



جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen

Faculté de Technologie
Département de Génie Biomédical

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de

MASTER en GENIE BIOMEDICAL

Spécialité : Imagerie Médicale

Présenté par : LOUGLAIB Soumia et SALHI Amira

SEGMENTATION ET DETECTION DES CELLULES A PARTIR DE LA MICROSCOPIE SPECULAIRE

Soutenu le 26 Juin 2019 devant le Jury

M.	MESSADI Mohamed	<i>MCA</i>	Université de Tlemcen	Président
M.	LAZOUNI Mohamed	<i>MCB</i>	Université de Tlemcen	Encadreur
	EL Amine			
Mme	ILES Amel	<i>MCB</i>	Université de Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire 2018-2019

Remerciements

*Nous remercions **ALLAH** tout puissant qui nous aide et nous donne la patience, le courage et la volonté pour accomplir ce modeste travail.*

*Nous voudrions dans un premier temps remercier notre directeur de mémoire **Mr. LAZOUNI Mohamed El Amine** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui ont été contribué à alimenter notre réflexion, il a été d'un grand soutien dans l'élaboration de notre projet de fin d'étude.*

*On tient aussi à remercier **Mr. AL-WAISY Alaa Sleman** docteur à l'université de **BRADFORD** qui nous a été d'une grande aide dans l'accomplissement de notre mémoire, c'était un énorme plaisir et un véritable honneur de pouvoir bénéficier de ses connaissances et compétences dans le domaine, il a ainsi contribué à apporter de nombreuses informations cruciales qui ont été la base sur laquelle on a construit, bâti et orienté notre travail.*

*Tout notre respect et nos vifs remerciements vont aussi aux membres du jury : **Mr. MESSADI Mohamed** a accepté de présider le jury de ce travail, nous lui adressons nos respectueux remerciements et nous tenons également à lui signifier notre gratitude pour ces précieux commentaires. On exprime toute notre reconnaissance envers **Mme. ILES Amel**, nous tenons à exprimer envers elle notre profonde reconnaissance d'avoir consacré de son temps pour examiner ce travail.*

*Nous tenons à remercier également toute l'équipe de la clinique d'ophtalmologie **LAZOUNI** pour leur aide dans la collection des images et la validation des résultats.*

Nous remercions aussi toute l'équipe pédagogique de la faculté de technologie et les intervenants professionnels responsables de notre formation pour avoir assurée la partie théorique de celle-ci.

*Merci à ceux qui nous ont encouragé et soutenue.
À nos parents et à toutes nos familles.*

Résumé

L'endothélium de la cornée est une couche fragile de la face interne de la cornée. Il assure un rôle important dans le mécanisme de la vision. L'endothélium cornéen est constitué d'un nombre des cellules ou leurs contours sont facilement photographiés chez le patient grâce à un appareil utilisé par les ophtalmologues qui est le microscope spéculaire. Il permet de recueillir des informations qualitatives (forme des cellules) et quantitatives (densité cellulaire) sur cette partie importante de la cornée. La mesure de la densité cellulaire de ces cellules est nécessaire en cas d'une pathologie ou d'une intervention chirurgicale.

L'objectif de ce travail est de développer une méthode permettant de segmenter les cellules de l'endothélium cornéen humain observées en microscope spéculaire d'un côté ainsi que l'extraction de certains nombres des caractéristiques de ces cellules d'un autre côté en proposant une interface graphique simple pour les médecins ophtalmologues.

Mots clefs : Microscopie spéculaire, endothélium cornéen, densité cellulaire, segmentation par ligne de partage des eaux(LPE), filtre fréquentiel.

Abstract

The corneal endothelium is a fragile layer that covers the front surface of the human cornea; it plays a pivotal role in normal visual function. It is constituted of a number of cells; their contours are easily photographed with the specular microscope used by ophthalmologists. It allows the collection of qualitative information (cell shape) and quantitative information (cell density) in this important part of cornea. The measurement of the cell density of these cells is necessary in case of a pathology or surgery.

The aim of this work is to develop a method for segmenting the cells of the human corneal endothelium observed in specular microscopy on one side and the extraction of certain numbers of characteristics of these cells on the other side by providing a simple graphical interface for ophthalmologists.

Keywords: Specular microscopy, corneal endothelium, cell density, watershed segmentation, frequency filter.

ملخص

بطانة القرنية هي طبقة هشة تشكل الجزء الداخلي من القرنية، وتلعب دورا هاما في آلية الرؤية. وتتكون هذه البطانة من عدد من الخلايا يمكن تصويرها بسهولة لدى المريض بواسطة جهاز يستخدم من قبل أطباء العيون هو المجهر اليراق. هذا المجهر يسمح بجمع المعلومات النوعية (شكل الخلية) والمعلومات الكمية (كثافة الخلية) على هذا الجزء المهم من القرنية. قياس كثافة الخلية لهذه الخلايا ضروري في حالة مرض أو قبل اجراء جراحة للعيون.

الهدف من هذا العمل هو تطوير طريقة لتقسيم خلايا بطانة القرنية البشرية التي لوحظت في المجهر اليراق من جهة واستخراج عدد معين من خصائص هذه الخلايا من جهة أخرى من خلال توفير واجهة رسومية بسيطة لأطباء العيون.

كلمات مفتاحية: المجهر اليراق، بطانة القرنية، كثافة الخلية، تجزئة LPE، مرشح التردد.

Table des matières

Remerciements	
Résumé	
Table des matières	
Table des figures	
Introduction générale	

Chapitre 1 : Contexte médicale

1. Introduction.....	4
2. L'appareil visuel.....	4
2.1. Anatomie du globe oculaire	4
2.1.1 Contenant du globe oculaire	5
2.1.1.1 Membrane externe ou coque cornéo-sclérale.....	5
2.1.1.1.1 Sclère.....	5
2.1.1.1.2 Cornée.....	6
2.1.1.1.2.1 Épithélium cornéen	7
2.1.1.1.2.2 Membrane de Bowman.....	7
2.1.1.1.2.3 Stroma	7
2.1.1.1.2.4 Membrane de Descemet.....	7
2.1.1.1.2.5 Endothélium.....	7
2.1.1.2 Membrane intermédiaire ou uvée.....	9
2.1.1.2.1 Choroïde.....	9
2.1.1.2.2 Iris	10
2.1.1.2.3 Corps ciliaire.....	10
2.1.1.2.4 Pupille	10
2.1.1.2.5 Espace de l'angle irido-cornéen.....	10
2.1.1.3 Membrane interne.....	11
2.1.1.3.1 La rétine	11
2.1.2 Contenu du globe oculaire	11
2.1.2.1 Humeur aqueuse	11
2.1.2.2 Cristallin	11

2.1.2.3 Corps vitré	11
3. La microscopie spéculaire.....	12
3.1 Définition	12
3.2 Historique de la microscopie spéculaire	12
3.3 Principe physique du microscope spéculaire.....	13
3.4 Utilisation clinique de routine.....	14
3.5 Déroulement de l'examen	14
3.6 Types de microscope spéculaire	15
3.7. Résultats donnés par le microscope spéculaire	15
4. Conclusion.....	16

Chapitre 2 : Outils de traitement d'images et état de l'art

1. Introduction.....	18
2. Etat de l'art.....	18
3. Les étapes principales d'une chaîne de traitement des images médicales.....	23
3.1. Prétraitement	23
3.1.1. Amélioration de contraste	23
3.1.2. Filtrage.....	24
3.3. Extraction des paramètres.....	26
3.4. Classification	26
4. Conclusion.....	27

Chapitre 3 : Méthode proposée pour la segmentation des cellules et résultats obtenus

1. Introduction.....	29
2. Base de données	29
3. Méthode Proposée.....	31
3.1. Prétraitement	31
3.1.1. Amélioration de contraste	32
3.1.2. Filtrage.....	33

3.2. Segmentation	35
3.3. Caractérisation	37
3.3.1. Calcul de nombre des cellules	38
3.3.2. Calcul de la densité cellulaire	38
3.3.3. Calcul de la surface moyenne des cellules.....	38
3.3.4. Calcul du périmètre moyen des cellules.....	38
4. Discussions des résultats obtenus.....	40
5. Comparaison entre le résultat obtenu par l’algorithme proposé et par la machine	41
6. Présentation De L’interface.....	43
Conclusion général	45
Bibliographie	46

Table des figures

Figure 1: Représentation de l'anatomie de l'œil	5
Figure 2 : Différentes couches de la cornée	6
Figure 3: Exemple des cellules endothéliales saines et pathologiques.....	9
Figure 4: Les cellules endothéliales	9
Figure 5 : Le microscope spéculaire Nidek.....	12
Figure 6 : Principe du microscope spéculaire avec coupe schématique de la cornée	14
Figure 7 : Résultat obtenu à partir du microscope spéculaire	16
Figure 8 : Segmentation des cellules par la méthode de Daniel Reska et al	19
Figure 9 : Segmentation des cellules par la méthode de Bettina Selig.....	20
Figure 10: Segmentation des cellules par la méthode de F. Scarpa and A. Ruggeri.....	21
Figure 11: Segmentation des cellules par la méthode de Adam Piorkowski.....	21
Figure 12: Segmentation des cellules par la méthode de Anna Fabijanska.....	22
Figure 13: Système de traitement d'images.	23
Figure 14 : Les différentes techniques pour l'amélioration des images	24
Figure 15 : Les différentes méthodes du filtrage.....	25
Figure 16 : Les approches de segmentation d'images.....	26
Figure 17 : Histogramme de description de la base de données.....	30
Figure 18: Microscope spéculaire SP3000P TOPCON.....	30
Figure 19 : Organigramme du système proposé.....	31
Figure 20 : Résultat d'égalisation adaptative d'histogramme	33
Figure 21: Résultat du filtrage passe bande(A) : Image égalisée (B) : Image filtrée	34
Figure 22 : Quelques images endothélium cornéen ainsi que le résultat de la segmentation.....	37
Figure 23: Exemple des paramètres calculés sur une image parmi les six images	39
Figure 24: Résultat obtenu par l'étape de caractérisation	39
Figure 25 : Présentation de la méthode proposée étape par étape	40
Figure 26: Le temps d'acquisition d'une image	41
Figure 27: Résultat obtenu à partir de microscopie spéculaire TOPCON.....	41
Figure 28: Résultat obtenu à partir de l'algorithme proposé.....	42
Figure 29 : Résultat de quatre images obtenues par le microscope spéculaire et l'algorithme proposé.....	42
Figure 30: Fenêtre 1	43
Figure 31: Fenêtre 2	44

Introduction générale

L'imagerie a révolutionné la médecine en permettant à des fins diagnostics de visualiser d'une manière non invasive et dynamique l'anatomie, la physiologie ou le métabolisme du corps humain.

Cette visualisation indirecte nécessite l'emploi de techniques de traitement d'image qui est devenu de plus en plus important dans les soins de santé puisqu'il contribue à améliorer la qualité de l'image numérisée et enlever tous les artefacts indésirables qui peuvent influencer sur les résultats de reconnaissance des pathologies, et par conséquent, un diagnostic fiable et précis de la part du médecin.

La médecine est un domaine très vaste qui englobe plusieurs spécialités cherchant à restaurer la santé humaine par la prévention des pathologies. Parmi ces spécialités nous adressons à l'ophtalmologie, qui présente la branche de la médecine qui traite tous les problèmes oculaires grâce aux nouvelles technologies embarquées dans les machines optiques qui profitent à son tour des progrès réalisés en traitement et analyse d'images.

Cette spécialité regroupe plusieurs techniques d'imagerie comme l'angiographie, la tomographie par cohérence optique, la topographie cornéenne, la microscopie spéculaire qui fait l'objet de notre travail ...

À ce jour, les ophtalmologistes effectuent une analyse quantitative et qualitative des cellules endothéliales en déterminant certains nombres de caractéristique. Parmi ces caractéristiques on peut citer : la densité cellulaire qui doit être > 2000 (cellules / mm^2) chez un patient sain ainsi qu'une forme hexagonale des cellules.

L'objectif de notre étude est de proposer un système automatique et rapide, qui a pour but d'améliorer la qualité de la segmentation des cellules endothéliales ainsi que l'extraction des caractéristiques des cellules endothéliales cornéennes humaines afin de réaliser un meilleur diagnostic de l'endothélium cornéen qui facilite la traduction en milieu clinique.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Chapitre 1 :

Contexte médical : est consacré à la présentation de la partie anatomique de l'œil humain avec une explication détaillée de la cornée et ses composantes en concentrant sur l'endothélium ; il contient aussi le fonctionnement et l'appareillage de la microscopie spéculaire la technique d'exploration de l'endothélium cornéen.

Chapitre 2 :

Outils de traitement d'images et état de l'art : ce chapitre décrit toutes les étapes d'une chaîne de traitement d'image avec une présentation des outils et des approches utilisés dans cette chaîne, ainsi qu'une citation des certains travaux réalisés dans la segmentation des cellules endothéliales.

Chapitre 3 :

Méthode proposée pour la segmentation des cellules et résultats obtenus : le dernier chapitre contient une présentation détaillée sur l'algorithme proposé pour la segmentation et la détection des cellules endothéliales, ainsi que la discussion des résultats obtenus et une comparaison entre les résultats du système proposé et les résultats obtenus par le microscope spéculaire.

Notre travail s'achève par une conclusion générale qui comprend un aperçu de tout ce qui précède dans les chapitres. Aussi bien, certaines perspectives qui peuvent être proposées après la réalisation de ce travail de recherche.

Chapitre 1 :

Contexte médical

1. Introduction

Soixante-dix pour cent des récepteurs sensoriels de l'organisme sont situés dans l'œil humain [1] qui est l'organe de la vision de l'être vivant ; il lui permet de capter la lumière, pour ensuite l'analyser et interagir avec son environnement et permet aussi de distinguer les formes et les couleurs. L'œil est constitué de plusieurs parties, la cornée est l'une des parties importantes dans l'œil et qui peut être analysée par un appareil utilisé dans le monde d'ophtalmologie est le microscope spéculaire.

