



جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen

Faculté de Technologie

Département de Génie Biomédical

Laboratoire de Recherche de Génie Biomédical

**MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES**

Pour l'obtention du Diplôme de

**MASTER en GENIE BIOMEDICAL**

**Spécialité : Signaux et Images en Médecine**

Présenté par : ROUIZI Salima et SELKA Selma

---

**Détection automatique et classification du  
kératocône**

---

Soutenu le 24 mai 2016 devant le Jury

M. BESSAID Abdelhafid	<i>Prof</i>	Université de Tlemcen	Président
M. LAZOUNI Mohamed El Amine	<i>MAB</i>	Université de Tlemcen	Encadreur
M. MESSADI Mohammed	<i>MCA</i>	Université de Tlemcen	Co-Encadreur
M. CHIKH Mohammed Amine	<i>Prof</i>	Université de Tlemcen	Examineur

Année universitaire 2015-2016

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciements

*Nous remercions tout d'abord Dieu pour l'accomplissement de ce mémoire.*

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur Mr LAZOUNI Mohamed El Amine. Nous le remercions de nous avoir encadrés, orienté, aidé et conseillé. On est reconnaissantes pour le temps conséquent qu'il nous a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. On a beaucoup appris à ses côtés et on lui adresse notre gratitude pour tout cela.*

*Nous adressons de chaleureux remerciements à notre Co-encadreur de mémoire Mr. MESSADI Mohammed pour son attention de tout instant sur nos travaux, pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de ce mémoire. Son énergie et sa confiance ont été des éléments moteurs pour nous. On a pris un grand plaisir à travailler avec lui.*

*Nous tenons ensuite à remercier les membres du jury, Mr. A. BESSAID professeur au département de génie biomédical, à qui nous adressons l'expression de notre parfaite reconnaissance pour avoir accepté de présider notre jury.*

*Nous adressons nos remerciements à Mr. M.A CHIKH professeur au département de génie biomédical, d'avoir accepté d'examiner notre travail et de participer à ce jury.*

*Il nous est particulièrement agréable de remercier Dr. LAZOUNI Médecin spécialiste en ophtalmologie, qui nous a ouvert les portes de sa clinique, ainsi que tout le personnel de la clinique LAZOUNI.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents ; je ne saurai jamais m'exprimer quant aux sacrifices et aux dévouements que vous avez consacré à mon éducation et à mes études. Aucune dédicace n'est assez éloquente pour exprimer mon respect, ma considération et ma profonde gratitude.*

*A mes très chères sœurs : Hayet et Ahlam.*

*A toute la famille : ROUIZI et HAMIDOU.*

*A mon adorable binôme Selma pour sa compréhension, sa patience, son humour et son aide.*

*A mon âme sœur DOUIDI Bouchra.*

*A tous mes professeurs : Leur générosité et leur soutien m'obligent de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.*

*A toute la promotion master 2 signaux et images en médecine 2016.*

*A tous ceux qui m'aiment et qui ont cru en moi*

ROUIZI SALIMA

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents ; je ne saurai jamais m'exprimer quant aux sacrifices et aux dévouements que vous avez consacré à mon éducation et à mes études. Aucune dédicace n'est assez éloquente pour exprimer mon respect, ma considération et ma profonde gratitude.*

*A mes très chers frères : Ayyoub et Lokmane.*

*A toute la famille : SELKA et KALAJDI*

*A mon adorable binôme Salima pour sa compréhension, sa patience, son humour et son aide.*

*A ma meilleure ami et sœur Sara.*

*A tous mes professeurs : Leur générosité et leur soutien m'obligent de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.*

*A toute la promotion signaux et images en médecine 2016.*

*A tous ceux qui m'aiment et qui ont cru en moi*

*SELKA SELMA*

## Glossaire

AETP : Élévation antérieure du point le plus faible

AUC : Area-Under-the-Curve

AUROC : Area Under the Receiver Operating Characteristic

AvPI : Average Progression Index

BCVb : Baiocchi Calossi Versaci back index

BCVf : Baiocchi Calossi Versaci front index

BDD : Base De Données

CART : Classification And Regression Trees

CCT : Central Corneal Thickness

CDVA : Corrected Distance Visual Acuity

CHAID : CHi-squared Automatic Interaction Detector

CLEK : Collaborative Longitudinale Evaluation of Keratoconus

CP-TP : Central Pachymetry and Thinnest Pachymetry

CV3 : Corneal Volume values for the 3.0 mm

CV5 : Corneal Volume values for the 5.0 mm

CV7 : Corneal Volume values for the 7.0 mm

CXL : Cross-linking cornéen

D : Dioptries

DCT : Depressed Corneal Thickness

FFKC : Kératocône Fruste Forme

FN : Faux Négatif

FP : Faux Positif

HEOM : Heterogeneous Euclidean-Overlap Metric

I-S : valeur Inférieure – Supérieure

K : Kératométrie centrale

KC : Kératocône

KISA : Keratoconus percentage index

K-NN: K-Nearest Neighbors

KPI : Keratoconus Prediction Index

K1 : meridian keratometry

K2 : steep keratometry

LASIK : LASER in SITUE tu Keratomileusis

MaxPI : Maximum Progression Index

MCT : Minimum Corneal Thickness

MinPI : Minimum Progression Index

MLP : Multilayer Perceptron

MPE : Élévation Postérieure Maximale

NPV : Valeurs de Prédiction Négative

OCT : Tomographie par Cohérence Optique

PPV : Valeurs de Prédiction Positive

PTI : Percentage Thickness Increase

Q : Facteur d'asphéricité

RBFNN : Radial Basis Function Neural Network

ROC : Receiver Operating Characteristic

SimK : Kératométrie Simulée moyenne

SVM : Support Vector Machine

TC : Taux de Classification

TP : Thinnest Pachymetry

TP-Y : Décentration vertical du point le plus faible

VN : Vrai Négatif

VP : Vrai Positif

Z3 : Indice de Schwiegerling

## Résumé

Le kératocône est une maladie oculaire correspond à une déformation de la cornée qui s'amincit progressivement, perd sa forme sphérique et prend une forme de cône irrégulier, dont sa reconnaissance a besoin des experts et des images topographiques de l'œil qui fournissent un ensemble de données.

La mise en œuvre des méthodes reposant sur la détection précoces des signes cliniques du kératocône permet d'améliorer le diagnostic de ces maladies.

Ce mémoire met l'accent sur le développement des méthodes pour la détection automatique du kératocône, par le traitement d'images topographiques et la classification des paramètres numériques qui peuvent améliorer les outils de détection pour aider les médecins ophtalmologues dans la phase de reconnaissance du kératocône.

Plusieurs techniques de classification et de traitement d'images ont été utilisées dont les résultats étaient satisfaisant.

**Mots clé :** Kératocône, cornée, topographie cornéenne, aide au diagnostic médical, traitement d'images, classification.

## Abstract

Keratoconus is an eye disease corresponds to a deformation of the cornea thins gradually loses its spherical shape and takes a shape of an irregular cone. The diagnostic needs ophthalmologist doctors and topographic images of the eye that provides a set topographic data.

The implementation methods based on detection of subclinical keratoconus it's possible to greatly improve diagnosis of these diseases.

This brief focuses on the development of methods for the automatic detection of keratoconus, for the treatment of topographic images and classification of parameters that can improve the detection tools to assist ophthalmologists in the keratoconus recognition phase.

Too much methods of classifications and medical processing have been used which results were satisfactions.

**Keywords:** Keratoconus, cornea, corneal topography, medical diagnostic, image processing, classification.

## ملخص

القرنية المخروطية هو مرض العين يتمثل في تشوه شكل القرنية حيث تفقد تدريجيا شكلها الكروي و تأخذ شكل مخروط غير منتظم ، والتعرف عليه يتطلب وجود أطباء مختصين في طب العيون، بالإضافة إلى الصور الطبوغرافية للعين التي توفر مجموعة من البيانات التي تساعد على تشخيص و الكشف المبكر لهذه الأمراض. الهدف من إنجاز هذا المشروع هو تطوير أساليب الكشف التلقائي للقرنية المخروطية و ذلك بدراسة محتوى الصور الطبوغرافية من خلال تقنيات و أدوات المعالجة الرقمية للصور نذكر منها استخراج المناطق والمورفولوجيا الرياضية بالإضافة إلى جمع و تصنيف البيانات .  
تم استعمال عدة تقنيات التصنيف و معالجة الصور و قد كانت النتائج مرضية.

## كلمات البحث:

القرنية المخروطية، القرنية، تضاريس القرنية، التشخيص الطبي، معالجة الصور، التصنيف

## Table des figures

Figure 1.1: Oeil atteint du kératocône .....	6
Figure 1.2: Carte topographique d'un cas pathologique.....	14
Figure 1.3: Topographe Orbscan II .....	16
Figure 2.1: Perceptron monocouche .....	23
Figure 2.2 : Perceptron multicouches .....	23
Figure 2.3 : Exemples de quatre types de problèmes de discrimination binaire.....	24
Figure 3.1: statistiques du kératocône .....	35
Figure 3.2: Analyse graphique du kératocône selon l'âge.....	36
Figure 3.3: Carte topographique d'un cas atteint du kératocône .....	39
Figure 3.4: Carte topographique d'un cas sain .....	39
Figure 3.5: Affichage Max .....	40
Figure 3.6: Echelle de couleurs .....	41
Figure 4.1: Statistiques des trois techniques de classification.....	48
Figure 4.2: Organigramme de traitement d'image.....	50
Figure 4.3: Images topographiques .....	51
Figure 4.4: Image segmentée.....	51
Figure 4.5: Images binaires .....	52
Figure 4.6: Les zones détectées .....	52
Figure 4.7: Les 3 zones d'intérêts .....	53
Figure 4.8: Echelle de couleurs .....	54
Figure 4.9: Intervalles de classification des couleurs.....	55
Figure 4.10: Détection du point le plus fin .....	56
Figure 4.11: Image de kératométrie axiale .....	56
Figure 4.12: La région de 3mm de la kératométrie axiale .....	57
Figure 4.13: Détection des axes.....	57
Figure 4.14: Résultat d'étude de symétrie des axes .....	58
Figure 4.15: Carte topographique d'un patient sain.....	59
Figure 4.16: Carte topographique d'un patient malade.....	60
Figure 4.17: Résultats de classification des trois bases utilisées .....	64
Figure 4.18: Interface graphique .....	66

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Stades du kératocône .....	9
Tableau 3.1: Répartition des patients dans la BDD .....	34
Tableau 3.2 : Les attributs de la base de données.....	39
Tableau 4.1: Matrice de confusion .....	44
Tableau 4.2 : Résultats de la méthode KNN .....	45
Tableau 4.3 : Matrice de confusion du meilleur résultat trouvé par KNN .....	46
Tableau 4.4: Résultats de la méthode arbre de décision C4.5 .....	46
Tableau 4.5: Matrice de confusion du meilleur résultat trouvé par arbre de décision.....	47
Tableau 4.6 : Résultats de la méthode des réseaux de neurones .....	47
Tableau 4.7: Matrice de confusion du meilleur résultat trouvé par les réseaux de neurones...	47
Tableau 4.8: Les 11 attribus pertinents.....	49
Tableau 4.9: Résultats des couleurs dans la zone de 3mm.....	59
Tableau 4.10: Résultats des couleurs dans la zone de 5mm.....	59
Tableau 4.11: Résultats des couleurs dans la zone de 7mm.....	59
Tableau 4.12: Résultats des axes et du point le plus fin.....	60
Tableau 4.13: Résultats des couleurs dans la zone de 3mm.....	60
Tableau 4.14: Résultats des couleurs dans la zone de 5mm.....	61
Tableau 4.15: Résultats des couleurs dans la zone de 7mm.....	61
Tableau 4.16: Résultats des axes et du point le plus fin.....	61
Tableau 4.17: Tableau récapitulatif des classifieurs.....	62
Tableau 4.18: Résultats de différents classifieurs .....	63
Tableau 4.19: Matrice de confusion du meilleur résultat .....	63

## Table des matières

### **Introduction générale**

1. Contexte.....	1
2. Problématique.....	1
3. Contribution.....	2
4. Organisation du manuscrit.....	2

### **Chapitre 1: contexte médicale**

1. Introduction.....	4
2. Historique.....	4
3. Épidémiologie.....	5
4. Fréquence.....	6
5. Anatomie pathologique.....	6
6. Pathogénie.....	8
7. Symptômes.....	8
8. Evolution.....	9
9. Formes et types du kératocône.....	10
9.1. Le kératocône Fruste.....	11
9.2. Le kératocône aigu.....	11
10. Diagnostics différentiels et cliniques.....	12
11. Examens cornéotopographiques.....	14

11.1. La topographie cornéenne.....	14
11.2. Types de topographie cornéenne.....	15
12. Traitement du kératocône .....	16
12.1. Correction optique..... ;.....	16
12.1.1. Lunette.....	16
12.1.2. Lentille de contact.....	17
12.2. Correction par chirurgie.....	17
13. Conclusion.....	18
<b><u>Chapitre 2: Etat de l'art et principes théoriques des techniques utilisées</u></b>	
1. Introduction .....	19
2. Techniques de traitement d'images .....	19
2.1. La segmentation d'image .....	19
2.1.1. Segmentation par seuillage .....	20
2.2. Morphologie mathématique .....	20
2.2.1. Dilatation.....	21
2.2.2. Squelettisation.....	21
2.3. Caractérisation et Classification des images.....	22
3. Techniques de classification des données numériques.....	22
3.1. Classification par Réseaux de neurones.....	22
3.2. Classification par Machine à Vecteur de Support.....	23

3.3. Classification par K plus proches voisins .....	24
3.4. Classification par l'Arbre de décision.....	24
4. Etat de l'art .....	25
4.1. Approche de classificationsnumérique.....	25
4.2. Autres approches.....	28
5. Contribution.....	31
6. Conclusion .....	32

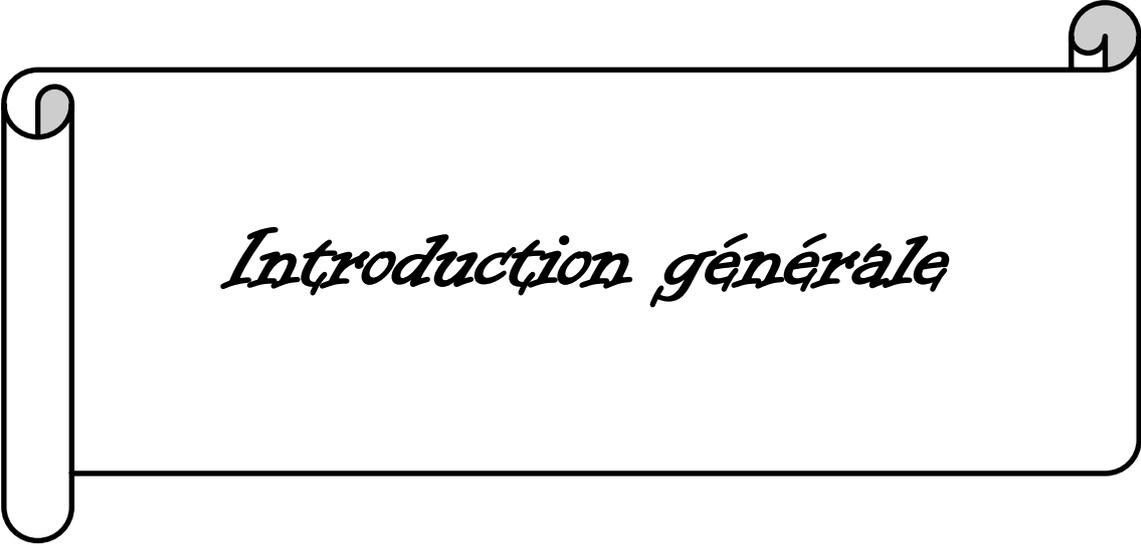
### **Chapitre 3: Base de données**

1. Introduction .....	33
2. Définition d'une base de données.....	33
3. Description de la base de données collectée.....	34
3.1. BDD numérique.....	34
3.2. BDD images.....	39
4. Conclusion .....	42

### **Chapitre 4: Mise en œuvre pratique**

1. Introduction .....	43
2. Classification .....	43
2.1. Critères d'évaluation.....	43
2.2. Résultat de la classification.....	44
2.2.1. Méthode des K plus proches voisins K-NN.....	45

2.2.2. Méthode d'Arbre de décision C4.5:.....	46
2.2.3. Méthode des Réseaux de neurone MLP .....	47
3. Chronologie du traitement d'images .....	49
3.1. Images antérieures et postérieures .....	50
3.1.1. Segmentation .....	51
3.1.2. Caractérisation.....	52
3.2. Images de kératométrie axiales.....	56
3.2.1. Caractérisation .....	57
3.2.2. Morphologie mathématique.....	58
3.3. Résultats et interprétations du traitement d'images.....	58
3.4. Classification de la base d'images .....	62
4. Classification de la combinaison des deux bases de données.....	63
5. Interprétation générale.....	64
6. Interface graphique .....	65
7. Conclusion.....	66
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>67</b>



*Introduction générale*

# Introduction générale

---

## Introduction Générale

### **1. Contexte :**

La vue est un ensemble de fonctions qui contribuent à la perception, l'identification, la localisation des différentes scènes de la vie. Pour s'y sentir bien, un individu doit avoir non seulement une bonne acuité visuelle, mais aussi pouvoir compter sur d'autres fonctions [1]. Des petites faiblesses de la vue peuvent être très gênantes dans la vie quotidienne; dans certaines circonstances elles représentent même un danger. A côté des amétropies connues il y a le kératocône.

Le kératocône est une ectasie axiale progressive, typiquement asymétrique, non-inflammatoire de la cornée qui apparaît préférentiellement à la fin de l'adolescence ou au début de l'âge adulte. C'est une atteinte évolutive qui progresse par alternance de phases de stabilisation et de phases de poussée. Normalement, le kératocône finit par se stabiliser et ne plus évoluer après un certain âge. Cette déformation de la cornée induite par le kératocône est problématique car elle est responsable d'une vision floue, déformée, même dédoublée.

Cette maladie est détectée en effectuant un examen de topographie cornéenne qui permet non seulement un meilleur diagnostic, en plus un outil d'aide aux médecins ophtalmologues dans la prise de décision précoce pour une meilleure prise en charge du patient.

Le dépistage du kératocône dans sa forme infra-clinique est un enjeu majeur en chirurgie réfractive, car il constitue une contre-indication formelle au LASIK, en raison du risque majeur d'une ectasie iatrogène. La prévalence du kératocône infra-clinique parmi les patients demandeurs de chirurgie réfractive est certainement plus élevée que dans la population générale. Le dépistage automatisé du kératocône infra-clinique est un enjeu de Santé publique [2].

### **2. Problématique :**

Le kératocône est une affection dont l'origine est inconnue, même si certains de ses facteurs de risque ont été identifiés. Il est difficile d'estimer la prévalence des formes cliniquement silencieuses de kératocône, pour une raison qui est intrinsèque au problème soulevé par leur dépistage. Quel que soit le critère étudié, il existe un chevauchement significatif entre les formes débutantes de kératocône et certaines atypies cornéennes non évolutives [3].

L'objectif de ce mémoire concerne l'amélioration du pouvoir détecter le kératocône en se basant sur des paramètres numériques et des images de cartes topographiques qui sont fournis par le topographe OrbscanII. Dans ce contexte, nous avons établi un système d'aide au

# Introduction générale

---

diagnostic réalisé par le traitement des images par segmentation, caractérisation et la morphologie mathématique afin d'extraire les informations pertinentes, ainsi que la classification des paramètres en utilisant des méthodes intelligentes à savoir : KNN, MLP et C4.5.

### **3. Contribution :**

Notre travail de recherche dispose les contributions suivantes :

- Collecte d'une nouvelle base de données composée de 444 patients lors de la réalisation des examens de topographie cornéenne.
- Teste de robustesse de notre base de données en utilisant plusieurs techniques de classification.
- Segmentation et caractérisation des images topographiques afin d'extraire les informations nécessaire pour le dépistage du kératocône.

Enfin, nous avons proposé un système d'aide au diagnostic pour les médecins ophtalmologues permettant la détection précoce du kératocône en utilisant des images interprétées automatiquement par un outil informatique.

### **4. Organisation du manuscrit :**

Notre projet de fin d'étude s'articule de la façon suivante :

- **Chapitre 01 :** Dans le premier chapitre, nous donnons un aperçu général sur le kératocône (KC) ; les symptômes, l'évolution, les examens cornéotopographiques permettant l'acquisition des images en couleurs et les paramètres numériques ainsi que les traitements éventuels.
- **Chapitre 02 :** Dans une première section de ce chapitre, nous passons en revue les différentes techniques de classifications en plus des outils de traitement d'images que nous allons utiliser pour résoudre la problématique posée dans ce mémoire, à savoir la détection du nombre de couleurs et leurs domaine d'appartenance dans les images topographiques. Dans la dernière section de ce chapitre, nous présenterons l'état de l'art des approches de classification du kératocône.
- **Chapitre 03 :** Ce chapitre concerne la description de notre propre base de données qui est divisée en une base d'images de 444 échantillons composé de 3 types d'images et la procédure suivie pour les obtenir, et une base de données numériques.

## Introduction générale

---

- **Chapitre 04** : Ce dernier chapitre est consacré à la présentation des méthodes efficaces pour la détection du kératocône et nous l'avons clôturé par les résultats et leurs interprétations.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale tout en proposant plusieurs pistes et perspectives de recherche dans le domaine.



**CHAPITRE 1****Contexte médical****1. Introduction :**

Le kératocône est une dystrophie qui touche l'œil, un trouble fréquent qui survient à la suite de forme irrégulière de la cornée, ce qui empêche la bonne focalisation de la lumière sur la rétine. Peut affecter toutes catégories de personnes, tout âge confondus, en général les femmes sont plus sujet de cette maladie [4]. Elle a été découverte par Mr Duddel en 1729 mais sa cause reste toujours inconnue, bien que les experts ont spéculé sur une variété de raisons, y compris les conditions médicales antérieures, l'hérédité, les allergies en se frottant les yeux.

L'investigation de cette maladie est décelable par plusieurs examens : la lampe à fente, le kératomètre et topographie cornéenne. Ce dernier reste l'examen le plus fiable pour le suivi et la détection précoce du kératocône.

L'acuité visuelle peut être fortement entravée par cette maladie. La correction de la vue peut se faire au début avec des lunettes mais à un stade plus avancé seulement avec des lentilles de contact rigides. Quand il n'est plus possible d'adapter des lentilles parce que la maladie a trop progressé, il faut procéder à une chirurgie telle que le cross-linking ou les anneaux jusqu'à une transplantation de la cornée pour une réhabilitation visuelle.

Dans ce chapitre, nous allons développer le thème de cette recherche qui consiste à définir la description générale de la maladie ainsi que l'atteinte histologique au niveau de la cornée et citer les causes lui donnant naissance ainsi que son évolution. Nous allons clôturer ce chapitre en énumérant les types de topographies et les traitements adéquats.

**2. Historique:**

La première description clinique de cette affection date du début du XVIIIème siècle par Duddel en 1729, qui a décrit l'observation d'un adolescent dont les cornées faisaient fortement saillie en avant et qui en outre était porteur d'un nystagmus [5].

En 1748, l'ophtalmologiste allemand Mauchard a fourni une description du kératocône sous le nom de «staphyloma diaphanum » [5].

Une description claire de la maladie n'a été donnée qu'en 1854, lorsque le britannique Nottingham a rapporté le cas de cornée sphérique en décrivant plusieurs caractéristiques classiques de la maladie [5].

En 1859, le chirurgien britannique Bowman a utilisé un ophtalmoscope pour le diagnostic du kératocône et a décrit comment incliner le miroir de l'instrument de manière à mieux

distinguer la forme conique de la cornée. Bowman a également essayé de restaurer la vision en tirant sur l'iris à l'aide d'un fin crochet inséré à travers la cornée et en tirant sur la pupille selon une fente sténopéïque verticale. Il a rapporté avoir obtenu un succès avec cette technique en restaurant la vision d'une patiente de 18 ans [5].

