

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB DE BLIDA

INSTITUT D'ELECTRONIQUE

Thèse de Magister
par :

Mme Dalila BOUTOUTA / BEKHADDOUMA-ABDI

Spécialité : Electronique
Option : Communication

IDENTIFICATION DE PERSONNES PAR L'EMPREINTE DE L'IRIS DE L'ŒIL

Membres du jury :

OULD-ROUIS Hamid	président
MENACER Abderrahmane	promoteur
GUERTI Mhania	examinatrice
BENBLIDIA Nadjia	examinatrice
BERKANI Daoud	examineur
OUKID-KHOUS	invitée



Octobre 2003

Dédicaces

Je dédie ce mémoire aux êtres que j'aime le plus,

*A mon adorable mère que j'aime énormément qui s'est tant sacrifiée pour me voir réussir dans mes études
et dans ma vie,*

A mon très cher père qui a tant contribué à ma réussite par sa confiance et son soutien précieux,

*A mes adorables filles Rayane et Fatima qui m'ont donné l'envie et le courage de continuer mes études,
et de surmonter toutes les difficultés,*

A mon mari qui m'a aidé, soutenu et encouragé,

A mes frères et sœurs et leurs enfants en particulier Fatma, Radia et Khaled,

A toute ma belle-famille, en particulier ma belle-mère,

A la mémoire de la regrettée Nadja,

A ma meilleure amie Zohra qui a partagé mes joies et mes peines,

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Dalila

REMERCIEMENTS

Que notre encadreur Dr Abderrahmane MENACER, sans l'aide duquel notre projet n'aurait pas été mené à terme, puisse trouver, ici, l'expression de notre vive reconnaissance et de notre sincère gratitude. Nous lui savons gré, par ailleurs, de nous avoir supporté, dans les deux acceptions du terme, de longues journées durant où nous avons usé et abusé de son hospitalité comme de sa générosité. Nous tenons à exprimer également un témoignage de reconnaissance à l'égard de sa femme et de ses enfants en particulier Abdennour.

Nous tenons, par le biais de cette rubrique, à exprimer notre sincère reconnaissance à Mademoiselle Nadja BENBLIDIA. Elle n'a pas ménagé ses efforts et elle a été d'un bon conseil. Elle a été d'un grand soutien moral lorsque les problèmes administratifs artificiels étaient étouffants. Qu'elle reçoive donc ici nos remerciements les plus fleuris pour tous cela, ainsi que pour sa contribution à la correction du rapport du magister et pour avoir honoré de sa présence la présoutenance et la séance de démonstration préliminaire faite avec le concours relevé et apprécié de Mademoiselle Mhania GUERTI.

Nous tenons à remercier les membres de l'équipe INTELIX pour leur assistance morale et technique et particulièrement, Kheireddine, Karim et Nacereddine sans oublier Amel et Ouassila.

Que Mr Djamel BOUMARAF trouve ici notre gratitude pour son aide morale et matériel.

Nos vifs remerciements à ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

REMERCIEMENTS PARTICULIERS

Docteur Abderrahmane MENACER et Madame Dalila BOUTOUTA tiennent à remercier tout particulièrement Monsieur Sadek Boualem NOUAR Directeur de la Sous-Direction de la Post-graduation au Ministère de l'Enseignement Supérieur, Madame BOUDJEMAÂ de la même Sous-Direction de la Post-graduation ainsi que Monsieur Djamel FERROUKHI Directeur de la Direction de l'Enseignement et de la Formation au Ministère pour le sérieux, le professionnalisme et l'attachement à la justice et à la justesse qu'ils ont manifesté et dont ils ont fait preuve. Qu'ils trouvent ici notre entière reconnaissance.

ملخص

نقدم في مذكرة الماجستير هذه نظاما لتحديد الهوية و/أو التأكد منها باستعمال بصمة قزحية العين التي تحتوي على نسيج غني بأشكال التفاصيل الدقيقة. إن قزحية كل شخص فريدة في بنيتها و التي تتميز بشملت التفاصيل مدى الحياة.

تستعرض هذه المذكرة مجمل مراحل العلاج الأساسية و الهامة التي تدخل في تصميم النظام القزحي لتحديد الهوية. هذه المراحل الهامة تتمثل في: اخذ صورة العين متبوعة بعلاج أولي لتحسين نوعية الصورة, يليها تعيين موقع القزحية و قياس أبعادها ثم تشفير الجزء المفيد منها. هذه الشفرة تزود قاعدة البيانات أو تستعمل لتحديد الهوية أو التأكد منها.

تستعرض هذه المذكرة و بالتفصيل:

- خوارزم التعيين الآلي لموقع قزحية العين الذي يسمح بإيجاد القياس الصحيح للقزحية بهدف تشفير الجزء المفيد من الصورة.

- مجمل مراحل تحليل صورة قزحية العين. نحصل حينها على شفرة خاصة لكل قزحية مع التقليل من كمية بيانات الصورة من جهة و السماح بمقارنة سهلة بين مختلف القزحيات في مرحلة تحديد الهوية من جهة أخرى.

إن كل من خوارزم التعيين الآلي لموقع قزحية العين و مجمل التحاليل لها, تتميز بالبساطة و النجاعة و الكمال. كما تتميز أيضا بسهولة ترجمتها مباشرة إلى برامج على الحاسوب تستغل من طرف المستعمل.

ABSTRACT

The human iris has an extremely rich structure and is stable (unchanged) through the whole life span. It has also the property of being unique from one individual to the other. Like the fingerprints, it can therefore be used as a powerful identifier and / or authenticifier.

The present memoir deals with the basic steps necessary to the conception of such a recognition device. These are (i) the acquisition of an image of the human eye and its processing aiming at improving its quality. (ii) The localisation of the iris on the processed image and encoding only the useful part of it. The created data is used to enrich / build a data base and / or identity a specific individual.

This memoir presents (i) an automatic localisation algorithm of the human iris. It determines the exact dimensions of the human iris which makes it possible the encoding of the useful part. (ii) An image processing protocol of the human eye which generates a code specific to each individual iris and reduces the amount of data heeded by eliminatory the redundant ones. It also allows for an easy comparison of irises during a recognition process. Both the automatic localisation algorithm and the image processing protocol are complete and efficient. They can easily be translated into computer programs for the end user.

RESUME

On présente dans ce mémoire, un système d'identification et/ou d'authentification d'une personne à l'aide de l'empreinte de l'iris oculaire qui dispose d'une texture très riche en motifs et détails fins. Les iris de chaque personne sont uniques et possèdent la caractéristique d'être stables et demeurent inchangés la vie durant.

Ce mémoire expose les différents traitements de base, essentiels et nécessaires à la conception d'un système d'identification irienne. Ces traitements essentiels sont l'acquisition de l'image de l'œil suivie d'un prétraitement destiné à l'amélioration de la qualité de l'image. Ensuite, on procède à la localisation puis à la délimitation de l'iris avant de coder la partie utile de l'image de l'iris. Les empreintes iriennes obtenues sont enfin exploitées pour enrichir la base de données ou bien pour opérer une identification et/ou une authentification.

Dans ce mémoire, on expose en détail:

- l'algorithme de localisation automatique de l'iris de l'œil,
qui permet de déterminer le dimensionnement exact de l'iris afin de coder la partie utile de l'image,
- et le protocole d'analyse de l'image de l'iris de l'œil.

On génère ainsi, un code spécifique à chaque iris à même de réduire la quantité et la redondance des données de l'image, d'une part et de permettre une comparaison aisée des iris, lors de la phase de reconnaissance, d'autre part.

L'algorithme de localisation automatique de l'iris de l'œil et le protocole d'analyse sont simples, efficaces et complets et sont directement traduisibles sous forme de programmes informatiques, exploitables par l'utilisateur.

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Notions de biométrie et caractéristiques anatomiques et physiologiques de l'iris de l'œil.....	4
1 Introduction	4
2 Biométrie et authentification de l'utilisateur.....	4
2.1 Principe de fonctionnement.....	5
2.2 Comment choisir un moyen biométrique ?	5
2.3 Performances des systèmes	6
3 Quelques moyens biométriques.....	6
3.1 Empreintes digitales	6
3.2 Forme de la main	7
3.3 Le visage.....	8
3.4 La voix.....	8
3.5 La rétine.....	8
3.6 La thermographie.....	9
3.7 L'iris de l'œil.....	9
4 Position du problème.....	13
5 Anatomie et physiologie de l'iris de l'œil	14
5.1 Introduction	14
5.2 Aspect macroscopique et situation	14
5.3 Embryologie	15
5.4 Configuration externe.....	16
5.5 La texture visible de l'iris.....	19
5.6 Conclusion sur l'iris	20
6 Conclusion sur la biométrie.....	20
Chapitre II : Localisation automatique de l'iris de l'œil.....	21
1 Introduction	21
2 Principe du protocole de prise d'image de l'iris de l'œil	21
3 Occlusion de l'œil.....	22
4 Détection automatique du centre et du rayon de la pupille	23
4.1 Organigramme.....	23
4.2 Exemple illustré du déroulement des traitements.....	23
5 Détection automatique de l'iris de l'œil	28
5.1 Organigramme.....	28
5.2 Exemple illustré du déroulement des traitements.....	29
6 Conclusion.....	30
Chapitre III : Protocole d'analyse de l'image de l'iris de l'œil.....	31
1 Introduction	31
2 Hypothèses	31
2.1 Déformation de l'image de l'iris	31
2.2 Invariance de la géométrie de l'iris en fonction de l'ouverture de la pupille.....	32

3	Définition géométrique du masque d'analyse	33
3.1	Le masque d'analyse polaire	33
3.2	Exemple de la forme du masque en fonction de l'ouverture de la pupille	35
3.3	Le masque d'analyse rectangulaire.....	37
4	Définition du filtre de Gabor	38
4.1	Introduction	38
4.2	Définition du filtre de Gabor	40
4.3	Choix des dimensions des filtres	40
4.4	Génération des filtres de Gabor	41
5	Codage d'une image rectangulaire	42
6	Codage d'une image sous forme d'un disque partiel	42
6.1	Transformation d'un rectangle en disque partiel et réciproquement.....	43
6.2	Codage d'une zone d'analyse d'une image de l'iris de l'œil	47
7	Résultats comparatifs des trois méthodes sur une zone d'analyse	48
8	Normalisation du contraste	48
8.1	Normalisation linéaire du contraste	48
8.2	Normalisation par histogramme du contraste	51
9	Récapitulation du protocole d'analyse	54
10	Structure du fichier "IrisData"	54
11	Constitution de la base de données (Phase apprentissage)	55
12	Conclusion.....	56
Chapitre IV : Identification.....		57
1	Introduction	57
2	Comparaison.....	57
3	Nombre de degrés de liberté.....	58
4	Théorie statistique de la décision.....	60
4.1	définitions	60
4.2	formalisme de Neyman-Pearson.....	61
4.3	Stratégie de décision.....	63
5	Résultats pratiques obtenus	65
6	Exemple d'applications pratiques.....	67
6.1	Application "optimale"	68
6.2	Application dans le domaine militaire.....	69
6.3	Application dans un centre de calcul pour enseignants à l'université.....	69
7	Conclusion.....	69
Conclusion générale.....		71
Annexe A : Texture stochastique de l'iris.....		73
Annexe B : Jacobien.....		74
Annexe C : Approximation circulaire.....		75
Annexe D : Calcul du seuil de probabilité optimale.....		77
Annexe E : Quelques traitements classiques en traitement d'image		78
Annexe F : Organigrammes et menus de l'application.....		91
Bibliographie.....		103

INTRODUCTION GENERALE

La croissance mondiale des communications, tant en volume qu'en diversité (déplacement physique, transaction financière, accès aux services...), implique le besoin de s'assurer de l'identité des individus. L'importance des enjeux, motive les fraudeurs à mettre en échec les systèmes de sécurité existants.

Il y a donc un intérêt grandissant pour les systèmes électroniques d'identification et d'authentification. Leur dénominateur commun, est le besoin d'un moyen simple, pratique, fiable et peu onéreux, pour vérifier l'identité d'une personne, sans l'assistance d'une autre personne. Le marché du contrôle d'accès s'est ouvert avec la prolifération de systèmes, mais aucun ne se révèle efficace contre la fraude, car tous utilisent un identifiant externe tel que: badge, carte, clé, code...

