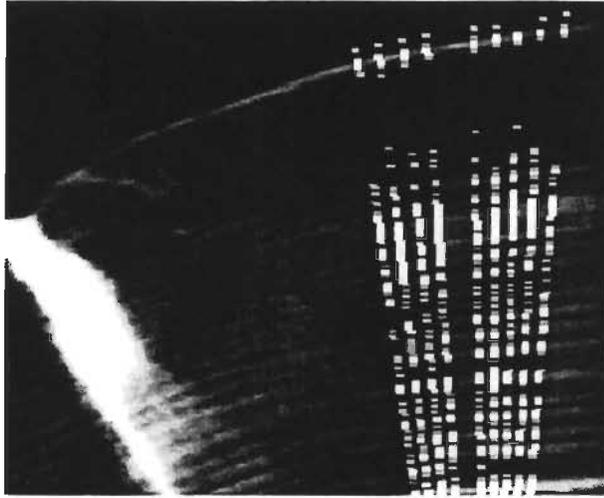


FIG. 5.14: Méthode de collaboration (otolithe 2)

les moins floues des images, pour décider de l'ordre d'application des deux approches dans leur collaboration. La première étape de cette collaboration des opérateurs revient à effectuer une partition des pixels d'un rayon en deux ensembles A et B selon les critères définis à la section 3.3.1. La deuxième étape se résume à l'application d'un seuillage sur les normes du gradient (section 3.3.2) sur les pixels, dont les coordonnées correspondent à ceux de l'ensemble B . Ces opérations sont effectuées le long de directions dont l'origine est le centre de la structure annulaire. Cette méthodologie nous permet de détecter environ 17 anneaux de croissance, sur la portion de l'otolithe présentée à la figure (5.16), dont 16 ont été identifiés lors de la première phase et 2 contours supplémentaires, appartenant à des cernes des régions plus bruitées, sont par la suite identifiés. La méthode de comptage est basée sur l'extraction des composantes horizontales et verticales de la portion d'otolithe utilisée pour détecter les anneaux. En effet, une opération de convolution entre l'image ayant les anneaux ou les contours marqués (par exemple blanc ou noir) et un masque (H_1 ou H_2) de Prewitt permet de mettre en valeur les structures horizontales ou verticales de cette image. Le choix des

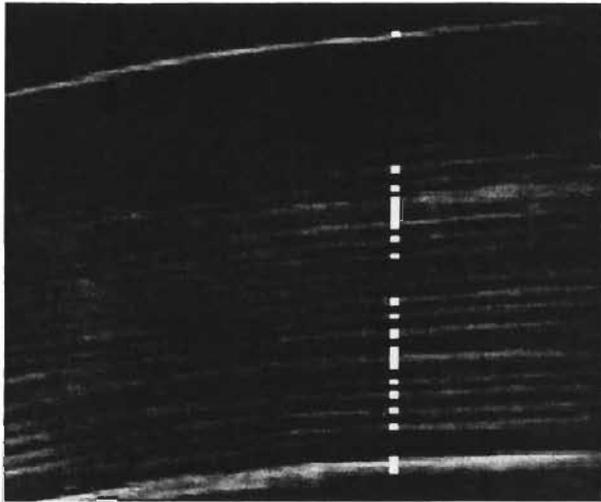


FIG. 5.15: Méthode de collaboration le long d'un axe

composantes à extraire dépend de la région de détection préalablement définie. Par exemple, sur la figure (5.17) nous avons illustré la détection des anneaux dans une région. Pour compter les anneaux marqués de cette figure, nous avons effectué une convolution de l'image (5.17) avec le masque H_1 , ce qui permet l'extraction des composantes horizontales et l'estimation de l'âge est réalisée de la manière suivante : nous comptabilisons, dans un premier temps, le nombre d'anneaux le long d'une première direction (par exemple celle de gauche sur 5.18) et nous gardons en mémoire la distance par rapport au centre de la structure annulaire de chacun des anneaux. Dans un deuxième temps, nous parcourons les autres rayons et à chaque présence d'anneau, nous comparons L (sa distance au centre) avec toutes les distances précédemment mémorisées pour éviter la répétition. S'il existe une distance D tel que $D \in [L - k; l + k]$, l'anneau courant n'est pas considéré, sinon il est comptabilisé et sa distance est gardée en mémoire. La constante $k(\approx 5)$ est choisie d'une manière empirique.