En 1869, lorsque le pionnier Suisse de l'ophtalmologie Johann Horner a rédigé une thèse intitulée « sur le traitement du kératocône », la maladie a déjà acquis sa dénomination actuelle. Le traitement à cette époque était une tentative pour reformer physiquement la cornée par cautérisation chimique via une solution de nitrate d'argent et l'application d'une pression [5].

L'idée de corriger le kératocône par une lentille de contact, dénommée « lunette de contact » à l'époque, revient à Fick en 1888 marquant le début de la contactologie. C'est le physicien Français Kalt qui a fabriqué par la suite le premier modèle des coquilles de verre qui ont amélioré la vision des patients en comprimant la cornée en une forme plus régulière. Par la suite, le kératocône a fait l'objet de nombreux travaux dont ceux d'AMSLER [5].

### **3. Épidémiologie:**

Le mot kératocône, d'origine grecque, signifie « cornée conique », Le kératocône est une maladie dégénérative de l'œil [6], déformante de la cornée plus précisément le revêtement transparent de l'iris et de la pupille de l'œil qui perd progressivement sa forme normalement sphérique pour prendre localement la forme d'un cône de plus en plus cambré.

Le kératocône est une ectasie axiale progressive, typiquement asymétrique, non-inflammatoire de la cornée. Il est bilatéral dans 96 % des cas, se développant de façon asymétrique, le diagnostic de la maladie pour le deuxième œil intervenant typiquement environ cinq ans après celui du premier.

L'apparition du kératocône est habituellement suivie d'une période de stabilité relative ou de progression très lente, qui peut être entrecoupée d'épisodes de progression plus rapide. La fin de la progression est également variable. La gravité de l'atteinte, au moment de la stabilisation, peut aller d'un astigmatisme irrégulier modère, corrigeable par lunettes ou lentilles de contact, à un amincissement sévère, avec protrusion et cicatrices, pouvant nécessiter une kératoplastie ou une autre méthode de traitement chirurgical. Le patient débute avec une cornée sphérique ou présentant un astigmatisme régulier. La progression se caractérise d'abord par un amincissement du stroma cornéen central, la protrusion apicale entraînant un resserrement de la courbure cornéenne, et des degrés variables de cicatrices.

L'apex plus fin se déplace vers le bas, provoquant un astigmatisme irrégulier, un signe de l'anomalie, cause de la diminution de la qualité de la vision sur 20 ou 30 ans [7].



**Figure 1.1: Oeil atteint du kératocône**

#### **4. Fréquence :**

Elle est peu importante sur la population générale, suivant les sources, entre 1 et 5/1000. Cette disparité s'explique surtout en fonction des critères diagnostiques sélectionnés. La fréquence du kératocône a sans doute été sous-estimée jusqu'à ces dernières années ; le développement de la chirurgie réfractive, imposant un dépistage préopératoire systématique par vidéo topographie a largement contribué à la découverte de fove mineures ou frustes, jusque-là ignorées.

L'affection peut être considérée comme bilatérale. La surveillance systématique des yeux adelphe des cas qualifiés d'unilatéraux a montré que l'atteinte du deuxième œil pouvait se révéler après plusieurs dizaines d'années. La prédominance féminine rapportée par Amsler en 1961 est rarement été retrouvée dans les études suivantes.

Toutes les races peuvent être atteintes par le kératocône, mais celui-ci serait plus fréquent chez les Asiatiques. Cette notion n'a pas été retrouvée dans l'importante étude CLEK (Collaborative Longitudinale Evaluation of Keratoconus) [8].

Dans notre base de données récoltée de 352 patients venant de tout le territoire algérien (nord, sud, Ouest, Est), nous avons trouvé 138 cas portant la maladie du kératocône et le nombre est en hausse.

#### **5. Anatomie pathologique :**

L'amincissement central de la cornée est fait aux dépens des lames stromales et il est constamment retrouvé. L'épaisseur cornée peut atteindre dans certains cas  $1/5^e$  de l'épaisseur cornéenne normale soit environ  $100\mu\text{m}$ .

---

- Epithélium :

Il est diversement touché suivant l'intensité et l'ancienneté du kératocône. Il existe une atrophie réduisant l'épithélium à deux ou trois assises cellulaires au lieu des six ou sept habituelles. Cette perte de l'architecture normale de l'épithélium s'est faite classiquement au détriment des couches basales et moyennes.

- Membrane basale épithéliale :

Elle présente les lésions de ruptures en regard des interruptions de la membrane de Bowman. Elle est très irrégulière et microscopie électronique peut en outre reconnaître, au niveau de la lamina densa, la présence de dépôts très osmiophiles homogènes, paraissant s'infiltrer dans la membrane de Bowman.

- Membrane de Bowman :

Elle perd sa structure homogène, prend un aspect fibrillaire avec des épaissements localisés, des plicatures et des ruptures comblées par du tissu conjonctival ou des cellules épithéliales. Les lésions ne sont pas pathognomiques du kératocône, mais c'est dans cette affection qu'elles sont retrouvées avec la plus grande fréquence.

- Stroma :

L'amincissement du tissu stromal, maximal dans la zone centrale du kératocône, n'est pas dû à une diminution propre des lamelles de collagène qui restent normales mais à une réduction du nombre de ces lamelles. Au niveau du stroma moyen et profond, il y a souvent une désorganisation des lamelles stromales avec une perte de parallélisme de ces lamelles. Ainsi, il présente fréquemment des ondulations anormales.

L'innervation stromale paraît hypertrophique ; Pouliquen a particulièrement souligné la modification de la population des kératocytes lors des kératocônes

- Membrane de Descemet :

Ces lésions sont moins caractéristiques. Il s'agit de déformations d'ondulations, parfois d'encoches et de rupture en coup d'ongle, essentiellement dans les kératocônes aigus.

- Endothélium cornéen :

Typiquement, la mosaïque endothéliale est conservée lors du kératocône et la densité cellulaire est normale pour l'âge. Cependant, les espaces entre les noyaux peuvent être irréguliers et un polymégathisme cellulaire peut exister en rapport avec un étirement des cellules dans le sens de la protrusion conique antérieure [8].

## **6. Pathogénie:**

La cornée est la lentille transparente à travers laquelle on perçoit l'iris coloré et la pupille noire centrale. Normalement, la cornée a une forme arrondie régulière. Chez les personnes ayant un kératocône, le centre de la cornée s'amincit et forme une protubérance conique et irrégulière qui perturbe la vision.

Il existe plusieurs théories qui tentent d'expliquer ce qui déclenche le kératocône chez une personne, mais la cause exacte de cette maladie oculaire est toujours inconnue, quatre facteurs sont couramment cités et étudiés par de nombreuses équipes de recherche :

- **Maladie génétique (hérédité et anomalie chromosomique):** même si aucun gène spécifique n'a été, à ce jour, identifié, le fait que plusieurs membres d'une même famille puissent être atteints et que la maladie se développe presque systématiquement dans les deux yeux appuie la thèse d'une implication génétique. Une recherche est actuellement en cours pour identifier le ou les éventuel(s) gène(s) impliqué(s).
- **Prédisposition aux allergies générale ou oculaire:** Il semble qu'il existe un lien entre allergie et kératocône (maladie atopique, kérato-conjonctivite printanière) dont les mécanismes ne sont pas clairement établis.
- **Des facteurs mécaniques :** Il repose sur la fréquence qui semble accrue de façon significative du kératocône dans les cas où la cornée subirait des agressions mécaniques : Frottement oculaire, Lentilles cornéennes, Floppy eyelid syndrome, mesure de la pression intraoculaire, pourraient par exemple contribuer à déclencher la maladie.
- **Altération du tissu conjonctif :** Elle repose sur l'association du kératocône avec des affections générales touchant notamment le tissu conjonctif. Le kératocône serait plus fréquemment rencontré au cours de certaines maladies du tissu conjonctif maladie d'Ehler-Danlos, osteogenesis imperfectum, syndrome oculo-digital, syndrome d'Appert, dystocie cranio-faciale de Crouzon, syndrome de Marfan, prolapsus de la valve mitrale [9-10].

## **7. Symptômes:**

Les symptômes du kératocône vont généralement apparaître vers la fin de l'adolescence ou au début de la vingtaine, mais peuvent tout de même apparaître à n'importe quel moment.

Le kératocône va parfois provoquer des troubles de la vision de nuit, en raison des halos et des éblouissements. Voici les premiers signes typiques de kératocône :

- Vision floue.
- Besoin fréquent de changer une prescription.
- Vision floue qui ne se corrige pas avec les lunettes.

D'autres symptômes comprennent:

- Sensibilité à la lumière accrue;
- Difficulté à conduire la nuit;
- Halos et éblouissements, surtout la nuit;
- Fatigue visuelle;
- Maux de tête et douleur générale aux yeux;
- Irritation aux yeux.

À un stade avancé du kératocône, le patient pourrait éprouver un voilement soudain de la vision dans un œil, qui disparaît après une période de quelques semaines ou mois. Ce phénomène se nomme hydrops aigu et est dû à l'accumulation soudaine de fluide dans la cornée étirée. Dans les cas avancés, des cicatrices superficielles se forment à la pointe du renflement cornéen, entraînant une dégradation plus importante de la vision [10].

### **8. Evolution :**

L'évolution du kératocône peut se faire de différentes façons. Classiquement, la maladie débute à la puberté, on assiste le plus souvent à une progression de l'astigmatisme mais celle-ci ne se fait pas d'un seul tenant : le cône peut rester stationnaire, évoluer rapidement sur trois à cinq ans et s'arrêter ou au contraire, progresser régulièrement pendant une longue période. En outre, on a remarqué que, dans l'ensemble, la progression de la maladie se faisait avant tout entre l'âge de 10 et 20 ans; elle serait plus lente entre 20 et 30 ans et est très réduite après 30 ans.

Les kératocônes peuvent arrêter de progresser à n'importe quels stades d'évolution qui peuvent être classés selon différents critères, mais on distingue souvent :

<b>Stade I</b>	Inconfort visuel, baisse d'acuité visuelle avec astigmatisme.
<b>Stade II</b>	La myopie s'associe à l'astigmatisme.
<b>Stade III</b>	Aggravation des troubles visuels et apparition d'une déformation (protubérance) bien visible de la cornée.
<b>Stade IV</b>	Amincissement associé à une perte de transparence (cicatrices ou opacités au sommet du cône) et risque de kératocône aigu.

**Tableau 1.1 : Stades du kératocône**

Cette évolution peut être émaillée de complications :

- **L'ulcération de la cornée** : se produit le plus souvent spontanément après un certain temps d'évolution mais est largement favorisée par le port de lentilles de contact. Le patient se plaint de douleurs, de photophobies ; l'épithélium est abrasé au sommet du cône et en l'absence de traitement, on peut aboutir à une kératite et à un hypopion.
- **La perforation de la cornée** est très rare. Elle peut être favorisée par des conditions particulières.
- **Le kératocône aigu**. Ce terme est sans doute impropre bien que consacré par l'usage, l'élément essentiel étant une rupture aiguë de la membrane de Descemet.
- La cornée apparaît menacée de perforation imminente, mais cette complication semble ne pas pouvoir se produire.
- Dans les cas sévères, la membrane de Bowman peut se rompre par endroits et être remplacée par des cicatrices de tissu fibreux. Après quelques semaines, les cellules endothéliales proches de la rupture de la membrane de Descemet s'élargissent et se reconstituent une nouvelle membrane. L'œdème se résorbe. Si la cicatrice résiduelle touche l'axe visuel central, l'acuité visuelle peut être augmentée et que l'adaptation d'une lentille de contact peut être facilitée.

En règle générale, l'évolution se fait vers une résolution spontanée avec un maintien ou diminution de la vision. Plusieurs facteurs sont à l'origine de la survenue d'un kératocône aigu notamment un traumatisme ou une friction importante de l'œil. Le kératocône aigu se développe avec une particulière fréquence chez les sujets trisomiques [8-9].

### **9. Formes et types du kératocône :**

- ✓ Il existe deux formes de kératocône, avec des évolutions différentes :
- **La forme silencieuse** : Dix fois plus fréquente que la forme progressive, elle ne s'accompagne en général d'aucun symptôme. Le plus souvent détectée par hasard lors d'un contrôle ophtalmologique, elle ne nécessite aucun traitement si elle reste stable, mais un suivi régulier est conseillé.
- **La forme progressive** : Cette forme agressive de la maladie peut se manifester dès l'adolescence. Sa progression rend la correction par des verres de lunettes de plus en plus difficile. Les lentilles de contact offrent alors une meilleure correction, elles exercent une pression sur la cornée qui permet d'en réduire les irrégularités.

Le patient peut encore atteindre 100% d'acuité visuelle, jusqu'au moment où l'augmentation de la protubérance de la cornée rend impossible le port de lentilles. Plus tard, une perforation de la cornée peut même survenir, nécessitant une transplantation de la cornée [11].

✓ On peut distinguer le kératocône fruste et le kératocône aigu tel que :

### **9.1. Le kératocône Fruste :**

Le kératocône fruste est une forme de kératocône débutante et/ou peu évolutive, dont le diagnostic est difficile car en raison de la faible expression de la maladie: les critères ou indices utilisés pour le dépistage et le diagnostic des formes avérées et suspectes de kératocône peuvent être négatifs. Le kératocône fruste est une forme très précoce de kératocône infra clinique.

Le dépistage du kératocône fruste est une priorité en chirurgie réfractive, car le LASIK y est contre indiqué, sous peine de risquer la survenue d'une ectasie cornéenne (kératectasie).

Le kératocône avéré est une pathologie non inflammatoire qui concerne la cornée, et qui débute généralement à l'adolescence. C'est une affection bilatérale, mais dont le stade et l'expression est souvent différente entre les deux yeux. Le diagnostic du kératocône est suspecté à l'examen à la lampe à fente (amincissement cornéen marqué, cicatrices sous épithéliales, nerfs cornéens épaissis, etc.) et confirmé par l'examen de la topographie cornéenne.

Le dépistage automatisé par topographie cornéenne montre des indices parfois élevés, qui peuvent soulever l'hypothèse d'une forme débutante ou suspecte de kératocône [12].

### **9.2. Le kératocône aigu :**

Le kératocône aigu est une complication du kératocône très évolué probablement déclenchée par des microtraumatismes (frottement oculaire). Il s'agit d'une rupture brutale de la couche postérieure de la cornée (la couche de Descemet), entraînant la constitution immédiate d'un œdème localisé majeur de la cornée.

Cette complication entraîne des douleurs intenses, un larmoiement, une gêne à la lumière majeure et une grande difficulté à ouvrir les yeux (blépharospasme).

Dans l'ensemble des statistiques, la fréquence des kératocônes aigus est de 2,6 %. Cet événement est plus fréquent chez les sujets porteurs d'une trisomie 21 ou chez les patients allergiques.

La cicatrisation de la couche de Descemet prend quelques semaines et aboutit à la formation d'une cicatrice souvent paracentral aplatissant le sommet du kératocône.

Il est souhaitable de mettre en route un traitement pour faire baisser la pression intraoculaire, et réduire l'inflammation et la douleur.

Des études récentes suggèrent que l'injection d'une bulle de gaz non expansif ou d'air dans la chambre antérieure de l'œil permet d'accélérer la cicatrisation et de réduire partiellement les douleurs.

→ Le kératocône aigu n'est pas une indication de greffe de cornée en urgence.

→ Le kératocône est beaucoup fréquent chez les sujet porteur d'une trisomie 21 (environ 0.5 à 15% des cas soit 10 à 300 fois la prévalence de la population générale).

L'évolution est caractérisée par la fréquence accrue des complications, notamment la survenue d'un kératocône aigu, probablement favorisée par les traumatismes cornéens, fréquents chez ces patients [13].

#### **10. Diagnostics différentiels et cliniques :**

Ils se posent avec les autres affections comportant un amincissement non inflammatoire de la cornée.

- **Le kératoglobe (forme extrême de kératocône) :**

Cette affection est une ectasie cornéenne majeure, rare, bilatérale, caractérisée par la protrusion globuleuse de la cornée. L'amincissement est souvent extrême et diffus. L'amincissement cornéen peut atteindre 20 % de l'épaisseur cornéenne normale. Il est moindre près du limbe.

On ne note pas d'anneau métallique ni de cicatrice cornéenne. Bien qu'elle s'accompagne de myopie forte et d'astigmatisme de haut degré, l'acuité visuelle peut parfois être relativement conservée. L'évolution du kératoglobe est avant tout marquée par les risques de perforations cornéennes et de ruptures spontanées.

- **La dégénérescence marginale pellucide (ou kératocône marginal) :**

La dégénérescence marginale pellucide est vraisemblablement une forme périphérique de kératocône.

On observe en effet des cas dans lesquels d'un des yeux est porteur d'une dégénérescence marginale pellucide et l'autre d'un kératocône typique.

La dégénérescence marginale pellucide se caractérise par une ectasie décentrée et un pseudo aplatissement central de la cornée. Il s'agit d'une affection bilatérale qui se traduit par un

amincissement de la cornée périphérique dans le secteur inférieur, habituellement entre 4h et 8h. Ceci entraîne un aplatissement de l'axe vertical de la cornée avec un astigmatisme important et souvent irrégulier.

L'amincissement intéresse une bande étroite de 1 à 2mm de large, elle-même séparée du limbe par une zone de cornée normale de 1 à 2mm de large. La cornée centrale est d'épaisseur normale et fait saillie au-dessus de la zone d'amincissement.

Cette zone d'amincissement cornéen est claire, toujours épithélialisée, avasculaire, sans dépôt lipidique, ce qui la distingue d'affections tel que l'ulcère de MOOREN ou la dégénérescence marginale de TERRIEN.

Elle peut se compliquer de poussées aiguës, aboutissant à une cicatrice cornéenne parfois vascularisée.

- Le kératocône postérieur :

Malgré la similarité du nom, est aussi une maladie distincte du kératocône. C'est une anomalie généralement présente dès la naissance se traduisant par un amincissement de la surface postérieure de la cornée. Dans la majorité des cas, elle n'affecte qu'un seul œil.

Il s'agit d'un processus ectatique rare considéré habituellement comme une anomalie du développement et la similitude terminologique de leur désignation est sûrement pour beaucoup dans les problèmes diagnostiques avec le kératocône.

Le kératocône postérieur peut adopter deux formes : une forme totale et une forme localisée. Il se présente comme une augmentation de courbure de la face postérieure de la cornée avec un amincissement tandis que la surface antérieure est normale. Il peut exister un astigmatisme antérieur mais il est beaucoup plus régulier que celui rencontré dans le kératocône antérieur.

Le parenchyme est clair mais la zone amincie peut parfois être opacifiée et des cicatrices stromales peuvent exister.

Le kératocône postérieur est en général une affection congénitale unilatérale bien que des cas bilatéraux aient été décrits.

Il est souvent associé à d'autres anomalies oculaires touchant notamment le segment antérieur.

Des examens histologiques ont montrés des interruptions localisées de la membrane de Bowman remplacé par une prolifération fibroblastique ; le stroma cornéen paraît aminci. La membrane de Descemet et l'endothélium cornéen sont toujours présents mais anormaux dans

la zone de la concavité postérieure, avec notamment une configuration de plusieurs couches. Cette affection est, en règle générale, considérée comme une variante d'anomalie de clivage de la chambre antérieure et les lésions histologique rencontrées font penser qu'elle survient sans doute entre les 5<sup>e</sup> et 6<sup>e</sup> mois de la gestation [8-5].

**11. Examens cornéotopographiques :**

Le développement de la pratique des examens cornéotopographiques, notamment dans le bilan préopératoire des patients candidats à la chirurgie réfractive, a permis le dépistage d'un plus grand nombre de kératocônes, en particulier ceux de forme fruste.

**11.1. La topographie cornéenne :**

La topographie cornéenne permet de recueillir des informations relatives à la courbure ou au relief (élévation) de la cornée, grâce à la projection et l'analyse du reflet d'un motif lumineux éclairant ou balayant la cornée. Les images recueillies sont analysées de façon automatisée par un logiciel, et des cartes en couleur sont fournies au praticien pour interprétation [14].

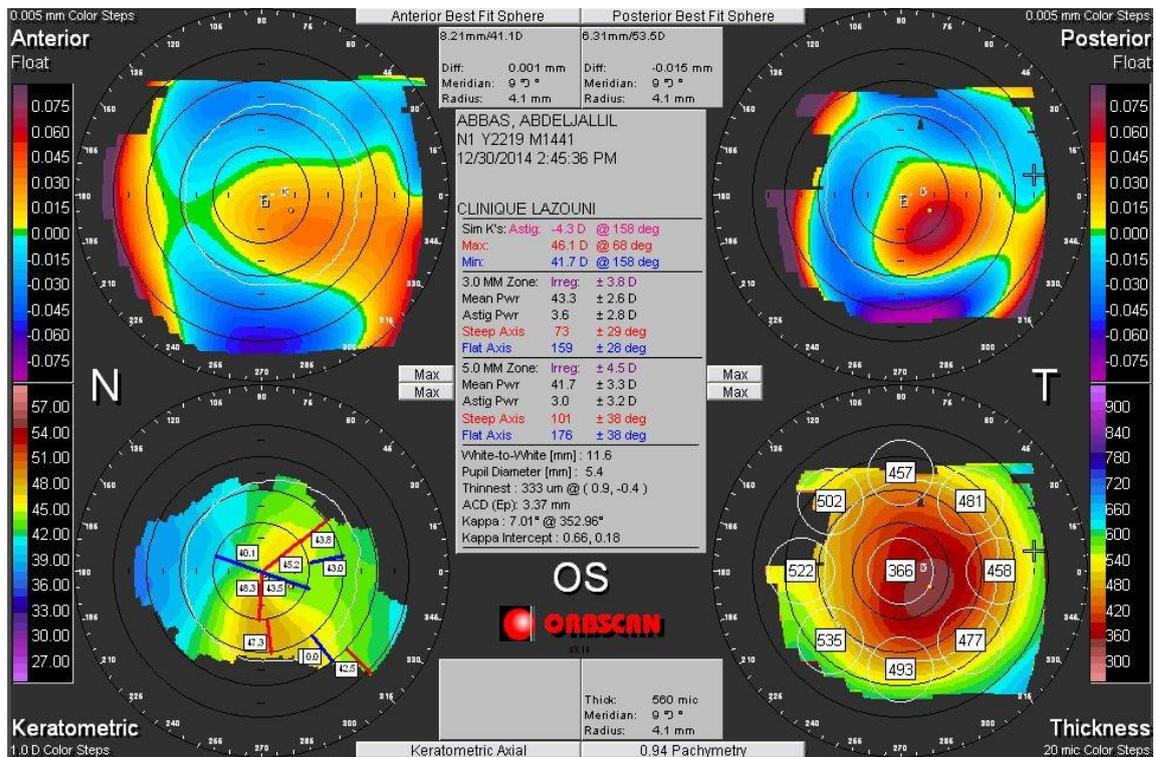


Figure 1.2: Carte topographique d'un cas pathologique

### 11.2. Types de topographie cornéenne :

Plusieurs fournisseurs se sont investis pour fournir plusieurs types de topographes cornéens. Les instruments qui mesurent et décrivent avec le plus de précision les propriétés topographiques de la surface cornéenne peuvent être classés en deux grands types :

- **Le disque de Placido:** Les systèmes topographiques de courbure basés sur le disque de Placido sont des outils précieux dans l'évaluation de la courbure et de la réfraction cornéenne, mais ils ne décrivent pas directement la forme spatiale réelle de la cornée, ils utilisent des mires réfléchives concentriques tel que l'Orbscan [15].
- **Les enregistreurs de l'élévation/dépression.:** Les topographes d'élévation fournissent une estimation directe de l'élévation de la cornée, établissant ainsi une «vraie » carte en trois dimensions de la forme de la surface cornéenne antérieure et postérieure L'étude des cartes d'élévation a permis de proposer de nouveaux critères diagnostiques dont la validité reste cependant à prouver. Ce type d'examen peut s'effectuer à l'aide soit d'un appareil à balayage d'une fente lumineuse comme avec l'Orbscan, le balayage (rotatif) permet d'établir des relevés de tomographie cornéenne qui s'intéresse aux cartes de l'épaisseur cornéenne en chaque point, et l'étude de ses variations, soit d'une caméra rotative Scheimpflug tels que les topographes Pentacam (Oculus), TMS 5 (Tomey) et Galilei (Ziemer), soit d'une stéréographie [15-14-8].