Il est fréquent d'oublier le code d'accès. Pour éviter cet oubli, beaucoup de personnes écrivent ce code sur un carnet, perdant ainsi toute confidentialité. Le mot de passe est un moyen de présélection et non de contrôle d'accès.

Le niveau de sécurité d'un système est toujours celui du maillon le plus faible. Ce maillon faible, c'est bien souvent l'être humain: un mot de passe aisément déchiffrable ou noté à côté de l'ordinateur. Dans la plupart des entreprises, on exige que les mots de passe soient modifiés régulièrement et comportent au moins 8 caractères, mélangeant lettres majuscules, minuscules et chiffres. Ceci afin d'échapper aux logiciels de décodage qui peuvent en peu de temps, balayer tous les mots du dictionnaire. Cette protection peut s'avérer insuffisante pour l'accès à des applications sensibles.

Actuellement, l'accès sécuritaire et la surveillance constituent un sujet de très grande importance à cause du développement fulgurant des réseaux informatiques présents dans tous les domaines, ainsi que l'ampleur que prend chaque jour le réseau Internet dans notre société. En général, on distingue deux catégories d'identification, fondamentalement différentes et dépendantes de l'application :

- la reconnaissance ou l'identification de l'utilisateur qui consiste à associer une identité à une personne. En d'autres termes, elle répond à des questions du type: *"Qui est-il?"*
- l'authentification ou la vérification de l'utilisateur qui permet de confirmer une identité proclamée ou de l'infirmer. Le système doit alors répondre à la question suivante: *"Est-il réellement la personne qu'il est en train de proclamer?"*

En ce qui concerne les applications, l'authentification de l'utilisateur est utilisée dans tous les domaines, nécessitant un accès contrôlé, tel que celui des applications bancaires, des sites hautement sécurisés comme les sièges de gouvernement, ainsi que les réseaux, Internet en particulier. Quant à la reconnaissance, elle est souvent utilisée par la police et les services d'immigration dans les aéroports, ainsi que dans la recherche de bases de données criminelles, Elle figure aussi dans les applications civiles où l'authentification des cartes de crédit, de permis de conduire et des passeports, est de plus en plus courante.

Avec l'émergence du commerce électronique, tous les fournisseurs de produits et de services par Internet sont en train de fournir un effort considérable afin de se protéger. En d'autres termes, le processus d'authentification de l'utilisateur, ainsi que les aspects de sécurité sont devenus essentiels pour toute entreprise voulant se lancer dans le monde du commerce électronique. Les techniques d'authentification offrant plus de précision et de robustesse en présence de facteurs interférents sont donc de plus en plus recherchées.

L'idée, d'utiliser l'iris de l'œil comme empreinte, est proposée par des ophtalmologues qui ont remarqué que l'image vidéo en temps réel, de l'iris humain, peut fournir une base "*biométrique*" vraisemblable pour confirmer l'identité d'une personne sans qu'il y ait un contact physique.

L'iris a des spécificités qui en font une empreinte de choix. Il représente une caractéristique frappante du visage. L'iris est facilement visible à plusieurs mètres comme un disque coloré entouré du blanc de l'œil. C'est un diaphragme qui ajuste la quantité de lumière qui atteint la rétine. L'ouverture du diaphragme est contrôlée par le réflexe irien. Ce réflexe empêche toute fraude à l'aide, par exemple, d'une lentille de contact qui simulerait l'empreinte de l'iris du sujet dont l'identité est plagiée. Une variation de la lumière ambiante permet de lever la mystification éventuelle.

L'iris oculaire possède une texture très riche en détails et en information et qui reste inchangée durant toute la vie. Cette texture est unique pour chaque personne et les deux iris de la même personne sont différents, même les jumeaux monozygotes ont des textures d'iris dissemblables.

Dans ce mémoire, nous décrivons un système autonome de reconnaissance de l'identité d'une personne par l'examen de l'empreinte de l'iris oculaire. Après la prise de l'image de l'œil à l'aide d'une caméra adaptée, débute la phase du traitement numérique: il s'agit de localiser l'iris et de récupérer les données essentielles, caractéristiques de l'iris. Un masque

d'analyse est ensuite appliqué à l'iris pour le décomposer en anneaux concentriques. Les détails de l'iris, appelés minuties, sont ensuite extraits de ces anneaux après filtrage, lissage, détection de contour, adaptation géométrique, normalisation du contraste et enfin codage. Le code obtenu est stocké dans une base de données permettant une consultation ultérieure pour comparaison. La phase de reconnaissance intervient après la phase d'apprentissage, donc après la constitution de la base de données. Cette dernière est sans cesse actualisée et enrichie en fonction des besoins de l'application.

On a opté pour ce mémoire l'organisation suivante:

- Le premier chapitre du mémoire définit et présente la biométrie. On présente divers moyens biométriques actuellement en œuvre ou en développement en pointant leurs avantages, inconvénients et leurs domaines d'application. Pour le reste des chapitres, l'étude se consacre à l'iris de l'œil exclusivement. On donne aussi une présentation approfondie, de l'anatomie et la physiologie de l'iris, on y expose aussi la constitution de la texture de l'iris.
- Le deuxième chapitre présente un ensemble d'algorithmes dédié à la localisation automatique de l'iris à partir d'une image de l'œil.
- Le troisième chapitre propose un protocole d'analyse de l'image de l'iris oculaire dédié au codage de l'empreinte irienne.
- Le dernier chapitre est consacré à la phase d'identification au terme de laquelle sera prise une décision d'autorisation ou de refus d'accès.
- On achève ce mémoire par une conclusion générale ouverte sur des perspectives susceptibles d'enrichir l'approche adoptée et d'améliorer les performances du système proposé.

NOTIONS DE BIOMETRIE ET CARACTERISTIQUES ANATOMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES DE L'IRIS DE L'ŒIL

1 INTRODUCTION

La biométrie est la science qui permet d'identifier automatiquement un individu en se basant sur ses caractéristiques physiques ou comportementales. Généralement, on distingue deux catégories de méthodes d'authentification biométrique [MAHMOUDI 00], [COTTARD 00]:

- Les méthodes basées sur les caractéristiques *physiques (morphologie humaine)* telles que visage, voix, iris, rétine, pouce, ADN, forme de la main et de l'oreille.
- Les méthodes basées sur les caractéristiques *comportementales* comme la dynamique de la signature (la vitesse de déplacement du stylo, les accélérations, la pression exercée, l'inclinaison,...), la manière de marcher ou de taper sur un clavier (la pression exercée, la vitesse de frappe).

2 BIOMETRIE ET AUTHENTIFICATION DE L'UTILISATEUR

Les systèmes d'authentification *biométriques* suppriment (voir tableau I.1):

- La duplication,
- Le vol,
- L'oubli,
- La perte.

	Copie	Vol	Oubli	Perte
Clef	X	X	X	X
Code	X	-	X	-
Badge	-	X	X	X
Empreinte	-	-	-	-

Tableau I.1 : Avantage de l'empreinte biométrique

2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le principe de fonctionnement d'un système biométrique est donné par la figure I.1, il comprend:

- L'acquisition de l'information à analyser (image en général),
- Le traitement de l'information et la création d'un fichier "signature" (élément caractéristiques de l'image), puis la mise en mémoire de ce fichier de référence sur un support (disque dur, carte à puce, code barre),
- La phase d'identification, consiste à comparer les fichiers "signature" des personnes qui se présentent, aux fichiers stockés dans la base de données, afin de déterminer les taux de similitude et prendre, en conséquence, la décision d'identification ou de rejet.

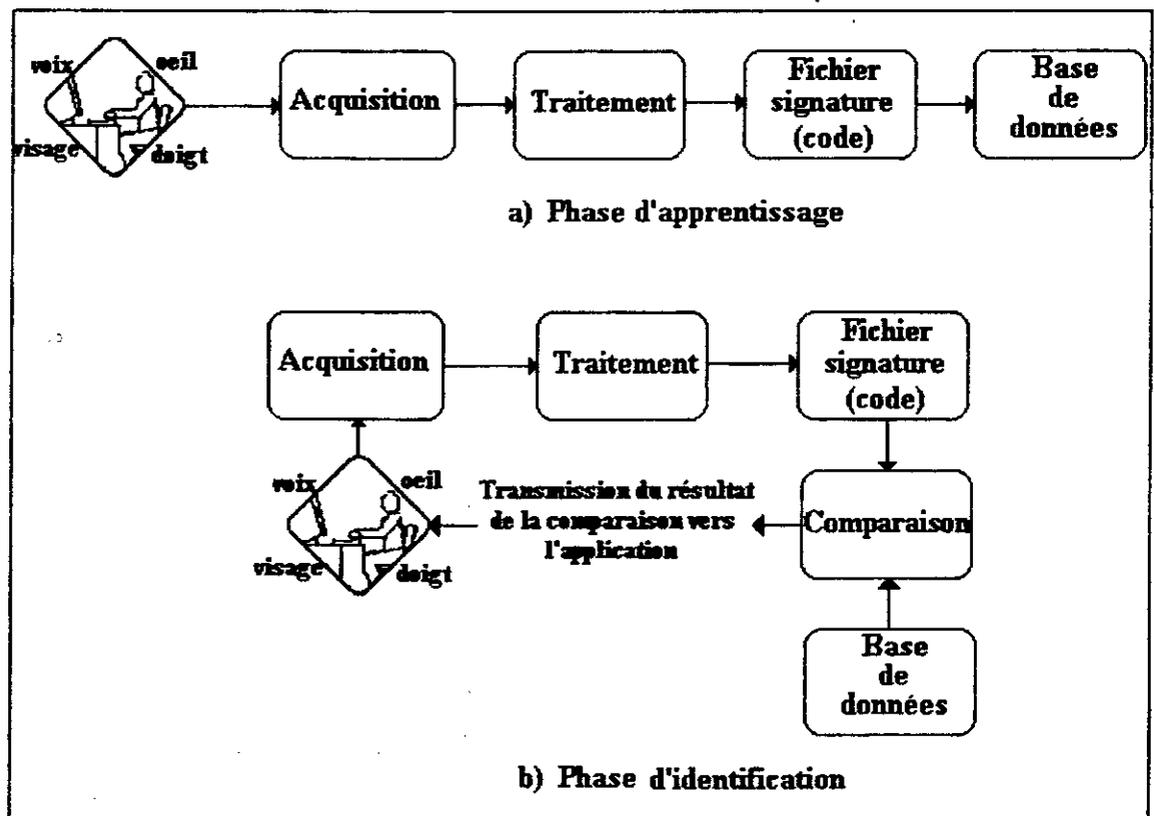


Figure I. 1 : Principe de fonctionnement d'un système biométrique

2.2 COMMENT CHOISIR UN MOYEN BIOMETRIQUE ?

Plutôt que de comparer les performances de ces systèmes, il faut surtout tenir compte de l'environnement de leur usage, (facilité de: saisie, d'analyse, de stockage, de vérification). Chaque technologie possède des avantages et des inconvénients, acceptables ou inacceptables

suivant les applications. Ces solutions n'offrent ni les mêmes niveaux de sécurité ni les mêmes facilités d'emploi. Elles ne sont pas toujours concurrentes.

En comparaison aux systèmes classique d'authentification utilisant un objet ou un mot de passe, qui offrent une réponse stable (oui ou non, 0% ou 100%); les informations biométriques sont plus fluctuantes et donnent des réponses en terme de probabilité de similitude (entre 0% et 100%, le 100% n'étant jamais atteint) [COTTARD 00]. La variation des résultats d'identification d'un même individu est plus liée à la qualité de l'acquisition de l'information biométrique (on n'a jamais deux images ou deux sons identiques), qu'à la modification de la caractéristique biométrique de l'individu qui est généralement stable dans le temps. Il faut donc définir un seuil de décision (acceptation ou rejet) compris entre 0% et 100% de similitude; ce seuil pouvant être différent pour chaque personne, est fonction de l'application.

2.3 PERFORMANCES DES SYSTEMES

Il est impossible d'obtenir une coïncidence absolue (100% de similitude) entre le fichier "*signature*" créé lors de l'enrôlement et le fichier "*signature*" créé lors de la vérification. Les éléments d'origine (une image, un son...) utilisés pour les traitements informatiques ne peuvent jamais être reproduits à l'identique. Les performances des systèmes d'authentification biométriques s'expriment par [MILLIOT 00]:

- **T.F.R.** - Taux de faux rejets: Pourcentage de personnes rejetées par erreur.
- **T.F.A.** -Taux de fausses acceptations: Pourcentage d'acceptations qui n'auraient pas dues être retenues.