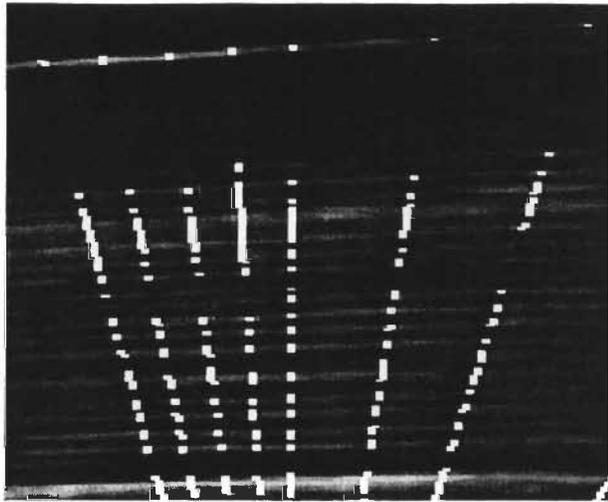


FIG. 5.16: Image des anneaux par la méthode de collaboration

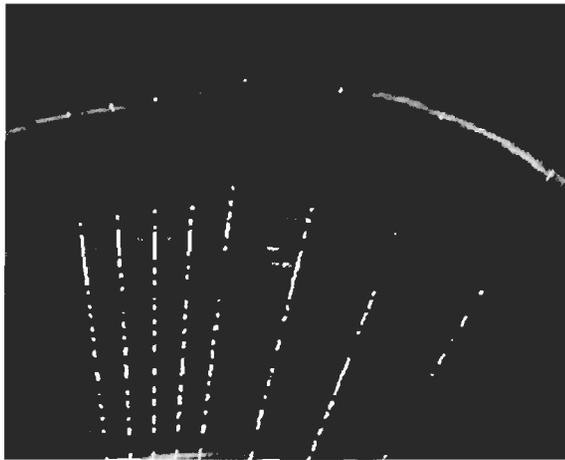


FIG. 5.17: Image des anneaux

	anneaux par rayon	nombre d'anneaux retenus
direction 1	16	16
direction 2	17	0
direction 3	17	0
direction 4	17	0
direction 5	18	1
direction 6	15	0
direction 7	17	0
direction 8	9	0
Total des anneaux		17

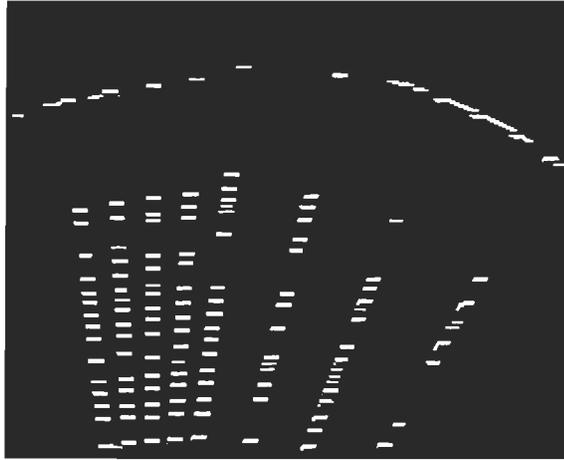


FIG. 5.18: Image permettant le comptage des anneaux

Tableau 1 : Comptage des anneaux

Le tableau 1 présente les résultats obtenus lors de l'application de cet algorithme. Nous remarquons que 17 anneaux ont été comptabilisés dans la portion d'otolithe présentée sur la figure (5.18). A la lumière des résultats présentés dans ce chapitre, nous pouvons conclure que la collaboration des deux opérateurs retenus a permis d'améliorer la détection des anneaux de croissance. Cependant, ces deux techniques restent très sensibles au bruit. Pour pallier à cet handicap, l'utilisateur de ces algorithmes devrait améliorer les étapes de préparation des otolithes et de la saisie des images.

Chapitre 6

Analyse des résultats et discussion

Nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus suite à l'application des algorithmes d'estimation du centre et de détection des anneaux de croissance. Un rappel de nos objectifs semble approprié. Notre but principal était d'estimer l'âge des poissons juvéniles. Pour y arriver, trois objectifs majeurs ont été fixés : améliorer la qualité des images, estimer la position d'un centre pour la structure annulaire et détecter les anneaux présents sur l'otolithe.

Une première section portera sur les images utilisées et la qualité de celles-ci. La seconde section portera sur l'apport et les limites du lissage sur la qualité des images. La troisième section sera consacrée à l'analyse des résultats obtenus. Nous tenterons aussi de déterminer le lien entre la qualité des images et la précision des algorithmes. Une dernière section montrera les résultats obtenus à l'aide de l'approche géométrique sur les anneaux de croissance d'arbre afin de démontrer l'efficacité de la méthodologie de segmentation sur des objets ayant une structure annulaire. Finalement, nous concluons par une énumération de travaux futures possibles pouvant permettre l'orientation des recherches visant un système automatique de détection des anneaux de croissance.