Dans ce travail de recherche, nous avons utilisé le topographe OrbscanII proposé par la firme Bausch &Lomb qui permet de plus l'analyse de la courbure postérieure de la cornée ainsi qu'une mesure multipoints de la pachymétrie cornéenne (épaisseur) extrêmement précieuse pour évaluer la prédisposition au kératocône. L'analyse de l'image des mires du disque de Placido ne permet donc de déduire que le rayon de courbure de la cornée antérieure. Les possibilités biométriques de l'Orbscan sont essentiellement liées à l'exploitation des données fournies par le balayage de la fente lumineuse. Le principe repose sur la technique photographique de Scheimpflug qui permet en augmentant la profondeur de champ d'obtenir une image nette de l'apex de la cornée jusqu'au cristallin. L'utilisation de la fente lumineuse permet une mesure directe de l'élévation, c'est-à-dire qu'elle fournit les coordonnées spatiales tri-dimensionnelles (x, y, z) de plus de 9 000 points non seulement de la face antérieure de la cornée mais également de la face postérieure de la cornée. Elles sont obtenues par triangulation entre le point mesuré, le projecteur et la caméra [16].



**Figure 1. 3: Topographe Orbscan II**

## **12. Traitement du kératocône :**

Plusieurs choix de traitement pour le kératocône sont offerts aux personnes atteintes de cette maladie oculaire, l'objectif du traitement est double :

- prévenir, stabiliser ou corriger la déformation de la cornée pour éviter ou retarder le recours à la greffe.
- réhabiliter la vision.

### **12.1. Correction optique :**

#### **12.1.1. Lunettes:**

Au cours de la progression du kératocône, le degré d'astigmatisme cornéen irrégulier augmente du fait de la distorsion provoquée par la déformation de l'ectasie cornéenne. Cet astigmatisme irrégulier est non-orthogonal (ayant donc de multiples foyers), rendant difficile la réalisation d'une réfraction adéquate, à la fois en objectif et en subjectif. La prescription en lunettes est par conséquent moins efficace, ne donnant pas de résultats optiques convenables, en particulier dans les stades avancés de la maladie.

De plus, bien que le kératocône soit une maladie bilatérale, un œil tend à être en avance, l'autre retardant dans la progression ; l'anisométrie ou l'antimétrie ainsi provoquée entraîne des intolérances de grandissement d'images avec les lunettes. Comme il devient de plus en plus difficile de prescrire des lunettes quand la maladie progresse, il devient essentiel de pouvoir compter sur les lentilles de contact. D'un autre côté, une paire de lunettes devrait être prescrite, pour être portée les jours où les lentilles de contact ne peuvent pas être supportées. Des lunettes de lecture, à porter avec les lentilles de contact, devraient également être prescrites pour les presbytes [7].

**12.1.2. Lentilles de contact:**

En fin de compte, les lentilles de contact deviennent nécessaires dans presque tous les cas de kératocône, pour offrir une vision optimale, et environ 10 % à 26 % des patients auront besoin d'une chirurgie cornéenne. Il se peut que l'utilisation de lentilles de contact sur l'œil kératocônique provoque des cicatrices cornéennes; cependant, des preuves raisonnables montrent que la cornée peut présenter des cicatrices, avec ou sans le port de lentilles de contact. Il n'est pas possible d'établir de pronostic de cette maladie et sa progression est variable ; des examens oculaires annuels ou plus fréquents sont indiqués. Cette maladie ne provoque pas la cécité, mais elle peut compromettre la qualité de vie, bien que les patients kératocôniques puissent habituellement conduire et lire, tout au long de l'essentiel de la progression. La plupart des patients kératocôniques (74 % des yeux) peuvent être traités sans chirurgie, au moins sur un œil, alors que les autres (26 %) sont traités par kératoplastie [7].

**12.2. Correction par chirurgie :**

La chirurgie est l'une des méthodes destinée aux patients ne tolérant plus la correction optique, où la gravité du kératocône est importante .En citant des types de chirurgies :

La réticulation du collagène avec la riboflavine (CXL le cross-linking cornéen) est un traitement de la cornée non effractif qui ralentit ou freine l'évolution du kératocône, et pourrait aider à stabiliser la vision à un stade peu avancé. En ajoutant aussi, la réticulation du collagène cornéen avec traitement au laser, c'est la combinaison du CXL avec laser excimère afin de remodeler la cornée et améliorer la vision générale avec lunettes et verres de contact, La réticulation du collagène cornéen + T-PKR est un double ne permet pas de corriger permet de renforcer la cornée et d'améliorer la qualité de la vision.

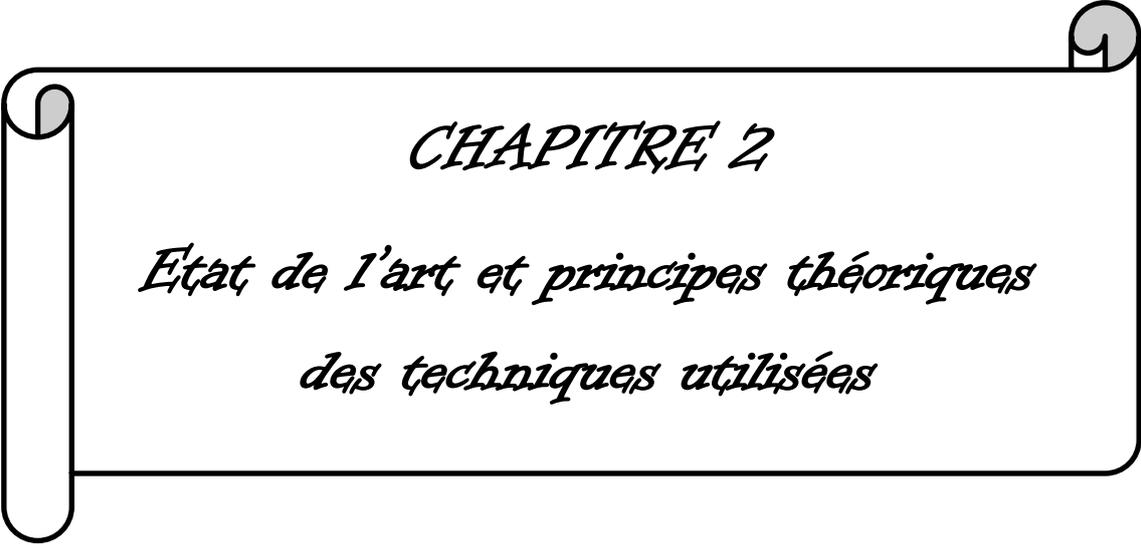
Intacs, elle comprend l'installation d'arceaux intra-cornéens juste sous la surface de l'œil dans la périphérie de la cornée, aident à remodeler la cornée rendant ainsi la vision plus claire.

En dernier lieu, dans les graves des cas, le chirurgien passe à la kératoplastie qui est la greffe de la cornée, pourrait s'avérer nécessaire pour des raisons de cicatrisation, d'amincissement extrême ou d'intolérance aux lentilles de contact, cette intervention chirurgicale remplace la cornée atteinte de kératocône avec des tissus provenant d'un donneur avec une bonne santé oculaire [17].

**13. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept médical du kératocône ainsi que l'anatomie pathologique de l'œil atteint de cette maladie déformante de la cornée. Puis, nous avons parlé des causes provoquant cette dystrophie qui sont encore inconnues. De plus, nous avons cité les symptômes du kératocône suivi de son évolution qui n'est pas semblable pour tous les patients où elle peut rester stationnaire, évoluer rapidement sur 3 à 5ans et s'arrêter ou, au contraire. En addition, nous avons défini les différents examens cornéotopographiques dont nous avons détaillé la topographie fondée sur le disque placido et la fente lumineuse qui sont utilisés par le topographe OrbscanII. Enfin, nous avons clôturé ce chapitre avec les traitements possible pour arrêter l'évolution du kératocône.

Le kératocône représente un sujet d'actualité délicat, ce qui a provoqué un ensemble de chercheurs à réaliser plusieurs travaux sur la détection précoce de cette pathologie en utilisant différentes techniques présentées dans le chapitre qui suit



## *CHAPITRE 2*

*État de l'art et principes théoriques  
des techniques utilisées*

## CHAPITRE 2

### Etat de l'art et principes théoriques des techniques utilisées

#### **1. Introduction :**

Ce chapitre présente une synthèse théorique et pratique de diverses techniques utilisées pour l'étude du kératocône depuis son apparition.

Le kératocône présente un sujet d'actualité critique en touchant la partie sensible de l'œil d'un degré différent d'un patient à un autre, sa détection à un état précoce est très difficile et aussi importante avant la chirurgie réfractive dans le but d'éviter son évolution ; pour cela plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'étude de cette maladie.

Dans cette section nous présentons plusieurs techniques de traitement d'images couleurs ainsi que les techniques de classification qui ont prouvé leurs efficacités, en plus d'un état de l'art complet des approches utilisées dans les systèmes d'aide au diagnostic médical et plus spécifiquement celles qui concernent le domaine de détection et classification du kératocône, à savoir les Réseaux De Neurones, les Machines à Vecteurs de Support, les arbres de décision, et d'autres méthodes utilisées.

#### **2. Techniques de traitement d'images :**

Les outils numériques de traitement d'images sont particulièrement utiles pour extraire l'information pertinente à partir des images initiales. Certaines images en niveaux de gris ou en couleurs issues des dispositifs d'imagerie médicales ne sont pas souvent directement utilisables pour effectuer les mesures ce qui nécessite le passage par plusieurs phases de traitement d'images.

##### **2.1. La segmentation d'image :**

La segmentation est un procédé qui a pour but de rassembler les pixels de l'image étudiée en régions selon des critères prédéfinis. Si l'homme est actuellement capable de différencier, dans une image quelconque, les objets la constituant, c'est parce qu'il est capable de comprendre les mécanismes, les relations liant les divers objets de la scène. Les algorithmes de haut niveau capables d'arriver à un tel résultat ne sont pas encore d'actualité.

Dans l'objectif d'analyser une image, la segmentation est alors une étape primordiale. On regroupe de façon usuelle les méthodes de segmentation en 4 groupes [18], basés respectivement sur :

- Une approche globale de l'image : segmentation par seuillage.
- Approche contour.

- Approche régions.
- Classification des pixels.

Ces méthodes permettent de segmenter l'image en régions homogènes (par rapport à la texture, la couleur, la distribution des niveaux de gris...). Le résultat correspond à un partitionnement de l'image ; chaque pixel est en effet étiqueté de façon à indiquer son appartenance à telle ou telle région [17-19].

### **2.1.1. Segmentation par seuillage :**

La segmentation par seuillage est l'une des méthodes de segmentation les plus simples à implémenter ; cette approche va séparer les éléments d'une image en se basant uniquement sur l'intensité de niveaux de gris des éléments la constituant [20].

Le seuillage consiste à mettre à zéro tous les pixels ayant un niveau de gris inférieur à une certaine valeur (appelée seuil, en anglais threshold) et à la valeur maximale les pixels ayant une valeur supérieure. Ainsi le résultat du seuillage est une image binaire contenant des pixels noirs et blancs, c'est la raison pour laquelle le terme de binarisation est parfois employé. Le seuillage permet de mettre en évidence des formes ou des objets dans une image. Toutefois la difficulté réside dans le choix du seuil à adopter [21].

Le seuillage n'est pas nécessairement une opération qui s'effectue manuellement : la valeur de seuil peut être obtenue de manière automatique.

Le principe du seuillage automatique est d'utiliser des méthodes de traitement des données (maximisation d'entropie, maximisation ou minimisation de la variance inter ou intra-classes, etc.) pour trouver automatiquement la valeur de seuil qui sépare le mieux les objets du fond à partir de l'histogramme des niveaux de gris [22].

### **2.2. Morphologie mathématique :**

La morphologie mathématique est une théorie de traitement non linéaire de l'information utile pour filtrer, segmenter et quantifier les images. Elle est destinée aux traitements d'images binaires.

La morphologie mathématique offre un grand nombre d'outils très puissants de traitement et d'analyse d'images, dont le but est l'étude des objets en fonction de leurs formes, de leurs tailles, des relations, avec leur voisinage de leurs textures et de leurs niveaux de gris ou couleur.

Contrairement au traitement linéaire des images, la morphologie mathématique ne s'appuie pas sur le traitement du signal, mais repose sur la théorie des ensembles.

Pour analyser des images à l'aide de la morphologie mathématique, on s'appuie sur un certain nombre d'opérateurs dont les principaux reposent sur la définition des deux opérateurs de base qui sont la dilatation et l'érosion, qu'on spécifie et qu'on combine pour arriver au résultat désiré.

Nous distinguons 2 types d'opérateurs morphologiques :

- Opérateurs morphologiques composées : elles se composent d'une succession d'opérateurs élémentaire, ouverture et fermeture.
- Opérateurs morphologiques élémentaires : telles que l'érosion et la dilatation [23].

### **2.2.1. Dilatation :**

L'opération de dilatation notée  $\delta_B(X)$ , est en fait l'opération dual de l'érosion. On obtient le dilaté d'un ensemble  $X$  par un élément structurant  $B$  en prenant la totalité de la surface recouverte lors que l'origine de  $B$  occupe successivement toutes les positions  $x \in X$ .

La dilatation de  $X$  par  $B$  est définie par :

$$\begin{aligned}\delta_B(X) &= X \oplus B = \bigcup_{b \in B} X + b \\ &= \bigcup_{x \in X} B + x \\ &= \{x + b, x \in X, b \in B\}\end{aligned}$$

La dilatation se fait à l'aide d'un élément structurant représentant un objet de référence permettant d'étudier les images ou objets binaires à l'aide d'opérateurs (réunion, intersection). Il est caractérisé par sa forme et sa taille.

L'élément structurant est déplacé de façon à ce que son centre  $x$  passe successivement par toutes les positions possibles dans l'image binaire.

Soit  $X$  une image binaire, c'est-à-dire un sous-ensemble de  $E$ . Le translaté de  $X$  par  $p \in E$  est l'ensemble  $Xp = \{x + p, x \in X\}$  [24].

### **2.2.2. Squelettisation :**

L'objectif de la squelettisation est de représenter un ensemble avec un minimum d'information, sous une forme qui soit à la fois simple à extraire et commode à manipuler. Le squelette doit rendre compte des propriétés géométriques de la forme : ramifications, parties allongées.

Le squelette doit être constitué de courbes sans épaisseur. Le squelette doit conserver les relations de connexité : même nombre de composantes connexes, même nombre de trous par composante connexe [25].

### **2.3. Caractérisation et Classification des images :**

Pour effectuer une classification, la caractérisation doit impérativement contenir des descripteurs pertinents. A partir d'une étude bibliographique, nous constatons que la liste des attributs généralement utilisés pour la classification automatique des objets est liée aux paramètres de forme notamment :

- Le centre de gravité.
- La surface.
- Le périmètre.
- La compacité.

Le paramètre d'asymétrie est un attribut important pour différencier des objets. Ce paramètre est généralement, évalué par la comparaison des deux moitiés de l'objet selon l'axe horizontal et vertical. Pour quantifier ce paramètre deux axes orthogonaux passant par le centre de gravité de l'objet sont suffisants pour l'évaluation l'indice de symétrie d'un objet.

Pour établir une classification des pixels dans une image, Il faut affecter chaque pixel à une classe en fonction de ses caractéristiques spectrales (niveaux de gris, composantes colorimétriques, etc.) [26].

### **3. Techniques de classification des données numériques :**

Différentes techniques peuvent être introduites pour le traitement des données, dans le cadre de la classification supervisée, qui a pour objectif, définir des règles permettant d'identifier les classes auxquelles appartiennent des objets, à partir des traits descriptifs (attributs, caractéristiques et features) qui peuvent être qualitatives ou quantitatives caractérisant ces objets.

#### **3.1. Classification par réseaux de neurones :**

Les réseaux de neurones artificiels s'inspirent du fonctionnement du cerveau et du système nerveux ou, plus exactement, de la représentation que l'on s'en fait.

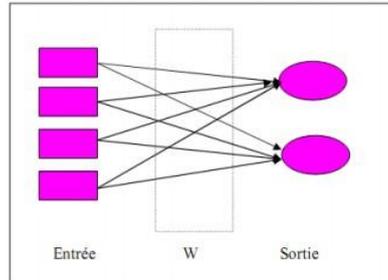
Il existe deux grandes catégories de réseaux :

- Les réseaux à apprentissage supervisé
- Les réseaux à apprentissage non supervisé

Cette méthode repose sur la notion de neurone formel. Le neurone formel est donc une modélisation mathématique qui reprend les principes du fonctionnement du neurone biologique, en particulier la sommation des entrées.

➤ Perceptron monocouche :

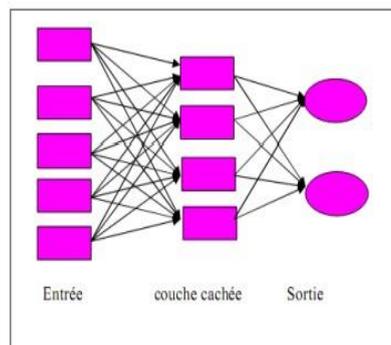
La structure d'un réseau monocouche est telle que des neurones organisés en entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par une couche modifiable de poids.



**Figure 2.1: Perceptron monocouche**

➤ Perceptron multicouche :

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche, et les connexions ne se font qu'avec les neurones de couches avales. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées [27].



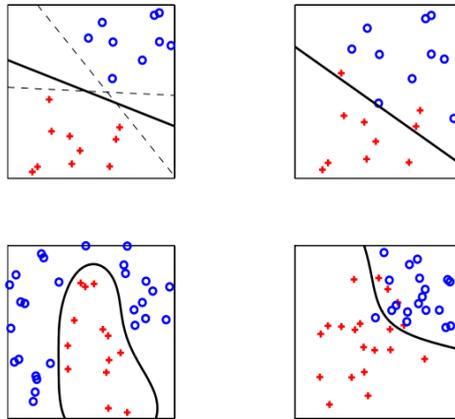
**Figure 2.2: Perceptron multicouches**

### **3.2. Classification par Machine à Vecteurs de support :**

Les machines à vecteurs support sont utilisées dans de nombreux problèmes d'apprentissage : reconnaissance de forme, catégorisation de texte ou encore diagnostic médical. Les SVM reposent sur deux notions : celle de marge maximale et celle de fonction noyau. Elles permettent de résoudre des problèmes de discrimination non linéaire. La marge est la distance entre la frontière de séparation et les échantillons les plus proches appelés

vecteurs support. Dans un problème linéairement séparable les SVM trouvent une séparatrice qui maximise cette marge.

Le principe est donc de trouver un classifieur, ou une fonction de discrimination, dont la capacité de généralisation (qualité de prévision) est la plus grande possible [28].



**Figure 2.3: Exemples de quatre types de problèmes de discrimination binaire**

Dans cette figure il s'agit de séparer les points bleus des croix rouges. La frontière de décision est représentée en noir.

### **3.3. Classification par K plus proches voisins :**

La méthode des K plus proches voisins (KNN) est une approche très simple et directe. Elle ne nécessite pas d'apprentissage mais simplement le stockage des données d'apprentissage. Son principe est le suivant. Une donnée de classe inconnue est comparée à toutes les données stockées. On choisit pour la nouvelle donnée la classe majoritaire parmi ses K plus proches voisins (Elle peut donc être lourde pour des grandes bases de données) au sens d'une distance choisie.

La méthode KNN est une approche de classification supervisée intuitive, souvent utilisée dans le cadre de l'apprentissage de la machine. Il s'agit d'une généralisation de la méthode du voisin le plus proche (NN) [29].

### **3.4. Classification par l'Arbre de décision :**

L'apprentissage se fait par partitionnement récursif selon des règles sur les variables explicatives. Suivant les critères de partitionnement et les données, on dispose de différentes méthodes, dont CART, CHAID, etc. Ces méthodes peuvent s'appliquer à une variable à expliquer qualitative ou quantitative. Deux types d'arbres de décision sont ainsi définis:

- Arbres de classification : la variable expliquée est de type nominal (facteur). A chaque étape du partitionnement, on cherche à réduire l'impureté totale des deux nœuds fils par rapport au nœud père.

- Arbres de régression : la variable expliquée est de type numérique et il s'agit de prédire une valeur la plus proche possible de la vraie valeur.

Construire un tel arbre consiste à définir une suite de nœud, chaque nœud permettant de faire une partition des objets en 2 groupes sur la base d'une des variables explicatives. Il convient donc :

- De définir un critère permettant de sélectionner le meilleur nœud possible à une étape donnée,
  - De définir quand s'arrête le découpage, en définissant un nœud terminal (feuille),
  - D'attribuer au nœud terminal la classe ou la valeur la plus probable,
  - D'élaguer l'arbre quand le nombre de nœuds devient trop important en sélectionnant un sous arbre optimal à partir de l'arbre maximal.
- valider l'arbre à partir d'une validation croisée ou d'autres techniques [30].

#### **4. Etat de l'art :**

Plusieurs travaux ont été élaborés pour la détection automatique du kératocône, pour cela plusieurs experts se sont investis dans cette recherche où ils ont donné une variété de résultats en utilisant différentes techniques de classification ce qui a délivré un grand nombre de publications dont nous allons citer d'une manière étendue les plus récentes selon la technique utilisée.

##### **4.1. Approche de classifications numériques :**

###### ➤ Classification par réseaux de neurones :

Certaines méthodes automatiques ont été proposées pour déterminer le kératocône à partir des cartes topographiques; Parmi ces méthodes, les réseaux neuronaux se sont révélés très utiles. Toutefois, l'identification des premiers signes de cette maladie oculaire reste un problème est de savoir si le dépistage doit être effectué sur les deux yeux du même sujet ou chaque œil séparément; Jusqu'à présent, les réseaux de neurones ont été utilisés uniquement dans la seconde variante.

Afin d'examiner les différences entre les deux méthodes de dépistage en termes de capacité discriminative, en 2002, P.AgostinoAccardo & Stefano Pensiero ont réalisé plusieurs combinaisons de réseaux de neurones multicouches en changeant le nombre de neurones de la

couche d'entrée, nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans les couches cachées. Les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant comme entrée les paramètres des deux yeux du même sujet, et en sortie les trois catégories de classification clinique (normal, présence du kératocône, autres anomalies) pour chaque sujet, un faible nombre de neurones dans la couche cachée (inférieur à 10). Dans ce cas, une sensibilité globale de 94,1%, ainsi qu'une spécificité globale de 97,6% ont été atteints [31].

➤ Classification par Machine à Vecteurs de support :

Pour démontrer la faisabilité d'un algorithme d'apprentissage basé sur SVM.

H.Bagherinia et al, en Mai 2008, ont utilisé le classificateur (SVM) pour distinguer les cornées normales d'autres conditions de la cornée à l'aide d'examens topographiques (tels que le kératocône suspect, kératocône, la dégénérescence marginale pellucide, myope et hypermétrope corrigé avec le laser). Le vecteur caractéristique se compose de 12 paramètres. Les 3 premiers paramètres ont été utilisés dans le programme d'analyse cornéenne d'origine, tandis que les 9 autres paramètres sont dérivés de la courbure moyenne de carte. Les données sont composées de 85 sujets normaux, et 239 sujets ayant d'autres conditions cornéennes, ont été utilisés pour former et évaluer la version actuelle de l'algorithme. Le classificateur SVM a été formé en utilisant 80% de l'ensemble de données déterminé au hasard, et évaluée en utilisant les 20% restants. La version actuelle de l'algorithme a été utilisée pour maximiser la séparation entre ces deux groupes dans ces 12 dimensions de l'espace caractéristique.

Les résultats de la vérification précoce basée sur l'ensemble des données de formation en utilisant la version actuelle de l'algorithme montrent que le classificateur SVM a été en mesure de distinguer les cornées normales des autres conditions de la cornée avec  $\geq 90\%$  de sensibilité, la spécificité et la précision. Ce qui a permis de conclure que l'utilisation d'un classificateur SVM avec des paramètres dérivés de la carte moyenne de courbure peut devenir un outil utile pour distinguer les cornées normales des autres conditions de la cornée [32].