Ces taux vont dépendre de la qualité des systèmes, ainsi que du niveau de sécurité souhaité.

3 QUELQUES MOYENS BIOMETRIQUES

3.1 EMPREINTE DIGITALE

C'est grâce aux travaux d'Alphonse Bertillon [MILLER 94], dans les années 1880, que l'on a commencé à identifier des récidivistes sans avoir recours au marquage ou à la mutilation. L'idée d'en faire un instrument d'identification à part entière s'est imposée avec les recherches du Britannique Galton, qui démontra la permanence du dessin de la naissance à la mort, son inaltérabilité et son individualité [MILLER 94].

La minutie, selon Galton, est l'arrangement particulier des lignes papillaires formant des points caractéristiques à l'origine de l'individualité des dessins digitaux (Arrêts de lignes, bifurcations, lacs, îlots, points, la combinaison des minuties est pratiquement infinie). Dans la pratique judiciaire des pays développés, il faut 8 à 17 points (mais le plus souvent 12 points suffisent) [COTTARD 00] sans discordance, pour qu'on estime l'identification établie.

Avantages

- C'est l'une des techniques (centenaire) les plus connues du grand public.
- La technologie la plus éprouvée techniquement et la plus connue du grand public,
- Petite taille du lecteur facilitant son intégration dans la majorité des applications (téléphones portables, PC),
- Faible coût des lecteurs grâce aux nouveaux capteurs de type "*Chip silicium*",
- Traitement rapide,
- Bon compromis entre le taux de faux rejet et le taux de fausse acceptation.

Inconvénients

- Image négative liée aux empreintes digitales, car fortement utilisées par la police,
- Difficulté de lecture avec des doigts sales ou abîmés,
- Besoin de la coopération de l'utilisateur (pose correcte du doigt sur le lecteur),
- Certains systèmes d'identification peuvent accepter un moulage de doigt ou un doigt coupé. D'où la nécessité de disposer de moyens de détection du doigt vivant,
- le lecteur (capteur) reste exposé à une éventuelle dégradation dans les applications de contrôle d'accès accessible au grand public (distributeur de billets, accès extérieur à des locaux...).

Applications

- Contrôle d'accès physique (locaux, machines, équipements spécifiques),
- Contrôle d'accès logique (systèmes d'information).

3.2 FORME DE LA MAIN

Il s'agit d'une analyse tridimensionnelle qui repose sur la géométrie de la main (largeur et épaisseur de la paume, dessins des lignes de la main, longueur des doigts) [MILLER 94].

Avantage: Technique simple à utiliser.

Inconvénient: Cette technique est par contre trop encombrante pour un usage sur le bureau, dans une voiture ou un téléphone.

Application: Contrôle d'accès à des locaux.

3.3 LE VISAGE

L'écart entre les 2 yeux, l'écartement des narines ou encore la largeur de la bouche peuvent permettre d'identifier un individu. Cette méthode doit pouvoir tenir compte de certains changements de la physionomie (lunettes, barbe, chirurgie esthétique) et de l'environnement (conditions d'éclairage). L'inconvénient de la méthode est qu'il est impossible de différencier entre deux jumeaux.

3.4 LA VOIX

La voix d'une personne se caractérise par plusieurs paramètres. Chaque personne possède une voix propre que l'on peut analyser par enregistrement avec un micro. Les sons se caractérisent par une fréquence, par une intensité et par une tonalité. Le traitement informatique tient compte des distorsions liées au matériel utilisé, et sait analyser un son de mauvaise qualité tel qu'une transmission téléphonique ou radiophonique. La fatigue, le stress ou un rhume, peuvent provoquer des variations de cette voix. La fraude est possible en enregistrant, à son insu, la voix d'une personne autorisée, à moins d'obliger la personne contrôlée à lire un texte aléatoire.

Avantage

- Il est plus facile de protéger le lecteur que dans les autres technologies (protection d'un micro derrière une grille anti-vandalisme),
- C'est le seul moyen pour s'identifier via une liaison téléphonique,

Inconvénients

- Sensible à l'état physique de l'individu,
- Fraude possible par enregistrement.
- Sensible aux bruits ambiants,
- Taux de faux rejet et fausse acceptation élevés.

3.5 LA RETINE

La rétine est la couche sensorielle de l'œil qui permet la vision. Cette zone est parcourue par des vaisseaux sanguins qui émergent au niveau de la papille optique, où l'on distingue l'artère et la veine centrale de la rétine qui se divisent elles-mêmes en artères et veines de diamètre plus faible pour vasculariser les cellules qui permettent la vision. La grande variété

de configurations des vaisseaux sanguins présente la même diversité que les empreintes digitales. L'aspect des vaisseaux peut être modifié par l'âge ou la maladie, mais la position respective des vaisseaux reste inchangée durant toute la vie de l'individu. Une caméra est utilisée pour capturer la cartographie des vaisseaux, pour cela il est nécessaire d'illuminer le fond de l'œil [MAHMOUDI 00].

Avantages

- L'empreinte rétinienne est peu exposée aux blessures (coupure, brûlure),
- Les taux de faux rejet et de fausse acceptation sont faibles.
- Cette carte vasculaire, propre à chaque individu diffère entre 2 jumeaux..

Inconvénients

- Moins stable dans le temps que les empreintes digitales,
- Mauvaise acceptation du public (l'œil est un organe sensible),

Applications

- Distributeurs de billets de banque,
- Contrôle d'accès à des locaux sensibles.

3.6 LA THERMOGRAPHIE

Une caméra thermique est utilisée pour réaliser un cliché infrarouge du visage. Cela permet de faire apparaître une répartition de la chaleur unique à chaque individu, voire de cartographier le réseau veineux du visage invisible à l'œil nu. L'avantage est que l'on peut distinguer de vrais jumeaux. Très cher, ce système reste expérimental [COTTARD 00].

3.7 L'IRIS DE L'ŒIL

La personne qui cherche à se faire identifier, doit simplement fixer l'objectif d'une caméra qui récupère instantanément le dessin de son iris. L'iris est un motif très dense qui n'est pas dicté par les gènes [Annexe A] (l'iris est une caractéristique phénotype et non pas génétique). Chaque œil est unique. Dans toute photographie de l'iris, on compte plus de 200 variables indépendantes [DAUGMAN 92], [MILLER 94] ce qui induit ^{une} probabilité très faible de confondre 2 individus. On doit cette méthode à quelques ophtalmologues [ADLER 65], [FLOM 87] qui ont remarqué dès les années 80, que la couleur de l'iris peut varier, mais rarement son motif. Cette méthode d'identification évoluera certainement avec le temps, comme pour les empreintes digitales. Cette évolution dépend en partie du développement adapté des capteurs de prise d'image des empreintes iriennes.

Pour capturer l'image de cette membrane colorée, il est inutile d'éclairer la rétine. Par contre, l'éclairage de l'iris pose un problème de reflets; on utilise souvent, à cet effet, un éclairage multi-sources artificiel (réseau de diodes LED) calibré tout en atténuant le plus possible l'éclairage ambiant.

Avantages

- Grande quantité d'information contenue dans l'iris (Figure I.2),
- Vrais jumeaux non confondus,
- L'iris est infalsifiable sous peine d'altération (il est impossible de modifier l'iris par chirurgie sans sa destruction avec risque d'altérer la vision),
- Le mouvement de la pupille confirme la physiologie naturelle non altéré de l'iris par un objet artificiel telle une lentille ou autre,
- Degré de liberté élevé (environ 244) par rapport aux autres moyens biométriques,
- Stabilité de la texture de l'iris durant la vie,
- Acquisition de l'image de l'iris sans contact (à distance).

Inconvénients

- La petite dimension de l'iris (1 cm) rend l'acquisition de l'image à partir d'une certaine distance (1 m), difficile.
- L'iris est situé derrière la cornée qui est une surface courbée et humide ce qui donne des reflets qui apparaissent sous forme de tâche de flash sur les images,
- L'iris est partiellement caché par les paupières et les cils,
- L'éclairage ambiant ne doit pas être élevé ou brillant.

Applications

Le système de reconnaissance de l'iris permet d'effectuer une identification sûre et rapide d'une personne. En conséquence, ce dispositif trouvera des applications dans tous les domaines mettant en application des systèmes de sécurité. Il pourrait s'appliquer dans les secteurs suivants:

- Distributeurs de billets de banque,
- Contrôle d'accès physique (locaux, machines, équipements spécifiques), contrôle d'accès logique (systèmes d'information),
- Les systèmes de sécurité militaire,
- L'accès à des pièces spéciales de travail, telles que les chambres stériles, les chambres blanches, les secteurs de hautes technologies,

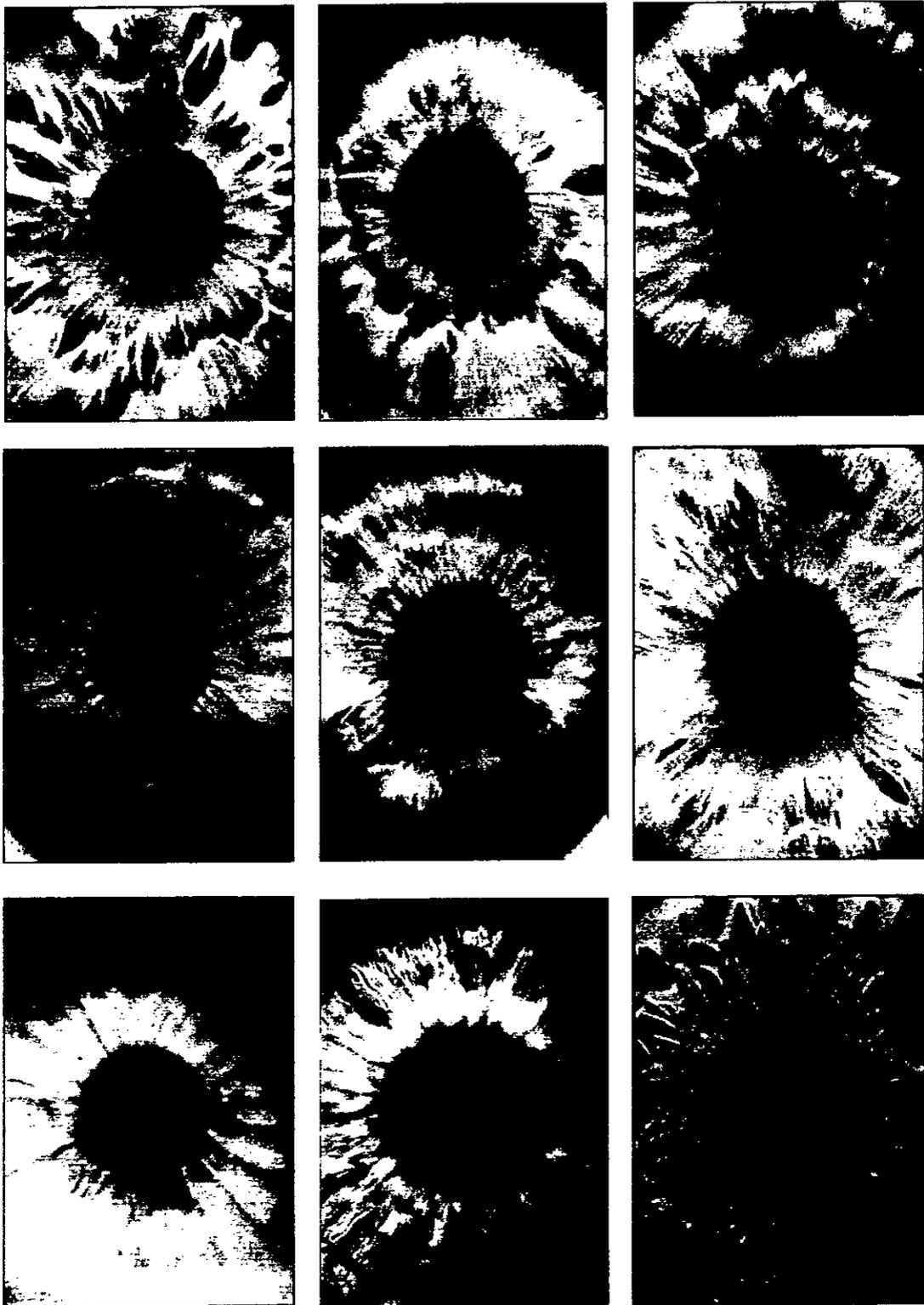


Figure I. 2 : Image de plans rapprochés illustrant les textures de différents iris

- L'accès au secteur administratif des banques où des données de travail sont confidentielles; la sécurité y est assurée par des cartes magnétiques d'accès et pour l'utilisation des ordinateurs, par un code généré par une seconde carte. Notre dispositif permettrait d'alléger ce protocole et de maintenir un plus haut niveau de sécurité dans la banque puisque seule, une personne autorisée pourrait pénétrer,
- Des dispositifs dérivés de notre application peuvent être utilisés en domotique pour assurer la sécurité d'une maison individuelle et éviter les cambriolages,
- Ce dispositif pourrait aussi être utilisé pour empêcher ou autoriser l'accès à certaines zones dans des prisons ou des administrations pour éviter les attentats.