FIG. 6.1: Effets de la lumière (à gauche), marques de sablage (au centre) et anneaux visibles (à droite)

6.1. Les images numérisées

Nous avons utilisé un ensemble de six images d'otolithe de poissons, toutes de poissons âgés de 30 jours, pour développer les algorithmes. Les images dont nous disposions étaient très bruitées (voir figure 6.1) et nous ne pouvions, pour des raisons techniques d'appareillage, saisir que des portions d'otolithes. On pourrait dire que nous nous sommes imposés des conditions limites pour le développement d'algorithmes de segmentation d'anneaux de croissance. Ces conditions nous ont imposé un choix de zones de détection qui contenaient la totalité des anneaux (voir image de droite sur la figure 6.1).

Un bruit non négligeable est celui provenant de l'éclairage utilisé lors de la saisie des images. Lorsque cet éclairage n'est pas uniformément réparti sur la surface de l'otolithe, cela entraîne la présence de zones d'ombres et de lumière (6.1 à gauche). Ce problème connu des biologistes nécessiterait la mise au point d'un système d'éclairage particulier et mieux adapté. Lors du tirage aléatoire des pixels nécessaires à l'estimation du centre, il est possible que des points appartenant à une zone bruitée soient retenus (voir image de gauche sur 6.1), ce qui introduit un biais sur la position du centre.

Toutes les règles et algorithmes décrits dans les chapitres précédents, et qui permettent l'estimation du centre et la détection des anneaux, ont été obtenus à l'aide de ces six images. A cet ensemble d'images d'otolithes, s'ajoutent cinq images de troncs d'arbres. Ce nouvel échantillon a permis la validation de la méthodologie.

6.2. Les limites du prétraitement

Les étapes de prétraitement n'ont pas pour objectif de faire disparaître tout le bruit présent dans une image. Ce sont des étapes préalables destinées à faciliter les étapes ultérieures de segmentation. Elles visent donc à renforcer la ressemblance des pixels d'une même région. Le lissage gaussien a été retenu dans ce mémoire et il s'est avéré le plus performant parmi ceux qui ont été testés. Cependant, tout comme les anneaux de croissance, les zones d'ombres et de lumière ainsi que les marques laissées par le processus de sablage contiennent des discontinuités et même un filtre idéal ne pourrait éliminer ces discontinuités. Il existera toujours un risque d'élimination des anneaux lors du lissage. Hors les filtres mentionnés au chapitre 2, des tests de lissage ont été effectués avec des transformées par ondelettes mais les résultats ne sont pas concluants à ce stade de développement.

6.2..1 Détection du centre

La première étape de la méthode géométrique proposée consiste, tel que vu antérieurement, sur la détection du centre de la structure annulaire. Cinq tests ont été effectués

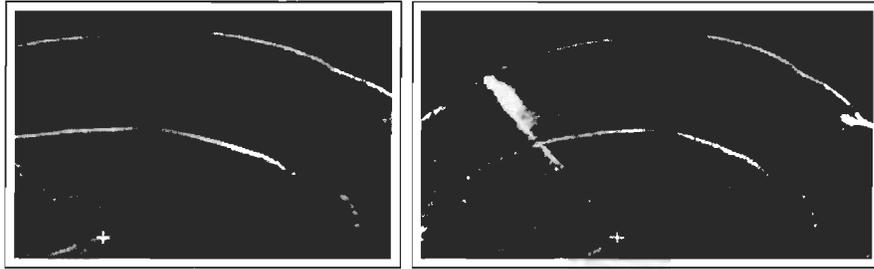


FIG. 6.2: Images d'otolithes testées

sur des images d'otolithes et de coupes transversales d'arbres. Les images (6.2 à 6.5) témoignent de la qualité des résultats obtenus (croix=centre). Les images utilisées dans ces tests ont des caractéristiques particulières et la forme des anneaux n'est pas la même d'une image à une autre. Pour les images d'otolithes, les anneaux sont clairement identifiables sur l'image à gauche de la figure (6.2), tandis que sur l'image à droite de la figure (6.2) et sur l'image (6.3), l'effet de la lumière utilisée lors de la saisie a masqué une grande partie de la structure. Ainsi, la zone représentant le nucléus sur l'image (6.3) est difficilement identifiable. C'est aussi le cas de la partie supérieure gauche de l'image à droite sur la figure (6.2). Pour ce qui est des coupes transversales d'arbres, on peut remarquer une différence au niveau de la forme des anneaux. Sur la figure (6.4), les anneaux ont une forme circulaire tandis que sur la figure (6.5), les anneaux le sont moins. Nous avons tiré au hasard environ 600 points pour estimer la position du centre sur chacune de ces images.