Dans le même contexte, en 2010, Murilo Barreto Souza et al, ont utilisé une base de données composée de 318 cartes obtenues avec l'OrbscanII, dont 172 cas normal, 89 cas d'astigmatisme, 46 cas de kératocône, 11 cas photokératectomie réfractive. Leur étude a été basée sur l'utilisation des différentes méthodes de classification : Machine à Vecteur de Support (SVM), Perceptron Multicouche (MLP) et Fonction à Base Radial des Réseaux de Neurones (RBFNN). Les résultats retrouvés par l'ensemble des techniques de classification étaient satisfaisants pour la détection du kératocône [33].

Pour définir une nouvelle méthode de classification pour le diagnostic de kératocône basé sur des mesures cornéennes fournies par une caméra Scheimpflug combinée avec une topographe cornéen avec un disque placido (Sirius, CSO, Florence, Italie). Une étude a été publiée par Maria Clara Arbelaez et al, en aout 2012 dans laquelle ils ont analysé 877 yeux avec kératocône, 426 yeux avec kératocône infra clinique, 940 yeux pris comme étant des cas anormal et 1259 yeux témoins sains. Une machine à vecteurs de support (SVM) a été utilisée pour analyser les mesures de la cornée. Le classificateur a été formé pour examiner les indices obtenus à partir des surfaces cornéennes antérieure et postérieure, ou seulement de la surface cornéenne antérieure.

La précision du classificateur était excellente à la fois avec et sans les données générées à partir de la surface postérieure de la cornée et l'épaisseur cornéenne, mais l'utilisation des données des deux surfaces de la cornée et de la pachymétrie ont permis à la SVM d'augmenter sa sensibilité à 96,0%

Pour conclure cet article, les chercheurs ont déduit que leur algorithme de classification a montré une grande précision, la sensibilité et la spécificité de la discrimination entre les yeux anormaux, les yeux avec kératocône ou kératocône infra clinique, et les yeux normaux. Y compris la surface de la cornée postérieure et des paramètres d'épaisseur nettement amélioré. La classification peut être particulièrement utile pour exclure les yeux avec les premiers signes de l'ectasie de la cornée lors de la sélection des patients pour la chirurgie au laser excimer [34].

### ➤ Classification par l'arbre de décision :

Le volume et la complexité des données produites lors des examens de vidéokératographie présentent un défi d'interprétation. En conséquence, les résultats sont souvent analysés qualitativement par reconnaissance de formes subjectives ou réduites à des comparaisons des indices de synthèse. Pour cela, Michael D. Twa et all, ont utilisé une méthode de classification par apprentissage automatisée pour décrire une application par l'induction d'arbre de décision, afin de discriminer les formes cornéennes normales et kératocône de manière objective et quantitative ensuite la comparé avec d'autres méthodes de classification connue. La surface de la cornée a été modélisée avec le septième ordre polynôme de Zernike pour 132 yeux normaux de 92 sujets et 112 yeux de 71 sujets diagnostiqués avec kératocône.

La performance de classification a été comparée à l'indice de Rabinowitz-McDonnell, l'indice de Schwiegerling Z3 (Z3), l'indice de prédiction kératocône (KPI), KISA%, et la

localisation du cône et Indice de Magnitude en utilisant des seuils de classifications recommandées pour chaque méthode. Ils ont également évalué l'aire sous la courbe caractéristique de fonctionnement du récepteur (ROC) pour chaque méthode de classification [35].

### **4.2. Autres approches :**

Pour déterminer dans une étude longitudinale s'il existe une corrélation entre les vidéokératographie et les signes cliniques de kératocône qui pourraient être utiles à la pratique des cliniciens.

Les yeux ont été regroupés par XiaohuiLi et al, en 2009 comme suit : kératocône, début kératocône, kératocône suspect ou normale sur la base des signes cliniques et vidéokératographie ont été examinés au départ et suivis pendant 1 à 8 ans. Les différences dans les indices de vidéokératographie quantitatifs et le taux de progression ont été évalués. Les indices quantitatifs étaient kératométrie centrale (K), la valeur inférieure - supérieure (I-S) et l'indice de pourcentage de kératocône (KISA). L'analyse discriminante a été utilisée pour estimer le taux de classification en utilisant les indices.

Au cours d'un suivi médian de 4 ans, environ 28 % dans le groupe de kératocône suspect a progressé au kératocône précoce ou kératocône et 75 % dans le groupe kératocône tôt progressé à kératocône. En utilisant tous les 3 indices et l'âge, 86,9 % dans le groupe normal, 75,3 % dans le groupe kératocône précoce, et 44,6 % dans le groupe de kératocône suspect pourrait être classé, ce qui donne un taux global de classification de 68,9% [36].

Afin d'étudier les changements morphologiques de la cornée dans une grande population touché par le kératocône et d'établir une classification structurelle à l'aide d'une Tomographie par Cohérence Optique (OCT).

Un système d'OCT dont le domaine de Fourier à résolution axiale 5  $\mu\text{m}$  a été utilisé par Otman Sandali & al en 2013 .Pour chaque patient, 3 scans à haute résolution ont été fait à travers le cône de kératocône. Tous les scans ont été analysés par des spécialistes du kératocône qui n'ont pas donnés l'accès aux données cliniques et topographiques des patients, et aussi ceux qu'ils ont établi un classement OCT. La reproductibilité de la classification et de sa corrélation avec les caractéristiques cliniques et para cliniques des patients atteints de kératocône ont été évalués.

La classification OCT a domaine de Fourier contenant 5 étapes distinctes du kératocône; Etape 1 montre l'amincissement dans l'apparence normale des couches épithéliales et stromales au niveau du cône. Etape 2 montre des anomalies hyper réfléchive survenant au niveau de la couche de Bowman avec un épaissement épithélial. Etape 3 montre le déplacement postérieur des structures hyper réfléchives se produisant au niveau de la couche de Bowman avec épaissement accru épithéliale et un amincissement stromale. Etape 4 montre pan-stromal cicatrice. Etape 5 démontre hydropisie, apparition brutale: la rupture et dilacération du collagène avec de grandes lamelles kystes intrastromales remplis de fluide membrane de Descemet. La reproductibilité de la classification a été très élevée entre les observateurs spécialisés de la cornée.

Les caractéristiques cliniques et paracliniques de kératocône, y compris l'acuité visuelle, l'épithélium cornéen et les changements d'épaisseur du stroma, la topographie cornéenne, les caractéristiques de la cornée biomécaniques, et les changements de microstructure observées sur la microscopie confocale, concordaient avec notre classement OCT [37].

Pour étudier la norme de l'échelle standard du kératocône (Pentacam- dérivés stades Amsler - Krumeich) par rapport aux indices d'irrégularité de la cornée et de la meilleure Acuité Visuelle à Distance de spectacle Corrigée(CDVA), un travail a été réalisé en 2013 par, Anastasios John Kanellopoulos et al, dont 12 cas de kératocône ont été évalués pour le classement du kératocône. Les indices d'irrégularités de la surface antérieure (mesurée par imagerie Pentacam),et la réfraction subjective (mesurée par CDVA(Corrected Distance Visual Acuity)), et la kératométrie ont été corrélés et analysés à l'aide d'un test bilatéral, ils ont obtenue environ  $0.626 \pm 0.244$  de déviation standard CDVA (exprimé en décimal) pour tous les yeux, une kératométrie moyenne méridien plat (K1) de  $46.7 \pm 5.89$  D; une kératométrie forte moyenne (K2) de  $51.05 \pm 6.59$  D. L'indice de la variance de surface et l'indice de la hauteur de décentration ont une forte corrélation avec le classement de la topographie cornéenne ( $P < 0.001$ ). CDVA et la kératométrie ont une faible corrélation avec la sévérité du kératocône [38].

Dans le but d'évaluer l'élévation de la cornée, pachymétrie et kératométrie dans des yeux atteints par le kératocône en fonction du stade clinique de la maladie, Kamiya K et al, en 2014 ont pris un groupe de 126 yeux dont 83 patients ont le kératocône,42 patients sont normaux. A l'aide d'une camera Scheimpflug rotative (Pentacam HR, Oculus) l'élévation cornéenne, la pachymetrie et la kératométrie ont été mesurés dans ces yeux. (AUROC) la courbe a été

utilisé pour analyser la signification diagnostic de ces paramètres, par rapport à chaque étape de classifications d'Amsler - Krumeich, et a été calculé pour décrire l'exactitude prédictive des différents indices et de déterminer les points de coupure où la sensibilité et la spécificité ont été maximisés.

La partie supérieure AUROCS montre la différence d'élévation postérieur (0.980) et l'antérieur (0.977), suivie du dioptrés (D) valeur de (0.941), le pourcentage d'épaisseur augmente (PTI) 2 mm (0.931), PTI 4 mm (0.927), l'indice de progression (0.927), Pachymétrie minimale (0.923), kératometrie environ (0.914), l'élévation antérieur (0.909), PTI 6 mm (0.906), l'élévation postérieur (0.898), Pachymétrie centrale (0.889), PTI 8 mm (0.870), PTI 10 mm (0.864), épaisseur de la cornée profil spatial 2 mm (0.835) et le cylindre (0.796). Les chercheurs ont trouvés que les différences dans les courbes d'AUROC entre antérieur et postérieur d'élévation de la mesure et d'autres paramètres de diagnostic ont tendance à être plus grande dans les premières étapes de kératocône [39].

Pour évaluer l'efficacité de l'épaisseur et le volume des paramètres cornéens mesurés avec le système Pentaca Scheimflug dans les cornées kératocône infra cliniques discriminants et les cornées normales, Jing cui et al, en 2015 ont inclus 19 patients portant un kératocône infra clinique, 29 patients ont une myopie astigmatisme, dont les cornées été évaluées en utilisant un système Pentacam Scheimflug (2002 model, Oculus, Berkshire, UK).

Différents paramètres tel que l'épaisseur et le volume de la cornée ont été évalués, y compris l'épaisseur centrale de la cornée (CCT), l'épaisseur minimale de la cornée (MCT), épaisseur de la cornée déprimé (DCT), l'indice de progression maximale (MaxPI), l'indice de la progression moyenne (AvPI), l'indice de progression minimale (MinPI), et les valeurs du volume de la cornée pour les 3,0 mm (CV3), 5.0 mm (CV5) et 7,0 mm (CV7) cercles centraux. Une courbe ROC a été utilisé pour comparer entre la sensibilité et la spécificité des paramètres.

L'étude aboutisse a trouvée des différences significatives dans tous les paramètres ( $p < 0,001$ ) à l'exception CV3 et CV5, entre kératocône infra clinique et cornées normales. La précision diagnostique pour tous les paramètres a été élevée, avec une surface sous la courbe (ASC) d'environ 1. Les valeurs seuils optimaux pour DCT, MinPI, AvPI et MaxPI ont été 5,5, 0,95, 1,05 et 1,45 pour le kératocône infra clinique, respectivement [40].

Pour étudier l'efficacité du SCORE Analyzer (Bausch + Lomb Technolas, Allemagne) dans la détection de la forme fruste du kératocône (FFKC) dans les yeux des asiatiques et

valider son utilité comme un système d'évaluation des risques pour la post- laser in situ keratomileusis (LASIK). Pour cela Damien Gatinel et al, en 2015 ont pris le défi d'évaluer la topographie cornéenne d'Orbscan par le SCORE analyseur sur 128 Orbscan de 128 asiatiques dont 24 cas FFKC (forme fruste du kératocône), 104 cas à contrôler. Les yeux ont été classifiés en 2 groupes: le 1<sup>er</sup> FFKC et le 2<sup>eme</sup> groupe a contrôlé avant l'opération du lasik.

Les Principaux critères de jugement ont été les paramètres de précision: sensibilité, spécificité, les valeurs de prédiction positive et négative (PPV, NPV), ces paramètres ont été impliqués dans l'algorithme du SCORE et ont été comparés entre les deux groupes.

Le SCORE a été négative dans 7 yeux (faux négative) et 2 dans le groupe à contrôler été positive (faux positive). ils ont obtenu une sensibilité de 70.83%, spécificité de 98.08%, PPV 89.47% et NPV 93.58%, aussi l'irrégularité 3mm, épaisseur de pakymetrie (TP), la différence du central et de l'épaisseur pakymétrie (CP-TP), décentration vertical du point le plus faible (TP-Y), l'élévation postérieur maximale (MPT) et l'élévation antérieur du point le plus faible (AETP) sont statistiquement et significativement différent dans les deux groupes [41].

En balayant l'état de l'art, les différents paramètres utilisés dans les BDD étudiées sont : Le sexe, l'âge, type d'image (antérieure ou postérieure), la packymétrie, décentration verticale du point le plus mince de la cornée, la kératométrie centrale, l'irrégularité 3mm et l'indice de pourcentage de kératocône (KISA). Plusieurs topographes ont été utilisé tels que : Pentacam, caméra sheimpflug, CSO, Orbscan... etc. L'Orbscan reste l'appareil le plus fiable du faite qu'il a été utilisé dans plusieurs travaux d'un côté, et aussi fournit des coupes antérieures et postérieures en même temps.

### **5. Contribution :**

L'objectif premier de notre approche est d'extraire les caractéristiques des images afin d'apporter un niveau d'aide décisionnel et de confort supplémentaire à l'expert médical pour la proposition de son diagnostic. L'identification des propriétés de l'image est donc une étape majeure qui conditionne les caractéristiques.

L'étude des paramètres numériques permet donc, dans un deuxième temps, d'envisager un traitement des images topographiques.

Nous proposons dans ce mémoire un système d'aide au diagnostic constitué d'un emboîtement d'un ensemble de méthodes de traitement d'images et des techniques de classifications, dans lequel nous effectuons une analyse de données numériques présent du topographe en utilisant des approches capables de fournir une aide aux médecins ophtalmologues dans leurs routines cliniques afin de sélectionner les paramètres pertinents

pour la détection de la maladie du kératocône. Ensuite, nous traitons des images topographiques de la cornée en se basant sur les domaines d'appartenance des couleurs (pathologiques-non pathologique). Toutes les techniques d'intelligence artificielle ont été appliquées sur une base de données récente qui contient les différents paramètres utilisés par les différents chercheurs dans l'état de l'art.

### **6. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un ensemble de techniques utilisées en traitement d'images médicales, Cette étape, que nous avons envisagé, consiste à développer une méthode de segmentation adaptée au contenu des images topographiques permettant, de caractériser les objets (couleurs) de l'image afin d'apporter une aide supplémentaire au praticien lors de la prise de décision.

Ensuite nous avons présenté les différentes approches de classification notamment les réseaux de neurones, les machines à vecteurs de support, les arbres de décision ainsi que d'autres méthodes ayant relation avec la recherche entamée.

Nous notons que la littérature scientifique est très riche en nombre de travaux qui proposent une aide aux médecins dans le domaine d'ophtalmologie où nous avons cité les plus récents, suivi par la contribution à notre travail.

Dans le chapitre suivant, nous montrerons l'intérêt de notre base de données topographique récoltée localement ainsi que les différents paramètres qui la caractérisent.



## *CHAPITRE 3*

*Base de données*

**CHAPITRE 3****Base de données****1. Introduction :**

Grace à l'évolution et l'informatisation dans différents domaines, spécialement dans l'imagerie médicale plusieurs techniques ont été appliquées pour faciliter le diagnostic et surmonter multiples problèmes ainsi que la classification peut être un outil informatique très important pour créer un système intelligent permettant l'orientation et la prise de décision du médecin.

L'indisponibilité d'une base de données standard permettant l'étude directe du kératocône, nous a permis de faire notre propre collecte. Notre nouvelle base de données est composée de données numériques et de données images. La BDD numérique est composée de 352 patients chacun d'entre eux est représenté par 22 descripteurs (tableau 1).

Comme on était, limité par le temps, nous avons pu prendre que les images de 148 patients à partir de la topographie cornéenne par l'OrbscanII réparties en images antérieures, images postérieures et de la kératométrie axiale.

Pour ce chapitre, nous allons détailler les différents paramètres utiles pour effectuer la classification ainsi que la procédure suivie pour l'obtention des images sur lesquelles nous avons établi les traitements nécessaires.

**2. Définition d'une base de données :**

Une base de données usuellement abrégée en BD ou BDD, est un ensemble structuré et organisé permettant le stockage de grandes quantités d'informations qui peuvent être utilisées par des programmes ou des utilisateurs, comme les experts de la santé de façon à être facilement accessibles, administrées et mises à jour. C'est la pièce centrale d'un système d'information qui régit la collecte, le stockage, le retraitement et l'utilisation de données dans la science du traitement automatisé de l'information [42].

La BDD occupe un emplacement très important dans la recherche médicale qui vient directement après l'élaboration du projet de recherche dans le but de faire une analyse descriptive pour arriver à interpréter les résultats obtenus.

Le but de la récolte des données est spécifique tel que le suivi médical du patient (antécédents, traitements administrés, symptômes observés, etc.), ou l'analyse d'une

population pour améliorer le traitement ou le diagnostic d'une maladie ou d'un protocole [43].

### 3. Description de la base de données collectée:

Dans cette première partie, nous allons détailler les démarches prises pour arriver à une base de données qui peut être utilisée par les utilisateurs afin de réaliser des études de recherches. Pour cela, nous présenterons les différents paramètres qui la caractérisent dans le but de proposer un système intelligent capable d'aider les médecins ophtalmologues dans leurs routines cliniques. Ces paramètres ont été proposés et validés par les médecins ophtalmologues.

#### 3.1. BDD numérique :

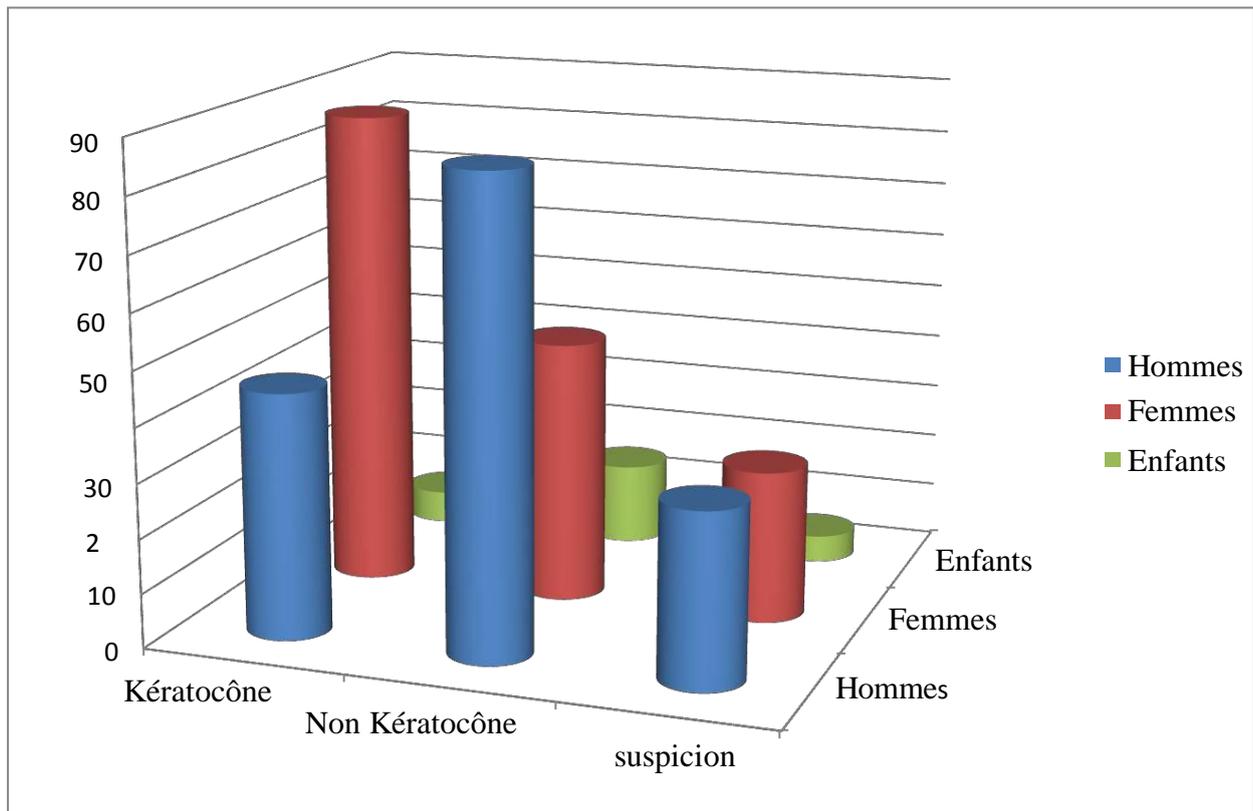
En médecine, le raisonnement par classification est basé sur l'exploitation des connaissances médicales disponibles sur un ensemble de diagnostics pour arriver à une décision finale.

Notre base de données a été réalisée en mois de janvier et février 2016, nous avons pris des cas enregistrés entre 2011 et 2016. Elle se compose de 352 patients qui sont de régions différentes (ouest, centre, sud, et nord), sur lesquels nous avons exploité l'œil gauche et l'œil droit.

Cette investigation s'est faite sur 163 hommes, 163 femmes et 26 enfants, dont 138 sujets sont atteints du kératocône, 65 sont en suspicion du kératocône et 149 présentant des cas sains. La base est répartie comme représenté dans le tableau 3.1 suivant est illustré par un graphique 3D (Figure 3.2) :

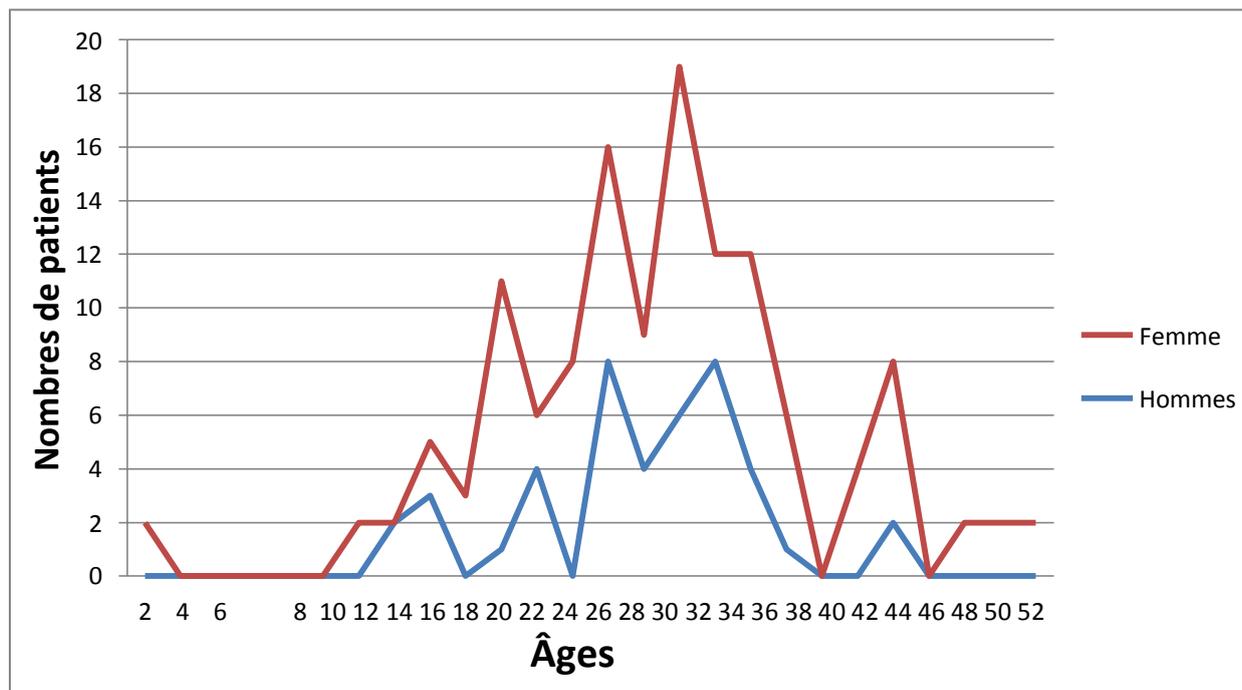
	Hommes	Femmes	Enfants
Kératocône	45	87	6
Non kératocône	86	48	15
Suspicion de kératocône	32	28	5

**Tableau 3.1: Répartition des patients dans la BDD**



**Figure 3.1 : Statistiques du kératocône**

L'interprétation du tableau 3.1 précédent et du graphe ci-dessus (Figure3.2), nous résulterons que le nombre de femmes est plus important que celui des hommes, ce qui confirme l'hypothèse de l'étude théorique qui indique son apparition dans tous les groupes ethniques et à lieu un peu plus chez les femmes [4]. Nous pouvons constater aussi que l'échelle des enfants est très faible par rapport aux adultes à cause de la difficulté de réalisation de l'examen topographique pour cette catégorie.