Le système de reconnaissance par l'iris peut aussi trouver des applications qui ne sont pas directement liées à la reconnaissance et à la seule sécurité. En particulier, nous ne devons pas oublier que l'objet de reconnaissance est l'iris de l'œil: il peut donc être mis en œuvre en ophtalmologie pour déceler éventuellement l'état physique du patient.

Fiabilité

Discrets, rapides, les périphériques de reconnaissance de l'iris de l'œil offrent une fiabilité encore jamais atteinte et autorisent un éventail illimité de contrôles d'accès. La comparaison des deux procédés biométriques, utilisant l'empreinte digitale et l'empreinte irienne, plaide nettement en faveur de l'empreinte irienne. Ne serait-ce que si l'on considère son niveau de fiabilité. Si une empreinte digitale comporte environ 80 "*points caractéristiques*", l'iris en offre, lui, jusqu'à 250 [MILLIOT 00]. Mieux encore, l'ensemble de ces points demeure stable dans le temps, de la petite enfance jusqu'à la mort. Il en résulte un taux d'erreur quasi négligeable, d'environ 1 sur 3 millions [DAUGMAN 92], souvent inférieur à celui d'une empreinte d'ADN partielle. C'est toutefois surtout en ce qui concerne les tentatives de fraude que l'iris se montre supérieur. Plusieurs tests ont démontré la faiblesse des solutions digitales face à des répliques 2D (copies de l'empreinte du doigt) et 3D (copie du doigt avec maintien de température corporelle). L'œil, en revanche, a la particularité de réagir à un stimulus lumineux en contractant sa pupille, et ce, de façon variable selon les individus. En raison de ce réflexe physiologique, une image statique (photo haute définition) ne pourra pas passer le test de vérification de fraude. Quant à la construction d'une réplique fonctionnelle, elle s'avère si complexe, qu'aucune tentative n'est à ce jour parvenue à déjouer le système.

4 POSITION DU PROBLEME

De nos jours, la *fraude* ne cesse d'augmenter dans notre société. Certains utilisateurs, appelés *imposteurs*, sont capables de falsifier leur identité avec une facilité remarquable. Ceci est dû au fait que les systèmes d'authentification les plus utilisés sur le marché, sont basés sur la solution conventionnelle: *login and password* ou accès avec mot de passe, souvent associés à une carte ID contenant l'information sur l'identité de son possesseur. Cependant, les utilisateurs ne sont pas tout à fait satisfaits de ces cartes ID pour les raisons suivantes:

- les cartes ID basées sur les mots de passe ne sont pas fiables,
- les cartes ID peuvent être perdues, oubliées ou mal placées,
- le mot de passe risque d'être oublié ou compromis.

Le fait de ne pas permettre une authentification physique de l'utilisateur, rend les cartes ID relativement faciles à falsifier, ce qui constitue un inconvénient majeur. En effet, et à juste titre les utilisateurs ne se sentent pas suffisamment bien protégés en effectuant des transactions faisant appel à de telles techniques d'authentification: de nombreuses entreprises recherchent la technique qui permet de donner plus de confort à leurs utilisateurs tout en garantissant un accès hautement sécurisé.

Différentes techniques d'authentification basées sur les caractéristiques physiques de l'utilisateur ont été développées par la recherche scientifique. Ces techniques, généralement appelées méthodes biométriques, ont donné naissance à plusieurs produits commerciaux d'authentification que l'on peut trouver actuellement sur le marché. L'avantage principal de ce qu'on appelle *mot de passe biométrique*, est lié au fait qu'il ne pourrait pas être volé, oublié ou transmis à une autre personne. En effet, chaque membre de la population possède sa propre caractéristique biométrique, qui est relativement stable. Par conséquent, il est fort possible que dans un futur relativement proche, le mot de passe biométrique puisse remplacer le mot de passe conventionnel dans toutes les applications nécessitant un niveau élevé de sécurité.

5 ANATOMIE ET PHYSIOLOGIE DE L'IRIS DE L'ŒIL

5.1 INTRODUCTION

Dans le présent chapitre, on présente l'anatomie et la physiologie de l'iris. On montre ainsi l'origine des différentes formes géométriques, qui constituent la texture de l'iris, et par conséquent l'empreinte irienne.

5.2 ASPECT MACROSCOPIQUE ET SITUATION

L'iris est la membrane colorée de l'œil, située derrière la cornée et devant le cristallin, et percée d'un orifice, la pupille (Figure I.3). Son diamètre est de 12 à 13 mm. Son épaisseur varie selon la région considérée: relativement importante dans sa partie médiane au niveau de la collerette (0.6 mm), l'épaisseur diminue progressivement en allant vers la pupille. C'est au niveau de sa racine, que l'iris est le plus mince (0.1 mm). Quand à la pupille, son diamètre est éminemment variable, de 0.5 mm en myosis (ouverture minimale) à 8 mm en mydriase (ouverture maximale) [BERGGREN 85], [COSCAS 69].

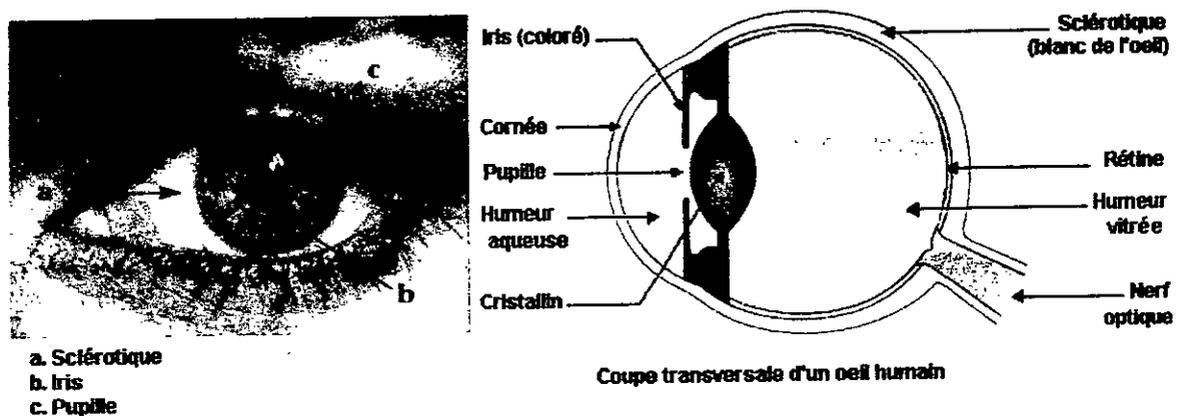


Figure I.3 : L'œil humain

L'iris est tendu dans un plan vertical formé par l'orifice antérieur de la sclérotique (blanc de l'œil). Il baigne dans l'humeur aqueuse (Figure I.4). Sa face antérieure limite la chambre antérieure; la face postérieure est à son origine en avant du plan du cristallin et limite avec lui la chambre postérieure; son bord interne s'appuie légèrement au centre sur la face antérieure du cristallin. Sa périphérie s'insère sur la face antérieure du corps ciliaire, celui-ci prenant part à la constitution de l'angle irido-cornéen. Légèrement soulevé par le cristallin, l'iris bombe en avant et forme un tronc de cône très aplati à base postérieure [COSCAS 69].



Figure I. 4 : Iris normal. Vue d'ensemble

L'iris joue un rôle optique important grâce à la dimension variable de la pupille. L'iris se comporte comme un véritable diaphragme d'ouverture variable qui se règle automatiquement selon l'intensité lumineuse. Le mouvement d'ouverture et de fermeture de la pupille, est assuré par les muscles dilatateur et sphincter de l'iris.

5.3 EMBRYOLOGIE

L'iris humain commence à se former au troisième mois de la grossesse. Les structures créant ses dessins distinctifs sont complétées au huitième mois de la grossesse, par contre la pigmentation (couleur) continue d'évoluer durant la première année après la naissance. Les couches de l'iris (Figure I.5) ont une double origine embryologique, une origine mésodermique qui engendre le Stroma irien et la membrane pupillaire, et une origine ectodermique qui conduit à la formation de l'épithélium postérieur (7) et des muscles sphincter (6) et dilatateur (8) de l'iris [WILDES 97], [COSCAS 69].

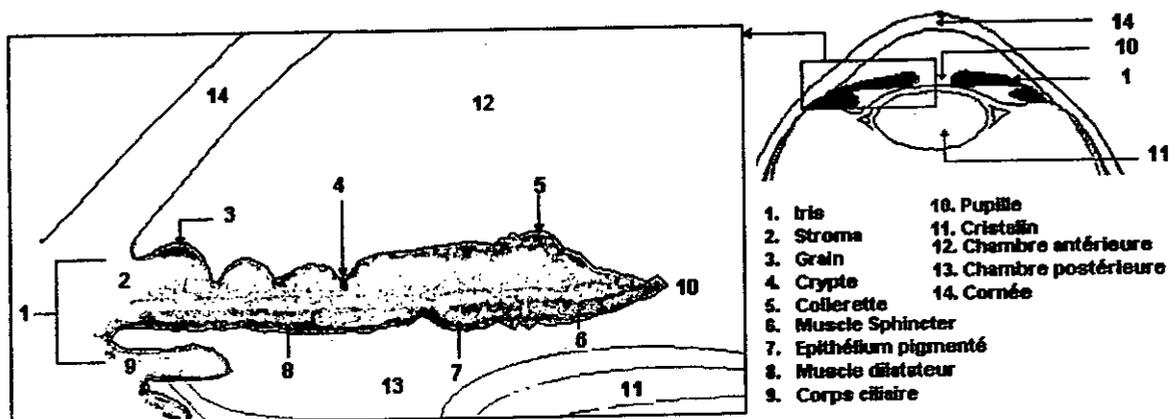


Figure I. 5 : Anatomie de l'iris. La structure de l'iris (coupe transversale)

5.4 CONFIGURATION EXTERNE

L'iris présente deux faces, antérieure et postérieure, et deux bords, l'un externe périphérique qui s'insère sur le corps ciliaire, l'autre interne central délimitant la pupille (Figure I.6).

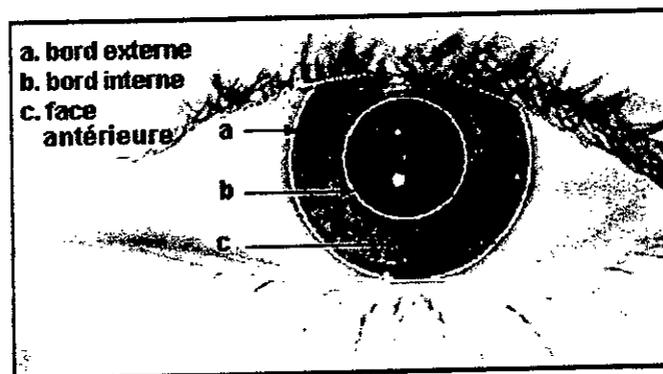


Figure I. 6 : Iris de L'œil

5.4.1 FACE ANTERIEURE

C'est elle qui est le mieux visible en bio microscopie. Elle apparaît ainsi très irrégulière dans son relief, elle se compose de deux parties: la zone pupillaire, interne, et la zone ciliaire, externe, séparées par une ligne brisée: la collerette (Figure I.7).