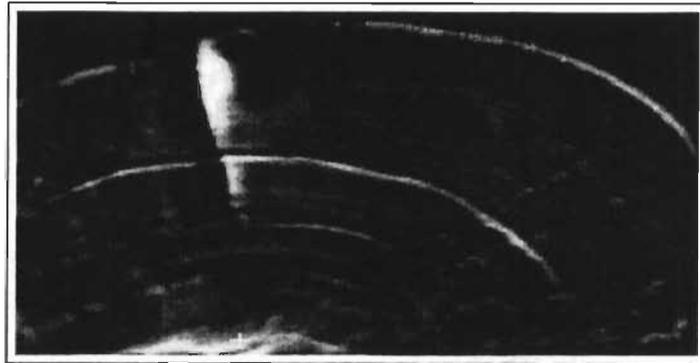


FIG. 6.3: Troisième image d'otolithe testée

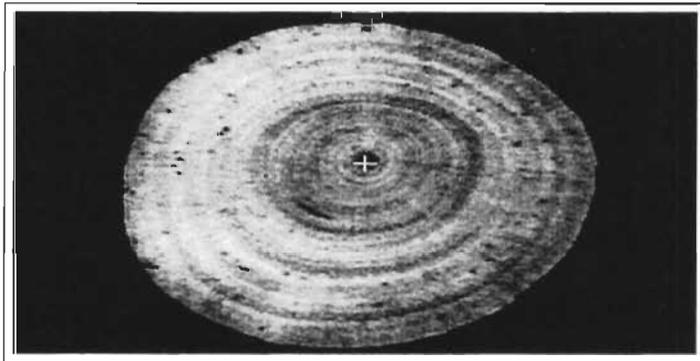


FIG. 6.4: Première image d'arbre testée

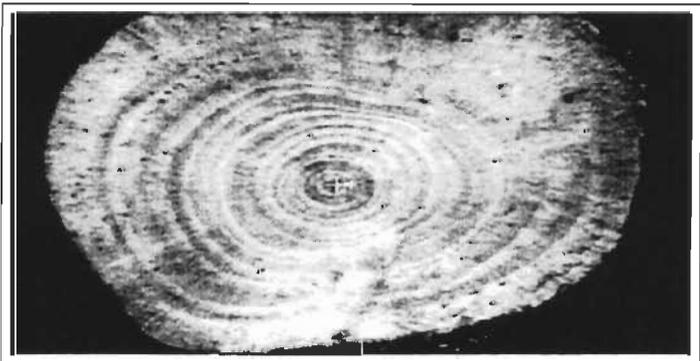


FIG. 6.5: Deuxième image d'arbre testée

On remarque que la position du centre est bien localisée dans la zone du nucléus (région de départ de la formation des anneaux), et ce, malgré la qualité de l'image et la forme des cernes dans la structure annulaire.

6.2..2 Qualité de la détection du centre et des anneaux

Dans cette sous section, nous commenterons, dans un premier temps, les résultats obtenus à la section précédente. Dans un deuxième temps, nous discuterons du taux d'efficacité de la reconnaissance en terme de pourcentage de détection des anneaux dans les zones où les anneaux peuvent être visuellement identifiés. Bien que nous ayons testé cette technique sur cinq images différentes, les images qui nous intéressent le plus sont celles des figures (6.2, 6.4 et 6.5); celles où la structure annulaire est clairement identifiable et pour lesquelles la structure de l'image fût peu altérée lors des étapes de saisie et de numérisation. Sur l'image (6.3), l'emplacement du centre est moins précis étant donné la perte d'information sur les anneaux. Ainsi, lors du tirage des points en vue de l'estimation du centre, il est plus probable d'échantillonner dans des zones bruitées. Malgré cela, l'estimation est robuste. Dans le cas le plus simple, si l'on considère uniquement les images ayant une qualité équivalente à celles des figures (6.2, 6.4 et 6.5), on obtient un repérage de qualité.

La détection des anneaux par le seuillage sur les niveaux de gris nous permet de détecter clairement la présence d'anneaux le long d'une direction donnée. Cette approche a donné des résultats satisfaisants comme on peut le remarquer sur l'image de droite de la figure (6.6), ainsi que sur les figures (5.9, 6.7 et 6.2..2).