Ce chapitre introduit l'anatomie de l'œil, ces différentes parties avec une explication détaillée de l'anatomie de l'endothélium cornéen humain qui est la base de cette étude. Ensuite, nous présentons le microscope spéculaire, son historique, son principe physique, ces différents types ainsi que le déroulement et l'utilisation clinique de son examen et les résultats obtenus par cet appareil.

2. L'appareil visuel

L'appareil visuel est un système optique qui contient le globe oculaire, les annexes et les voies optiques. Dans cette partie, nous allons présenter juste l'anatomie du globe oculaire qui contient la partie qui nous intéresse dans cette étude qui est la cornée.

2.1. Anatomie du globe oculaire

L'œil ou globe oculaire, se définit comme étant l'organe de la vision, situé dans la cavité orbitale du crâne. Il se décompose de deux cavités distinctes qui sont : la chambre antérieure et la chambre postérieure.

L'œil humain est un globe de 2.2 à 2.5 centimètres de diamètre qui pèse entre 7 et 8 gramme, il est mobile grâce à 6 muscles extra oculaires et il est constitué d'une vingtaine d'organes vivants tout essentiel pour voir correctement (Figure 1) [2].

Ce globe oculaire permet de percevoir les couleurs, les formes et les positions. Il capte la lumière pour former une image sur la rétine et de convertir cette image en un influx nerveux, transmis par le nerf optique au cerveau, ou elle est interprétée [3].

Le globe oculaire a un rayon de courbure avant de 7,8 mm et de la face arrière de 6,8 mm. Elle est plus mince au centre : 0,45 mm, avec un indice de réfraction est $n=1,377$. Sa puissance normale est de 42 dioptries [4].

Le globe oculaire est formé de trois enveloppes ou membrane, ces enveloppes forment ce qu'on appelle un contenant ; et trois milieux transparents forment un contenu.

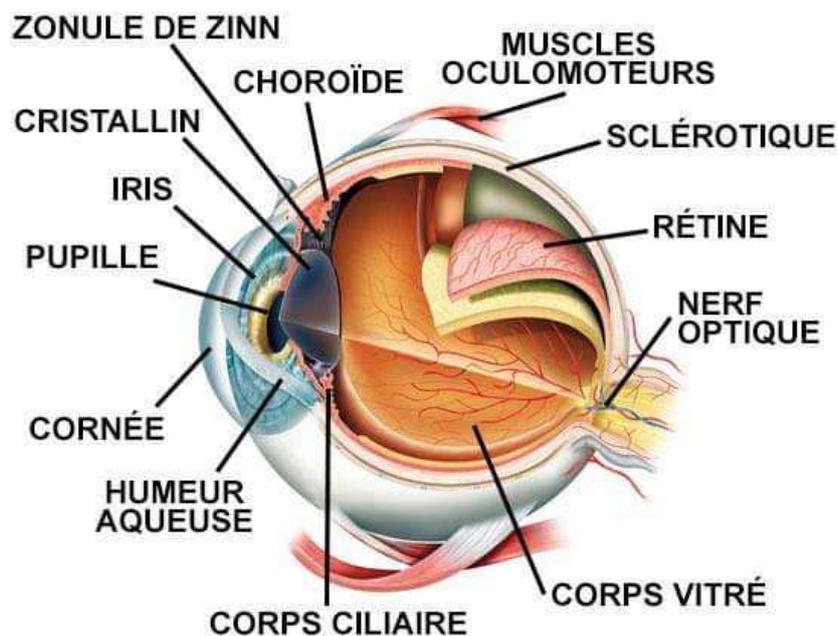


Figure 1: Représentation de l'anatomie de l'œil

2.1.1 Contenant du globe oculaire

Le globe oculaire contient trois différentes parties qui sont : la membrane externe (coque cornéo-sclérale), la membrane intermédiaire (uvée) et la membrane interne (rétine).

Dans la partie qui suit, nous allons présenter en détaille chaque partie.

2.1.1.1 Membrane externe ou coque cornéo-sclérale

2.1.1.1.1 Sclère

La sclère ou sclérotique est la membrane externe de globe oculaire. La sclère recouvre les quatre cinquièmes du l'œil. Elle est formée des fibres que s'entrecroisent. Elle est interrompue en avant par une rainure dans laquelle vient s'enchâsser la cornée. Le bord

postérieur de la rainure forme l'éperon scléral en dessous duquel est creusé l'organe de Schlemm (appelé improprement « canal ») [5].

2.1.1.1.2 Cornée

La cornée est une membrane solide et transparente de 11 mm de diamètre au travers de laquelle la lumière entre à l'intérieur de l'œil. La cornée est privée de vaisseaux sanguins (sinon notre vision serait troublée), elle est donc nourrie par un liquide fluide comme l'eau : l'humeur aqueuse [6].

La cornée contient 78% d'eau et pour maintenir ce degré d'hydrophile elle est constamment recouverte de larmes alimentées en continu par les glandes lacrymales et réparties par le battement des paupières [6].

La cornée est la principale lentille de l'œil, elle assure environ 80% de la réfraction. Elle est composée de 5 couches différentes. (Figure 2) [6].

La figure 2 qui suit montre les différentes parties de la cornée.

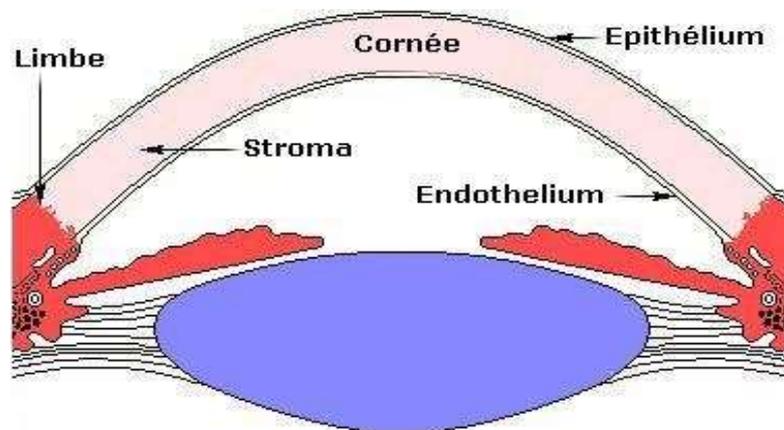


Figure 2 : Différentes couches de la cornée

Les différentes couches de la cornée sont : l'épithélium cornéen, la membrane de Bowman, le stroma, la membrane de Descemet et l'endothélium. Ces couches vont être présentées dans la partie qui suit.

2.1.1.1.2.1 Épithélium cornéen

C'est la couche la plus externe de la cornée, son épaisseur est de 50 à 60 μm ce qui représente 10 % de l'épaisseur totale de la cornée, est fait de cinq à six couches de cellule régénérable [6].

2.1.1.1.2.2 Membrane de Bowman

Il s'agit d'une structure acellulaire de 8 à 14 μm d'épaisseur, correspondant à une condensation de fibres de collagène et de protéoglycanes entrelacés de façon aléatoire. Les seules parties cellulaires présentes à son niveau sont représentées par de fines expansions des cellules de Schwann entourant les terminaisons nerveuses [7].

Elle constitue la matrice dans laquelle les complexes d'adhésion de l'épithélium sont ancrés. La membrane de Bowman ne se régénère pas après traumatisme [7].

2.1.1.1.2.3 Stroma

Très épais (400 microns), 90% de l'épaisseur de la cornée. Tissu conjonctif très spécifique. Il contient de l'eau, des substances organiques, du collagène. Tous ces éléments sont présents dans des règles qui assurent la transparence [6].

2.1.1.1.2.4 Membrane de Descemet

Il s'agit de la lame basale de l'endothélium cornéen qu'elle sépare du stroma. Sécrétée par l'endothélium cornéen, elle mesure 3 μm à la naissance pour atteindre 8 à 12 μm à l'âge adulte, et son épaisseur augmente avec l'âge. Très élastique et solide tout en étant perméable à l'eau, remarquablement résistante à l'action des enzymes protéolytiques, elle reste souvent intacte après destruction de l'épithélium et du stroma [8]

2.1.1.1.2.5 Endothélium

L'endothélium est une monocouche de cellules non répliquatives, au contour hexagonal de structure qu'on appelle mosaïque. Il est situé à la partie la plus postérieure de la cornée, entre la membrane de Descemet et l'humeur aqueuse (Figure 4).

Il a une surface de 250 μm^2 , formée de cellules plates, régulières de 5 à 6 μm de hauteur et de 15 à 20 μm de largeur. Cette régularité diminue vers la périphérie cornéenne ainsi qu'au

contact de la membrane de Descemet où de nombreuses interdigitations assurent une plus grande cohésion intercellulaire. Les cellules endothéliales comportent un volumineux noyau, bien défini, ovale et Centro cellulaire d'environ 5 μm d'épaisseur, occupant une grande partie de la cellule. Un cytoplasme clair, contenant de nombreuses vacuoles et de fins granules, occupe la partie apicale de la cellule (sommet de cellule). Il est parcouru d'une fine structure de microfilaments d'actine liés aux jonctions intercellulaires. Leur cytoplasme riche en organites cellulaires caractérise une importante activité métabolique [9].

Les cellules endothéliales perdent leur capacité de mitose embryonnaire à la naissance. Elles ne se divisent pas pendant la vie mais sont capables de s'élargir et de migrer vers les zones de rupture de la couche cellulaire. Leur densité diminue avec l'âge (4000 cell/mm² à la naissance contre 2500 cell/mm² à l'âge de 80 ans environ) [9].

La taille des cellules endothéliales cornéennes relativement homogène, mais en cas de pathologies endothéliales, elles peuvent présenter des variations de surface et une diminution critique du nombre de ces cellules. Lorsque la densité cellulaire descend de 400-700 cellules/mm², les cellules restantes ont tendance à perdre leur aspect hexagonal caractéristique et à adopter une morphologie plus irrégulière tant en forme qu'en grosseur. Mais puisque la taille des cellules endothéliales est inversement proportionnelle à la densité cellulaire, la taille des cellules tend à augmenter avec l'âge, et davantage lors de pathologies ou de traumatismes. La signification du pléomorphisme et du polymégathisme est inconnue, mais semble affecter la capacité d'adaptation de l'endothélium à un stress additionnel [10].

La figure 3 représente la différence entre l'aspect d'une mosaïque des cellules saines et pathologiques.

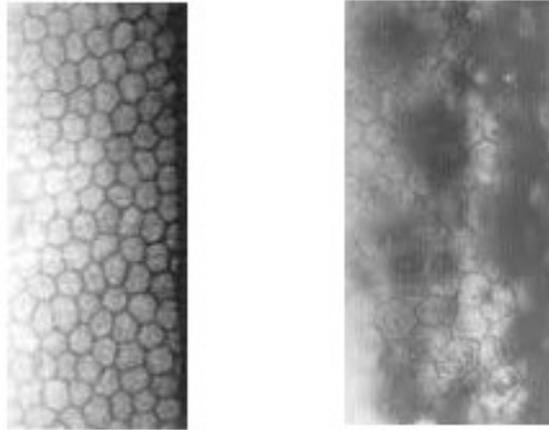


Figure 3: Exemple des cellules endothéliales saines et pathologiques

Les cellules endothéliales sont munies d'un système de pompe cellulaire qui permet de rejeter les molécules d'eau qui peuvent diffuser passivement dans la cornée vers l'humeur aqueuse ceci permet de contrôler l'état d'hydratation de la cornée, et donc sa transparence [8].

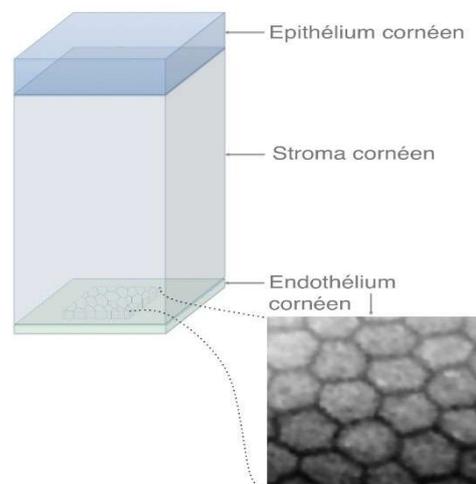


Figure 4: Les cellules endothéliales

2.1.1.2 Membrane intermédiaire ou uvée

2.1.1.2.1 Choroïde

Membrane essentiellement vasculaire située entre la sclère et la rétine, responsable de la nutrition de l'iris et de la rétine. Elle comprend quatre couches dont la lame supra-choroïdienne contenant des mélanocytes [5].

2.1.1.2.2 Iris

L'iris est un disque de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur dont la face antérieure est colorée (du bleu au brun foncé). Il s'insère sur le corps ciliaire. Il présente une collerette à l'union de son tiers interne et de ses deux tiers externes [5] :

- à la périphérie de la collerette, c'est l'anneau coloré externe (annulus iridis major) ou zone ciliaire de l'iris [5].
- à l'intérieur de la collerette se trouve l'anneau coloré interne (annulus iridis minor) ou zone pupillaire de l'iris [5].

2.1.1.2.3 Corps ciliaire

Le corps ciliaire est un anneau de 7 mm de large placé entre la choroïde et l'iris. Il est triangulaire à la coupe [5] :

- sa face antérieure est appliquée sur la sclère par l'intermédiaire de la lame supraciliaire [5].
- sa face postérieure présente une portion lisse, l'anneau ciliaire, et une partie plissée, les procès ciliaire qui sécrètent l'humeur aqueuse [5].
- la base du corps ciliaire repose sur l'iris, en arrière, elle forme avec l'iris l'angle irido-ciliaire [5].

2.1.1.2.4 Pupille

La pupille est l'orifice central de l'iris muni d'un appareil musculaire qui comprend un muscle sphincter de la pupille et un muscle dilatateur de la pupille [5].

2.1.1.2.5 Espace de l'angle irido-cornéen

L'espace de l'angle irido-cornéen est la région comprise entre la cornée, la sclère, l'iris et le corps ciliaire. Il intervient dans la régulation de la pression de l'humeur aqueuse par l'organe de Schlemm creusé entre le septum scléral, le ligament pectiné et l'éperon sclère [5].