• La collerette irienne

Ligne brisée, saillante, cheminant à l'union du tiers interne et des deux tiers externes, la collerette correspond à la limite de résorption (disparition progressive) de la membrane pupillaire où l'on voit souvent des reliquats (restes ou résidus) de cette membrane, s'insérer à son niveau. La collerette est plus ou moins nette; le relief qu'elle représente pouvant être estompé par des dépôts pigmentés. Elle reste cependant toujours visible car l'iris s'amincit doucement vers la pupille. Au voisinage de la collerette, on observe des déhiscences (ouvertures): *les cryptes de Funchs* [COSCAS 69] ou *Stromates* (Figure I.5).

Cette collerette divise l'iris en deux zones: l'une interne, pupillaire et l'autre externe, ciliaire.

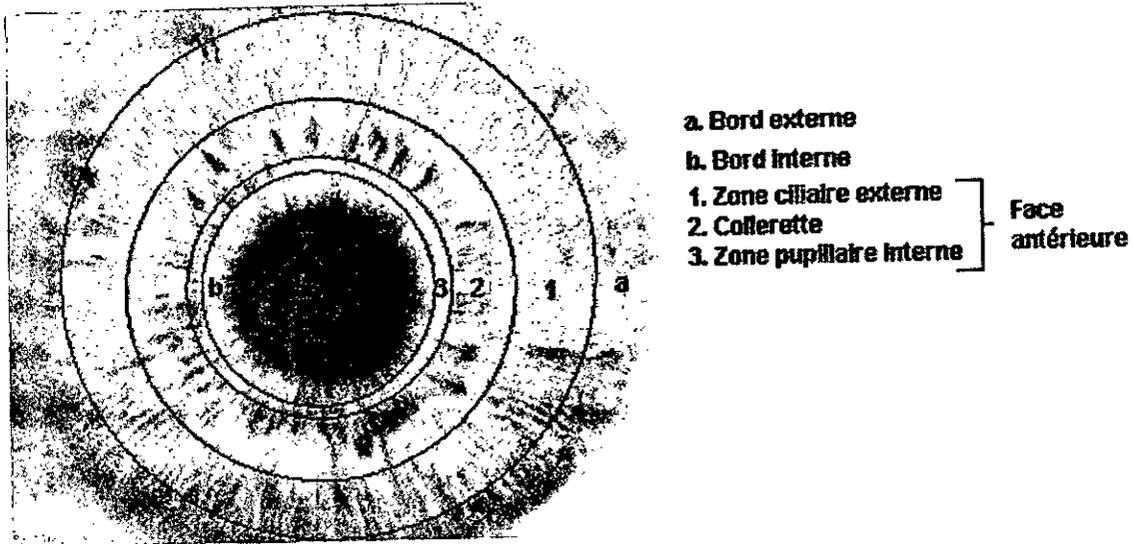


Figure I. 7 : Face antérieure de l'iris de l'œil

- **La zone pupillaire interne**

Large de 2 mm, la zone pupillaire présentée du centre vers la périphérie [COSCAS 69]:

- **La zone du rebord pupillaire:** le liséré pigmentaire est un anneau festonné pigmentaire qui correspond au débordement en avant du feuillet pigmenté postérieur au niveau de la pupille. Il est généralement plus large vers le haut que vers le bas. Sa charge pigmentaire s'atténue avec l'âge: cette zone se réduit finalement à une mince trame grise translucide.
- **La zone du sphincter:** se signale par la présence d'un ruban circulaire, bien marqué dans les iris clairs.
- **La zone des cryptes:** les *cryptes de Funchs* ou *stromates* sont des déhiscences profondes dont le fond est tapissé d'un tissu d'aspect réticulé, et qui sont délimitées par des arcs charnus qui se terminent sur la collerette. A ce niveau, la pente de la collerette est marquée ce qui permet de la reconnaître quand elle n'est pas nettement visible.

- **La zone ciliaire externe**

Plus large que la région pupillaire (3 à 4 mm), elle présente un système de cordelette rayonnante. En allant du centre vers la périphérie, on rencontre:

- **La zone interne,** plane, contiguë à la collerette.
- **La zone moyenne** plissée, formée par une série de sillons (plis) concentriques qui deviennent plus nets quand la pupille est dilatée: *les sillons de contraction*. Entre les sillons on observe parfois des *nodules* (petits nœuds) clairs ou pigmentés formés par la condensation locale du tissu conjonctif irien. Le plus périphérique des sillons, constitue l'ourlet marginal *Fuchs* ou ligne de crêtes iriennes de *Busacca*.

- *La zone externe* enfin, est constituée de *cryptes ciliaires* peu profondes, ce qui reflète une texture spongieuse.

La coloration de la face antérieure de l'iris, dépend de l'épaisseur de l'épithélium pigmenté et de l'intensité de la pigmentation du Stroma, mais le fond reste toujours noir. Plus la pigmentation du Stroma est riche, plus l'iris sera foncé. Sa couleur va du marron au bleu en passant par le vert. Les iris clairs possèdent un épithélium pigmenté mince et une pigmentation du Stroma peu abondante. Tributaire de la pigmentation, la coloration varie aussi avec l'âge: la pigmentation est en effet maximale vers 15 ans, puis elle décroît progressivement; chez le sujet âgé le pigment peut même disparaître par endroits et l'iris prend un aspect mité [BERTILLON 85], [COSCAS 69], [WILDES 97].

5.4.2 FACE POSTERIEURE

Par opposition à la couleur variable de la face antérieure, celle de la face postérieure est toujours d'un noir ou d'un brun foncé. Elle comporte cependant trois sortes de plis [COSCAS 69], [DAUGMAN 00]:

- *Les plis de contraction de Schwalbe*, minces lignes radiaires présentes dans la région pupillaire.
- *Les plis structuraux de Schwalbe*, lignes également radiaires qui parcourent le disque irien de la pupille à la périphérie en s'élargissant et qui correspondent à des vaisseaux.
- *Les plis circulaires*, concentriques à la pupille, sont formés par les différences d'épaisseur de l'épithélium pigmenté.

5.4.3 BORD EXTERNE PERIPHERIQUE (GRANDE CIRCONFERENCE OU BASE DE L'IRIS)

Ce bord mince et fragile, constitue la racine de l'iris qui s'insère sur le corps ciliaire. La continuité des deux stromas et leur disposition, assurent l'adhérence entre les deux segments.

5.4.4 BORD PUPILLAIRE (PETITE CIRCONFERENCE DE L'IRIS)

Le bord interne, au centre du disque irien, limite l'orifice pupillaire. La limite de la pupille est en fait, légèrement décentrée en bas par rapport au centre de l'iris. Le diamètre pupillaire moyen est de 4 à 5 mm. La pupille est plus étroite chez le vieillard.

5.5 LA TEXTURE VISIBLE DE L'IRIS [ADLER 65], [DAVSON 70]

La texture de l'iris est composée de plusieurs traits: les grains (petites élévations), les cryptes (atrophies irrégulières), les rides radiaires, les rides concentriques (Figure I.8) [FLOM 87], [WILDES 97], [MILLER 94].

5.5.1 TRAITIS VISIBLES D'ORIGINE PIGMENTAIRE

- **Les nodules:** ce sont des concentrations aléatoires de cellules pigmentaires sur la surface visible de l'iris, ils apparaissent généralement dans la zone ciliaire. Ces nodules sont, en général, stables en nombre, position et couleur.
- **Les cryptes:** contrairement aux nodules, les cryptes sont liées à la fois à la pigmentation et à la structure de la surface de l'iris. Les zones apparaissant foncées, peuvent être des cryptes et sont adjacentes à la collerette.

5.5.2 TRAITIS VISIBLES LIÉS AU MOUVEMENT DE L'IRIS

- **Les sillons (plis) radiaires:** ce sont des rides radiaires par rapport au centre de la pupille. Ils apparaissent dans la zone pupillaire et se terminent sur la collerette. Elles permettent à l'iris, de se contracter ou de se dilater pour changer la taille de la pupille.
- **Les sillons concentriques:** d'une manière similaire aux rides radiaires, les rides concentriques permettent la dilatation et la contraction de l'iris dans différentes directions. Leur forme est circulaire (demi cercle). Ces rides apparaissent typiquement dans la zone ciliaire, près de la périphérie de l'iris.

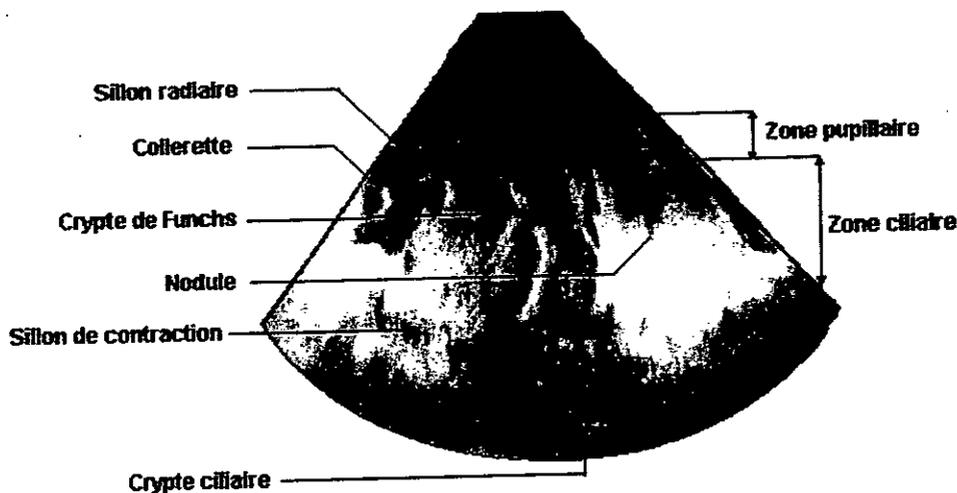


Figure I. 8 : Texture visible de l'iris

5.6 CONCLUSION SUR L'IRIS

La surface de l'iris est très irrégulière dans son relief. La disposition aléatoire de ses nodules et ses anfractuosités, est unique pour chaque personne, ce qui la rend éligible pour une exploitation en qualité d'empreinte identitaire. On se base essentiellement sur l'image en noir et blanc de l'iris car la texture de l'empreinte est permanente. La couleur quant à elle pourrait être exploitée à la condition de se limiter dans le temps car, en effet, la couleur s'atténue avec l'âge, il serait difficile de l'utiliser comme empreinte invariante.

6 CONCLUSION SUR LA BIOMETRIE

Dans un futur proche, les systèmes biométriques vont peu à peu remplacer l'utilisation de mots de passe, voire de clés qui sont utilisés actuellement pour les ordinateurs, les voitures, les accès contrôlés à des bâtiments ou à Internet. Les systèmes qui rencontreront le plus de succès seront ceux qui offriront l'interface la plus simple et la moins contraignante à l'utilisateur, tout en garantissant un bon niveau de sécurité. Finalement, l'authentification biométrique contribuera à rendre l'utilisation de certains systèmes plus simple et plus conviviale.

LOCALISATION AUTOMATIQUE DE L'IRIS DE L'ŒIL

1 INTRODUCTION

L'étape qui succède à l'acquisition et au pré-traitement de l'image de l'œil est la localisation de la position de l'iris dans cette image, c'est le thème du présent chapitre. Le but est de trouver les rayons R_1 et R_2 , ainsi que le centre O (Figure II.1) des limites interne et externe de l'iris supposées circulaires.

La localisation de l'iris de l'œil précède l'analyse de l'empreinte irienne pour en extraire l'information pertinente.