**Figure 3.2: Analyse graphique du kératocône selon l'âge**

La (Figure 3.2), représente que la catégorie de personnes les plus touchées de cette pathologie, le kératocône peut être découvert vers l'âge de 12 ans, au moment où l'œil est en pleine croissance, ce qui fait que la cornée se déforme à ce moment-là et se stabilise vers les quarantaines.

Chaque cas étudié est formé de 22 attributs, dont les 21 attributs sont des paramètres d'entrées et le 22ème attribut représente la classe du patient (kératocône- Non kératocône- Kératocône suspect).

Les indices calculés sont des données quantitatives qui peuvent être utilisées pour construire des modèles statistiques destinés à séparer en groupes de diagnostics des cornées testées.

Le logiciel du topographe utilisé dispose des critères de Rabinowitz et de Klyce & Maeda.

Les attributs de la BDD sont représentés dans le tableau:

Paramètres	Significations
Sexe	Femmes, Hommes.
Âge	De 2 ans à 85 ans.
Œil	OS : œil gauche OD : œil droit

Pachymétrie	C'est la mesure de l'épaisseur de la cornée, elle est fournie par les topographes cornéens à balayage par fente (Orbscan) ou caméra Scheimpflug (Galilei, Pentacam, TMS 5) permet de réaliser une cartographie complète de l'épaisseur cornéenne, dont la réalisation est déduite des données de l'élévation antérieure et postérieure de la cornée : il suffit pour cela de mesurer la distance entre les faces antérieure et postérieure de la cornée. La mesure étant effectuée en différents points, elle fournit un relevé pachymétrique complet du mur cornéen [44].
Point le plus fin	Correspond à l'épaisseur minimale du mur cornéen (en utilisant un facteur acoustique de 0.92 pour l'Orbscan) [45].
Centrage	Correspond au déplacement du point le plus fin vis-à-vis du centre géométrique de la cornée [45].
Asphéricité	Décrit certaines variations de la courbure d'une courbe ou d'une surface. Le facteur d'asphéricité $Q$ caractérise la variation du rayon de courbure à mesure que l'on s'éloigne de ce sommet en déterminant le type de la section conique : <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Q &lt; -1</math> : la courbe est une hyperbole.</li> <li>• <math>Q = -1</math> : la courbe est une parabole.</li> <li>• <math>-1 &lt; Q &lt; 0</math> : la courbe est une ellipse prolate.</li> <li>• <math>Q = 0</math> : la courbe est un cercle.</li> <li>• <math>Q &gt; 0</math> : la courbe est une ellipse oblate [46].</li> </ul>
Best fit spher	C'est la sphère dont le rayon de courbure se rapproche le plus du rayon de courbure de la cornée antérieure.
Kappa inter	L'intersection de l'axe pupillaire et la surface cornéenne antérieure est représentée par la lettre $K$ . L'axe pupillaire perce la cornée temporairement à l'intersection de la ligne de mire (l'élève est délimité en blanc, et son centre marqué comme un point blanc).

SimK	La kératométrie simulée moyenne, est un exemple d'indice topographique, car elle fournit l'estimation de la puissance kératométrique apicale moyenne, ce paramètre peut être indicatif de la présence d'un kératocône quand il atteint certaines valeurs (ex : 53 D) [47].
Irrégularité	Représente l'irrégularité dans les régions de 3mm puis 5mm centraux de la face antérieure (dioptries) qui est proportionnelle à la déviation standard des valeurs prises par la courbure locale de la surface antérieure [45].
Mean power	La puissance moyenne des 3mm.
Astigpwr	Pour vérifier si le patient présente un astigmatisme régulier ou non.
Axial power keratometric	Etude de la symétrie des axes
Couleurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chaudes: Présence du kératocône</li> <li>• Froides: absence du kératocône.</li> <li>• Le vert est utilisé pour définir les valeurs moyennes.</li> </ul> <p>Le nombre de couleurs représente des déformations de la cornée, nous avons recensé les couleurs manuellement, puis automatiquement par un programme pour faciliter la tâche aux médecins.</p>
La valeur du Score	<p>La valeur du score correspond au résultat d'une fonction discriminante comportant 12 variables dont le seuil optimal pour une détection sensible et spécifique a ajusté pour correspondre à la valeur « zéro ».</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• une valeur négative (score&lt;0) : Une cornée jugée comme indemne d'une forme fruste de kératocône.</li> <li>• une valeur positive (score &gt;0) : Une cornée jugée comme atteinte d'une forme fruste de kératocône.</li> <li>• La valeur absolue de cette valeur (sa « distance » avec le seuil) est indicative du caractère « normal » ou</li> </ul>

	« anormal » de la cornée analysée [45].
I – S	Représente la valeur de la différence I-S (Dioptries) qui correspond à la différence entre les valeurs moyennes kératométriques de 5 points équidistants localisés à 1.5 mm du vertex au niveau de la surface cornéenne antérieure supérieure (S) et inférieure (I). Elle reflète le degré d’asymétrie verticale de la surface cornéenne antérieure [45].
CP-TP	C’est la différence entre l’épaisseur centrale moyenne (zone centrale diamètre 2 mm) et l’épaisseur la plus fine [45].

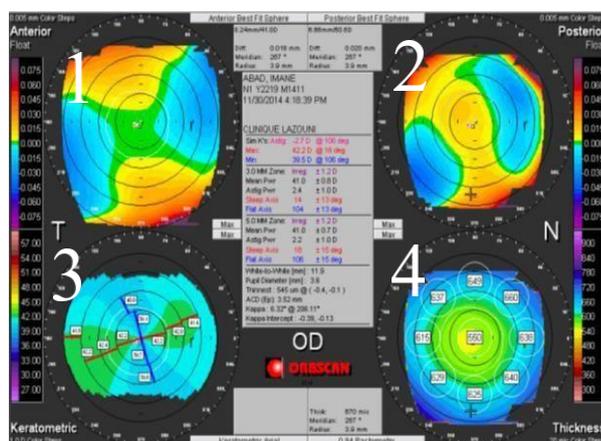
**Tableau 3.2 : Les attributs de la base de données**

**3.2. BDD images :**

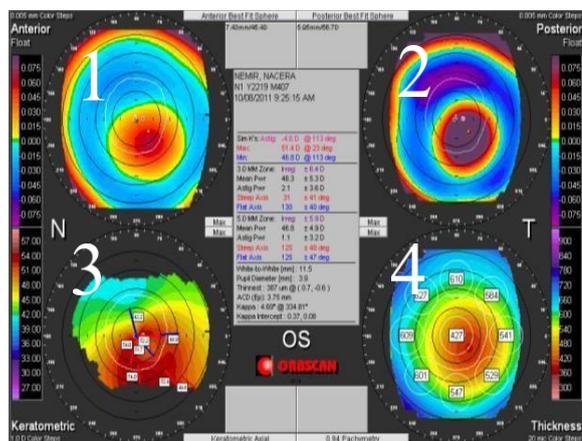
L’imagerie est un outil indispensable à la médecine moderne notamment pour le dépistage et le traitement du cancer, diagnostic des accidents vasculaires cérébraux, etc.

Et pour notre étude le recours à diverses techniques d’imagerie plus sophistiquées permet cependant d’évoquer le diagnostic du kératocône dès les stades précoces de l’affection, et d’en quantifier le stade évolutif. Car pour faire un bon diagnostic précoce le médecin ophtalmologue utilise les paramètres numériques et images.

La collecte des images topographique a été très difficile à cause de la sécurisation du système de fonctionnement du topographe « Orbscan II » qui ne nous donne pas l’accès directe aux images originales, pour palier à ce problème nous avons réalisé des captures d’écran dans le but de poursuivre la recherche et entamer les traitements.



**Figure 3.3: Carte topographique d'un cas sain**



**Figure 3.4: Carte topographique d'un cas atteint du kératocône**

À partir des figures (Figure 3.3) et (Figure 3.4), on remarque qu'il existe 4 blocs différents ce qu'on appelle «Quadmap » :

- 1 : Représente la coupe antérieure de la topographie cornéenne.
- 2 : Représente la coupe postérieure de la topographie cornéenne de l'œil gauche.
- 3 : Représente la kératométrie axiale.
- 4 : Représente la pachymétrie.
- Comme indiqué précédemment « OS » représente l'œil et « OD » représente l'œil droit.

À partir des cartes de topographie cornéenne, nous avons recueilli des informations relatives à la courbure de la cornée, grâce à la projection et l'analyse du reflet d'un motif lumineux éclairant ou balayant la cornée. Les images obtenues sont analysées de façon automatique par un logiciel, et des cartes en couleurs sont fournies au médecin pour l'interprétation du diagnostic.

À travers l'affichage classique «Quadmap» du topographe, nous sommes passé à l'affichage « max » de chacun et effectuer des captures d'écran selon les parties dont nous avons besoin pour faire nos traitements, puis découper chaque images tout en considérant qu'elles aient la même taille.

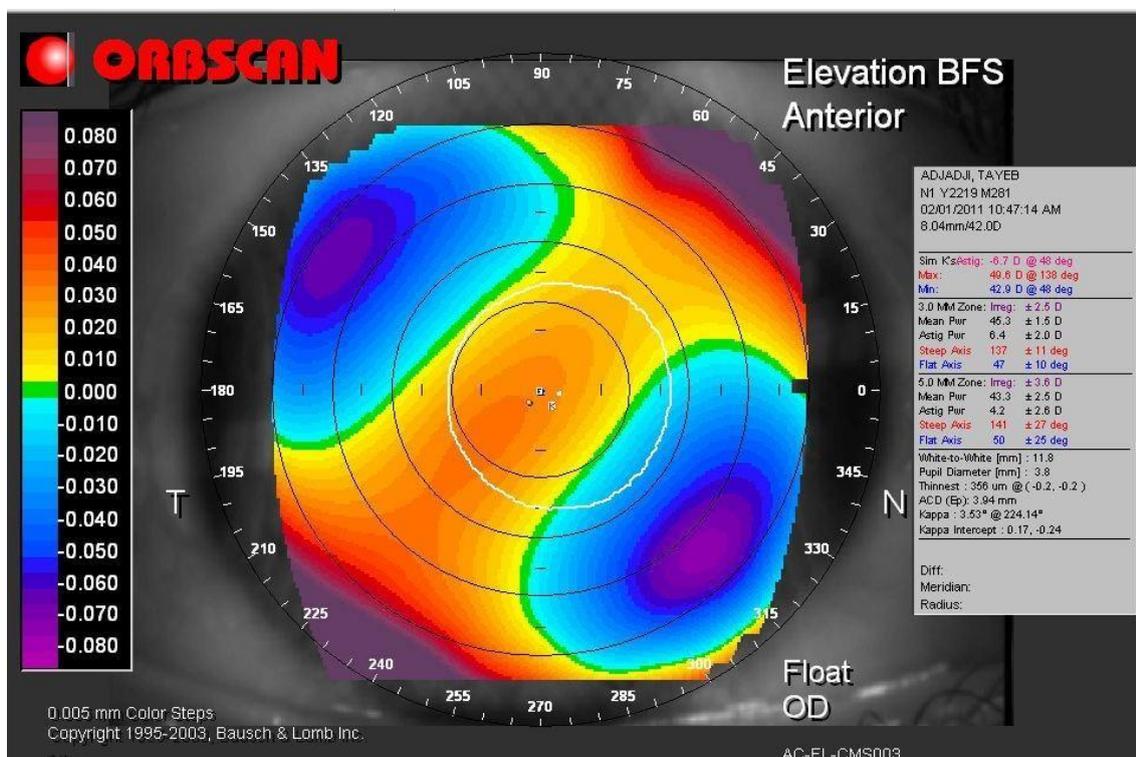


Figure 3.5: Affichage Max

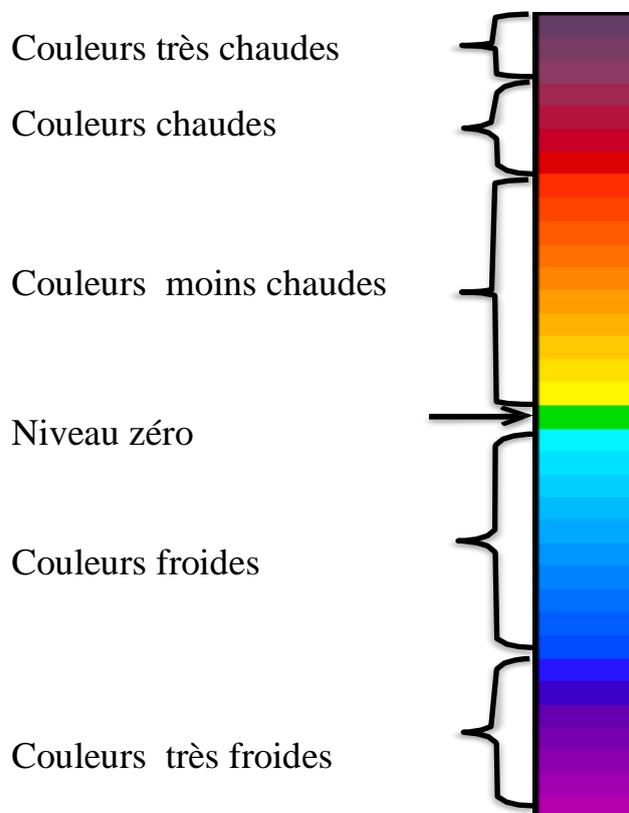
- Le bloc « 1 » et « 2 » ont servis pour la détection des nombres de couleurs dans les zones optiques 3mm, 5mm et 7mm ainsi que la détection du point le plus fin.
- Le bloc « 3 » a été utilisé pour la détection des axes dans le but de vérifier la symétrie.
- Le bloc « 4 » permet de faire l'affichage de la pachymétrie, cette valeur a été utilisée comme un paramètre numérique dans notre BDD.

La BDD est composé de 444 images présentant 3types d'informations:

- 148 échantillons de coupe antérieure de l'œil.
- 148 échantillons de coupe postérieure de l'œil.
- 148 échantillons de la kératométrie axiale représentés par deux couleurs (rouge et bleu).

Dans les coupes antérieures et postérieures, les images sont représentées par des couleurs significatives (Figure 3.6):

- Les couleurs chaudes (jaune, orange, rouge, violet) représentent ce qui est bombé. (définis les cas Kératocône).
- Les couleurs froides (bleu ciel jusqu'au vert) ; représentent ce qui est plat.
- Le vert est utilisé pour définir les valeurs moyennes.



**Figure 3.6: Echelle de couleurs**

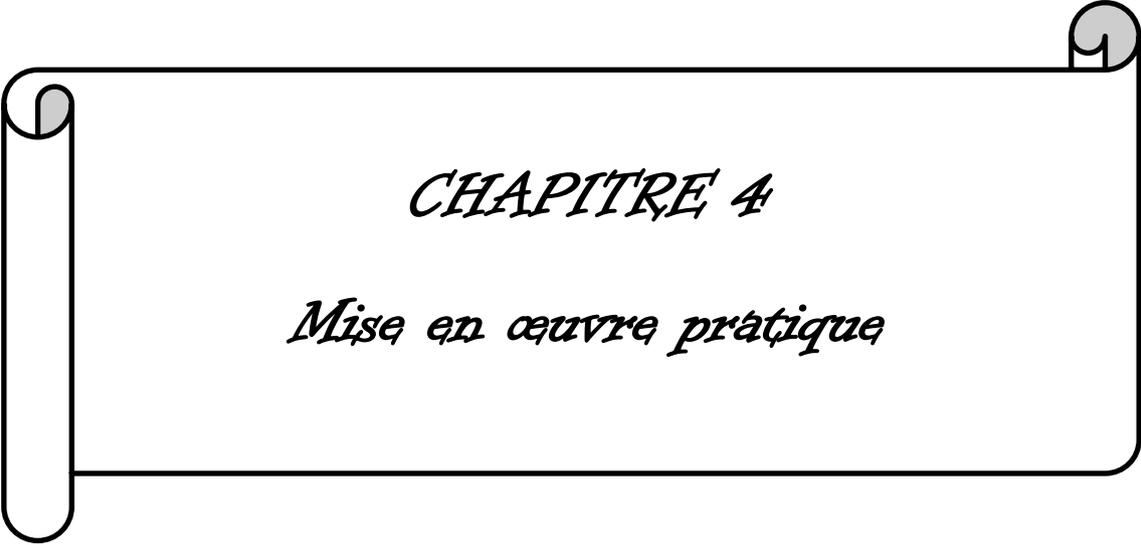
Tous ces paramètres sont utilisés par les ophtalmologues d'une manière visuelle dans le dépistage et le suivi de certaines affections de la cornée (kératocône, astigmatisme) pour la chirurgie réfractive, ce qui nous a poussé à développer un outil informatique basé sur le traitement d'image et la classification dans le but d'aider les ophtalmologues.

Plusieurs techniques de traitement d'image ont été utilisées pour arriver à notre objectif qui est la détection automatique du kératocône, nous avons établi une classification pour tester la robustesse de la base de données réalisée. Cette partie sera décrite dans le chapitre quatre qui suit.

#### **4. Conclusion :**

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté notre étude pratique en décrivant la base de données collectée composée de 352 échantillons présentant une BDD numériques utilisant les différents attributs qui font part de la constitution de la topographie cornéenne, où chaque échantillon est décrit par 22 descripteurs.

Nous avons rencontrés de nombreuses difficultés sur le terrain lors de la collecte des données ce qui nous a empêché d'établir une base de données plus volumineuse. Dans le chapitre suivant nous allons présenter les techniques de traitement d'images utilisées dans ce projet, ainsi que les approches de classifications.



*CHAPITRE 4*

*Mise en œuvre pratique*

---

## CHAPITRE 4

### Mise en œuvre pratique

#### 1. Introduction :

Le traitement d'images est une discipline de l'informatique et des mathématiques appliquées qui étudie les images numériques et leurs transformations, dans le but d'améliorer leur qualité ou d'en extraire de l'information. En outre, une autre technique peut être introduite pour le traitement des données qui est la classification afin de proposer un système d'aide au diagnostic en appliquant plusieurs traitement sur les images de la topographie cornéenne ainsi que des techniques de classification et de sélection pour la proposition d'un outil intelligent pour les ophtalmologues.

Nous avons fait une étude pratique sur notre base de données collectée. Ce chapitre est divisé en deux parties, dont nous allons citer les approches de classification participant dans le traitement afin de sélectionner les variables pertinentes pour la détection du kératocône qui vont être utilisées par la suite dans le traitement d'images dans les limites de ce projet, en détaillant toutes les étapes impliquées puis en présentant les résultats obtenus pour chaque partie en établissant son interprétation.

#### 2. Classification :

Le but d'utilisée la classification était de tester la robustesse de notre BDD et la performance des modèles par des critères d'évaluation (matrice de confusion, taux de classification, etc.).

##### 2.1. Critères d'évaluation :

###### ❖ Taux de classification :

Le Taux de Classification (TC) est défini comme suit :

$$TC = \frac{\text{Nombre de patients bien classés}}{\text{Nombre total des patients}}$$

Le TC est un paramètre relativement significatif pour l'évaluation d'un classifieur car il ne prend pas en considération la distribution des classes [48].

###### ❖ Matrice de confusion :

La matrice de confusion met en relation les décisions prises par le classifieur et les étiquettes des échantillons. C'est un outil qui sert à mesurer la qualité d'un système de classification.

Les matrices de confusion ont pour but de s'assurer de la fiabilité de reconnaissance individuelle de chaque classe par rapport aux autres c'est-à-dire les éléments bien reconnus pour une classe précise et mal reconnus pour les autres.

Résultats du test	Non Malades (M+)	Malades (M-)
Test positif (T+)	VP	FP
Test négatif (T-)	FN	VN
Total	(VP+FN)	(FP+VN)

**Tableau 4.1: Matrice de confusion**

VP : vrai positif=Nombre d'individus bien prédits dans la classe à juste titre (Absence de kératocône = Non malade).

VN : vrai négatif=Nombre d'individus prédits comme étant de la classe alors qu'ils ne le sont pas en vrai (Présence du kératocône = Malade).

FP : faux positif=Nombre d'individus prédits dans la classe alors qu'ils ne devraient pas en faire partie (Absence du kératocône = Malade).

FN : faux négatif=Nombre d'individus prédits comme étant de la classe alors qu'ils ne le sont pas en vrai (Présence du kératocône = Non malade).

## **2.2. Résultat de la classification :**

Nous avons testé notre base de données sur des classifieurs différents tels que les K plus proches voisins (KNN), les réseaux de neurones multi couches (MLP) et les arbres de décision (C4.5) en utilisant la validation croisée qui représente une méthode d'estimation de fiabilité d'un modèle fondé sur une technique d'échantillonnage, il y a au moins trois techniques de validation croisée mais celle utilisé est « k-fold cross-validation » dont le principe repose sur la division de l'échantillon original en k échantillons, puis la sélection d'un des k échantillons comme un ensemble de validation et les (k-1) autres échantillons constitueront l'ensemble d'apprentissage puis le calcul du score de performance. Cette opération se répète en sélectionnant un autre échantillon de validation parmi les (k-1) échantillons qui n'ont pas encore été utilisés pour la validation du modèle. L'opération se répète ainsi k fois pour qu'en fin de compte chaque sous-échantillon ait été utilisé exactement une fois comme ensemble de validation. La moyenne des k erreurs quadratiques moyennes est enfin calculée pour estimer l'erreur de prédiction [49].

Pour notre étude, nous avons utilisé le nombre de K par défaut K=10, les résultats obtenus sont présentés dans la partie qui suit.

**2.2.1. Méthode des K plus proches voisins K-NN :**

Pour le classifieur des K- plus proches voisins, nous avons varié le nombre K, C'est-à-dire le nombre de voisins pour chaque expérimentation, ainsi que le principe de calcul de distance utilisé.

Le Tableau 4.2 illustre les résultats des taux de classification et les faux négatifs FN ainsi que les deux principes de calcul de distances (La distance euclidienne et la distance HEOM)

- **La distance euclidienne :** qui calcule la racine carrée de la somme des différences carrées entre les coordonnées de deux points [50] :

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

- **La distance HEOM (Heterogeneous Euclidean-OverlapMetric):** C'est une approche pour traiter des ensembles de données avec des attributs à la fois qualitatives et quantitatives, consiste à utiliser une fonction de distance hétérogène qui utilise différentes fonctions de distance pour différents types d'attributs [51].

$$HEOM(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_r(x_i), a_r(x_j))^2}$$

Nombre de voisins	K-NN			
	Distance euclidienne		Distance HEOM	
	TC %	FN	TC %	FN
k=3	80,39	4	74,06	2
k=5	78,75	4	77,91	7
k=7	79,38	4	76,25	5
k=9	77,19	5	77,81	7

**Tableau 4.2 : Résultats de la méthode KNN**

Les meilleurs résultats obtenus avec la méthode KNN étaient avec la distance euclidienne car elle est bien adaptée pour les attributs quantitatifs, en utilisant un nombre de voisins  $K=3$  qui a donné un taux de classification élevé (TC)=80,39%, dont la matrice de confusion pour ce test est comme suit :

Technique K-NN				
	Absence d'un kératocône	Suspicion d'un kératocône	Présence d'un kératocône	Total
Absence d'un kératocône	134	13	0	147
Suspicion d'un kératocône	33	18	10	61
Présence d'un kératocône	4	3	105	112
Total	171	34	115	320

**Tableau 4.3 : Matrice de confusion du meilleur résultat trouvé par KNN**

D'après la matrice de confusion (Tableau 4.3), nous constatons donc qu'un nombre de 4 cas de kératocônes classés non kératocônes et un nombre nul de cas non kératocônes classés kératocônes, donc on peut dire que le nombre de faux négatifs est réduit par rapport à l'ensemble des cas malades dans la classification par K-NN.