Il comprend des canaux internes bordés de cellules endothéliales, qui communiquent avec la chambre antérieure de l'œil [5]

2.1.1.3 Membrane interne

2.1.1.3.1 La rétine

La rétine est l'enveloppe interne de l'œil .Elle comprend plusieurs portions [5] :

- la partie optique de la rétine étendue de l'ora serrata au disque du nerf optique .Elle est sensible à la lumière [5].
- la rétine aveugle, insensible à la lumière, se continue en avant avec l'épithélium du corps ciliaire et de l'iris [5].

2.1.2 Contenu du globe oculaire

Le contenu est constitué des milieux transparents permettant le passage des rayons lumineux jusqu'à la rétine

2.1.2.1 Humeur aqueuse

Liquide transparent et fluide, l'humeur aqueuse remplit la chambre antérieure, délimitée par la cornée en avant et l'iris en arrière. L'humeur aqueuse est évacuée au niveau de l'angle iridocornéen à travers le trabéculum dans le canal de Schlemm qui rejoint la circulation générale, une gêne à son évacuation provoque une élévation de la pression intraoculaire (valeur normale : inférieur ou égale à 22 mm Hg) [11].

2.1.2.2 Cristallin

C'est une lentille biconvexe, convergente, amarrée aux procès ciliaires par son ligament suspenseur, la zonule. Elle est capable de se déformer par tension ou relâchement de la zonule sous l'effet de la contraction du muscle ciliaire, et de modifier ainsi son pouvoir de convergence : cela permet le passage de la vision de loin à la vision de près qui constitue l'accommodation, la perte du pouvoir d'accommodation du cristallin avec l'âge est responsable de la presbytie qui nécessite le port de verres correcteurs convergents pour la lecture [11].

2.1.2.3 Corps vitré

Il s'agit d'un gel transparent, entouré d'une fine membrane, la hyaloïde, qui remplit les 4/5 de la cavité oculaire et tapisse par sa face postérieure (hyaloïde postérieure) la face interne de la rétine [11].

3. La microscopie spéculaire

3.1 Définition

La microscopie spéculaire est un examen qui consiste à analyser les cellules de la face interne de la cornée (cellules endothéliales). Cet examen permet de prendre des clichés photographiques de la cornée et de déterminer les caractéristiques de ces cellules (nombre, taille, forme, qualité et densité).

C'est la technique d'exploration non invasive qui permet d'obtenir des informations qualitatives et quantitatives de l'endothélium cornéen.

La figure 5 montre une image d'un microscope spéculaire de la marque japonaise Nidek.



Figure 5 : Le microscope spéculaire Nidek.

3.2 Historique de la microscopie spéculaire

La microscopie spéculaire s'est imposée depuis deux décennies comme la technique d'exploration non invasive de référence de l'endothélium cornéen. Elle a été inventée par David Maurice dans les années 1960. [12]

Les années 1970 et 80 ont vu la recherche et des publications explorant la structure normale et pathologique, processus de guérison et de vieillissement de la cornée endothélium notamment en relation avec la kératoplastie pénétrante et la cornée [12].

En 1999 l'Association of Amériqye Eye Bank établie que la microscopie spéculaire peut fournir des informations utiles dans le dépistage des tissus du donneur pour déterminer l'aptitude à transplantation [12].

Cependant, ce n'est qu'en 2001 que la détermination de la densité des cellules endothéliales (ECD) a été adoptée comme norme médicale par l'Œil Bank Association of Amériqye. [12]

3.3 Principe physique du microscope spéculaire

Le principe physique à la base de cette technique est la réflexion spéculaire, c'est-à-dire qui se produit dans un miroir.

L'angle du rayon réfléchi est la même que celui du rayon incident par rapport au plan de réflexion. La coupe de l'œil ainsi que la présentation à la manière de ce que voit l'ophtalmologiste permettent de mieux comprendre le phénomène [13].

Les différentes couches cellulaires de la cornée sont transparentes et possèdent des indices de réfractons différents (figure 6). Ainsi, à chaque changement de couche s'opère une réflexion. Si le faisceau incident est incliné, il est donc possible d'observer un décalage dans les rayons réfléchis. Plus la couche observée est profonde, plus elle apparaîtra sombre sur l'image. Ce principe explique la dérive d'éclairement systématiquement présente sur les images [13].

L'image sera de meilleure qualité si le rayon incident est étroit. En effet, les zones observées seront fortement superposées si le rayon lumineux est large. Inversement, le champ sera réduit d'autant [13].

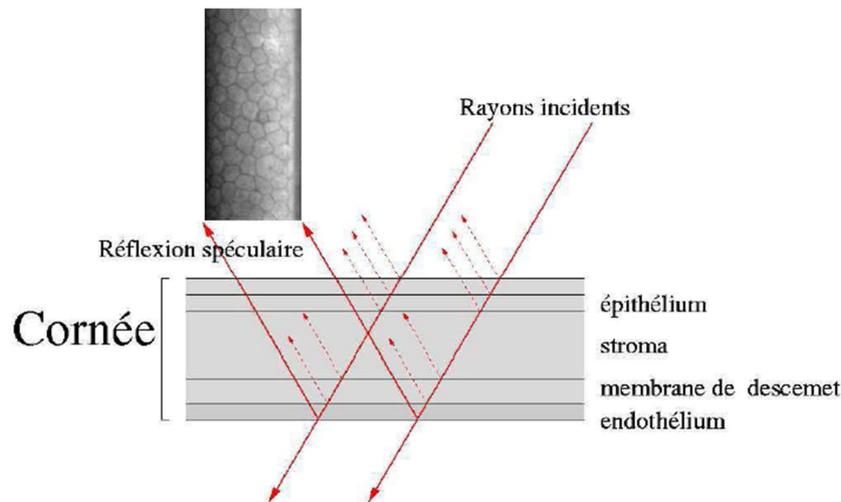


Figure 6 : Principe du microscope spéculaire avec coupe schématique de la cornée

3.4 Utilisation clinique de routine

La microscopie spéculaire est utilisée pour l'aide au diagnostic étiologique de certaines pathologies cornéennes et l'évaluation endothéliale des porteurs de lentilles de contact, des pathologies du segment antérieur comme les uvéites et les glaucomes.

Une évaluation endothéliale est essentielle pour tous les cas d'endothélium pathologique avant de décider de la réalisation d'une chirurgie de la cataracte afin de prévoir le risque de décompensation post-opératoire [9].

La microscopie spéculaire a également été utilisée dans certaines pathologies systémiques comme le diabète. Elle est utilisée enfin en routine pour le suivi post-opératoire des greffes de cornée transfixiantes et dans les suites de chirurgie, en particulier réfractive, susceptibles d'altérer l'endothélium. Elle est bien sûr indispensable en recherche clinique pour l'évaluation de la bonne tolérance de nouveaux procédés ou matériaux chirurgicaux ou médicaux. Bien qu'elle ait été développée pour l'analyse endothéliale. La microscopie spéculaire peut également permettre l'observation de l'épithélium, du stroma et même du cristallin, moyennant quelques modifications [9].

3.5 Déroulement de l'examen

Il n'existe pas de préparations particulières avant une microscopie spéculaire. Le patient est assis, en face du médecin ou manipulateur. Il suffit au médecin de prendre des clichés

photographiques de la cornée ; ces clichés sont analysés par un système informatique pour donner des valeurs de la densité cellulaire. La microscopie spéculaire n'est pas un examen douloureux ; il est sans risque car aucun appareil n'est au contact avec les différentes structures de l'œil. Les images sont interprétées et communiquées à l'ophtalmologue qui a prescrit l'examen selon le nombre des cellules ainsi que leurs qualités.

3.6 Types de microscope spéculaire

Deux types de microscope spéculaire existent :

- **Avec contact** : La microscopie spéculaire contact possède une lentille à aplanation qui touche l'apex de la cornée du patient et élimine la réflexion de la lumière sur la surface cornéenne et la microscopie. Les microscopes spéculaires contact sont faciles à utiliser, possèdent un grossissement plus élevé que les non contact, une meilleure résolution et un plus direct avec la cornée du malade [9].
- **Non contact** : La microscopie spéculaire non contact qui focalise directement dans la zone de reflet spéculaire à côté du reflet de surface. Les microscopes spéculaires non contact nécessitent un apprentissage pour focaliser dans la bonne zone mais des automatisations existent. Leur acceptation par le patient est excellente et les risques sanitaires nuls [9].

3.7. Résultats donnés par le microscope spéculaire

Actuellement, le microscope spéculaire permet d'obtenir une image de cellules sur une surface très réduite. L'image est alors analysée par un logiciel qui permet de :

- Calculer le nombre des cellules endothéliales contenus dans l'image.
- La densité cellulaire endothéliale (nombre de cellule par mm²).
- L'épaisseur cornéenne.

La figure 7 représente les différents calculs réalisés par l'appareil.

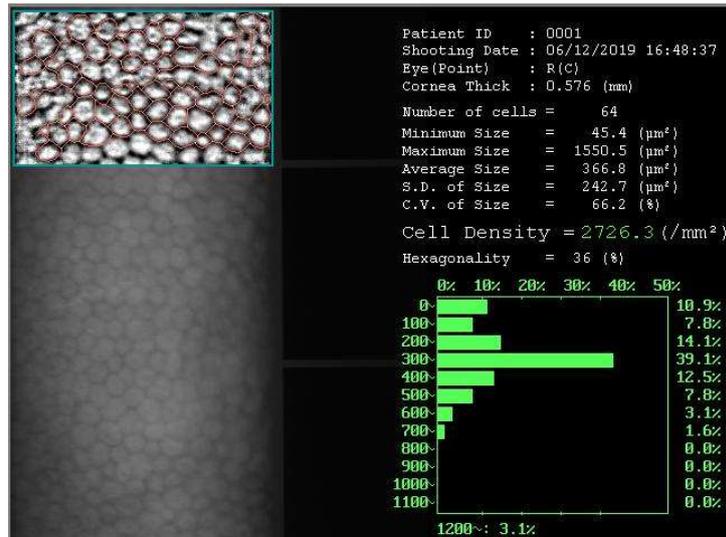


Figure 7 : Résultat obtenu à partir du microscope spéculaire

Selon notre travail avec les médecins ophtalmologues, lorsque le nombre de cellules endothéliales est inférieur à 1500 cellules / mm², la chirurgie peut causer d'énormes problèmes sur l'œil du patient. Pour cette raison, il est nécessaire de faire une microscopie spéculaire pour chaque patient avant une intervention chirurgicale ou le médecin fait une incision à côté de la cornée du patient comme la cataracte ou la chirurgie réfractive par implantation.

4. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons vu la partie anatomique de l'œil ainsi les différentes parties de la cornée qui nous intéressent, nous avons présenté ensuite la microscopie spéculaire qui est un examen pour la détection des cellules de l'endothélium cornéen humain.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter les travaux réalisés sur l'étude des cellules endothéliales ainsi les différentes méthodes de traitement d'image appliquées.

Chapitre 2 :
Outils de traitement
d'images et état de l'art

1. Introduction

Actuellement, le traitement numérique des images médicales a une importance très importante car les images acquises par les appareils contiennent dans la majorité des cas des bruits différents. L'application d'un ensemble de techniques de traitements sur ces images est nécessaire afin d'améliorer leurs qualités d'un côté et d'aider le médecin à donner un meilleur diagnostic d'un autre côté.

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à ce domaine en développant des méthodes et des algorithmes pour obtenir des images plus lisibles, nettes et accessibles. Dans ce travail, on s'intéresse à l'amélioration des images des cellules endothéliales.

Ce chapitre se divise en deux sections, la première résume certaines méthodes de traitement d'image qui sont réalisées dans la détection et la segmentation des cellules endothéliales cornéennes (Etat de l'art). La deuxième section contient une vision globale sur les différentes approches et techniques d'amélioration et d'analyse des images les plus fréquemment utilisées.

2. Etat de l'art

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'étude des cellules endothéliales et à la microscopie spéculaire. Pour cela, plusieurs méthodes de traitement d'image de ces cellules ont été développées et publiées.

Une approche entièrement automatique pour délimiter les contours des cellules endothéliales de la cornée est proposée par Daniel Reska et al [14] en 2014. Cette étude a été basée sur l'utilisation d'un filtre gaussien qui étend également les zones de haut gradient situées sur les limites des cellules et les rend plus visibles, ensuite une application d'une binarisation par seuillage adaptatif suivi d'une détection des points centraux des cellules a été réalisée. L'image résultante est segmentée par la méthode de contour actif. La figure qui suit montre les résultats obtenus dans cette étude.

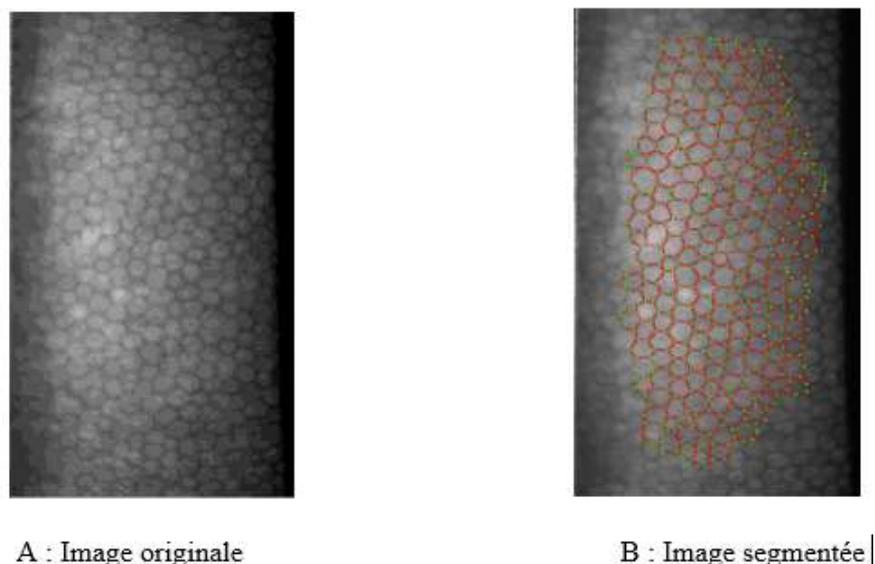


Figure 8 : Segmentation des cellules par la méthode de Daniel Reska et al

Dans un autre travail, Bettina Selig et al. [15] en 2015 ont utilisés un ensemble de 52 images confocales d'endothélium cornéen. Ces images ont été acquises chez 23 patients atteints de dystrophie cornéenne endothéliale de Fuchs utilisant un microscope confocal à balayage à fente (Confoscan 4; Nidek Technologies Srl, Padoue, Italie). Tous les patients ont été examinés dans la première année après le décapage automatique de Descemet kératoplastie endothéliale [14].