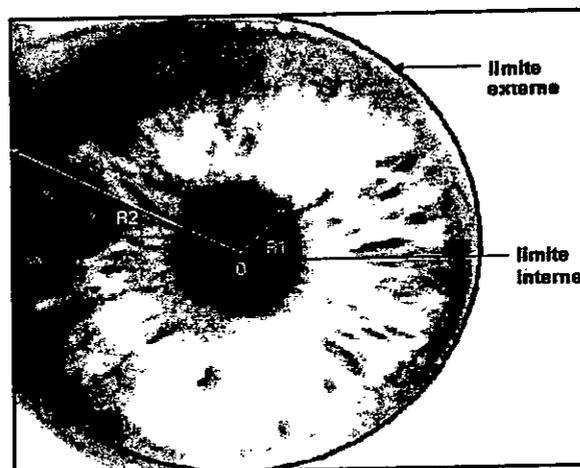


Figure II. 1 : Limites de l'iris de l'œil

2 PROTOCOLE DE PRISE D'IMAGE DE L'IRIS DE L'ŒIL

L'identification à l'aide de l'empreinte irienne commence par une acquisition numérique de l'image de l'œil. L'image est prise en noir et blanc pour exploiter la texture de l'iris oculaire, empreinte permanente et durable dans le temps. L'œil est placé à une distance

de 15 à 50 cm d'une caméra N & B, avec un capteur classique ou CCD. Un objectif est indispensable. Une des difficultés majeure de la reconnaissance automatique est l'acquisition d'une image de l'œil de haute qualité sans nuire à l'utilisateur, car l'iris est relativement petit (environ 1 cm de diamètre), sombre et très sensible. L'image désirée doit posséder les propriétés suivantes [WILDES 97], [FLOM 87], [MILLER 94]:

- Une résolution suffisante pour la reconnaissance (codage).
- Un bon contraste à l'intérieur de l'iris afin que la texture soit nette et sans avoir à augmenter l'éclairage qui pourrait nuire à l'utilisateur (l'intensité de la source lumineuse doit être adéquate).
- L'image doit être centrée, sans obliger l'utilisateur à porter un masque et sans coopération contraignante de sa part.
- L'image doit présenter le minimum possible de reflets. Par conséquent, il faut tenir compte: des reflets ponctuels, de la non-uniformité de l'éclairage, des reflets uniformes et non ponctuels, et des images de l'environnement qui se reflètent sur l'iris. On utilise souvent un éclairage multi-sources artificiel (réseau de diodes LED) calibré tout en atténuant le plus possible l'éclairage ambiant.

Le système de Daugman capture une image de l'œil dont l'iris a un diamètre compris entre 100 et 200 pixels, en utilisant une caméra dont l'objectif est de 330 mm avec une distance œil-caméra comprise entre 15 et 46 cm. De même [DAUGMAN 90], [DAUGMAN 93], [DAUGMAN 94], le système de Wildes [WILDES 96], [WILDES 92] utilise une caméra dont l'objectif est de 80 mm à une distance de 20 cm pour obtenir un iris de 256 pixels de diamètre. Vu la nécessité de garder l'éclairage relativement faible pour le confort de l'utilisateur, l'ouverture optique (objectif) ne peut être plus petite [WILDES 97].

On considère dans ce qui suit que les images des iris sont de qualité parfaite.

3 OCCLUSION DE L'ŒIL

L'œil est protégé par les paupières et les cils. Lors de la prise d'image, les paupières sont plus ou moins ouvertes. Elles peuvent cacher une partie ou la totalité de l'iris. Pour opérer une identification à l'aide de l'empreinte irienne, une analyse du degré d'occlusion des

paupières est nécessaire, ceci afin de retenir l'image de l'iris ou la rejeter en se basant sur un seuil d'occlusion prédéfini. L'occlusion partielle de l'œil n'empêche pas forcément l'exploitation de l'image de l'iris partiellement disponible. Dans ce qui suit, on suppose que la partie utile de l'iris (celle délimitée par le masque d'analyse) est non-masquée.

4 DETECTION AUTOMATIQUE DU CENTRE ET DU RAYON DE LA PUPILLE

4.1 ORGANIGRAMME

Etape 1 : Localisation automatique de la pupille (Détection de la position très approximative du centre de la pupille),

Etape 2 : Détection du centre approximatif de la pupille et du rayon correspondant (Amélioration de la position du centre),

Etape 3 : Détection du centre et du rayon exacts de la pupille (Approximation circulaire de la pupille).

4.2 EXEMPLE ILLUSTRE DU DEROULEMENT DES TRAITEMENTS

Etape 1 : Localisation automatique de la pupille (Détection de la position très approximative du centre de la pupille)

La pupille est une zone noire de dimension non négligeable. Les histogrammes de projection horizontal et vertical sont creusés. Les minimums (x_1, y_1) fournissent les coordonnées très approximatives de la position de la pupille. La méthode est la suivante:

- 1) Projeter l'image originale sur l'axe des abscisses x (calculer l'intensité moyenne de chaque colonne),
- 2) Lissage du résultat afin d'éliminer les variations brusques,
- 3) Déterminer l'abscisse x_1 correspondant à l'intensité moyenne minimale ($x = x_1$),
- 4) Projeter l'image originale sur l'axe des ordonnées y (calculer l'intensité moyenne de chaque ligne),
- 5) Lissage du résultat afin d'éliminer les variations brusques,
- 6) Déterminer l'ordonnée y_1 correspondant à l'intensité moyenne minimale ($y = y_1$).

Le point $P_1(x_1, y_1)$ appartient à la pupille avec une forte probabilité (Figure II.2).

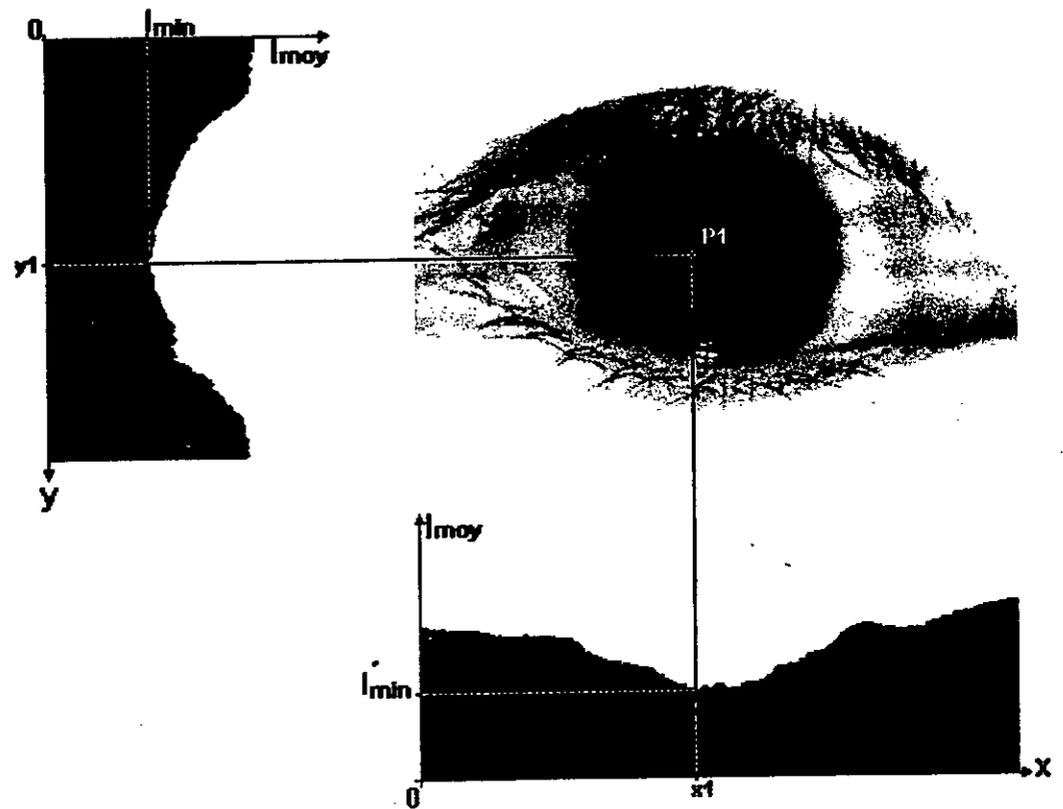


Figure II. 2 : Localisation de la pupille

Etape 2 : Détection du centre approximatif de la pupille et du rayon correspondant
(Amélioration de la position du centre)

Pour débiter, on présente une méthode d'exploration appelée "*méthode des cercles concentriques*".

Soit $P_c(x_c, y_c)$ le centre exact de la pupille, et R_c son rayon. Considérons N le nombre de cercles concentriques de rayon R (avec $0 < R < N+1$) et dont le centre P est inclus dans la pupille. On prend N élevé, par exemple 100. d_{cr} est la distance de correction entre le centre P et le centre exact P_c (Figure II.3a).

Pour chacun des cercles, on calcule l'intensité moyenne des pixels de l'image qui vérifient ce cercle. La figure II.3b montre la variation de l'intensité moyenne en fonction du rayon R .

On démontre que la distance de correction d_{cr} a pour expression (Figure II.3b):

$$d_{cr} = \Delta B / 2. \quad (II.1)$$

et aux approximations près le rayon de la pupille est R_c abscisse du milieu de la bande de transition ΔB .

Plus le centre P se rapproche du centre exact P_c (d_{cr} tend vers 0) et plus la transition est courte (ΔB tend vers 0).

Application pratique:

On applique la "*méthode des cercles concentriques*" à quelques points inclus dans la pupille le long d'une ligne horizontale. On choisit le point P' dont la courbe présente une largeur de bande de transition ΔB la plus courte. A partir du point P' on applique encore la "*méthode des cercles concentriques*" à d'autres points inclus eux aussi dans la pupille, cette fois ci le long d'une ligne verticale. On retient finalement le point P_2 , comme centre du cercle amélioré, dont la courbe présente une bande de transition la plus courte.

1) Balayage horizontal

- Appliquer la "*méthode des cercles concentriques*" au point $P_1(x_1, y_1)$, trouvé dans l'étape 1, et calculer la largeur de la bande de transition ΔB correspondante,
- Appliquer la même méthode sur quelques points à gauche et à droite de P_1 tout en calculant la largeur de la bande de transition ΔB correspondant à chacun de ces points,
- Choisir le point $P'(x_2, y')$ ayant la largeur de la bande de transition ΔB la plus courte. P' est le point le plus proche du centre de la pupille.

Les graphiques 1, 2, 3, et 4 de la figure II.4 présentent des transitions variées en fonction de la position du point P . le graphique 3 présente une bande de transition de largeur la plus courte. Il est pris comme point P' .

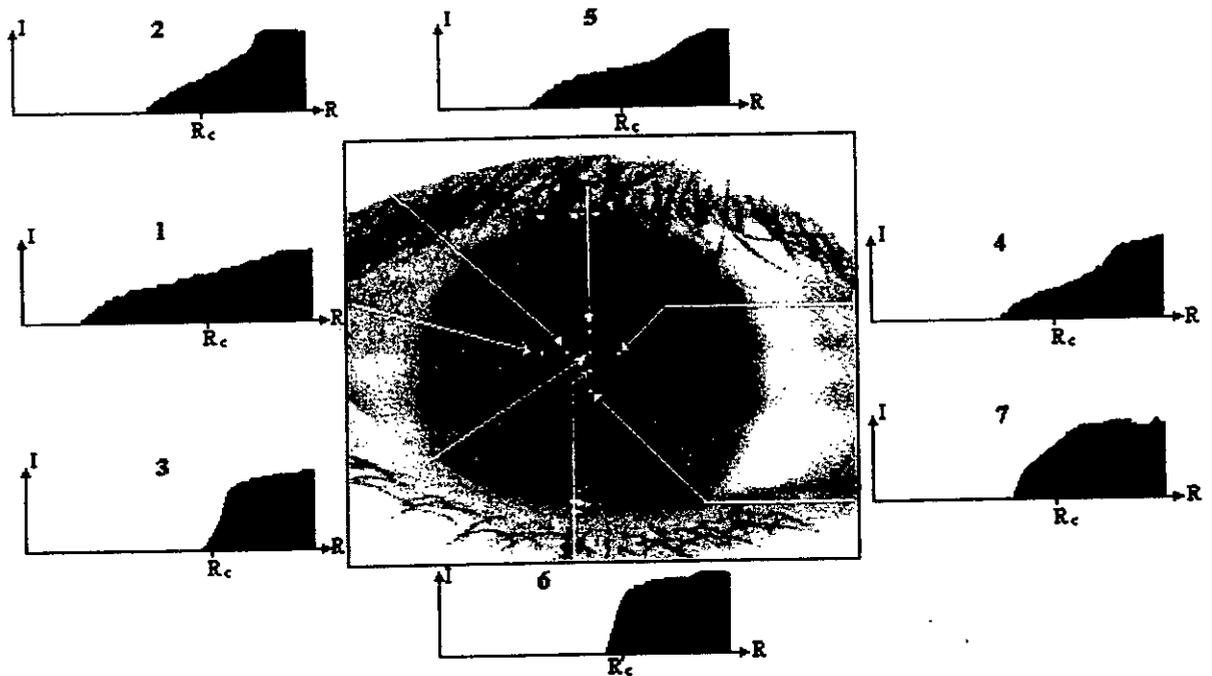


Figure II. 4 : Variation de la largeur de bande de transition des intensités moyennes en rapport au point P d'application de la "méthode des cercles concentriques"

2) Balayage vertical

- Appliquer la "méthode des cercles concentriques" au point $P'(x_2, y')$, trouvé lors du balayage horizontal, et calculer la largeur de bande ΔB correspondante,
- Appliquer la même méthode à quelques points en haut et en bas du point P' tout en calculant la largeur de la bande de transition ΔB pour chacun de ces points,
- Choisir le point $P_2(x_2, y_2)$ ayant la largeur de la bande de transition ΔB la plus courte (P_2 est le point le plus proche du centre de la pupille). Le rayon R_c approximatif de la pupille sera l'abscisse du milieu de la bande de transition dont la largeur est la plus courte.