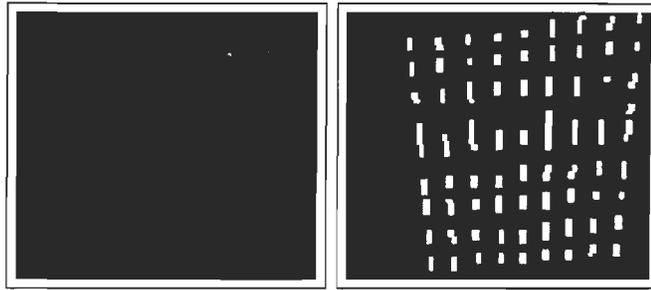


FIG. 6.6: Détection dans une zone contenant tous les anneaux

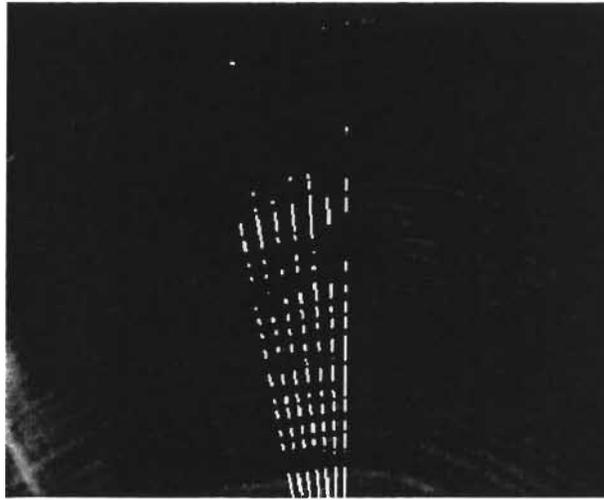


FIG. 6.7: Détection des anneaux

Dans les zones les moins floues de l'image, l'algorithme détecte la majorité des anneaux de croissance présents (voir figure 6.6). La figure (6.2..2) présente le résultat du seuillage sur les niveaux de gris d'une coupe transversale d'arbre. Sur cette image, on peut observer les similitudes qui existent entre les extremums de la fonction intensité, les anneaux en blanc et les contours en noir. Dans cette zone, l'algorithme détecte tous les 19 anneaux de croissance présents. Cette figure montre les performances de cet opérateur de détection des anneaux sur une zone d'arbre gougée manuellement.

Cependant, le lissage sur les niveaux de gris reste très sensible au bruit. Aussi, les seuils sont calculés indépendamment, en tenant compte de tous les pixels de chaque

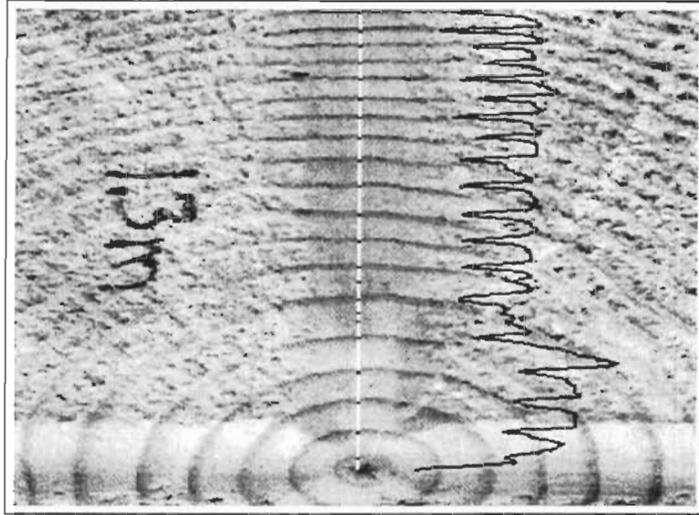


FIG. 6.8: Détection des anneaux par seuillage sur les niveaux de gris le long d'un rayon d'angle $\frac{\pi}{2}$ sur un tronc d'arbre

rayon traité. Lorsque la structure annulaire est parfaitement définie, la détection ne cause aucun problème (voir les figures 5.9, 6.6 et 6.2..2). Par contre, en présence de bruit, les résultats sont moins concluants comme nous pouvons le constater sur les figures (5.9 et 6.7). La présence des zones d'ombre et de lumière peut aussi biaiser les résultats. En effet, même si le seuillage arrive à identifier ces deux types de régions distinctement (si elles sont dans la direction de recherche), il risque fortement de ne pas détecter les anneaux contenus dans ces zones de façon précise. Dans un tel cas, l'utilisation des seuils multiples serait adéquate.

Pour ce qui est de la détection des contours des anneaux, les résultats des figures (5.10, 5.11 et 6.10) démontrent son efficacité. Son principal handicap est sa sensibilité au bruit. Elle permet effectivement de détecter les discontinuités présentes le long d'une direction tirée du centre. Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, les

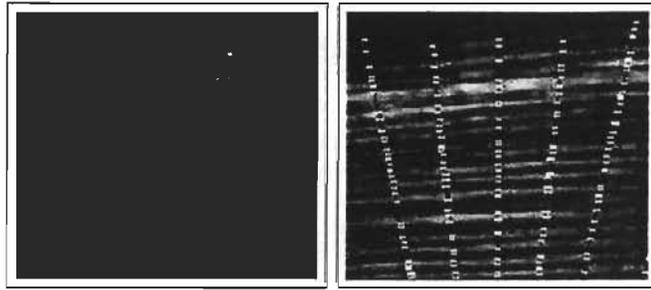


FIG. 6.9: Détection des contours dans une zone

artifacts et les zones d'ombre et de lumière contiennent aussi des discontinuités. Il peut donc arriver que l'algorithme détecte un contour appartenant au bruit comme étant celui d'un anneaux. De plus, il lui arrive de trouver un seul contour pour un anneau existant (voir l'image de droite de la figure 6.9). La solution à ce problème réside une fois de plus dans les étapes de préparation d'otolithe, de saisie et de numérisation des images. C'est pour s'affranchir de ce défaut que nous avons fait collaborer les deux approches. En effet, l'application des deux algorithmes en collaboration pour détecter les anneaux, suivant une même direction, a permis d'augmenter le taux de détection (5.13 et 5.14), soit de détecter 24 anneaux sur 30 (otolithes de 30 jours). Les 6 anneaux manquants sont ceux près du bord de l'otolithe. Cette zone en bordure est difficile à traiter, car elle est très bruitée et les anneaux y sont compactés.