L'algorithme proposé dans ce travail a été basé sur l'utilisation d'un filtre gaussien afin de lisser l'image, ensuite les minima locaux sont supprimés par un H-minima Transformation puis la dernière étape est l'application de la méthode de bassin versant stochastique pour segmenter l'image. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure ci-dessous.

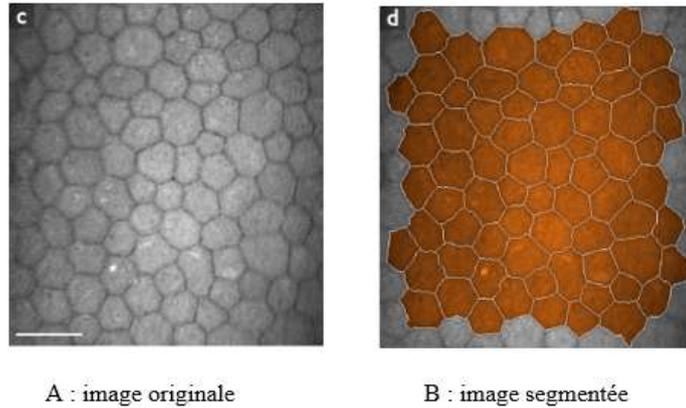


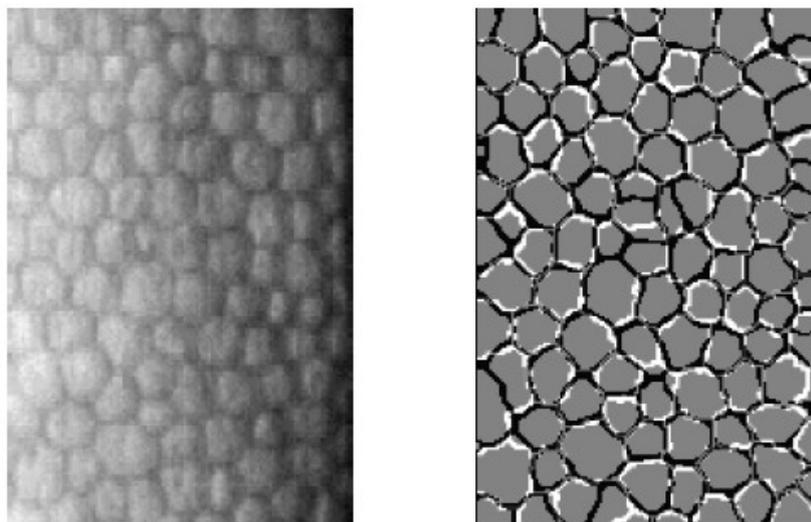
Figure 9 : Segmentation des cellules par la méthode de Bettina Selig

En 2016 F. Scarpa and A. Ruggeri [16] ont proposés un algorithme qui était appliqué sur 15 images acquises avec le microscope spéculaire (SP-3000P, Topcon, Japon) et 15 images acquises avec le Microscope confocal (Confoscan4 Nidek Technologies, Italie) ou les examens sont réalisés sur des sujets sains et pathologiques.

L'approche proposée est la réalisation d'un système complètement automatique pour l'estimation des paramètres morphométriques (géométrie et forme des cellules) de l'endothélium de la cornée qui a été basé sur la détection de contour qui comprend trois étapes principales :

- La détection des centres des cellules endothéliales par la convolution de l'image acquise avec un Laplacien à deux dimensions personnalisées du noyau gaussien.
- L'extraction de contours cellulaires à partir du squelette euclidien.
- Raffinement des contours des cellules par un algorithme génétique.

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure qui suit :

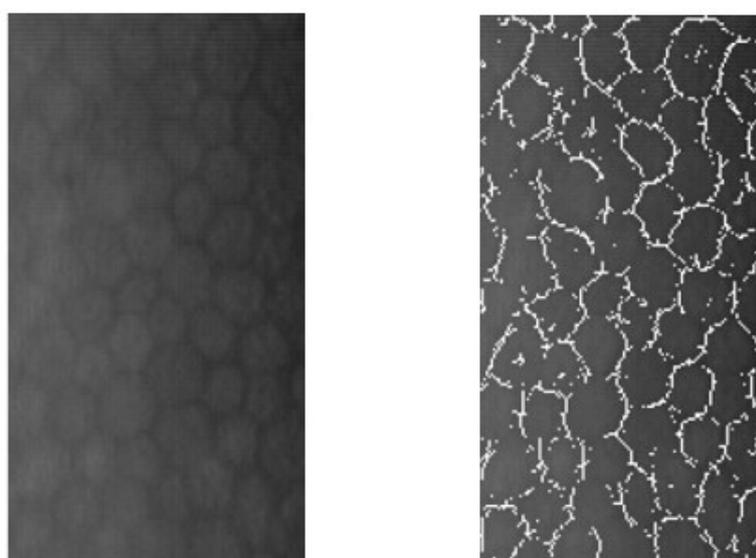


A : Image originale

B : Image segmentée

Figure 10: Segmentation des cellules par la méthode de F. Scarpa and A. Ruggeri

Les opérateurs de la morphologie mathématique ont été utilisés par Adam Piorkowski [17] en 2017 avec l'utilisation d'un filtre gaussien suivi d'une binarisation d'image par top Hat transformation. Par la suite, une segmentation de bassin versant a été appliquée. Cette méthode a été réalisée sur 30 images de la base de données alizarine. Les images obtenues sont présentés dans la figure qui suit.



A : Image originale

B : Image segmentée

Figure 11: Segmentation des cellules par la méthode de Adam Piorkowski

L'approche proposée par Anna Fabijanska [18] en 2017 a été effectuée sur une base de données Alizarine qui contient 30 images d'endothélium cornéen, chacune stockée sous forme de fichier compressé JPEG de résolution 576×768 pixels. Les images ont été acquises à partir de 30 yeux de porc colorés à la rouge alizarine en utilisant un microscope à contraste de phase inverse (CK 40, Olympus) à grossissement $\times 200$ et une caméra analogique (SSCDC50AP, Sony).

L'approche réalisée est entièrement automatique pour délimiter les contours des cellules endothéliales de la cornée. L'approche produit un contour de cellules d'une largeur de pixel. Il repose sur un simple réseau de neurones à réaction directe, formé pour reconnaître les pixels appartenant aux frontières des cellules. La carte de probabilité de bord (limite) produite par le réseau est ensuite analysée ligne par ligne et colonne par colonne afin de rechercher les pics locaux de la réponse du réseau. Ces pics sont considérés comme des candidats aux limites de cellules, et dans la dernière étape de la méthode, via un traitement morphologique binaire, sont liés pour créer des contours continus de cellules [18].

Des bons résultats ont été obtenus dans cette étude comme nous montre la figure 12

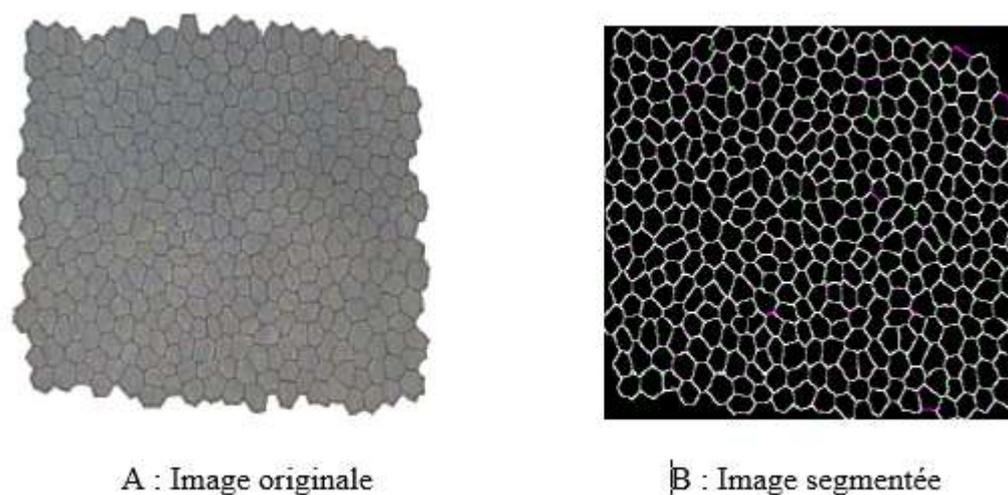


Figure 12: Segmentation des cellules par la méthode de Anna Fabijanska

Tous les travaux présentés précédemment passent par trois principales étapes : le prétraitement, le traitement et le post traitement qui constitue ce qu'on appelle : une chaîne de traitement des images médicales.

3. Les étapes principales d'une chaîne de traitement des images médicales

Dans l'objectif de résoudre les problèmes qui peuvent se présenter lors de l'acquisition d'une image de façon automatique, il est nécessaire de suivre cette chaîne de traitement d'images présentée dans l'organigramme suivant Figure(13).

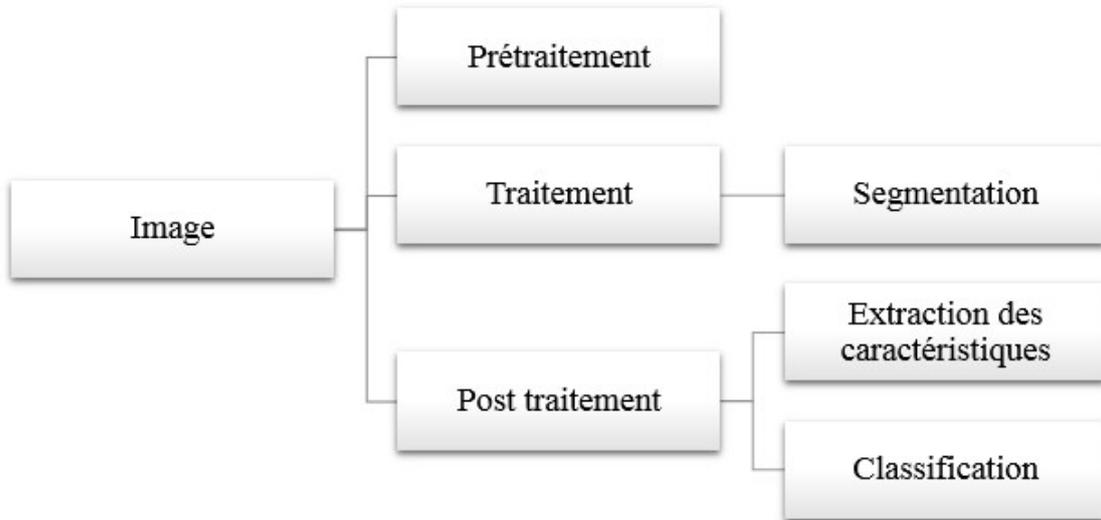


Figure 13: Système de traitement d'images.

3.1. Prétraitement

La phase de prétraitement constitue une phase importante dans une chaîne de traitement d'images qui regroupe toutes les opérations de manipulation de l'image consiste à améliorer sa qualité.

3.1.1. Amélioration de contraste

Le grand but de l'amélioration c'est de faire partager les niveaux de gris dans toute l'image afin de la rendre plus homogène (une meilleure répartition des niveaux de gris). Le schéma qui suit représente l'organigramme de différentes techniques pour l'amélioration des images Figure(14).

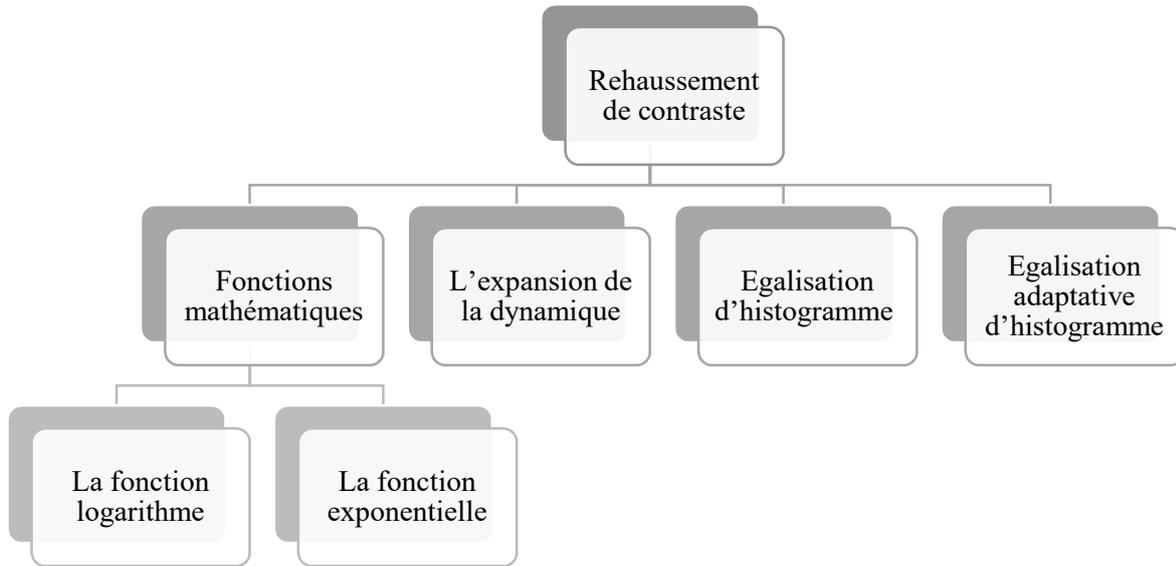


Figure 14 : Les différentes techniques pour l'amélioration des images

3.1.2. Filtrage

Le filtrage est le processus de remplacer un pixel par une valeur qui est fonction des données à proximité du pixel. C'est un opérateur local. Pour but atténuer le bruit et accentuer les discontinuités (Rehaussement des contours). Nous distinguons deux types de filtre, filtre spatial et filtre fréquentiel Figure(15).