### **2.2.2. Méthode d'Arbre de décision C4.5:**

Pour le classifieur arbre de décision C4.5, nous avons varié le nombre maximum de feuille afin de tester notre base de données dont le meilleur résultat est représenté dans le Tableau 4.4.

Arbre de décision C4.5	
TC %	FN
80	1

**Tableau 4.4: Résultats de la méthode arbre de décision C4.5**

Le taux de classification obtenu par cette approche TC=80%, dont la matrice de confusion pour ce test est comme suit :

Arbre de décision C4.5				
	Absence d'un kératocône	Suspicion d'un kératocône	Présence d'un kératocône	Total
Absence d'un kératocône	127	20	0	147
Suspicion d'un kératocône	26	30	5	61
Présence d'un kératocône	1	12	99	112
Total	154	62	104	320

**Tableau 4.5: Matrice de confusion du meilleur résultat trouvé par arbre de décision**

La matrice de confusion Tableau 4.5, présente un seul cas de kératocône compris comme étant un cas non malade (faux négatif), tandis qu'aucun cas sain n'est admis comme un cas malade.

### 2.2.3. Méthode des Réseaux de neurone MLP :

Pour le classifieur réseau de neurone MLP, nous avons varié le nombre de neurones en utilisant des couches cachées puis sans les utiliser pour faire une étude comparative présentée dans le Tableau 4.6 suivant :

MLP			
Avec utilisation de couches cachées		Sans utilisation de couches cachées	
TC %	FN	TC %	FN
78.12	2	77,5	2

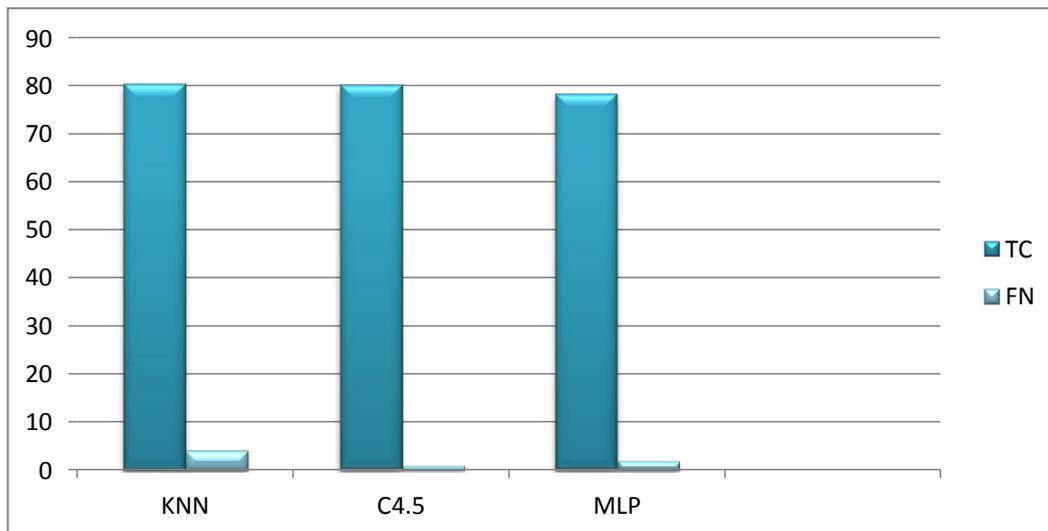
**Tableau 4.6: Résultats de la méthode des réseaux de neurones**

Les meilleurs résultats obtenus avec les réseaux de neurones étaient avec l'utilisation des couches cachées qui a donné un taux de classification TC=78.12% et deux faux négatifs dont la matrice de confusion pour ce test est comme suit :

MLP				
	Absence d'un kératocône	Suspicion d'un kératocône	Présence d'un kératocône	Total
Absence d'un kératocône	130	17	0	147
Suspicion d'un kératocône	34	15	12	61
Présence d'un kératocône	2	5	105	112
Total	166	37	117	320

**Tableau 4.7: Matrice de confusion du meilleur résultat trouvé par les réseaux de neurones**

Dans cette matrice de confusion, nous remarquons que le nombre de faux positifs ainsi que les faux négatifs sont moins important que celui du nombre total.



**Figure 4.1: Statistiques des trois techniques de classification**

L'histogramme résume les résultats de classification obtenus par les trois techniques de classification utilisées où nous distinguons un taux de classification de 80.39% pour la technique des KNNs avec 4 faux négatifs représentant le meilleur résultat, suivi de la technique d'arbre de décision C4.5 avec un taux de classification de 80% et 2 faux négatifs, ensuite le résultat obtenu par les MLPs se trouve en dernière situation présentant un taux de classification de 78.12% avec 2 faux négatifs.

Après la classification des données, nous avons effectué un teste sélectif afin d'extraire les paramètres pertinents lors de la détection de la présence du kératocône pour les utiliser dans la partie suivante en traitement d'images. La technique de sélection de variables utilisée dans ce mémoire est celle de « Ranking ». Le tableau qui suit résume les 11 paramètres les plus pertinents dans notre BDD.

N°	Attribute	Weight
1	Nombre de couleurs dans la zone de cercle de 5mm dans la coupe postérieure	0.2210078
2	Nombre de couleurs dans la zone de cercle de 3mm dans la coupe postérieure	0.200036
3	Nombre de couleurs dans la zone de cercle de 3mm dans la coupe antérieure	0.125899
4	Nombre de couleurs dans la zone de cercle de 5mm dans la coupe antérieure	0.111507
5	Irrégularité dans la zone de 3mm	0.103203
6	Pachymétrie	0.100970
7	Irrégularité dans la zone de 5mm	0.097858
8	Le point le plus fin	0.078922
9	Alignement de l'axe bleu	0.070602
10	Sexe	0.064342
11	SimK1	0.063153

**Tableau 4.8: Les 11 attributs pertinents**

Le Tableau 4.8 indique les 11 attributs les plus importants où on distingue que les nombres de couleurs présents dans les régions de 5mm et 3mm sont en tête de la liste, puis les valeurs numériques de l'irrégularité et la pachymétrie, ensuite le point le plus fin de la cornée et l'alignement de l'axe bleu de l'image de la kératométrie axiale.

Comme indiqué précédemment, ces paramètres sont les plus utilisés par les ophtalmologues en faisant une lecture visuelle des images de la topographie cornéenne lors de la détection de la maladie du kératocône. Or dans ce travail, on veut proposer un système automatique capable d'automatiser la lecture de la topographie.

D'après ces résultats, nous avons entamé une autre démarche dans laquelle nous avons utilisé les paramètres qui peuvent être obtenus à partir des images topographiques pour la détection automatique du kératocône.

### **3. Chronologie du traitement d'image :**

Les algorithmes appliqués ont été testés sur des images couleurs pour des cas pathologiques et des cas sains. Notre hypothèse de départ était basée sur la détection du nombre de couleurs et faire une classification selon des intervalles de degrés (couleurs très chaude, couleurs chaude, couleurs froides, etc.) afin d'arriver à une décision finale.

Pour cela un organigramme (Figure 4.2) est proposé pour montrer les différentes démarches que nous avons énumérées dans le traitement des images topographiques, et qui seront détaillées dans le paragraphe suivant.

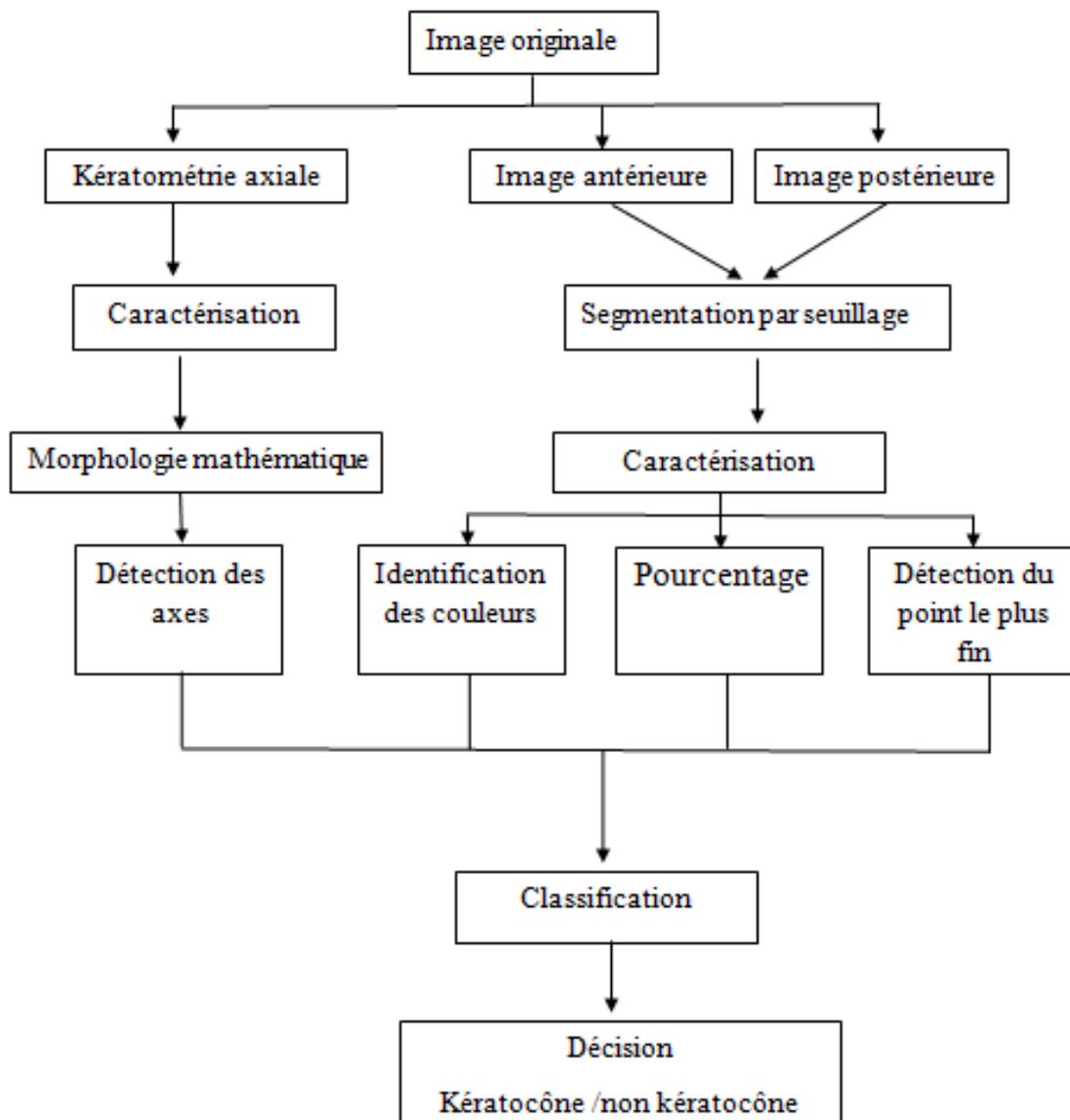


Figure 4.2: Organigramme proposé pour la détection du kératocône

### 3.1. Images antérieures et postérieures :

Dans le contexte de la vision artificielle, le traitement d'images se place après les étapes d'acquisition et de numérisation, assurant les transformations d'images et la partie de calcul permettant d'aller vers une interprétation des images traitées.

Dans le but d'extraire les informations qui sont habituellement tirées par les médecins ophtalmologues de manière visuelle, les images obtenues ont subi un traitement précis afin d'arriver à fournir les mêmes informations mais de façon numérique.

Pour les images antérieures et postérieures (Figure 4.3) nous avons suivi les mêmes étapes citées dans l'organigramme.

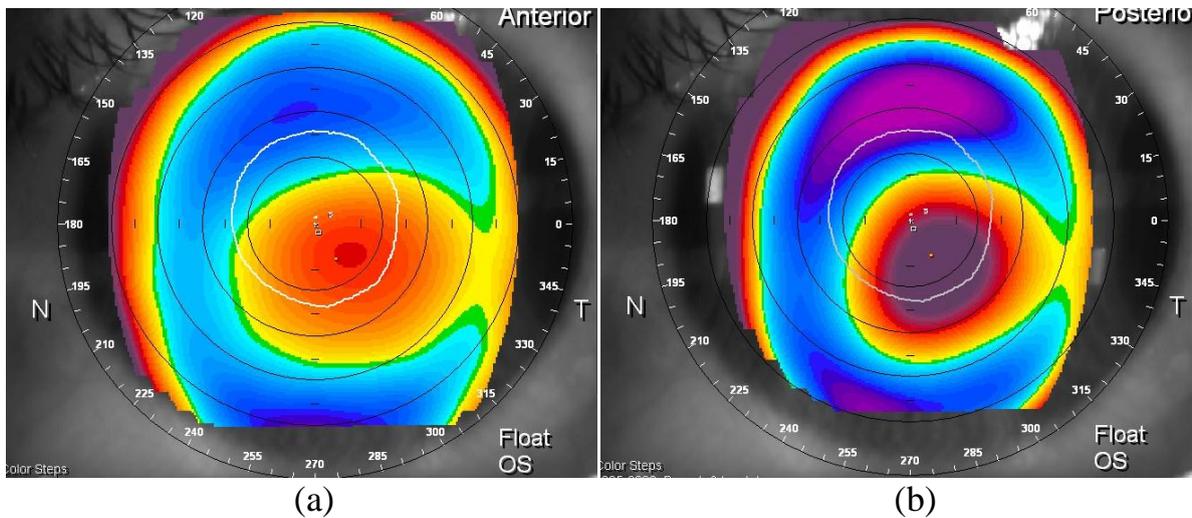


Figure 4.3: Images topographiques ; (a) : Image antérieure, (b) : Image postérieure

**3.1.1. Segmentation :**

Nous avons effectué une segmentation par seuillage automatique (Figure 4.4(a)) suivie par une ouverture surfacique (Figure 4.4(b)), après avoir transformé l'image couleur en image en niveau de gris afin d'extraire les cercles présentés en noir dans l'image originale (antérieure et postérieure).

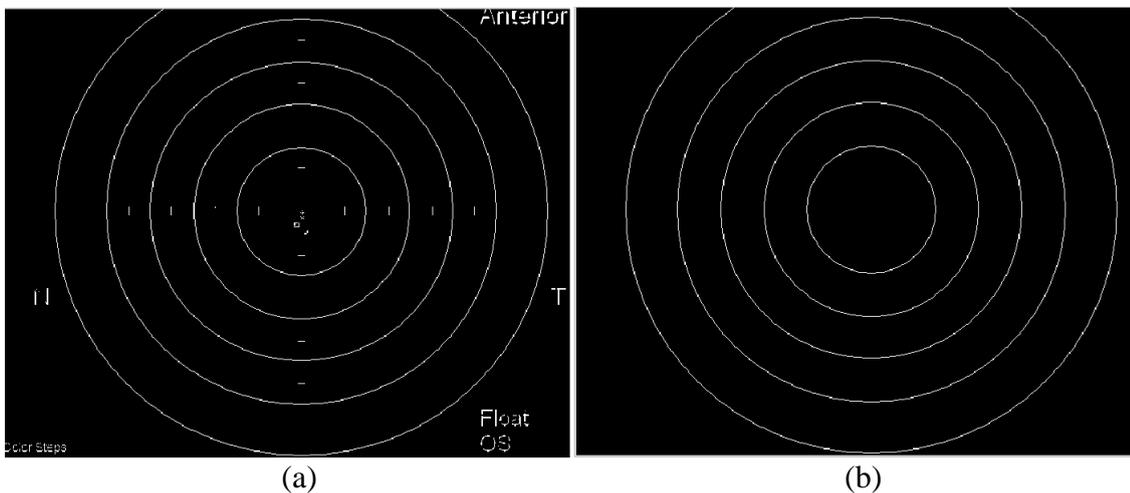


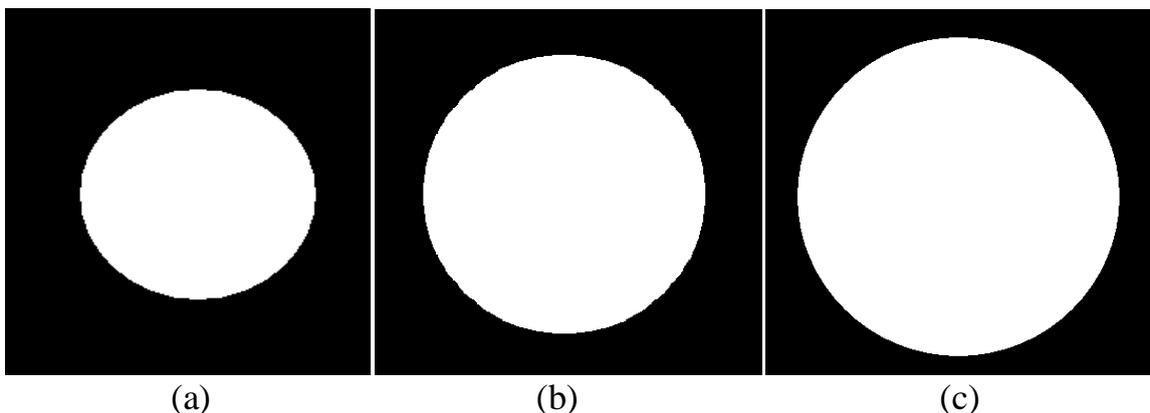
Figure 4.4: Image segmentée ;(a) Seuillage automatique, (b) : Ouverture surfacique

### 3.1.2. Caractérisation :

Pour aboutir au calcul du nombre de couleurs, nous avons passé par une caractérisation de l'image topographique.

Dans un premier lieu, une étape est destinée à l'extraction des régions d'intérêt sur lesquelles s'appuient les médecins pour interpréter la carte topographique du patient, et classer les résultats selon le degré de gravité.

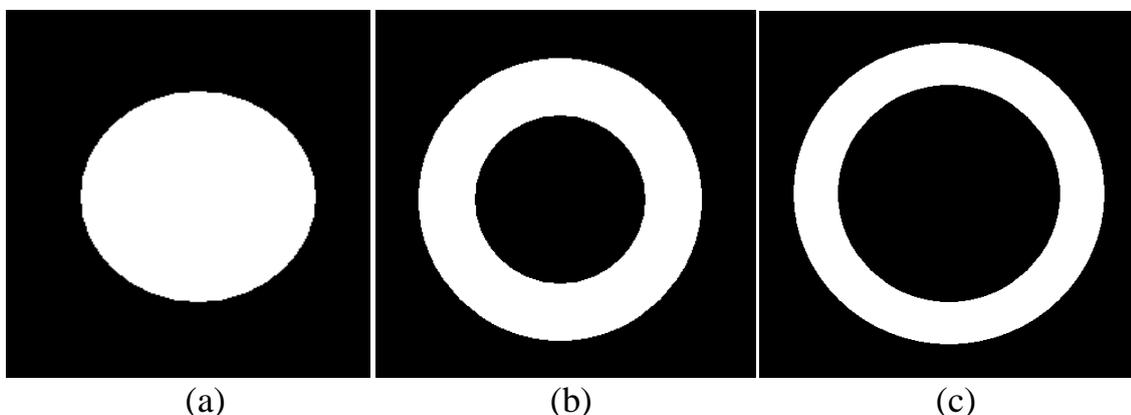
Nous avons effectué une caractérisation donnant trois images binaires contenant des disques de diamètre de cornée comme illustré dans la (Figure 4.5) suivante :



**Figure 4.5: Images binaires; (a): Cercle de 3mm, (b): Cercle de 5mm, (c): Cercle de 7mm**

En deuxième lieu, nous avons effectué un remplissage de trous, afin d'arriver à une caractérisation parfaite, puis une soustraction a été établie entre les coupes dans le but de séparer les régions:

- Entre la coupe 1 et la coupe 2 pour avoir uniquement la zone de 5mm (Figure 4.6(b)).
- Entre la coupe 3 et la coupe 2 pour avoir uniquement la zone de 7mm (Figure 4.6(c)).



**Figure 4.6: Les zones détectées; (a): Zone de 3mm, (b): Zone de 5mm, (c): Zone de 7mm**

En dernier lieu, une détermination des coordonnées du centre de gravité du cercle ayant un diamètre de 3mm est nécessaire pour effectuer la multiplication des images précédentes (Figure 4.6) avec l'image originale présentant les images antérieures et postérieures (Figure 4.3) afin d'avoir chaque région en couleur (Figure 4.7).

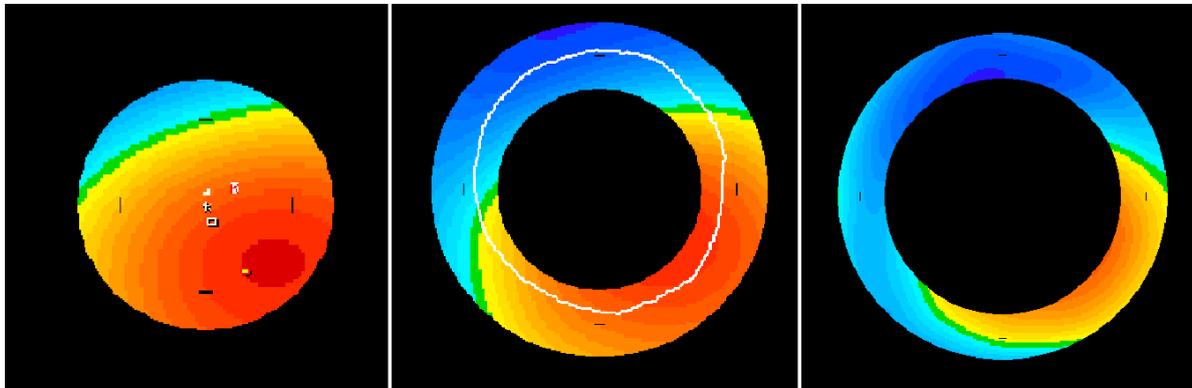
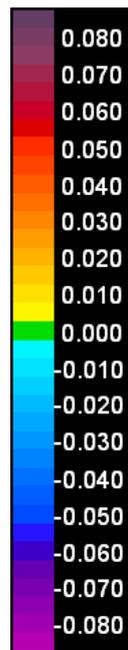


Figure 4.7: Les 3 zones d'intérêts

Après avoir acquis ces images des zones d'intérêts, l'identification des couleurs devient facile.

- **Identification des couleurs :**

Une échelle de couleur est acquise du topographe OrbscanII, est constituée de 35 couleurs (Figure 4.7) allant du froid au chaud. A l'aide du logiciel MATLAB, au début, nous avons pu identifier chaque couleur par des valeurs R, G, B. Puis, nous avons introduit ces valeurs dans une fonction qui sera utilisée par la suite pour le calcul du nombre de couleurs dans chaque région étudiée.



**Figure 4.8: Echelle de couleurs**

- **Pourcentage :**

Le pourcentage des couleurs est obtenu après avoir calculé la surface de chaque zone dans le but d'obtenir le nombre de pixels présents dans l'image et pouvoir séparer les pixels de couleurs similaires.

Ensuite, nous avons divisé l'échelle en six (06) intervalles (Figure 4.9):

- ❖ Intervalle 1 : Les couleurs très chaudes.
- ❖ Intervalle 2 : Chaudes.
- ❖ Intervalle 3 : Moins chaudes
- correspondent à des formes de cornée « montées ».
  - ❖ Intervalle 4: Les couleurs normales.
- reflètent ce qui est plat c'est le niveau zéros.
  - ❖ Intervalle 5 : Les couleurs froides.
  - ❖ Intervalle 6 : Très froides
- représentent un aspect descendant de forme.

La détection du nombre de couleurs est importante mais pour avoir plus de précision, il faut déterminer le pourcentage d'appartenance de ces couleurs aux intervalles déterminés à partir de l'échelle afin de pouvoir classer le degré de gravité du kératocône.