Les objectifs visés dans le cadre de ce projet de recherche étaient la mise au point d'algorithmes robustes de détection d'anneaux, éventuellement de courbes non nécessairement circulaires, dans des structures annulaires. A cet effet, quelques approches classiques de prétraitement et de segmentation ont été testées sur des otolithes de poissons juvéniles et des coupes transversales d'arbres. Les images utilisées lors du développement d'une approche géométrique originale, ont été numérisées dans des

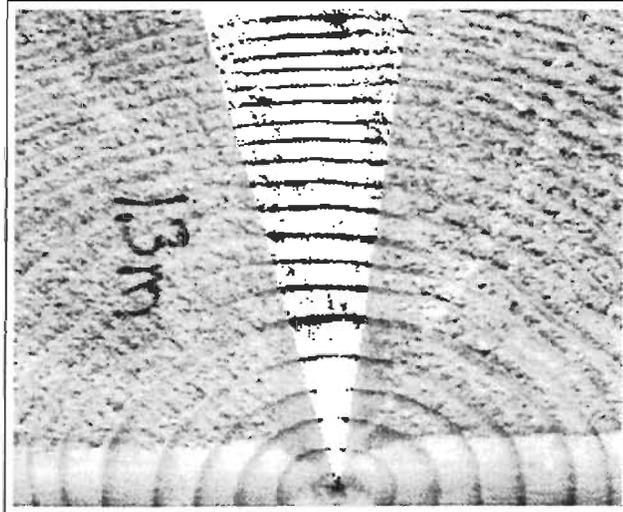


FIG. 6.10: Détection des anneaux d'arbre par seuillage sur le gradient

conditions très élémentaires. Malgré la qualité limitée de ces images, l'approche de segmentation, basée sur la détection d'un centre et le seuillage le long de directions privilégiées, que nous avons développée s'avère efficace.

Conclusion

Dans cette recherche, nous avons mis au point une approche effectuant la détection des anneaux de croissance visant l'estimation automatique de l'âge de poissons juvéniles. Cette technique est constituée de trois étapes. La première étape est basée sur le prétraitement des images et a pour but de réduire le bruit qui s'introduit lors des étapes de préparation de l'otolithe, de la saisie et de la numérisation des images. A l'issue de ce traitement, les images obtenues sont transmises à l'étape de détection du centre. Dans cette seconde partie, l'algorithme réalise, dans un premier temps, une estimation du pseudo-centre. Dans un deuxième temps et dans un voisinage de 50×50 pixels, il effectue l'estimation du centre proprement dit. La troisième étape reçoit donc en entrée l'image lissée et les coordonnées du centre de la structure associée. A cette étape, une demi-droite est tirée du centre suivant une direction quelconque ; on y recherche la présence d'anneaux de croissance par un seuillage sur les niveaux de gris et les contours des anneaux par un seuillage sur les intensités du gradient. Finalement, la collaboration de ces deux approches permet d'améliorer le nombre d'anneaux à trouver. On obtient donc à la sortie du processus l'image de départ sur laquelle les anneaux et les contours correspondants sont visibles. Les résultats que nous avons obtenus montrent que notre approche fonctionne bien. En effet, elle permet d'estimer efficacement le centre des anneaux d'un otolithe et de ceux présents sur un tronc d'arbre. Bien que la méthode proposée ne fonctionne pas sur l'ensemble de l'otolithe et que plusieurs améliorations pourraient y être apportées, il ne faut toutefois pas perdre de vue que la qualité des images est un facteur très important puisque notre approche ne peut détecter des anneaux dans une scène si celle-ci est floue. Tout d'abord, la qualité des images peut être