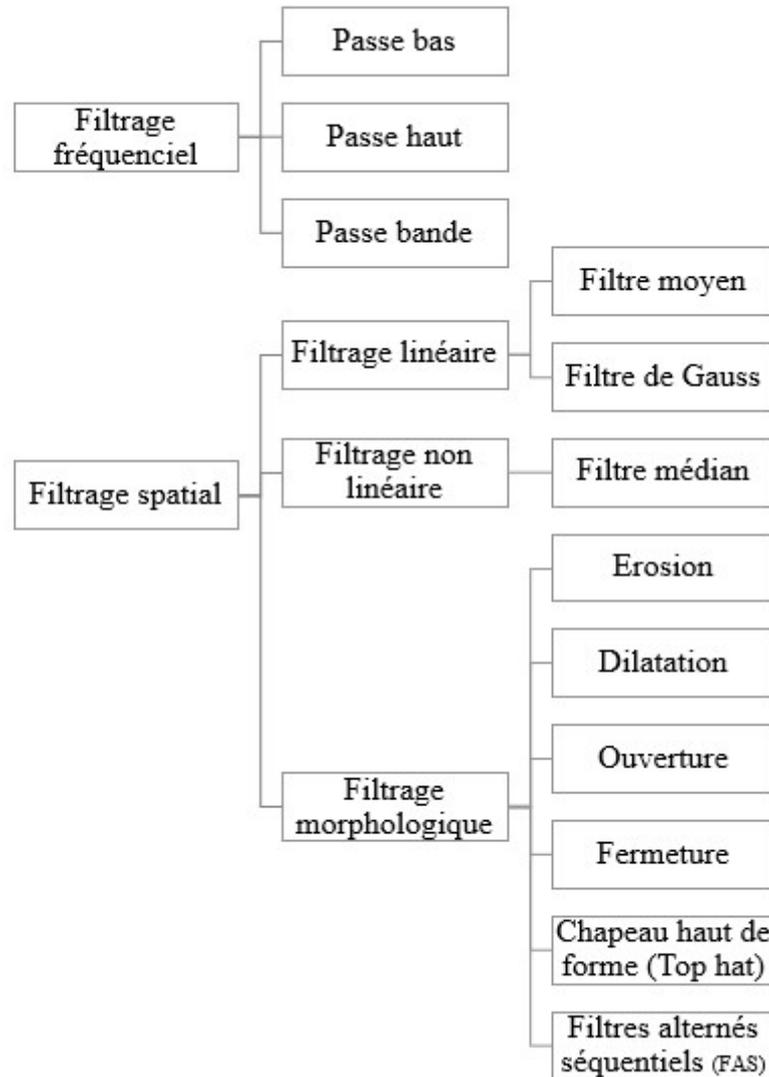


Figure 15 : Les différentes méthodes du filtrage.

3.2. *Segmentation*

La segmentation des images est une étape importante dans le processus d'analyse des images, c'est un des sujets qui a été le plus étudié dans ce domaine. La segmentation a pour objectif l'extraction d'indices visuels dans une image. Elle permet de partitionner une image en ensembles de points appelés régions, homogènes pour une ou plusieurs caractéristiques (intensité, couleur, texture, ...) et sont différentes pour au moins une de ces caractéristiques des régions voisines [20].

Il existe une multitude de méthodes de segmentation qu'on peut regrouper en différentes catégories Figure(16).

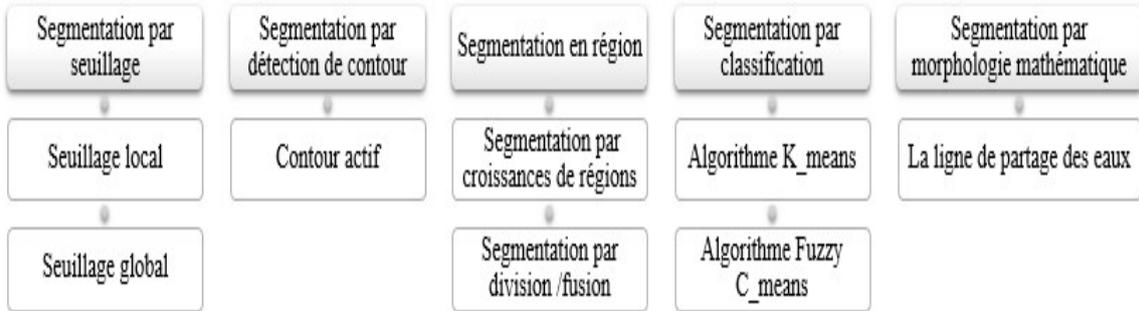


Figure 16 : Les approches de segmentation d'images.

3.3. *Extraction des paramètres*

Le choix des attributs pour caractériser une région est un problème difficile qui demande toute l'expérience du traiteur d'images. Ce choix dépend de l'image à traiter et du problème à résoudre. A partir des résultats de la segmentation appliquée sur les images, nous obtenons une carte de régions homogènes où les pixels de chaque région portent une seule valeur caractérisant la région [20].

3.4. *Classification*

La classification est une étape importante après la fin de traitement dans le but de proposer une aide aux médecins. Pour la réalisation d'un system d'aide à la décision, il est nécessaire d'appliquer un classifieur sur une base de données.

Il existe trois différentes familles de la classification : supervisé, semi supervisé ou non supervisé (clustering). La différence entre ces trois familles est la disponibilité ou non des classes.

4. Conclusion

Plusieurs travaux connexes sur la détection et la segmentation des cellules endothéliales cornéennes ont été présentés dans ce chapitre, ainsi une explication généreuse et approfondie de différentes étapes principales d'une chaîne de traitement d'image les plus courantes.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter la méthode proposée qui permette de segmenter les cellules de l'endothélium cornéen humain observées en microscopie spéculaire d'un côté ainsi que le comptage de ces cellules d'un autre côté dans le but d'aider les médecins ophtalmologues.

Chapitre 3 :

Méthode proposée pour la
segmentation des cellules et
résultats obtenus

1. Introduction

La segmentation des cellules endothéliales cornéennes est une tâche difficile à faire. Les problèmes sont dus principalement à un faible contraste et une faible luminance de l'image de l'endothélium obtenue par le microscope spéculaire, donc, nous avons développées et appliquées un system entièrement automatisé permet une analyse quantitative de l'endothélium de la cornée et qui ne nécessite aucune intervention de l'utilisateur pour détecter avec précision le contour des cellules.

Ce troisième chapitre est consacré à une présentation de la base de données utilisée dans ce projet de fin d'étude, le system proposé pour la détection et le comptage automatique des cellules endothéliales ainsi que la présentation et l'analyse des résultats obtenus.

2. Base de données

La base d'image utilisée dans notre travail a été collectée dans le cadre d'un projet de recherche pour la détection de la qualité des endothéliums algériens.

Ce travail est réalisé en collaboration avec plusieurs médecins ophtalmologues. Cette base d'images contient 75 images endothéliales provenant de 40 patients (23 hommes et 17 femmes) avec un moyen d'âge de 54 ans (entre 32 ans et 88 ans) dont 41 images normales et 34 pathologiques. La figure (17) nous montre une description de la base de donnée collectée.

Cet appareil permet de donner une image en niveau de gris de l'endothélium de la cornée. L'examen peut être fait d'une manière automatique grâce à la présence d'un Eye Tracker qui permet de faire le suivi des mouvements de l'œil.

Dans ce manuscrit, on va présenter que les résultats obtenus de 6 différentes images parmi les 75 de notre base de données.

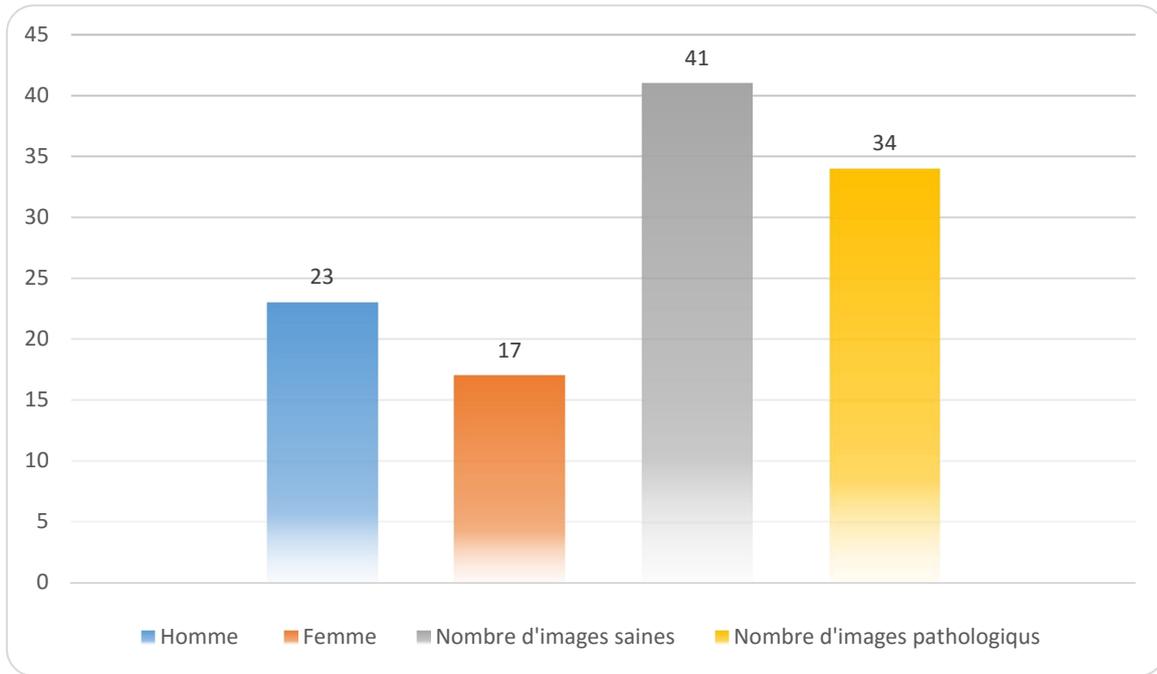


Figure 17 : Histogramme de description de la base de données

Les images utilisées dans notre travail sont des images capturées et enregistrées sous le format TIFF, avec une taille de 480*640 pixels. Elles sont acquises à partir du microscope spéculaire SP3000P de la société japonaise TOPCON Figure(18).



Figure 18: Microscope spéculaire SP3000P TOPCON

Dans ce manuscrit nous avons présentées uniquement les résultats obtenus de six différentes images sur les 75 collectées de notre base de données (quatre de bonnes qualités et deux de mauvaises qualités).

3. Méthode Proposée

Le système proposé comprend trois étapes essentielles : une étape de prétraitement pour améliorer la qualité d'image, une étape de segmentation cellulaire pour détecter avec précision les limites de la cellule et une étape de quantification de paramètres morphométriques qui contient le calcul de certain nombre de paramètres cliniques utiles, notamment : nombre des cellules, densité cellulaire, surface cellulaire moyenne et périmètre cellulaire moyen.

La méthode proposée est résumée dans l'organigramme suivant Figure (19) :

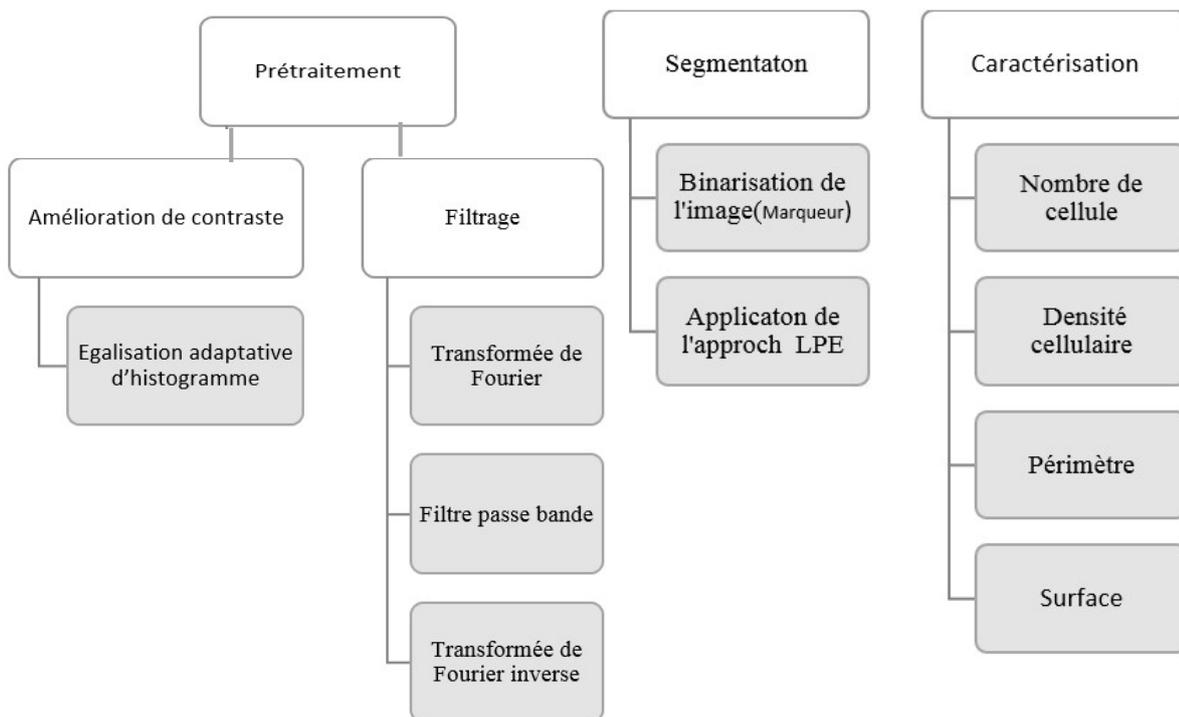


Figure 19 : Organigramme du système proposé

3.1. Prétraitement

Les images utilisées dans notre travail sont de mauvaises qualités, cela rend les frontières de cellules difficiles à reconnaître, même par un expert, ceci empêche l'utilisation des algorithmes tels que l'algorithme de ligne de partage des eaux, ce qui nous a poussés à

utiliser l'étape de prétraitement dans notre système qui comprend une phase d'amélioration de contraste suivi par une phase de filtrage.