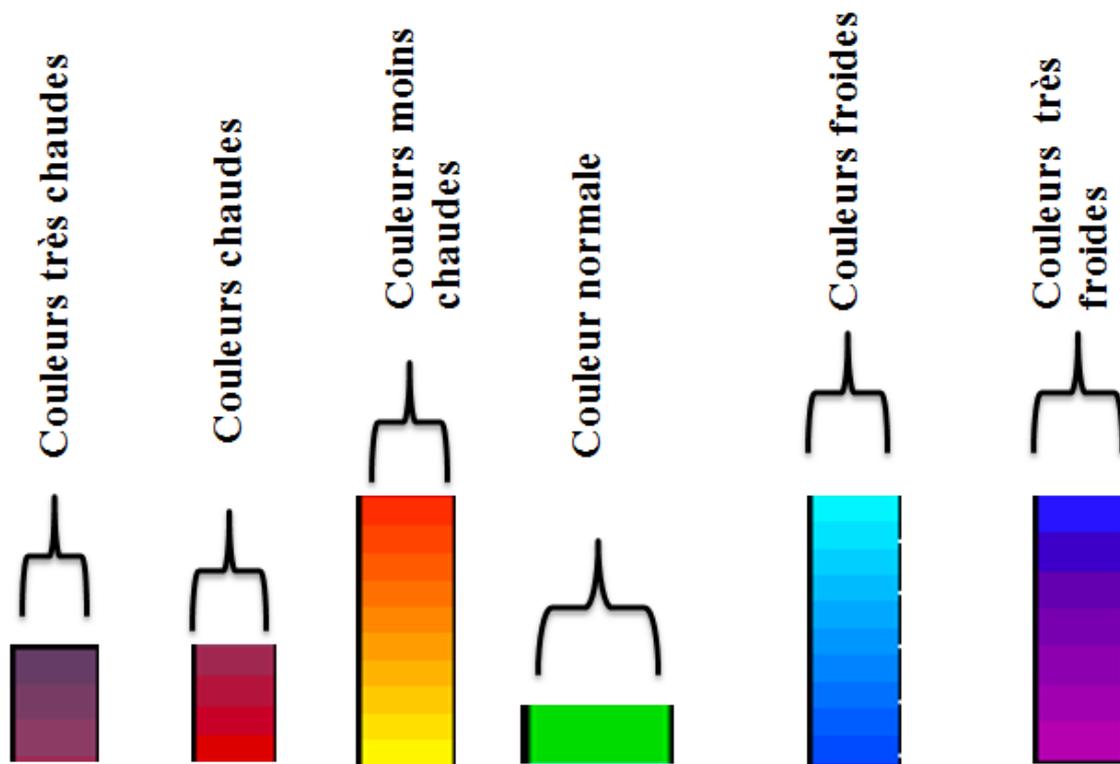


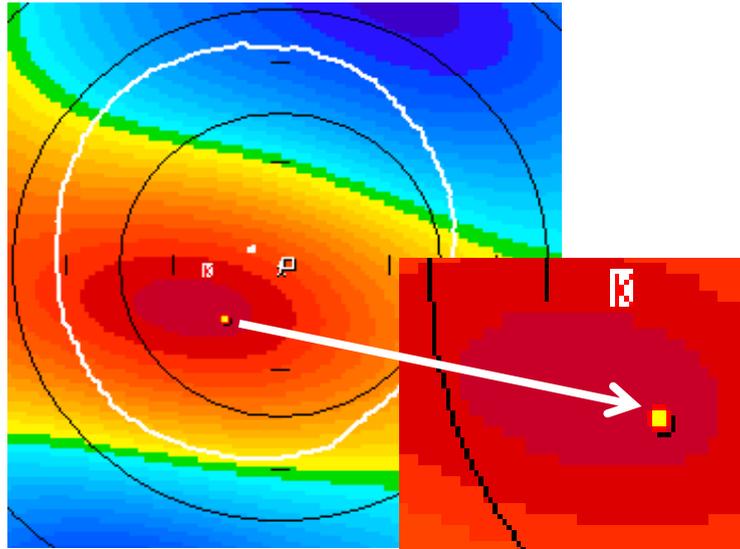
Figure 4.9: Intervalles de classification des couleurs

Le pourcentage se calcule en comparant le nombre de pixels appartenant à chaque intervalle dans une région avec la surface totale de la même région.

- **Détection du point le plus fin:**

Le point le plus fin de la cornée est un élément important dans la prévision du kératocône. Pour repérer ce point, nous avons calculé les coordonnées du centre de gravité de la zone de 3mm. Ensuite nous avons localisé l'emplacement du point le plus fin représenté dans la carte topographique en couleur unique (Figure 4.10) qui a des valeurs RGB différentes que celle de l'échelle ce qui nous a permis de sélectionner ses coordonnées.

Nous avons terminé par le calcul de la distance entre le centre de gravité et le point le plus fin afin d'indiquer si le point le plus fin est centré ou non.



**Figure 4.10: Détection du point le plus fin**

### **3.2. Images de kératométrie axiales :**

Les images de la kératométrie axiale prélevés du quadmaps, offre un autre outil pour le diagnostic du kératocône, de sorte que l'axe bleu représente ce qui est creux, et l'axe rouge représente ce qui est bombé.

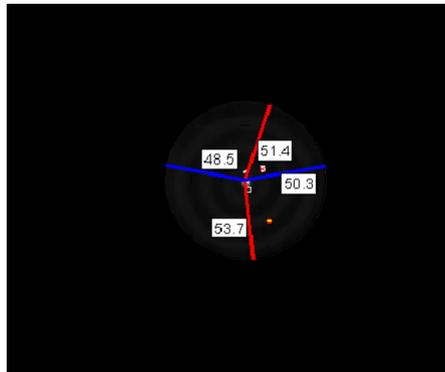
Dans le but d'extraire les 2 axes présents dans l'image de la kératométrie axiale (Figure 4.11), nous avons utilisé la morphologie mathématique, la caractérisation qu'on va les définir comme suit.



**Figure 4.11: Image de kératométrie axiale**

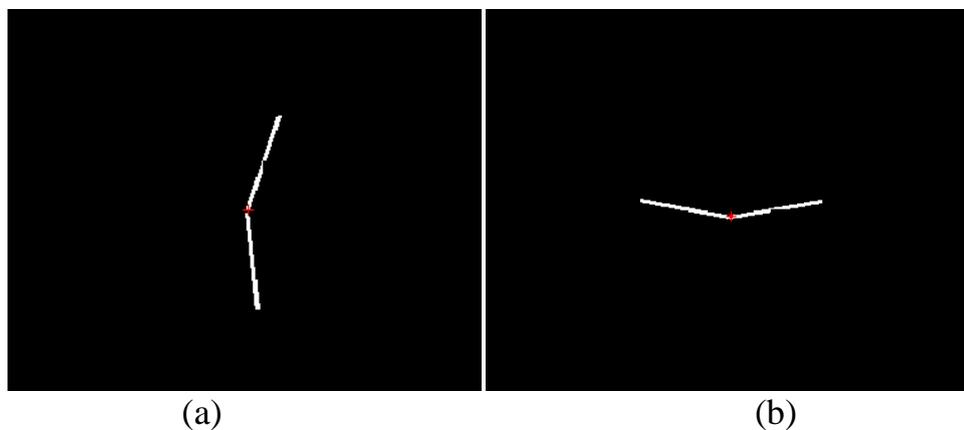
### 3.2.1. Caractérisation :

Dans cette section nous avons tout d'abord détecté la région de 3mm en effectuant une multiplication entre l'image de kératométrie axiale et l'image binaire de 3mm. Le traitement se fait seulement sur cette région (Figure 4.12) parce qu'elle donne plus d'informations.



**Figure 4.12: La région de 3mm de la kératométrie axiale**

Ensuite, nous avons détecté les deux axes rouge et bleu, chacun dans une image par identification des couleurs, suivis d'une ouverture surfacique pour garder uniquement les axes (Figure 4.13).



**Figure 4.13 : Détection des axes ;a) Ouverture surfacique Axe rouge, (b) Ouverture surfacique Axe bleu**

Après avoir pris les images de chaque axe, nous avons divisé ces derniers en quatre quadrants de même taille dans le but de les localiser, cette étape consiste à calculer les coordonnées du centre et la taille de l'image.

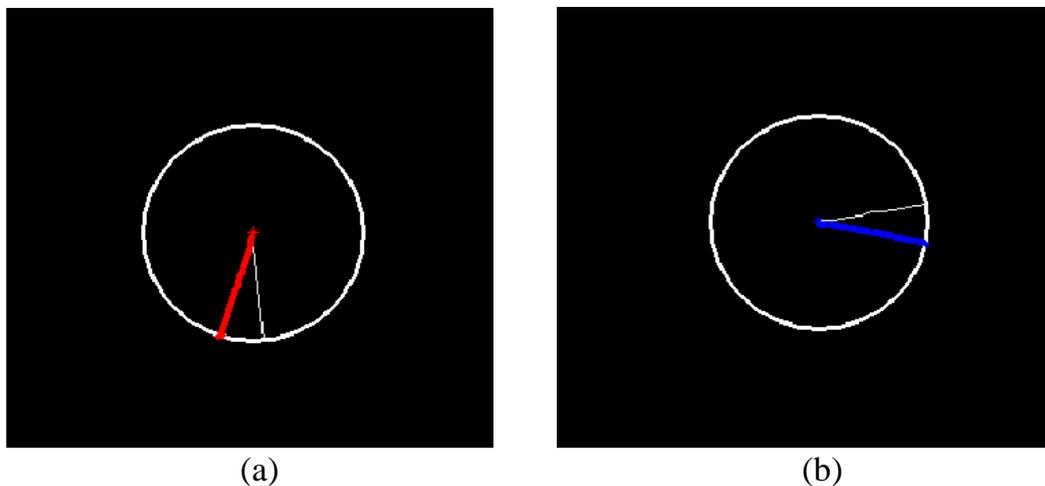
Nous avons appliqué une inversion sur chaque quadrant par utilisation d'une boucle sélective pour choisir et inverser le quadrant qui contient la moitié de l'axe.

Enfin, nous avons effectué une superposition du quadrant inversé sur la coupe contenant l'autre moitié de l'axe, en ajoutant le contour du cercle de 3mm calculé.

### 3.2.2. Morphologie mathématique :

Dans la phase de superposition citée dans le paragraphe précédent, nous avons introduit des outils de morphologie mathématique, dont nous avons utilisé la squelettisation des axes pour obtenir la largeur d'un seul pixel.

Ensuite, plusieurs dilatations ont été appliquées sur les axes, la moitié des axes et le contour (Figure 4.14) pour pouvoir calculer la distance entre les deux points d'intersection de la moitié de l'axe sélectionnée et celle inversée avec le contour dans le but de tester la symétrie par rapport au centre de gravité de l'image.



**Figure 4.14: Résultat d'étude de symétrie des axes; (a): Superposition rouge, (b): Superposition bleu**

### 3.3. Résultats et interprétations du traitement d' image:

Dans ce mémoire nous avons étudié plusieurs cas atteint du kératocône, des cas sains dans le but de détecter la maladie automatiquement et faire une comparaison entre les résultats obtenus pour arriver à une interprétation finale.

#### ➤ Cas sain :

Dans cette partie, nous avons traité les images topographiques (Figure 4.15) d'un cas sain, en représentant les résultats calculés dans les tableaux ci-dessous.

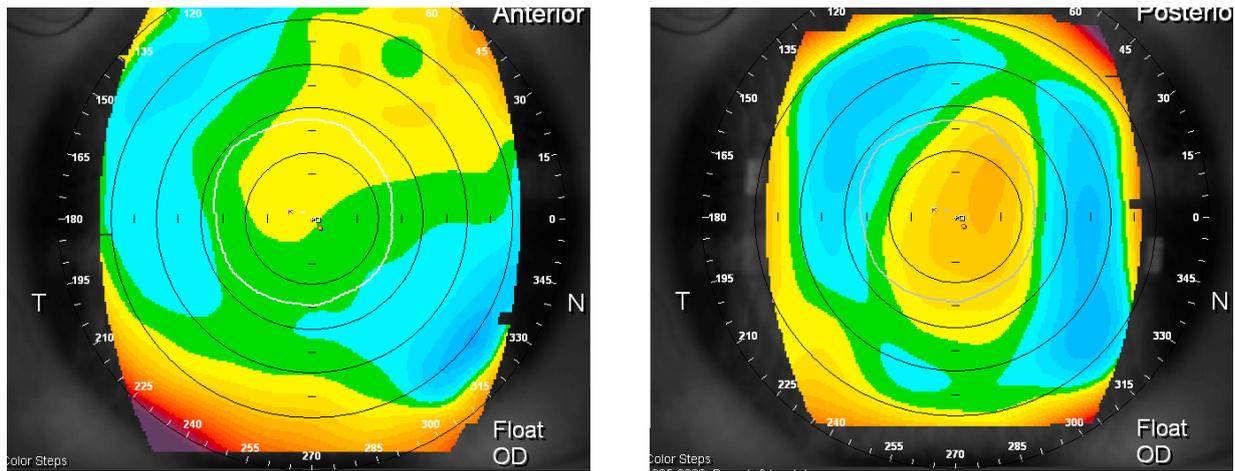


Figure 4.15: Carte topographique d'un patient sain

Images		3 mm							
		Pourcentages							
		Nombre De couleurs Automatique	Nombre De couleurs Manuel	Très chaud %	chaud %	Moins chaud %	normal %	Froid %	Très froid %
Image	Antérieure	1	1	0	0	48.23	48.42	0	0
	Postérieure	4	5	0	0	96.15	0.50	0	0

Tableau 4.9: Résultats des couleurs dans la zone de 3mm

Images		5 mm							
		Pourcentages							
		Nombre De couleurs Automatique	Nombre De couleurs Manuel	Très chaud %	chaud %	Moins chaud %	normal %	Froid %	Très froid %
Image	Antérieure	2	2	0	0	28.92	51.66	12.67	0
	Postérieure	7	7	0	0	49.47	19.22	24.69	0

Tableau 4.10: Résultats des couleurs dans la zone de 5mm

Images		7 mm						
		Pourcentages						
		Nombre De couleurs Automatique	Très chaud %	chaud %	Moins chaud %	normal %	Froid %	Très froid %
Image	Antérieure	3	0	0	20.20	36.00	41.58	0
	Postérieure	5	0	0	6.18	24.68	66.93	0

Tableau 4.11: Résultats des couleurs dans la zone de 7mm

Les trois tableaux précédents montrent, d'une part la partie automatique dont nous avons cité le nombre de couleurs, le pourcentage avec ces 6 intervalles (très chaud, chaud, moins

chaud, normale, froid, et très froid) des 3 régions; 3mm, 5mm, et 7mm, et d'autre part une colonne contienne le nombre de couleurs acquis manuellement. Pour la zone de 7mm, nous n'avons pas calculé le nombre de couleurs manuellement pour tous les cas étudiés car les médecins ophtalmologues n'utilisent pas cette région pour la raison de l'emplacement du kératocône dans la majorité des cas dans le centre de la cornée.

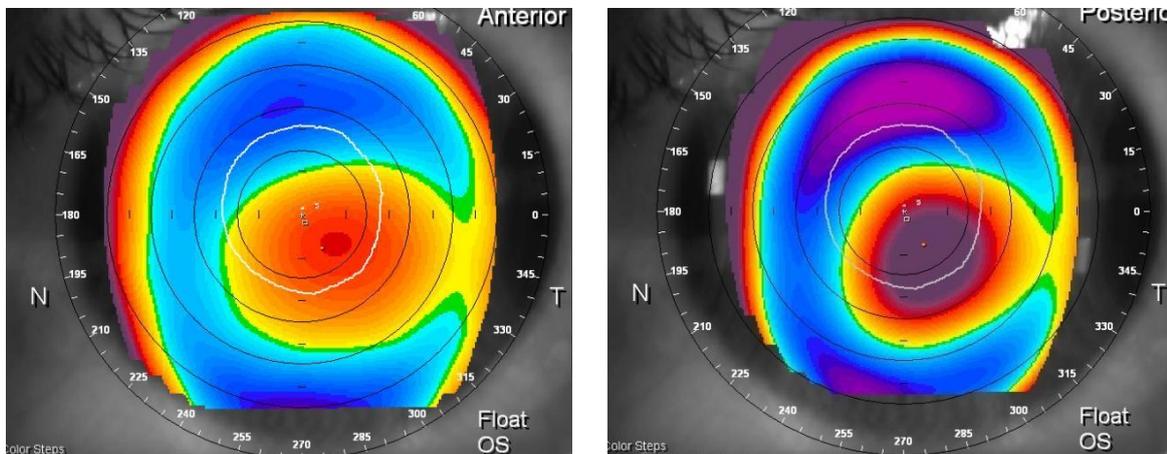
Etude des axes			Etude du point le plus fin	
Décalage des Axes (pixel)		Décision	Distance entre le point le plus fin et le centre (pixel)	Décision
Rouge	5.5902	Symétrique		
Bleu	51.4933	Non symétrique	14,8408	Centré

**Tableau 4.12: Résultats des axes et du point le plus fin**

La distance du point le plus fin ainsi que la distance calculée des axes rouge et bleu sont représentées dans le tableau, en compagnie avec leurs seuils pour la décision.

➤ **Cas pathologique :**

Les images ci-dessous représentent la topographie cornéenne des deux faces antérieures et postérieures d'un patient malade. Les tableaux suivant (Tableau 4.13, Tableau 4.14, Tableau 4.15 et Tableau 4.16) contiennent les résultats quantitatifs des traitements effectués.



**Figure 4.16: Carte topographique d'un patient malade**

Images		3 mm							
		Pourcentages							
		Nombre De couleurs Automatique	Nombre De couleurs Manuel	Très chaud %	chaud %	Moins chaud %	normal %	Froid %	Très froid %
Image3	Antérieure	16	17	0	4.65	75.95	3.69	12.41	0
	Postérieure	25	25	30.58	13.24	30.68	3.10	19.11	0

**Tableau 4.13 : Résultats des couleurs dans la zone de 3mm.**

Images		5 mm							
		Pourcentages							
		Nombre De couleurs Automatique	Nombre De couleurs Manuel	Très chaud %	chaud %	Moins chaud %	normal %	Froid %	Très froid %
Image3	Antérieure	21	21	0	0	48.20	3.23	41.34	0.83
	Postérieure	32	32	14.88	10.58	16.28	1.44	23.72	26.83

**Tableau 4.14: Résultats des couleurs dans la zone de 5mm.**

Images		7 mm						
		Pourcentages						
		Nombre De couleurs Automatique	Très chaud %	chaud %	Moins chaud %	normal %	Froid %	Très froid %
Image3	Antérieure	19	0	0	28.96	3.90	63.96	0.96
	Postérieure	28	0	0.87	23.80	4.38	43.58	25.15

**Tableau 4.15: Résultats des couleurs dans la zone de 7mm.**

Le traitement des trois régions d'intérêts dans la cornée antérieure et postérieure, nous a aboutis aux résultats présentés dans les tableaux précédents en donnant le nombre de couleurs manuelle et automatique, et le pourcentage avec ses six phases.

Etude des axes			Etude du point le plus fin	
Décalage des Axes(pixel)		Décision	Distance entre le point le plus fin et le centre (pixel)	Décision
Rouge	31,5462	Non symétrique		
Bleu	27,5045	Non symétrique	48,7647	Non centré

**Tableau 4.16 : Résultats des axes et du point le plus fin**

D'après les tableaux ci-dessus, nous avons pu remarquer que globalement les résultats sont différents précisément dans la répartition des couleurs dans différentes régions de l'image antérieure et l'image postérieure. Nous avons aussi constaté que la distance du point le plus fin par rapport au centre de gravité diffère d'un cas sain à un cas pathologique ainsi que la symétrie des axes rouge et bleu étudiée.

Dans le cas normal, d'une part, le nombre de couleurs est réduit ce qui indique peu de déformations de la cornée par rapport à un cas atteint du kératocône qui en présente beaucoup. D'autre part, les domaines d'appartenance des couleurs présents dans les images topographiques sont répartis différemment ; où le pourcentage est élevé dans les intervalles normaux, moins chauds, et froids et nulle dans les autres chez un sujet sain contrairement au

sujet malade qui touche tous les intervalles avec une dominance remarquable dans ceux qui contiennent les couleurs chaudes et très chaudes. Ces résultats donnent des informations sur le degré de gravité du kératocône.

La localisation du point le plus fin de la cornée a été déterminé par le calcul de la distance entre ce dernier et le centre de l'image ; Pour cela, nous avons classé les images selon les cas sains et pathologiques par ordre croissant de la valeur de la distance entre le point le plus fin et le centre de l'image, puis nous avons pris la valeur maximale de cette distance chez les sujets sains, et minimale chez les sujets atteints du kératocône. En faisant la moyenne entre ces deux valeurs nous avons déterminé le seuil (Seuil=19 pixels) pour tester le centrage du point le plus fin.

Dans les images de kératométrie axiale, l'étude de la symétrie des deux axes significatifs par rapport au centre a engendré la détermination d'un seuil à partir des distances calculées automatiquement où nous avons rangé les axes symétriques et ceux asymétriques respectivement en prenant en considération le classement croissant de la valeur du décalage afin de détecter le seuil indiquant le changement de l'état symétrique vers l'état asymétrique :

- Pour l'axe bleu : si le décalage est inférieur à 26.0711 pixels → Axe bleu symétrique.  
Sinon → Axe bleu asymétrique.
- Pour l'axe rouge : si le décalage est inférieur à 21.2704 pixels → Axe rouge symétrique.  
Sinon → Axe rouge asymétrique.

#### **3.4. Classification de la base d'images :**

Les résultats obtenus par le traitement d'images ont été introduit dans une nouvelle base de données contenant comme attributs les types d'images (antérieure ou postérieure), les nombres de couleurs calculés automatiquement dans les zones étudiées ainsi que les pourcentages des intervalles contenant les couleurs très chaudes, moins chaudes, chaudes, normal, froides et très froides. De plus, la distance d'asymétrie des axes rouge et bleu et celle du décalage du point le plus mince de la cornée. Ces paramètres ont subi une étape de classification dont nous avons suivi les mêmes démarches de la partie précédente de classification, le tableau suivant résume les résultats expérimentaux.

Classifieur	TC %	FN
K-NN	66,82	8
C4 .5	64,09	8
MLP	67,27	14

**Tableau 4 .17 : Tableau récapitulatif des classifieurs**

Nous pouvons remarquer à partir du tableau récapitulatif que la technique MLP a une bonne prédiction par rapport aux deux autres algorithmes. Le K-NN n'est pas loin derrière.

#### **4. Classification de la combinaison des deux bases de données :**

Pour donner plus de valeur à notre travail et acquérir de bons résultats, nous avons créé une troisième base de données qui rassemble la base numérique de classification composée de 22 attributs cités dans le chapitre précédent, ainsi que les paramètres utilisés dans la base d'images, dans le but de l'évaluer en utilisant plusieurs approches dont les résultats sont illustrés dans le Tableau 4.18.