améliorée lors des étapes de préparation des otolithes, de la saisie et de la numérisation des images. Cela pourrait augmenter la précision aux étapes d'estimation du centre et de détection des anneaux. En effet, dans quelques cas, l'algorithme de détection d'anneaux de croissance n'a pu détecter un anneau effectivement présent dans la scène, ce qui est dû par exemple au phénomène de la répartition de l'éclairage utilisé lors de la saisie. Ce phénomène a tendance à réhausser la valeur des pixels rendant le seuillage sur les niveaux de gris moins efficace. D'autre part, l'algorithme de détection des contours des anneaux a détecté des contours en trop, ce qui est dû à la présence du bruit et des artefacts. Contre ce problème nous n'avons pas trouvé de palliatif. On pourrait donc ajouter à notre approche d'autres étapes de prétraitement pouvant réduire l'effet des artefacts. De plus, le seuillage sur les niveaux de gris et celui sur les intensités du gradient ne sont pas les plus efficaces de tous ni les plus robustes au bruit quant à la détection des régions homogènes et à la détection des contours ; il serait donc intéressant de tester d'autres seuillages le long des rayons et observer si la détection est meilleure. De plus, la mise au point des procédés de saisie des images, avec des techniques de vision élémentaires, s'avèrent nécessaires pour améliorer la qualité des images afin de réduire les sources de bruit autre que celles qui sont inhérentes à la structure même des spécimens étudiés. Finalement, des travaux supplémentaires peuvent être envisagés sur un échantillon de spécimens plus important, afin de développer un estimateur robuste du nombre d'anneaux de croissance à partir des informations obtenues sur un ensemble de demi-droites qui originent du centre de la structure. Le problème de l'estimation du nombre d'anneaux en bordure des structures annulaires (zone compacte) pourrait être résolu par l'utilisation d'une stratégie basée sur la progression des écarts inter-anneaux.

Bibliographie

- [1] R.J. Beamish. 1979a, " Differences in the age of Pacific hake (*Merluccius productus*) using whole otoliths and sections of otoliths", *J. Fish. Res. Board Can.* 36 :141-151.
- [2] R.J. Beamish. 1979b, " New Information on the Longevity of Pacific Ocean Perch (*Sebastes alutus*)", *J. Fish. Res. Board Can.* 36 :1395-1400.
- [3] R.J. Beamish. 1981, " Use of Fin-ray Section to Age Walleye Pollock, Pacific Cod, and Albacore, and the Importance of this Method", *Trans. Am. Fish. Soc.* 110(2) : 287-299.
- [4] R.J. Beamish and D. Chilton. 1977, " Age Determination of Lingcod (*Ophiodon elongatus*) Using Dorsal Fin Rays and Scales.", *J. Fish. Res. Board Can.* 34 :1305-1313.
- [5] S.E. Campana, G. Chouinard, M. Hanson, A. Frechet and J. Bratney. 1998, " Stock Composition of Cod Aggregations Near the Mouth of the Gulf of St. Lawrence in Januar 1996 based on an Analysis of Otolith Elemental Fingerprints", *CSAS Res. Doc.* 98/55.
- [6] J. Rivaton, F. Brouard, F. Grandperrin, M. Kulbicki. 1983, " Notes sur les Lectures de Stries Journalières observées sur les Otolithes de Poissons Démersaux

- Profonds à Vanuatu”, *Notes et Documents d’Océanographie, ORSTOM, Port-Vila, 8 : 8p.*
- [7] F. Lagardere, G. Chaumillon, R. Amara, G. Heineman and J.M. Lago. 1995, ”Examination of Otoliths Morphology and Microstructure using Laser scanning Microscopy. In Recent Developments in Fish Otolith Research.”, *D. H. Secor, J. M. Dean and S.E. Campana. University of South Carolina Press.*
- [8] N. Watabe, K. Tanaka, J. Yamada and J.M. Dean. 1982, ” Scanning Electron Microscope Observations Organic Matrix in the Otolith of the Teleost Fish *Fundulus Heteroclitus* (Linnaeus) and *Tilapia Nilotica* (Linnaeus). ”, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 58, pp. 127-134.*
- [9] S.E. Campana and J.D. Neilson. 1985, ”Microstructure of Otoliths.”, *Can. J. Fish. Aquat. Sci. 42 :1014-1032.*,
- [10] N. Baillon. 1992, ” Otolithométrie en Milieu Tropical. Application à trois Espèces de Poissons du Lagon de Nouvelle Calédonie. ”, *Etudes et Thèse, ORSTOM : 290p.*
- [11] B. Morales-nin. 1987, ” The Influence of the Environnemental Factors of Microstructure of Otoliths of three Demersal Fish Species Caught off Namibia.”, *S. Afr. Res. J. Mar. 36 :255-262,*
- [12] R. L. Radtke. 1984, ”Cod Fish Otoliths : Information Storage Structures. In the Propagation of Cod *Gadus Morhua*.”, *E. Dahl, D. S. Danielssen, E. Mokness, and P. Solemdal. Flodevigen Rapportser, 1, pp. 273-298.*