Dans la phase d'amélioration de contraste, nous avons appliqués une égalisation adaptative d'histogramme afin de résoudre le problème de l'illumination de fond inhomogène, et en ce qui concerne la phase de filtrage, un filtre fréquentiel à base de transformée de Fourier est utilisé afin de rendre les frontières de cellule plus visibles.

3.1.1. Amélioration de contraste

- ***Définition d'égalisation adaptative d'histogramme***

L'égalisation adaptative d'histogramme permet de rehausser le contraste de l'image de manière automatique. Cependant le calcul se fait sur toute l'image alors que bien souvent il faut rehausser le contraste de l'image de manière locale. Il est donc parfois préférable d'utiliser une égalisation adaptative d'histogramme l'idée est d'égaliser l'histogramme localement sur différentes régions de l'image. La méthode se base sur une division de l'image en un certain nombre de rectangles et applique sur chacun une égalisation d'histogramme en limitant le contraste pour éviter de rehausser de manière trop importante le bruit dans des zones uniformes. Ensuite les valeurs de l'intensité sont interpolées aux frontières de chaque rectangle pour éviter des sauts brusques d'intensité entre deux rectangles voisins [21].

Une application de l'égalisation adaptative d'histogramme sur des images qui ont un faible contraste permet d'accroître le contraste.

Pour des meilleurs résultats, l'égalisation adaptative d'histogramme est appliquée deux fois dans notre méthode, une fois avant la phase de filtrage et une fois après Figure(20).

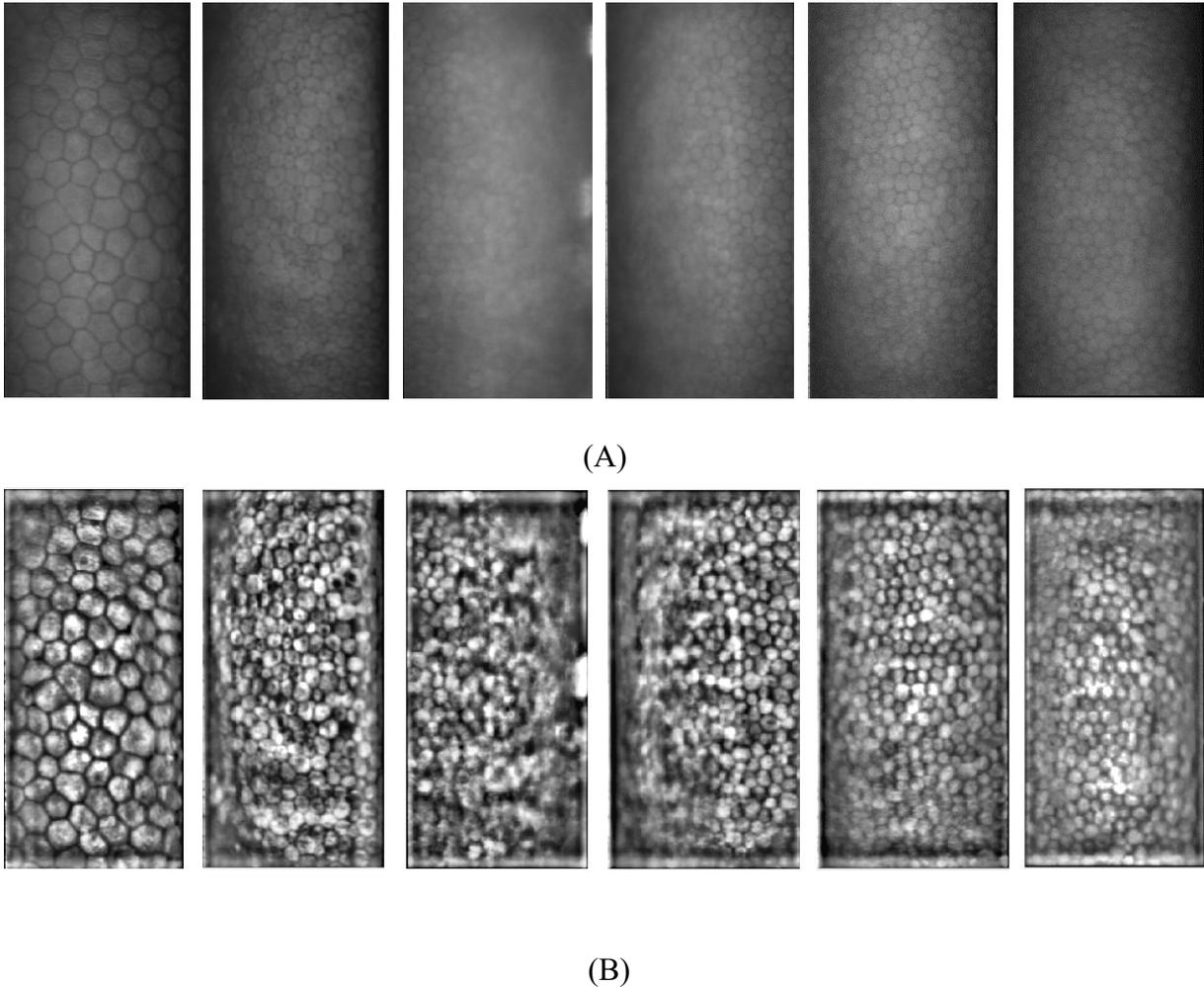


Figure 20 : Résultat d'égalisation adaptative d'histogramme

(A) : Image original (B) : Résultat final

3.1.2. Filtrage

- **Définition d'un filtre fréquentiel passe bande**

Les filtres de fréquence traitent une image dans le domaine de fréquence, ce sont des filtres basés sur l'utilisation de la transformée de Fourier. Ils sont de 3 types : des filtres passe haut, des filtres passe bas et des filtres passe bande.

Dans notre travail nous avons utilisés un filtre passe bande c'est le filtre de Butterworth qui prend une image et une fonction de filtrage dans le domaine de Fourier. Cette image est ensuite multipliée par la fonction de filtrage pixel par pixel :

$$G(k, l) = F(k, l) \times H(k, l)$$

où $F(k, l)$ est l'image d'entrée dans le domaine de Fourier, $H(k, l)$ la fonction de filtrage et $G(k, l)$ est l'image filtrée.

Pour obtenir l'image résultante dans le domaine spatial,

$G(k, l)$ doit être retransformée en utilisant la transformée de Fourier inverse [22].

On obtient la fonction de filtre passe bande en multipliant les fonctions de filtre d'un passe-bas et d'un passe-haut dans le domaine fréquentiel, où la fréquence de coupure du passe bas est supérieure à celle du passe haut [22].

Ce filtre fréquentiel passe bande atténue les très basses et les très hautes fréquences, mais conserve une bande de fréquence moyenne. Le filtrage passe bande peut être utilisé pour améliorer les contours (suppression des basses fréquences) tout en réduisant le bruit en même temps (atténuation des hautes fréquences).

Nous avons appliqués le filtre passe bande de butterworth dans l'étape de filtrage six fois pour arriver à des meilleurs résultats Figure(21).

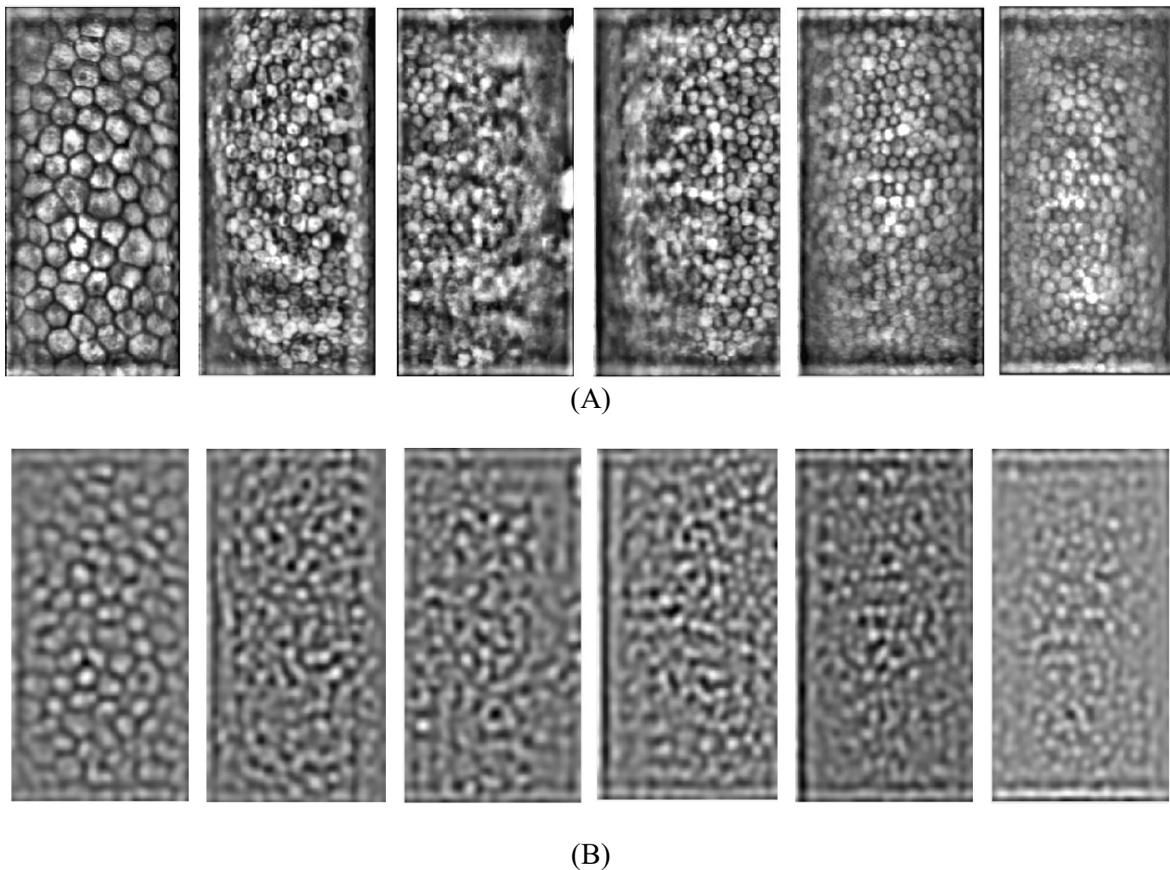


Figure 21: Résultat du filtrage passe bande(A) : Image égalisée (B) : Image filtrée

3.2. Segmentation

Cette étape consiste à appliquer une détection de contour des cellules endothéliales cornéennes basée sur l'utilisation d'un algorithme efficace c'est le plus connu parmi les approches de morphologie mathématique, qui est l'algorithme de ligne de partage des eaux (LPE).

- ***Définition de la ligne de partage des eaux***

La ligne de partage des eaux est une notion très importante pour les problèmes de segmentation. Intuitivement, elle est définie par analogie géographique comme le complémentaire des bassins versants, un bassin versant étant la zone associée à un minimum régional telle qu'une goutte d'eau tombant dans cette zone et suivant la ligne de plus grande pente s'arrêtera dans ce minimum [23].

On définit :

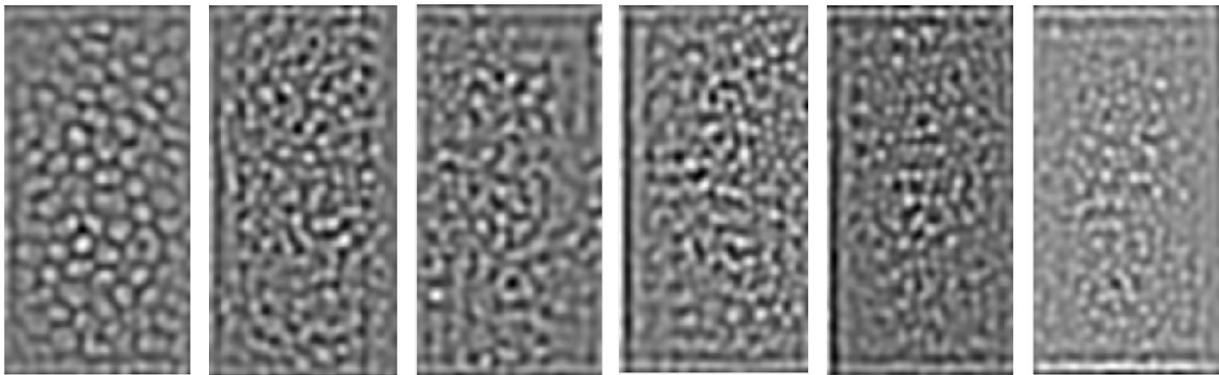
- **Le minimum local** comme étant le point ou plateau d'où on ne peut pas atteindre un point Plus bas sans être obligé de remonter [23].
- **Le bassin versant** comme étant la zone d'influence d'un minimum local : une goutte d'eau s'écoulant dans le bassin versant arrive au minimum local [23].
- **La ligne de partage des eaux** est une ligne séparant 2 bassins versants (de cette ligne, une goutte d'eau peut s'écouler vers au moins 2 minima locaux distincts). Elle est également la limite des zones d'influence des minima locaux [23].

La transposition de cette définition intuitive en termes mathématiques ne va pas sans poser de nombreux problèmes (définition d'une ligne de plus grande pente, problème des plateaux, etc...). La plupart des définitions sont algorithmiques, c'est-à-dire que la ligne de partage des eaux est définie d'après le moyen qui permet de la construire. Un des algorithmes les plus populaires est l'algorithme « d'immersion » qui consiste à remplir progressivement les bassins versants (à partir des minima régionaux) pour déterminer leurs limites [23].