Les graphiques 5, 3, 6, et 7 (dans l'ordre) de la figure II.4 présentent des transitions variées en fonction de la position du point P. le graphique 6 présente une bande de transition de largeur la plus courte. Il est pris comme point P_2 .

Etape 3 : Détection du centre et du rayon exacts de la pupille (Approximation circulaire [Annexe C],[MENACER 98a, b et c], [MENACER 2002b et c])

La "*méthode des cercles concentriques*" est appliquée à l'image originale lissée, filtrée (Sobel), ensuite binarisée (seuillage) [Annexe E], afin d'extraire les contours.

- 1) Charger dans une matrice les coordonnées de tous les points de contour qui se trouvent entre les deux cercles concentriques de centre P_2 (calculé dans l'étape précédente) et de rayons $(R_c - \Delta R)$ et $(R_c + \Delta R)$, avec ΔR une tolérance sur le rayon R_c . On prend par exemple $(\Delta R / R_c) = 10 \%$,
- 2) Déterminer les coordonnées (x_c, y_c) du centre exact de la pupille P_c ,
- 3) Estimation du rayon R_c de la pupille.

Remarque: cette étape est répétée plusieurs fois éventuellement avec des bandes ΔR plus étroites autour du rayon R_c pour une estimation affinée du rayon interne de l'iris.

5 DETECTION AUTOMATIQUE DE L'IRIS DE L'ŒIL

5.1 ORGANIGRAMME

5.1.1 CAS DE CERCLES NON-CONCENTRIQUES

Etape 1 : Détection automatique de la pupille (voir paragraphe précédent),

Etape 2 : Détection du rayon externe approximatif de l'iris (en utilisant le centre et le rayon de la pupille comme données initiales),

Etape 3 : Détection du centre et du rayon externe exacts de l'iris (approximation circulaire de la limite externe de l'iris).

Ceci revient à déterminer deux cercles non-concentriques avec deux centres O_1 et O_2 et deux rayons R_1 et R_2 .

5.1.2 CAS DE CERCLES CONCENTRIQUES

Etape 1 : Détection automatique de la pupille (voir paragraphe précédent),

Etape 2 : Détection du rayon externe approximatif de l'iris (en utilisant le centre et le rayon de la pupille comme données initiales),

Etape 3 : Détection du rayon externe exact de l'iris (la moyenne quadratique des rayons; le centre étant le même que celui de la pupille).

Dans notre cas on a fait l'hypothèse que les contours de l'iris sont des cercles concentriques pour des raisons de simplicité.

5.2 EXEMPLE ILLUSTRÉ DU DÉROULEMENT DES TRAITEMENTS

On présente dans ce qui suit un exemple des traitements dans l'hypothèse de limites iriennes circulaires et concentriques.

Etape 1 : Détection automatique de la pupille

La détection automatique de la pupille permet de calculer automatiquement le centre et le rayon exacts de la pupille $P_c(x_c, y_c)$ et R_c (dénommés aussi O et R_1 respectivement).

Etape 2 : Détection du rayon externe approximatif de l'iris.

Dans cette étape, on applique la "méthode des cercles concentriques" au point $P_c(x_c, y_c)$, avec $R > R_c$ et pour éviter les paupières haute et basse, on doit limiter l'angle d'ouverture des cercles (Figure II.5).



Figure II. 5 : Limitation angulaire des cercles concentriques

Le rayon externe approximatif R_e de l'iris sera l'abscisse du milieu de la bande de transition du graphe obtenu. La largeur de la bande de transition est théoriquement étroite.

Etape 3 : Détection du rayon externe exact de l'iris

On utilise l'image après détection de contour

- Charger dans une matrice les coordonnées de tous les points de contour qui se trouvent dans le disque partiel délimité par les arcs concentriques de centre P_c (centre de la pupille) et de rayons $(R_c - \Delta R)$ et $(R_c + \Delta R)$, ΔR est une bande autour du cercle de rayon R_c . On prend par exemple $(\Delta R / R_c) = 10 \%$,
- Le rayon externe exact R_2 de l'iris sera la moyenne des distances entre ces points de contour et le centre P_c .

Remarque: Cette étape est répétée plusieurs fois éventuellement avec des bandes ΔR plus étroites autour du rayon R_c (dénommé aussi R_2) pour une estimation affinée du rayon externe de l'iris.

6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté une approche pour la détection automatique des limites intérieure et extérieure de l'iris et la localisation de son centre. La méthode comporte deux étapes fondamentales, la première est la détection de la limite interne de l'iris, et la seconde consiste à détecter sa limite externe. Cette méthode est simple et pratique, elle donne de bons résultats même avec des images de l'œil comportant des taches de flashes (de dimensions modérées).

Ainsi, on a déterminé l'endroit exact de l'information irienne utile qu'on se propose de traiter ultérieurement.

PROTOCOLE D'ANALYSE DE L'IMAGE DE L'IRIS DE L'ŒIL

1 INTRODUCTION

Après la localisation de l'iris et son dimensionnement (détermination de son rayon interne R_1 , son rayon externe R_2 et son centre O), dans une image de l'œil, il est procédé à l'analyse de l'image de l'iris. On expose dans ce chapitre, un protocole d'analyse d'image de l'iris de l'œil [MENACER 2002a]. Le but de cette analyse est de représenter l'information utile de l'image de l'iris sous la forme d'un code normalisé et compact qu'on appelle "*IrisData*". On génère ainsi un code spécifique à chaque iris à même de réduire la quantité et la redondance des données de l'image. On commence par délimiter l'image de l'iris à l'aide d'un masque d'analyse, afin d'en extraire l'information utile, par l'application de filtres spécifiques à ce type d'analyse. Des transformations sont nécessaires, lors du traitement, afin d'obtenir un code dépendant uniquement de la texture de l'iris. L'ensemble des fichiers "*IrisData*" d'une population donnée constitue la base de donnée de référence. L'acquisition en est faite lors de la phase d'apprentissage.

2 HYPOTHESES

2.1 DEFORMATION DE L'IMAGE DE L'IRIS

L'inclinaison de la tête et la rotation de l'œil dans son orbite rendent la forme de l'image de l'iris elliptique si on suppose qu'elle est initialement circulaire. L'analyse de l'iris devrait commencer par une première transformation qui ramène cette ellipse à la forme d'un cercle. On suppose dans notre cas et pour ce qui suit que l'image de l'iris est prise de face, ainsi la forme de l'iris serait approximativement circulaire.

2.2 INVARIANCE DE LA GEOMETRIE DE L'IRIS EN FONCTION DE L'OUVERTURE DE LA PUPILLE

La dimension de l'ouverture de la pupille entraîne une transformation de la forme de l'empreinte irienne. L'hypothèse de travail est que cette transformation de la forme de l'empreinte irienne est radiale et linéaire.

Soient O , R_1 et R_2 respectivement le centre, les rayons interne et externe de l'iris (R_2 fixe, R_1 varie en fonction de l'ouverture de la pupille).

Soient P un point de l'iris, appartenant à la demi droite $[Oz$, et d la distance du centre O au point P . Quelle que soit l'ouverture de la pupille, la nouvelle position P' de P reste sur la même demi droite $[Oz$, et la distance d' entre le point P' et le centre O varie linéairement en fonction de la distance d (Figure III.1).

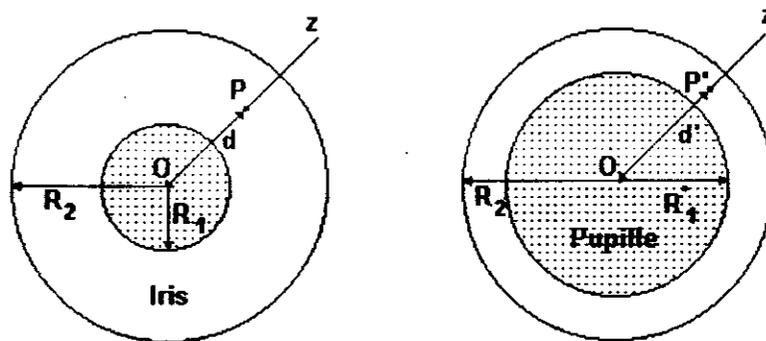


Figure III.1 : Transformation radiale et linéaire de l'empreinte irienne en fonction de l'ouverture de la pupille

La relation entre d et d' est:

$$\frac{d - R_1}{R_2 - R_1} = \frac{d' - R_1'}{R_2 - R_1'} \quad (\text{III.1})$$

$$d' \text{ où: } d = \frac{R_2 - R_1}{R_2 - R_1'} d' + \frac{R_1 - R_1'}{R_2 - R_1'} R_2 \quad (\text{III.2})$$

Avec: $(R_1 < d < R_2)$, $(R_1' < d' < R_2)$, $(R_2 \neq R_1)$ et $(R_2 \neq R_1')$.

3 DEFINITION GEOMETRIQUE DU MASQUE D'ANALYSE

Le masque d'analyse délimite l'image utile de l'iris. Il est complètement inclus dans l'iris. Il est constitué de deux parties symétriques, une partie droite et une autre gauche. On peut imaginer de nombreuses formes à ces masques (Figure III.2 et III.3).

3.1 LE MASQUE D'ANALYSE POLAIRE

Le critère d'invariance de la géométrie de l'iris consiste à ce que le même point de l'iris soit correctement localisé quelle que soit l'ouverture de la pupille. Le masque d'analyse doit être tel que la localisation soit correcte quelque soit l'ouverture de la pupille.

Chacune des parties droite et gauche du masque d'analyse est divisée en "pistes" sous forme de tranches circulaires. Et chacune de ces pistes est subdivisée en "zones" d'analyse (Figure III.2).

Afin d'éviter les limites irrégulières de l'iris, sujettes aux atteintes dues à la maladie et à l'âge, et donc susceptibles de modifications dans la texture de l'image, on choisit le rayon externe R_{2p} du masque, inférieur au rayon externe R_2 de l'iris d'une part. On choisit aussi le rayon interne R_{1p} du masque, supérieur au rayon interne R_1 de l'iris d'autre part. Le rapport entre la largeur exploitable du disque de l'iris et la largeur réelle est donné par l'équation (III.3).

$$k = \frac{R_{2p} - R_{1p}}{R_2 - R_1} \quad (\text{III.3})$$

k peut être pris dans l'intervalle $[0.7, 1]$, dans notre cas on a fixé $k = 0.8$, soit 10% de garde de part et d'autre des limites interne et externe.

On trouve ainsi les expressions des rayons interne et externe exploitables:

$$R_{1p} = R_1 + (1 - k)(R_2 - R_1) / 2 \quad (\text{III.4})$$

$$R_{2p} = R_2 - (1 - k)(R_2 - R_1) / 2 \quad (\text{III.5})$$

Pour éviter aussi l'empiétement des paupières haute et basse de l'œil, la hauteur à exploiter de l'iris est limitée à une valeur Y_{\max} en haut et en bas de l'axe horizontal de l'iris (Figure III.2a).

Les informations à la périphérie d'une zone à analyser sont insuffisamment ou pas du tout prises en compte en raison de la décroissance rapide de la fonction Gaussienne. La prise en compte de ces informations est garantie en introduisant un chevauchement partiel des

pistes et des zones (Figure III.2c). En pratique on prend des pistes et des zones à cheval sur deux pistes et deux zones respectivement.