Classifieur	TC %	FN
K-NN	84,67	4
C4 .5	86,33	4
MLP	83	5

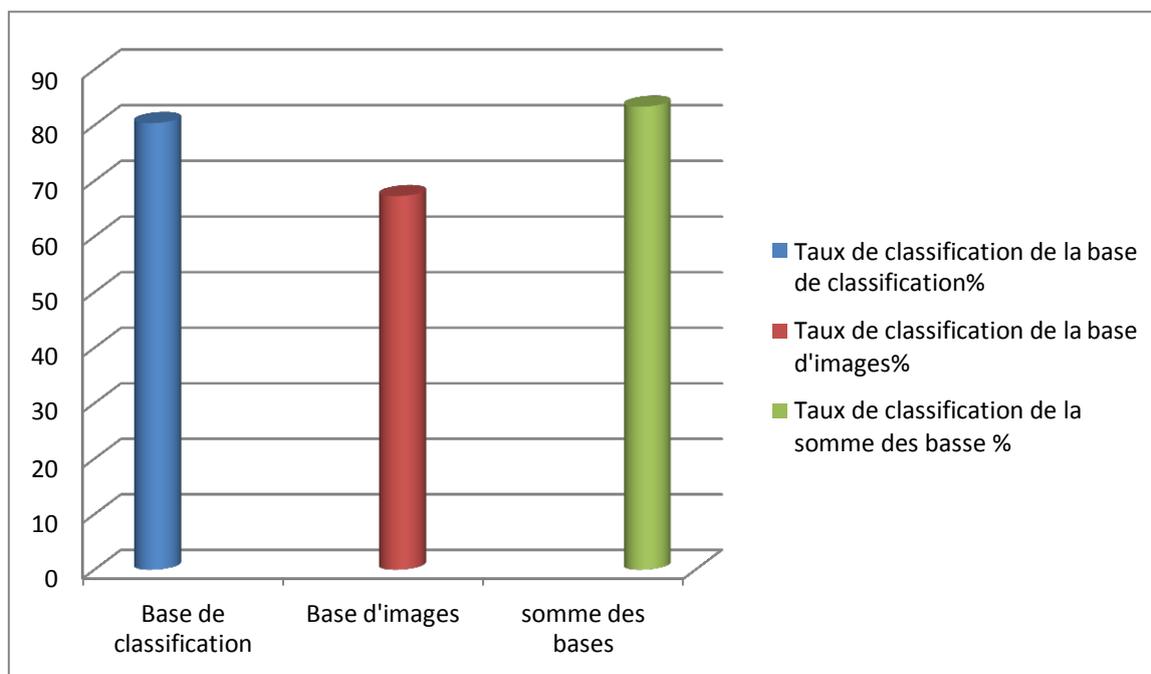
**Tableau 4 .18 : Résultats de différents classifieurs**

Nous pouvons distinguer à partir du Tableau 4.18 que la technique d'arbre de décision C4.5 a une bonne prédiction par rapport aux deux autres algorithmes avec un TC=86,33%. Le réseau de neurone multicouche MLP vient en second position. La matrice de confusion pour ce meilleur test est comme suit :

C4 .5				
	Présence d'un kératocône	Absence d'un kératocône	Suspicion d'un kératocône	Total
Présence d'un kératocône	46	2	4	52
Absence d'un kératocône	1	59	9	69
Suspicion d'un kératocône	4	5	20	29
Total	51	66	33	150

**Tableau 4.19: Matrice de confusion du meilleur résultat**

Le rassemblement des deux bases de données, nous a orienté à faire une comparaison de taux de classification entre tous les résultats réalisés auparavant.



**Figure 4.17: Résultats de classification des trois bases utilisées**

Nous constatant dans la Figure 4.17 que le taux de classification de la somme des bases est plus important que celui des deux autres bases vue qu'elle contient un nombre d'attribut plus élevé ce qui permet de déduire une précision remarquable.

##### **5. Interprétation générale :**

D'après les algorithmes du traitement d'images et de classification testés sur la BDD, nous avons remarqué que ces deux méthodes sont complémentaires pour pouvoir prendre une décision finale.

Les performances des systèmes d'apprentissage dépendent des caractéristiques de base de donnée (taille, nombre d'attributs...etc).

L'avantage des méthodes du traitement d'images est de porter plus de détails au médecin ophtalmologue.

Dans le domaine médical, on cherche avant tout à éviter les faux négatifs, pour ne pas aggraver l'évolution de la pathologie.

Finalement on peut dire que les résultats que nous avons trouvés à partir de ces méthodes sont satisfaisants pour la détection des maladies du kératocône.

**6. Interface graphique :**

A l'aide de l'outil de traitement MATLAB, nous avons développé une interface graphique regroupant les techniques de traitement d'images citées précédemment.

Cette interface présente une aide au diagnostic pour les médecins ophtalmologues dans le but de la détection automatique du kératocône en réalisant des boutons qui facilite sa manipulation :

- ANTERIEURE / POSTERIEURE : permet de charger l'image de la coupe antérieure / postérieure de la topographie cornéenne.
- La partie gauche de l'interface contient des panels qui correspondent aux paramètres de la coupe antérieure notamment la segmentation des régions pertinentes (celles du 3 mm, 5 mm et 7mm) et le nombre de couleurs dans chacune ainsi que le pourcentage de chaque intervalle.
- La partie droite de l'interface contient les mêmes panels que la partie gauche mais qui correspondent à la coupe postérieure.
- Un bouton est réalisé pour le calcul de la distance entre le centre de l'image et le point le plus fin, puis comparer la distance trouvée avec le seuil déterminé dans le but d'afficher un résultat automatique si le point est centré ou décentré.
- Enfin, pour étudier la kératométrie axiale, nous avons segmenté uniquement la partie de 3mm qui est la région utilisée par les médecins, et affiché le décalage par un nombre de pixels signifiant la symétrie en faisant une comparaison de ce dernier avec le seuil choisi précédemment.

Dans le cas des patients atteints du kératocône, un contrôle pour vérifier l'évolution de la maladie est nécessaire, ce qui nous a menés à réaliser une deuxième interface identique à la première dans laquelle l'expert doit introduire les images topographiques du nouvel examen pour obtenir les nouveaux résultats. Ensuite, la troisième interface permet d'étudier les différences entre les deux examens afin de déduire s'il s'agit d'un kératocône évolutif ou stationnaire.

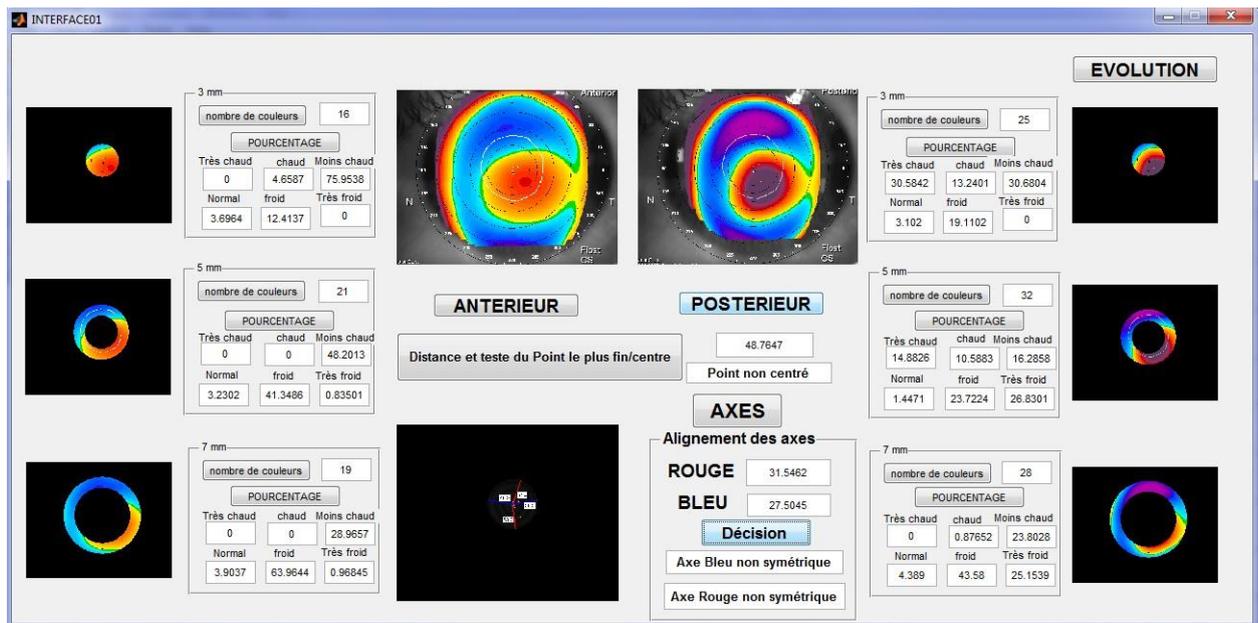


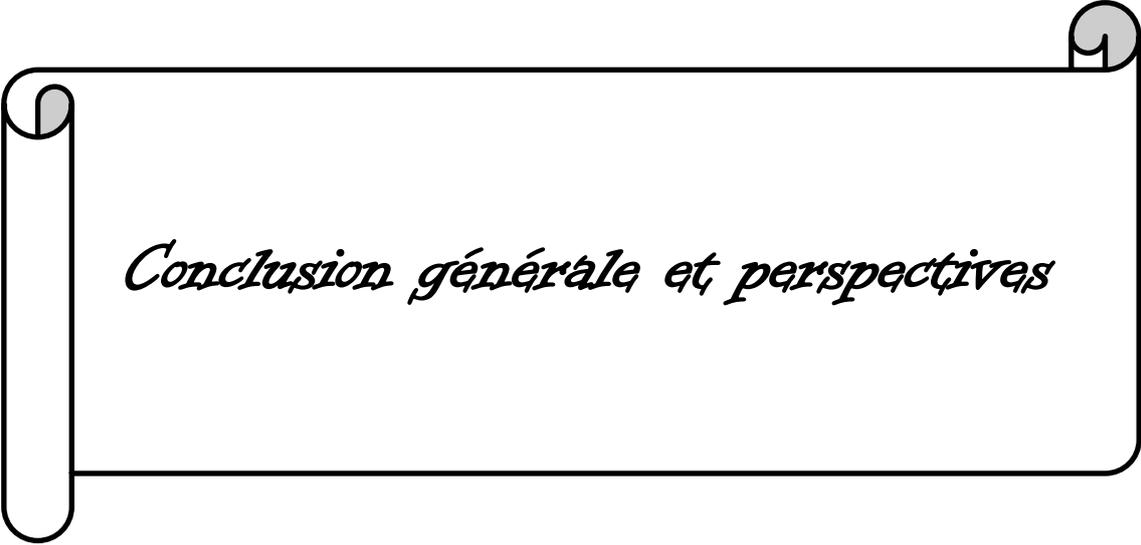
Figure 4.18: Interface graphique

**7. Conclusion :**

Dans ce dernier chapitre, nous avons testé les résultats de la classification de la base de données numériques par le calcul du taux de classification et la matrice de confusion. Les résultats trouvés prouvent la robustesse et la performance des différentes approches que nous avons mises en place (K-NN, MLP, C4.5).

Les paramètres pertinents résultants de la classification ont guidé la phase de segmentation et de caractérisation des images de la base de données en utilisant le nombre de couleurs, le pourcentage, le centrage du point le plus fin et la symétrie des axes.

Nous avons conclu ce chapitre, par un simple test de classification de la base d'images munies des résultats du traitement, ainsi que la combinaison des trois bases.



*Conclusion générale et perspectives*

# Conclusion générale et perspectives

---

## Conclusion générale et perspectives

Le kératocône est une maladie d'actualité délicate qui touche la partie oculaire de l'œil qui est la plus sensible, dont le diagnostic précoce reste difficile et très important.

Tout un ensemble de recherches a été réalisé dans la littérature, pour développer des systèmes d'aide au diagnostic afin de relever ce problème.

Dans ce modeste travail, nous avons présenté une étude sur les données et les images de la topographie cornéenne, nos efforts ont été dirigés vers le traitement et la détection automatique du kératocône, pour répondre aux besoins des médecins. Le système d'aide au diagnostic que nous avons proposé est basé sur des techniques intelligentes contenant deux parties.

Dans la première partie, nous avons appliqué une classification des paramètres numériques avec plusieurs approches, à savoir les K plus proches voisins (KNN), l'Arbre de décision C4.5, et le Réseau de neurone multi couches (MLP), dont nous avons testé leurs performances de prédiction avec le taux de classification et la matrice de confusion. Ensuite nous avons utilisé la technique de sélection « Ranking » afin de détecter les paramètres ayant plus de pertinence sur la détection du kératocône.

La deuxième partie de traitement d'images vient après la sélection des valeurs pertinentes notamment le nombre de couleurs, centrage du point le plus mince et la symétrie des axes.

Les images topographiques ont subi un enchaînement de procédure tel que la segmentation des régions d'intérêt dans lesquelles nous avons caractérisé les couleurs, l'emplacement du point le plus fin et étudié les axes.

Enfin, les résultats trouvés sont satisfaisants, ce qui nous a permis de déduire, que le jumelage de ces deux techniques de traitements a abouti à une décision bonne et convaincante.

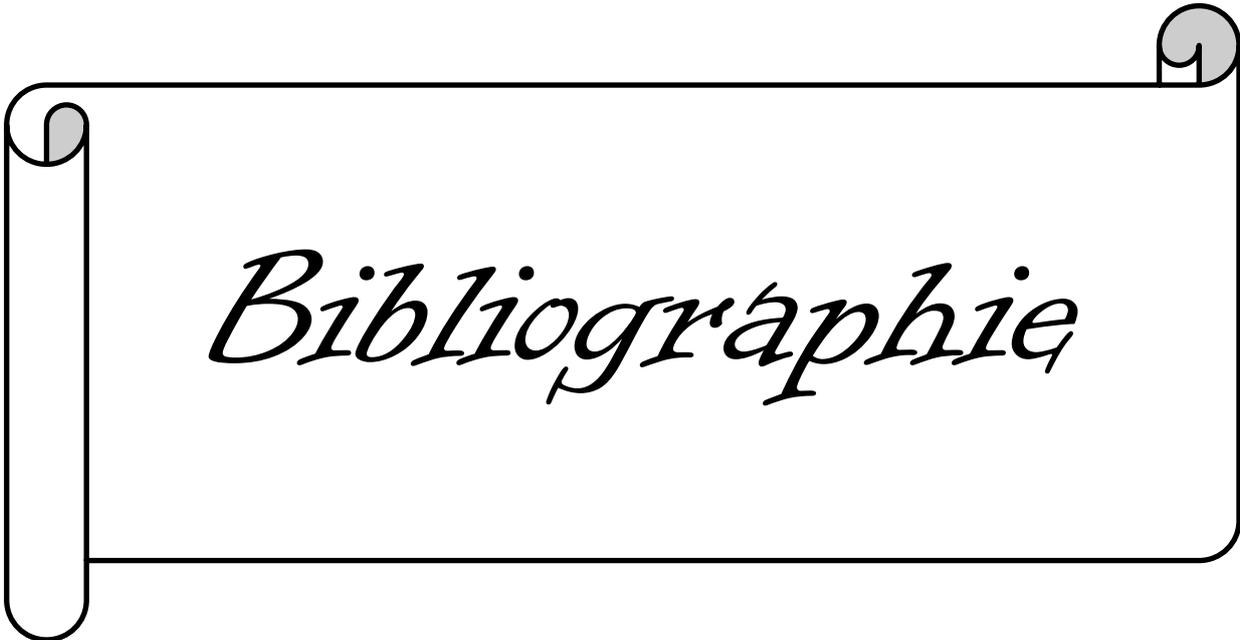
Bien évidemment, ce projet de fin d'étude laisse la place à de futurs travaux. De façon similaire au découpage auquel nous avons eu recours dans ce manuscrit, les perspectives suscitées par un tel travail concernent les applications dans le cadre de la détection automatique du kératocône, d'autres études complémentaires devraient être menées à développer prochainement les éléments suivants :

- Élargir la base de données en récoltant plus de sujets à traiter pour avoir une variété de cas ce qui donne plus de robustesse à l'étude des paramètres validés par les experts.

## Conclusion générale et perspectives

---

- Trouver une solution pour avoir l'accès direct aux images de topographie cornéenne afin d'éviter la perte de données et effectuer les traitements sur les images originales.
- Utiliser d'autres modèles de classifieurs permettant de choisir la technique de classification la plus fiable à une telle base de données.
- Utiliser d'autres techniques de sélection de variables.



*Bibliographie*

# Bibliographie

---

## Bibliographie

- [1] G. Muller; « Œil et travail surveillance et prévention dans un service médical ». Mémoire de la capacité de médecine en santé au travail et de prévention des risques professionnels. Université René Descartes, **2004-2005**.
- [2] D. Gatinel, A. Saad; « Détection automatisée du kératocône fruste avec l'Orbscan ». Fondation Rothschild, Centre d'Expertise et de Recherche en Optique Clinique (CEROC), **2011**.
- [3] D. Gatinel; « Evoquer et dépister un kératocône débutant ». Réalités ophtalmologiques, **2013-2014**.
- [4] C. Martel; « Le kératocône ». Association des optométristes du Québec. Clinique optométrique, **2014**.
- [5] A.M. Bourdiol, A. Bron, P. Amalric; « Le kératocône ». Encyclopédie de la vue, SNOF, **2012**.
- [6] J. Nottingham; « Practical observations on conical cornea: and on the short sight, and other defects of vision connected with it ». John Churchill, **1854**.
- [7] L. Sorbara, OD, MSc, FAAO. « Correction du Kératocône avec des Lentilles RPG ». Clinique Scientifique. Université de Waterloo, **2012**.
- [8] J. L. Arné ; « Kératocône ». *EMC-Ophtalmologie*, 2(4), 252-263 **2005**.
- [9] J. Colin, F. Malecaze; « Kératocône ». Encyclopédie Orphanet Grand Public, **2007**.
- [10] « Les causes du kératocône ». Fondation canadienne du kératocône. **2015**
- [11] D. Neucli; « L'opération du kératocône ». Hôpitaux Universitaires de Genève, **2012**.
- [12] D. Gatinel; « Qu'est-ce qu'un kératocône fruste ». Fondation Rothschild, **2013**.
- [13] M. Assouline; « Les formes plus inhabituelles de kératocône ». Centre Iena Vision Paris, **2015**.
- [14] D. Gatinel; « Topographie cornéenne ». Fondation Rothschild, **2014**.
- [15] A. Haddeji; « Construction d'un Atlas 3D numérique de la cornée humaine par recalage d'images ». Mémoire de maîtrise en informatique. Université de Montréal, **2013**.
- [16] F. Malecaze, J. Colin, D. Touboul, D. Gatinel. « Diagnostic et méthodes d'examen ». Association kératocône, **2011**.
- [17] « Les traitements du kératocône ». Fondation canadienne du kératocône. **2015**.
- [18] J. P. Cocquerez, S. Philipp; « Analyse d'Images : filtrage et segmentation ». 457, **1995**.
- [19] A. Trémeau, C. Fernandez-Maloigne, P. Bonton. « Image numérique couleur: de l'acquisition au traitement ». *DUNOD*, 2(10), 006843, **2004**.
-

# Bibliographie

---

- [20] A. Capri; «Caractérisation des objets dans une image en vue d'une aide à l'interprétation et d'une compression adaptée au contenu: application aux images échographiques ».Thèse de doctorat, Université d'Orléans, **2007**.
- [21] F. Pillou; « Traitement d'images ». Comment ça marche, **2015**.
- [22] C. Durosier, C. Boudry; « Segmentation des images ». Ecole des Chartes. URFIST de Paris, **2000**.
- [23] A. Feroui; « Traitement automatique d'image fond d'œil ». Mémoire de magister. Université de Tlemcen, **2009**.
- [24] H. Talbot; « Introduction à la Morphologie Mathématique Théorie et applications », **2011**.
- [25] A. Manzanera; « Cours de Morphologie Mathématique ». ENSTA/LEI Paris techniques, 49-54, **2005**.
- [26] : Philippe foucher : Reconnaissance de caractères.
- [27] P. Borne, M. Benrejeb, J. Haggège ; « Les réseaux de neurones ». Editions THECHNIP, **2007**.
- [28] Y. Guermeur, H. Paugam-Moisy; « Théorie de l'apprentissage de Vapnik et SVM ». Support Vector Machines, Apprentissage automatique, 109–138, **1999**.
- [29] F. Chamroukhi; « Classification supervisée: Les K-plus proches voisins ». Licence 2 Sciences Pour l'Ingénieur. Université du Sud Toulon – Var, **2012-2013**.
- [30] R. Rakotomalala; « Arbres de Décision ». Revue Modulad , 163-187, **2005**.
- [31] P. Agostino Accardo, S. Pensiero; « Neural network-based system for early keratoconus detection from corneal topography ». Journal of Biomedical Informatics, 35(3), 151–159, **2002**.
- [32] H. Bagherinia, X. Chen, C. Flachenecker, R. Angeles, D. Burger, P. Caroline, J. Dishler, D. Tanzer, D. Schanzlin, K. Reeder; « Support Vector Machine (SVM)-Based Classification of Corneal Topography ». Investigative Ophthalmology & Visual Science, 49(13), 1023-1023, **2008**.
- .

# Bibliographie

---

- [33] M. B. Souza, F.W. Medeiros; D.B. Souza; R. Garcia et M. R. Alves; «Evaluation of machine learning classifiers in keratoconus detection from orbscan II examinations». *Clinics*, 65 (12) ,1223-1228, **2010**.
- [34] M. C. Arbelaez, F. Versaci, G. Vestri, P. Barboni, G. Savini; «Use of a Support Vector Machine for Keratoconus and Subclinical Keratoconus Detection by Topographic and Tomographic Data». *Ophthalmology*. 119( 11), 2231–2238, **2012**.
- [35] M. D. Twa, S. Parthasarathy, M. A. Bullimore, C. Roberts, A. M. Mahmoud, Tom Raasch and D. j. Schanzlin; « Automated decision tree classification of keratoconus from videokeratography». *Investigative Ophthalmology and Vision Science*, E-Abstract, 1082, 46, **2000**.
- [36] X. Li, H. Yang, S. Yaron, « Keratoconus: Classification scheme based on videokeratography and clinical signs» .*journal of cataract & Refractive surgery*, 35(9), 1597-1603, **2009**.
- [37] O. Sandali, M. El Sanharawi, C. Temstet, A. Galan, W. Ghouali, I. Goemaere, E. Basli, V. Borderie, L. Laroche ;«Fourier-Domain Optical Coherence Tomography Imaging In Keratoconus :a Corneal Structural Classification» .*Ophthalmology*, 120(12), 2403–2412, **2013**.
- [38] J. Anastasios ,K. Poulos, G. Asimellis ; «Revisiting keratoconus diagnosis and progression classification based on evaluation of corneal asymmetry indices, derived from Scheimpflug imaging in keratoconic and suspect cases». *Clinical Ophthalmology*, 7, 1539–1548, **2013**.
- [39] K. Kamiya, R. Ishii, K. Shimizu , A. Igarashi; «Evaluation of corneal elevation pachymetry and keratometry in keratoconic eyes with respect to the stage of Amsler-Krumeich classification». 98(4), 459-63, **2014**.
- [40] J. Cui, X. Zhang, Q. Hu, W. Y. Zhou & F. Yang ; «Evaluation Of Corneal Thickness And Volume Parameters Of Subclinical Keratoconus Using A Pentacam Scheimpflug System». *Current Eye Research* ,1-4, **2015**.
- [41] C. Chan , M. Ang , A. Saad , D. Chua , M. Mejia , L. Lim ,D. Gatinel; «Validation of an Objective Scoring System for Forme Fruste Keratoconus Detection and Post-LASIK ectasia risk assessment in asian eyes». *Cornea*, 34(9), 996-1004, **2015**.
- [42] Base de données. Adproxima glossaire. **2007**

# Bibliographie

---

- [43] Coste ; « Bases de données – Outils de gestion ». L. QUINQUIS, **2010**.
- [44] D. Gatinel ;« Qu'est Ce Que L'épaisseur De La Cornée Pachymétrie Cornéenne ». Fondation Rothschild ,**2011**.
- [45] D. Gatinel ; « score-analyzer » .chirurgie refractive .bilan préopératoire .**2014**.
- [46] W. Douthwaite, H. Burek; « Mathematical Models Of The Corneal Surface». Ophthal Physiol Opt, 13, 68-7,**1993**.
- [47] D. Gatinel ; « Qu'est-ce qu'un indice de dépistage topographique ».Fondation Rothschild, **2011**.
- [48] M. A. Lazouni ;« Aide Au Diagnostic Pour Un Médecin Anesthésiste Réanimateur». Thèse de doctorat. Université de Tlemcen ,**2014**.
- [49] P. Refaeilzadeh, L.Tang, H. Liu; « Cross-Validation ».Arizona State University, **2008**.
- [50] W. lahbibi ; « Algorithme KNN (k narres neighbours, ou k plus proches voisins) ». Ecole supérieur de commerce, **2012**.
- [51] D.R. Wilson, T. R. Martinez; « Improved heterogeneous distance functions». Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR), 1–34, **1997**.