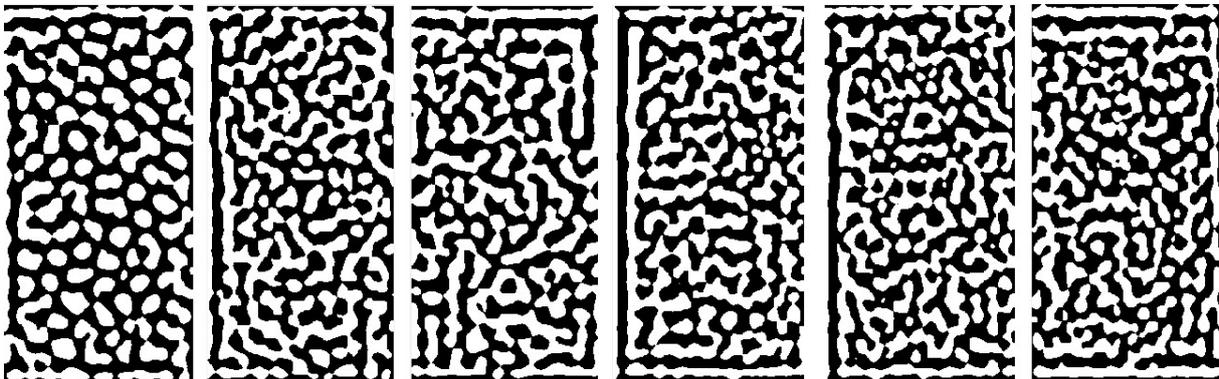
Dans la segmentation des images, la ligne de partage des eaux fournit par définition des contours fermés. Même si La ligne de partage des eaux produit une très forte sur-segmentation, tous les contours effectivement présents dans l'image font partie de la partition obtenue par

l'algorithme. Ce qui sous-entend que toute l'information nécessaire est présente dans cette transformation morphologique et qu'il faut, afin de pouvoir l'exploiter correctement [23].

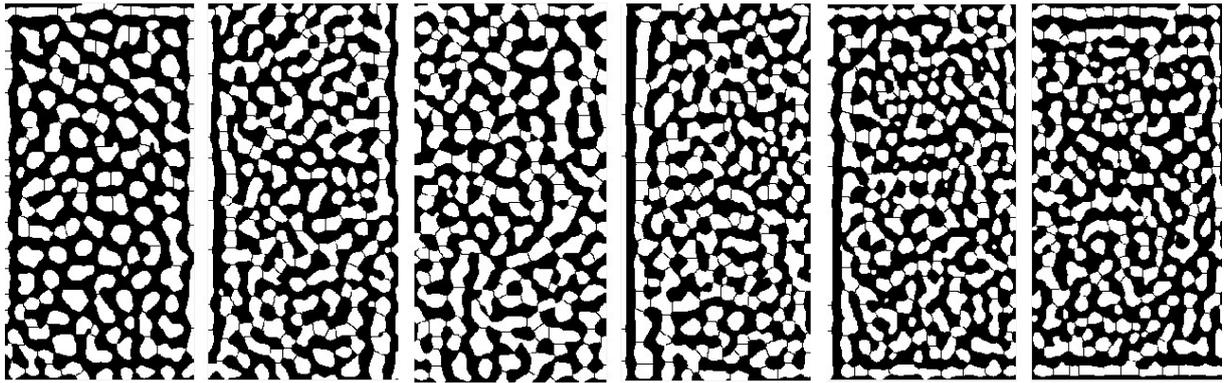
L'image prétraitée est passée par un processus de binarisation, cette image binarisée est constituée de marqueurs de cellules circulaires qui sont parfois liés les uns aux autres de manière chapelet, ces marqueurs liés sont séparés en appliquant l'approche de ligne de partage des eaux ensuite l'approche de Voronoï est utilisée pour détecter efficacement et automatiquement les limites des cellules endothéliales.



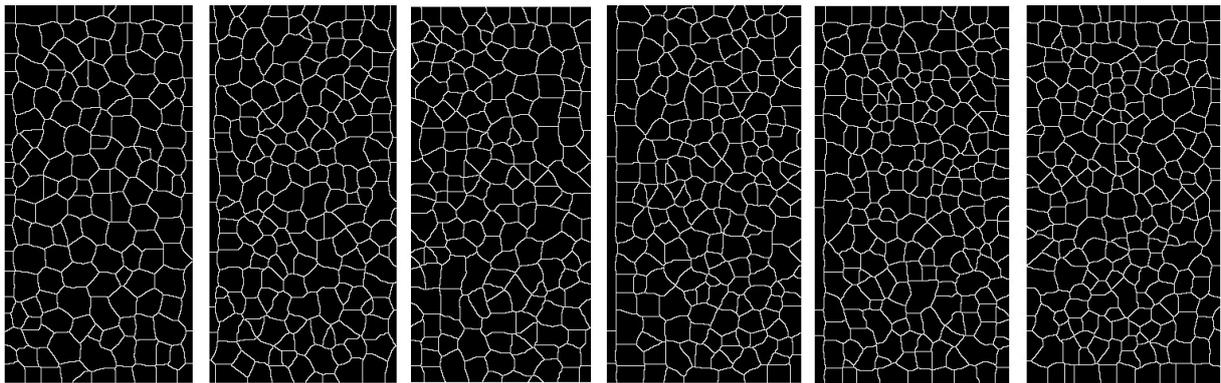
(A)



(B)



(C)



(D)

Figure 22 : Quelques images endothélium cornéen ainsi que le résultat de la segmentation

A : Image prétraitée B : Résultat de la binarisation

C : Résultat de l'application de ligne de partage des eaux D : Image segmentée

3.3. Caractérisation

A ce stade un certain nombre de caractéristiques utiles sur le plan clinique sont extraites des images de cellules endothéliales segmentées de manière automatisée ou l'étape de segmentation facilite l'extraction et le calcul de ces paramètres, afin de décrire avec précision la santé des cellules endothéliales de la cornée en se basant sur le calcul de nombre des cellules, la densité cellulaire, la surface moyenne des cellules et le périmètre moyen.

En raison de la mauvaise qualité des images de la base de données ou certaine région sont extrêmement sombre (situées au coin des images). Une segmentation précisée de ces cellules et une estimation des caractéristiques morphologiques de ces régions est difficile, pour cela les paramètres qui sont calculés dans l'étape de caractérisation sont fait sur une région de l'image qui a une luminance élevée car si l'image entière est utilisée, toutes les

cellules les plus externes sont exclues du calcul afin d'éviter toute cellules mal segmentée sur le bord de l'image d'entrée.

3.3.1. Calcul de nombre des cellules

C'est la détermination du nombre de cellules contenues dans l'image après la segmentation. Ce calcul facilite la détermination du paramètre suivant qu'est le paramètre le plus important dans notre système.

3.3.2. Calcul de la densité cellulaire

Cette partie est consacrée à la détermination de la densité cellulaire c'est à dire le nombre des cellules par unité de surface (mm²). Nous avons calculés cette densité à l'aide d'une formule mathématique :

$$DC = Nc/A$$

Ou :

DC : densité cellulaire

Nc : nombre de cellule

A : la taille totale de l'image

La densité cellulaire joue un rôle important dans le diagnostic et dans la détermination du statut sanitaire de la cornée.

3.3.3. Calcul de la surface moyenne des cellules

La surface d'une cellule endothéliale est calculée à partir du nombre de pixels contenus dans cette cellule.

3.3.4. Calcul du périmètre moyen des cellules

Le périmètre désigne le nombre de pixels du contour d'une cellule

```

Command Window

Nombre_de_cellules =

    55

Density_cellulaire =

    1.8353e+03

Surface_moyenne_des_cellules =

    554.6182

Perimetre_moyen_des_cellules =

    90.3911

fx >> |
    
```

Figure 23: Exemple des paramètres calculés sur une image parmi les six images

Les résultats obtenus à partir de l'étape de caractérisation sur les six images sont illustrés dans la figure 24 :

	nombre des cellules	la densité cellulaire	la surface moyenne	le périmètre moyen
Image 1	56	1868.6	543.9107	89.6765
Image 2	66	2186.8	462.9697	81.7775
Image 3	59	2032.4	503.2881	83.5128
Image 4	72	2385.6	421.6389	78.5615
Image 5	86	2902.5	343.0116	69.3356
Image 6	78	2653.5	377.0256	72.7120

Figure 24: Résultat obtenu par l'étape de caractérisation

4. Discussions des résultats obtenus

Toutes les étapes de la chaîne de traitement d'image de l'algorithme proposé pour la segmentation et la détection des cellules à partir de la microscopie spéculaire sont résumées dans la figure 25 :

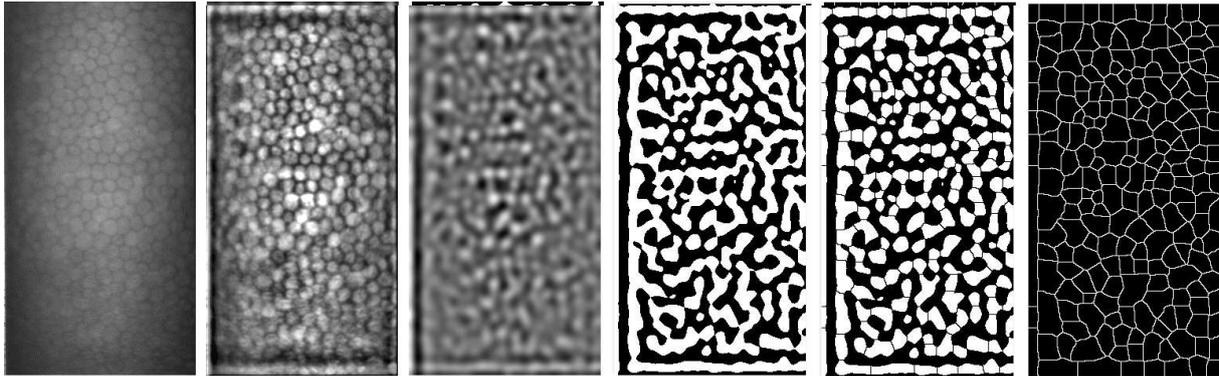


Figure 25 : Présentation de la méthode proposée étape par étape

L'égalisation adaptative d'histogramme a été corrigée principalement les problèmes de contraste et de luminosité des images endothéliales qui sont dus à un certain nombre de facteurs dans le processus d'acquisition :

- ✓ Le mouvement oculaire saccadé
- ✓ La sphéricité de la cornée qui entraîne une répartition non régulière de l'éclairage dans différentes zones de la cornée.

Comme vu précédemment, le filtre passe bande est appliqué six fois et à chaque test nous avons observés que les limites des cellules sont nettement améliorés en particulier dans les zones sombre situées ou coins des images.

L'utilisation de ce filtre fréquentiel permet la réduction du bruit et rendre les frontières de cellule plus visibles.

Nous remarquons que l'approche de ligne de partage des eaux a détecté efficacement et automatiquement les limites des cellules endothéliales ce qui facilite l'extraction des caractéristique de ces cellules notamment la densité cellulaire qui est calculée avec précision à l'aide de notre système.

Le temps de traitement de la technique ligne de partage des eaux par rapport aux autres techniques de segmentation est beaucoup plus réduit. Dans notre étude, le temps d'acquisition pour toute la chaine de traitement est uniquement de 3 secondes seulement par image.

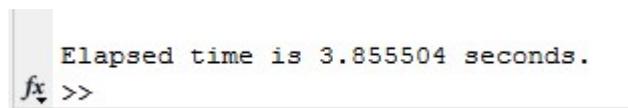


Figure 26: Le temps d'acquisition d'une image

5. Comparaison entre le résultat obtenu par l'algorithme proposé et par la machine

Dans cette partie nous avons comparés nos résultats avec les résultats obtenus par la machine.

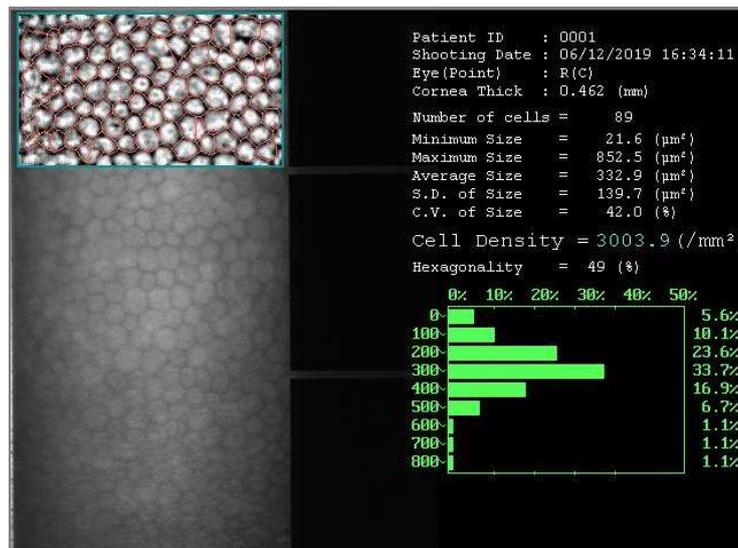


Figure 27: Résultat obtenu à partir de microscopie spéculaire TOPCON

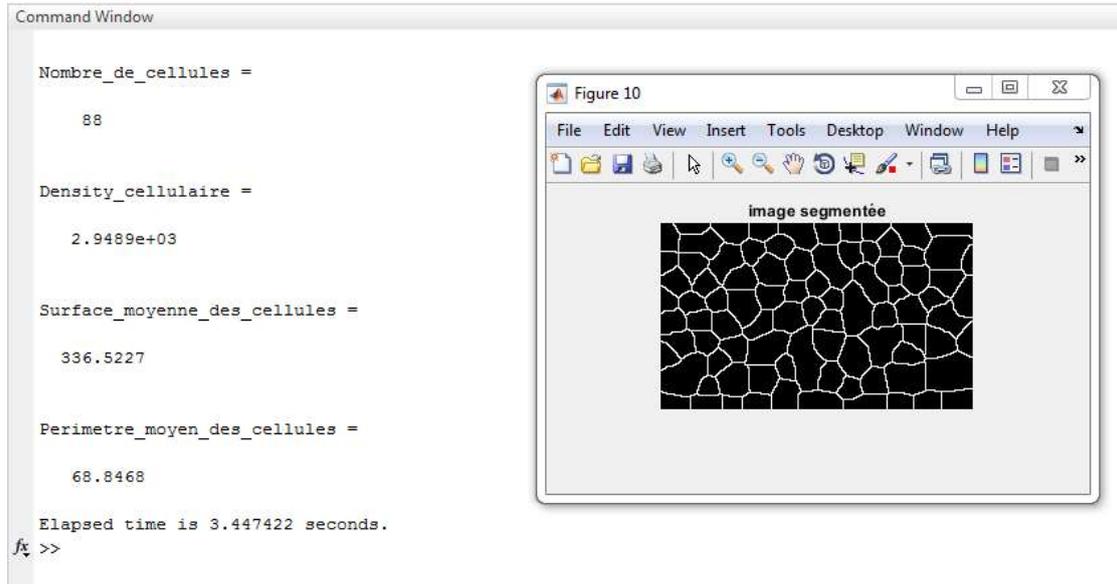


Figure 28: Résultat obtenu à partir de l’algorithme proposé

		Résultat de microscopie spéculaire	Résultat de l'algorithme proposé
Image 1	Nombre des cellules	89	88
	Densité cellulaire	2948.9	3003.9
Image 2	Nombre des cellules	64	66
	Densité cellulaire	2726.3	2245.2
Image 3	Nombre des cellules	66	65
	Densité cellulaire	2521.6	2168
Image 4	Nombre des cellules	61	75
	Densité cellulaire	2469.1	2399.7

Figure 29 : Résultat de quatre images obtenues par le microscope spéculaire et l'algorithme proposé

D’après ces figures nous remarquons que les paramètres calculés sont presque similaire quel que soit le nombre des cellules ou la densité cellulaire.