- [13] B. C. Victor. 1986, "Larval Settlement and Juvenile Mortality in a Recruitment-Limited Coral Reef Fish Population.", *Ecological Monographs* 56(2) : 145-160.
- [14] G. M. Wellington and B. C. Victor. 1988, "Variance in Component of Reproductive Success in Anunderstructured Population of Coral Reef Damsel fish : a field perspective", *American Naturalist* 131 (4) : 588-608 .
- [15] S.E. Campana. 1984, " Microstructure Growth Patterns in the Otoliths of Larval and Juvenile Starry Flounder, *Platichthys stellatus*.", *Can. J. Zool.* 62 :1507-1512,
- [16] R. Lecomte-Finiger, A. Yahyaoui. 1989, "La Microstructure de l'Otolithe au service de la Connaissance du développement larvaire de l'Anguille Européenne.", *C. R. Acad. Scie. Paris*, 308(3) :1-7.
- [17] C. F. Hickling. 1933, "The Natural History of Hake. Part IV. Age Determination and the Growth Rate.", *U. K. Min. Fish. Agr. Food Fish. Inv. Ser. 2*, 13 (2) : 120pp.
- [18] cité dans : D. K. Kimura, A. M. Shimada and S. A. Lowe. 1993, "Estimating Von Bertalanffy Growth Parameters of Sablefish *Anaplocoma fimbria* and Pacific Cod *Gadus macrocephalus* Using Tag-Recaptured Data", *Fishing Bulletin, U. S.* 91 :271-280.
- [19] P. M. J. Woodhead. 1968, "Seasonal Changes in The Calcium Content of the Blood of Arctic Cod.", *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 48, pp. 81-91.
- [20] B.B. Bedford. 1977, " Further Developpment of the Technique of Preparing Thin Selections of Otoliths Set in Black Polyester Resin.", *ICES, C.M. 1977/F* : 24.,

- [21] D. Chilton. 1970, " Preparation and Mounting of Pacific Cod Scales for Age Determination.", *Fish. Res. Board Can. MS Rep. 1086 : 3p.*,
- [22] A. Heltink and C.J. Kuitert. 1989, " Validation of Ageing Techniques on Otoliths of Horse Mackerel (*Trachurus trachurus*)", *ICES, C.M. 1989/H : 43.*,
- [23] R. Guichet, J.C. Quero and J. Labastie. 1973, "Estimation de la Composition du Stock du Merlu au Nord et à l'Ouest de l'Irland.", *Int Council Explor. Sea C.M. 1973/G :5, 9 pp.*
- [24] S.E. Campana, J.A. Gagne, J. Munro. 1987, " Otolith Microstructure of Larval herring (*Clupea harengus*) : Image or Reality?", *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 44 : 1922-1929,
- [25] B. Morales-Nin. 1988, " Age Determination in a Tropical Fish, *Lethrinus Nebulonus* (Forsskal, 1775) (Teleostei : Lethrinidae) by Means of Otolith Interpretation.", *Inv. Pesq.* 52(2) :237-244,
- [26] R.L. Radtke. 1989, " Larval Fish Age, Growth, and Body Shrinkage : information available from Otoliths.", *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 46 : 1884-1894,
- [27] G. Pannella. 1971, " Fish Otoliths : daily Growth Layers and Periodical Patterns.", *Sciences (N. Y.)* 173 : 1124-1227,
- [28] G. Pannella. 1973, " Otolith Growth Patterns : an Aid in Age Determination in Temperate and Tropical Fishes.", *T. B. Bagenal (ed) The Ageing of Fish. Proceedings of an International Symposium. Unwin Brothers Limited, Surrey, England : p. 28-39.*

- [29] S.E. Campana 1983, " Feeding Periodicity and the Production of Daily Growth Increments in Otoliths of Steelhead Trout (*Salmo gairdneri*) and Starry Flounder (*Plastichthys stellatus*).", *Can. J. Zool.* 61 :1591-1597.
- [30] L.S. Davis. 1975, " A Survey of Edge Detection Techniques", *CGIP*, 4 :248-270,1975.
- [31] L.S. Davis. 1975, " Machine Perception of Tree-Dimensional Solids", in *J.T. Tippett, ed., Optical and Electro-Optical Information Processing*, 159-197, MIT Press, Cambridge, MA, 1965.
- [32] J. Prewitt. 1970, " Object Enhancement and Extraction.",in B. Lipkin and A.,Rosenfeld,eds., *Picture Precessing and Psychopictorics*, *Academic Press, New York,1970*.
- [33] R. C. Gonzales, R. E. Woods 1992, " Digital Image Processing", *Addison-Wesley Publishing Company. Inc.*
- [34] R. Deriche. 1997, " Techniques d'extraction de contours.", Document de cours, INRIA Sophia-Antipolis, 2004 Route des Lucioles. B.P 93. 06902 Sophia-Antipolis Cedex.
- [35] F. Devernay. 1995, " A Non-Maxima Suppression Method for Edge Detection with Sub-pixel Accuracy.", *Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, No. 2724, Novembre 1995*
- [36] R. Touzi, A. Lopes and P. Bosquet 1988, " A Statistical and Geometrical Edge Detector for SAR Images.", *IEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 26(6) :764-773

- [37] J. Bouvrais, A. Chalifour, C. Michel and F. Nouboud. 1999, " Automatic Detection of Growth Rings in Fish Otoliths ", *Quality Control by Artificial Vision,1999,*