6. Présentation De L'interface

Notre application est constituée de deux fenêtres, une fenêtre comporte :

- **Bouton pour télécharger une image** : qui permet de lire les images
- **Panel contient trois boutons** : qui peuvent être utilisés pour appliquer le filtrage et l'amélioration de la qualité d'image.
- **Quatre axes** : permettent d'afficher l'image initiale, résultat d'égalisation adaptative d'histogramme, résultat de filtrage et résultat finale de l'étape de prétraitement.

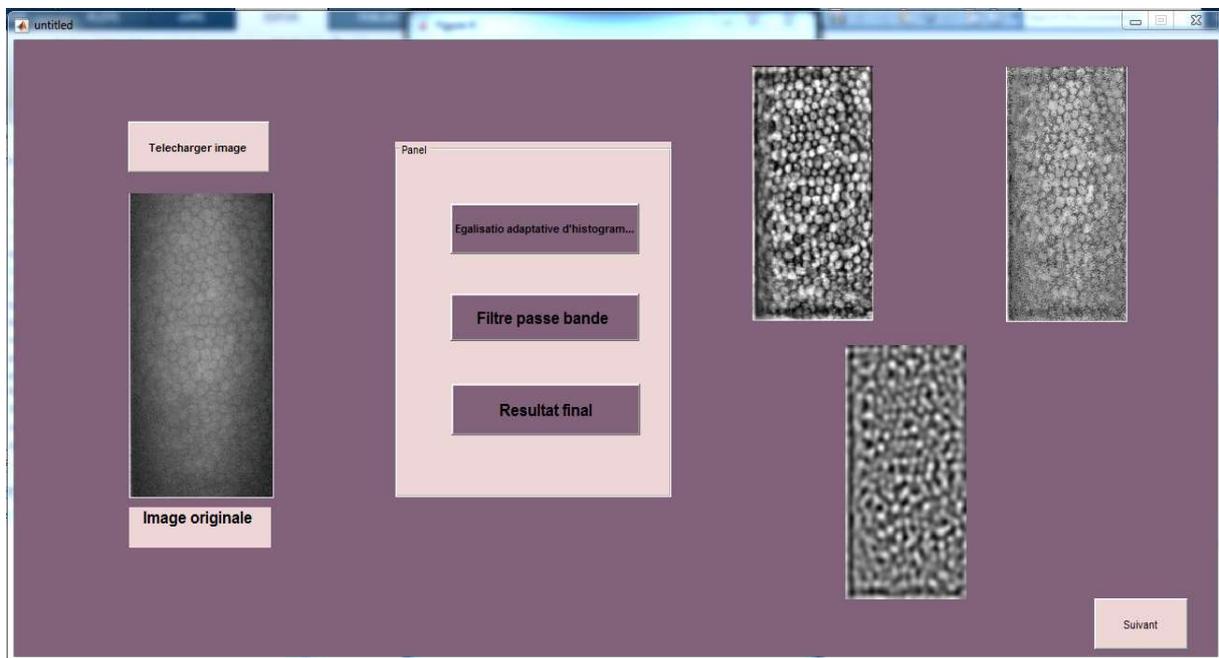


Figure 30: Fenêtre 1

L'interface proposée permet à l'utilisateur de segmenter toute l'image puis, la rogner pour effectuer les calculs des caractéristiques uniquement sur la partie recadrée. Donc, la deuxième fenêtre contient :

- **Bouton de la binarisation** : qui permet d'appliquer la binarisation sur l'image prétraitée.
- **Bouton de LPE** : application de l'approche de ligne de partage des eaux.
- **Bouton de l'image segmentée** : permet d'afficher le résultat final de la segmentation.

- **Bouton pour couper l'image** : couper l'image pour faire le calcul des paramètres morphométriques.
- **Panel contient quatre Boutons et quatre Static Text** : pour afficher les paramètres calculés.

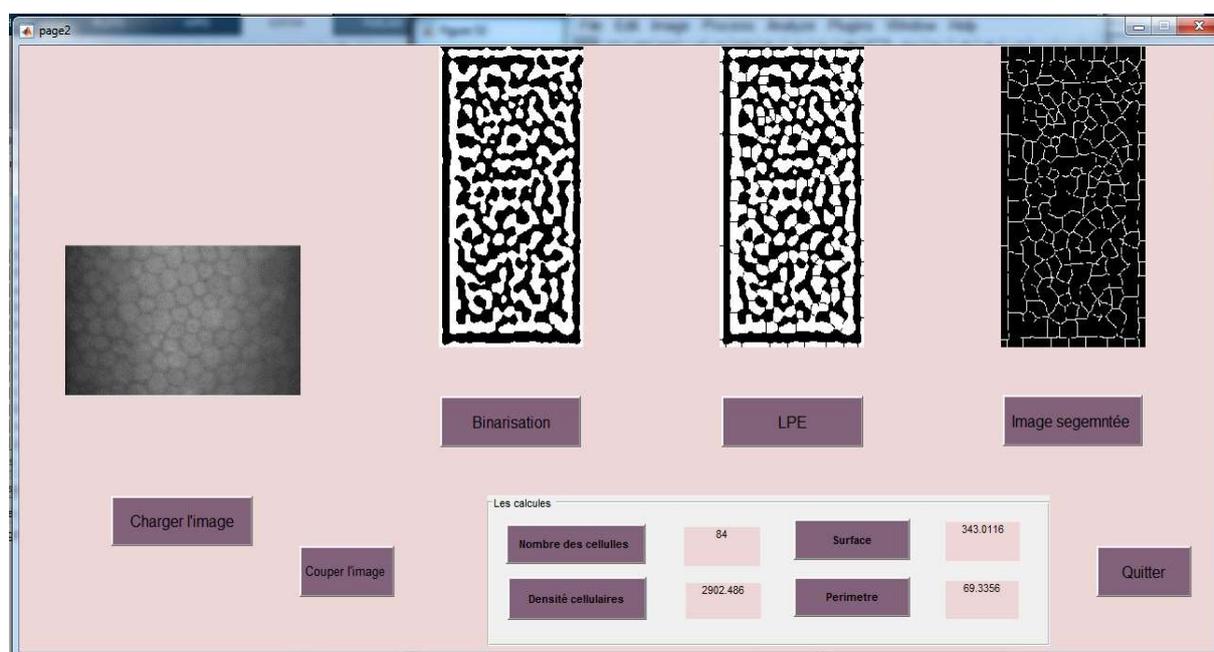


Figure 31: Fenêtre 2

7. Conclusion

Afin de diminuer le risque d'une décompensation cornéenne lors d'une chirurgie cornéenne, une bonne segmentation et un bon comptage des cellules endothéliales est obligatoire.

Pour cette raison, l'objectif de ce travail est de développer un algorithme capable de faire la segmentation ainsi que le comptage des cellules endothéliales.

Ce travail est validé par les médecins ophtalmologues. Puisque les résultats obtenus avec notre approche concernant les images de mauvaises qualités sont meilleurs que celles données par le microscope spéculaire TOPCON.

Conclusion général

L'objectif de ce mémoire est de proposer une nouvelle méthode de segmentation et de comptage des cellules endothéliales à partir de la microscopie spéculaire en se basant sur l'utilisation des différents outils de traitement d'images et des approches de la morphologie mathématique afin de réaliser un diagnostic précis.

A travers ce travail, nous avons effectués une brève description de : l'anatomie de l'œil et de l'endothélium cornéen humain (la partie qui nous intéresse dans cette étude), une présentation de l'appareillage de la microscopie spéculaire. Puis nous avons présentés quelques travaux trouvés dans la littérature qui concerne la segmentation de ces cellules. En dernier lieu, une explication détaillée de la méthode proposée pour la segmentation et le comptage des cellules endothéliales ainsi qu'une comparaison des résultats obtenus.

Le système proposé contient une étape de prétraitement basée sur l'utilisation d'une égalisation adaptative d'histogramme, et un filtre fréquentiel passe bande de Butterworth, une étape de segmentation des cellules endothéliales par l'application de l'approche morphologique de la ligne de partage des eaux, et une étape de caractérisation pour calculer quelques paramètres morphométriques des cellules. Ce système a été testé sur un ensemble d'images d'une base de données collectée au niveau de la clinique LAZOUNI dans le but de réaliser un travail de recherche sur l'analyse quantitative et qualitative endothéliale. Les résultats présentés dans le chapitre 3, montrent une bonne segmentation pour l'ensemble des données et ceci a été confirmé par les ophtalmologistes.

Donc, nous pouvons conclure que notre méthode a réussi de céder des résultats fiables dans le cadre d'aide au diagnostic médical.

Ce projet de fin d'étude nous a permis d'approfondir nos connaissances théoriques, acquises tout le long de notre formation, par la pratique des nouvelles technologies de l'information et de communication.

En perspective, nous cherchons à améliorer notre approche et proposer une interface graphique complète et intelligente qui facilitera la tâche du médecin ophtalmologue.

Bibliographie

- [1] Laouadj, Mabrouk. *Cours de psychophysiologie*. Université Abderrahmane Mira, Bejaïa. 2017.
- [2] <https://www.guide-vue.fr/la-sante-de-vos-yeux/shemas-de-l-%c5%93il> Consulté le : novembre 2018
- [3] Alexandra P. *les baisses de vue*. Mémoire. France 2010.
- [4] <https://www.futura-sciences.com/sante/dossiers/medecine-oeil-vision-dela-vision-667/page/4>. Consulté le : novembre 2018
- [5] TROST, Olivier et Pierre TROUILLOUD. *Anatomie tête, cou, nerfs craniens et organes des sens . s.l. : ellipses*. livre. 2011.
- [6] BELDJILALI, Sid Ahmed. *Optique géométrique*. Université de Science et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf. 2016.
- [7] Camille Couture. *Étude de la guérison des plaies cornéennes grâce à la cornée reconstruite par génie tissulaire*. Université Laval. Canada. 2016
- [8] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01508532/document> Consulté le : novembre 2018
- [9] LAVERNE, Sophie. *10 ans d'innovations en controle qualite du greffon cornéen et projets d'avenir*. Université jean Monnet, Saint-Etienne, 2013.
- [10] AUDET, CAROLINE. *Optimisation des conditions de culture des cellules endothéliales cornéennes félines pour la reconstruction d'un endothélium cornéen autologue*. Université Laval. Québec, canada 2010.
- [11] Ophtalmologie. e-ecm.com. 2017.
- [12] Gray et al. *Cornea*. Supplement to Volume 37, University Hospitals Cleveland Medical Center, 11100 Euclid Avenue, Cleveland, OH 44106. Number 6, Join 2018

- [13] Gavet, Yann. *Perception visuelle humaine, complétion des mosaïques et application à la reconstruction d'image de l'endothélium cornéen humain en microscopie optique spéculaire*. Thèse. France, 2008.
- [14] Daniel Reska, Kamil Charłampowicz, et Cezary Boldak. *Automatic segmentation of corneal endothelial cells using active contours*. Université de Technologie, Białystok, Poland, 2014.
- [15] Selig, Bettina, et al. *Fully automatic evaluation of the corneal endothelium from in vivo confocal microscopy*. *BMC Medical Imaging* 15:13. DOI 10.1186/s12880-015-0054-3. 2015.
- [16] Scarpa, F. et Ruggeri, A. *Automated Morphometric Description of Human Corneal Endothelium from in-vivo Specular and Confocal Microscopy*. 2016.
- [17] Piorkowski, Adam. *Best-fit Segmentation Created Using*. Université de Science et de la Technologie. Poland, 2017.
- [18] Fabijanska, Anna. *Corneal Endothelium Image Segmentation Using Feedforward Neural Network*. Université de Technologie. Poland, 2017.
- [19] Qahwaji, Rami S.R., et al. *A fully automated cell segmentation and morphometric parameter system for quantifying corneal endothelial cell morphology*, Université Bradford. Angleterre. 2018.
- [20] Berrichi Fatima Zohra, Benyettou Mohamed, « L'interprétation des Images Médicales Cérébrales Segmentation par L'approche Split et Merge », Laboratoire de Modélisation et Optimisation des Systèmes Industriels : LAMOSI. Faculté des Sciences, Département d'Informatique, USTO.B.P. 1505 EL M'naouer 31000 Oran – Algérie.
- [21] http://textes-francais.fr/adaptive_histogram_equalization consulté le : mai
- [22] <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2> consulté le : Mai 2019
- [23] Hammouda Merièm, Ramdane Mamcha Imène. *Segmentation d'images médicales par morphologie mathématique*. Mémoire. Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen. 2016