Soit N_p le nombre de pistes contiguës sur une partie du masque d'analyse et soit N_z le nombre de zones par piste, alors Le nombre total des zones du masque d'analyse avec chevauchement est donné par l'expression (III.6).

$$N_{zt} = 2 (2.N_p - 1) (2.N_z - 1) \quad (III.6)$$

$(2.N_p - 1)$ représente le nombre de pistes avec chevauchement de chaque coté du masque.

$(2.N_z - 1)$ représente le nombre de zones avec chevauchement sur chacune des pistes.

Le masque d'analyse polaire s'impose du fait de la nature quasi-circulaire des contours interne et externe de l'iris de l'œil.

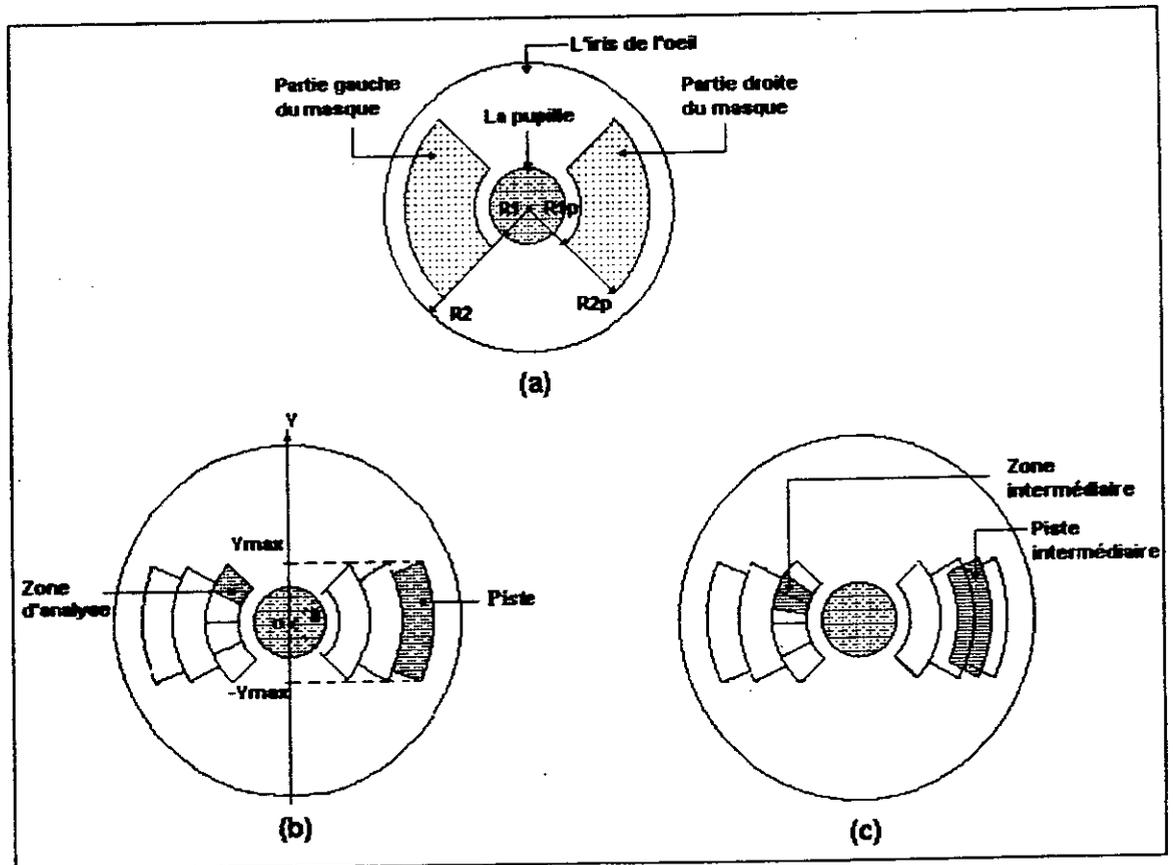


Figure III.2 : Masque d'analyse polaire

- (a) Les parties du masque d'analyse
- (b) Pistes et zones d'analyse
- (c) Chevauchement des pistes et des zones

3.2 EXEMPLE DE LA FORME DU MASQUE EN FONCTION DE L'OUVERTURE DE LA PUPILLE

Soit $\frac{R_1}{R_2}$ le rapport entre le rayon interne et le rayon externe de l'iris, et soit θ_1 l'angle d'ouverture de la première piste, à partir de la pupille, avec θ_1 fixe quelle que soit l'ouverture de la pupille.

Soit donné un nombre de pistes contiguës N_p , ainsi qu'un rapport k du disque exploitable (III.3).

On calcule la hauteur maximale Y_{\max} de la première piste.

$$Y_{\max} = (R_{1p} + \Delta R) \cdot \sin\theta_1 \quad (\text{III.7})$$

Si on suppose que les hauteurs maximales Y_{\max} sont toutes identiques à la première, les angles d'ouverture des pistes suivantes sont donnés par l'équation (III.8):

Pour $n=1$ à $n=(2.N_p-1)$ on a:

$$\theta_n = \text{Arcsin} \left(\frac{R_{1p} + \Delta R}{R_{1p} + \frac{n+1}{2} \Delta R} \sin\theta_1 \right) \quad (\text{III.8})$$

n représente le rang de la piste. Par exemple pour $n=1$ et 3, on a les deux premières pistes contiguës et pour $n=2$, on a la première piste de chevauchement.

ΔR est la largeur d'une piste, elle est donnée par l'équation suivante:

$$\Delta R = \frac{(R_2 - R_1) \cdot k}{N_p} \quad (\text{III.9})$$

L'expression de θ_n en fonction de $\frac{R_1}{R_2}$, k et N_p devient (III.10):

$$\theta_n = \text{Arcsin} \left[\frac{\frac{R_1}{R_2} [N_p + k(N_p - 2)] + [N_p - k(N_p - 2)]}{\frac{R_1}{R_2} [N_p + k(N_p - n - 1)] + [N_p - k(N_p - n - 1)]} \sin\theta_1 \right] \quad (\text{III.10})$$

Application:

On fixe $\theta_1=45^\circ$, on prend:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{3}, k = 0.8 \text{ et } N_p = 4 \text{ (Figure III.3a).}$$

En appliquant l'expression (III.10), on trouve $Y_{\max} = 0.4086 \cdot R_2$.

Dans ce cas, les angles d'ouverture sont:

θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7
38,94°	34,45°	30,95°	28,13°	25,79°	23,83°

Lorsque la pupille change de dimension (variation de R_1), les angles d'ouvertures des pistes restent fixes, contrairement aux Y_{\max} correspondants (Figure III.3b et III.3c).

Pour chacune des pistes, on a :

$$Y_{\max} = R_2 \left[[N_p + k(N_p - 2)] \frac{R_1}{R_2} + [N_p - k(N_p - 2)] \right] \frac{\sin \theta_n}{2.N_p} \quad (\text{III.11})$$

avec $n = 1$ à $n = 2.N_p - 1$

θ_n est fixe, pour tout n , quelque soit l'ouverture de la pupille donc quelque soit le rapport $\frac{R_1}{R_2}$.

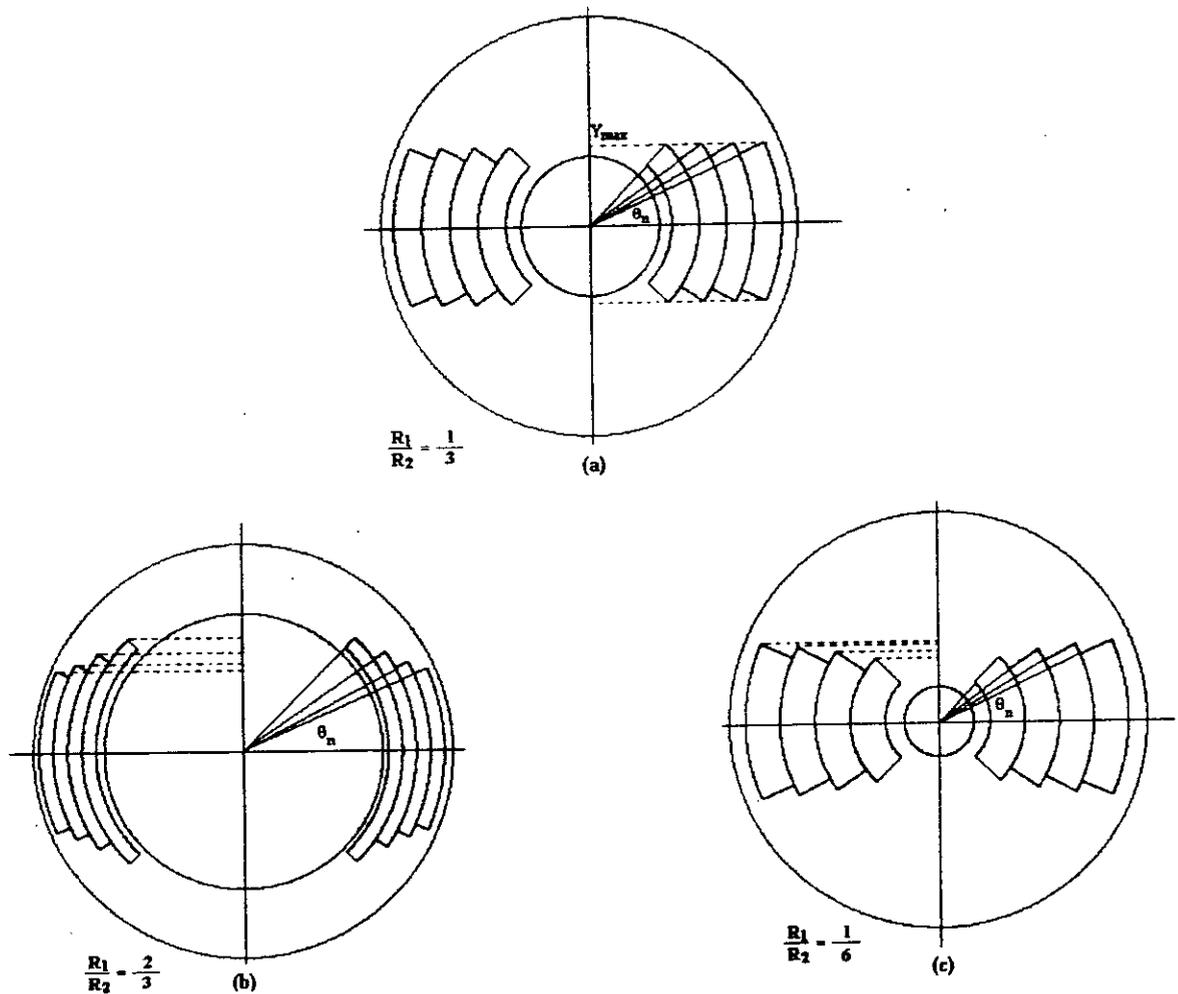


Figure III.3 : La forme du masque en fonction de l'ouverture de la pupille

On constate donc que si, pour une ouverture de pupille donnée ($\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{3}$ figure III.3a), les hauteurs maximales des pistes sont identiques, elle sont différentes lorsque $\frac{R_1}{R_2}$ est autre.

Lorsque $\frac{R_1}{R_2} < \frac{1}{3}$, les pistes s'élargissent et on a les Y_{\max} de toutes les pistes inférieurs à Y_{\max}

quand $\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{3}$.

Et lorsque $\frac{R_1}{R_2} > \frac{1}{3}$, les pistes se rapetissent et on a les Y_{\max} de toutes les pistes supérieurs à

Y_{\max} quand $\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{3}$.

Les valeurs des Y_{\max} correspondants à chacun, des cas de la figure III.3 sont donnés par le tableau III.1 suivant:

	Y_{\max} (Piste 1)	Y_{\max} (Piste 3)	Y_{\max} (Piste 5)	Y_{\max} (Piste 7)
$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{3}$	0.3771	0.3771	0.3771	0.3771
$\frac{R_1}{R_2} = \frac{2}{3}$	0.5421	0.4714	0.4243	0.3906
$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{6}$	0.2946	0.3300	0.3536	0.3704

Tableau III.1 : Les hauteurs des pistes en fonction de l'ouverture de l'iris

3.3 LE MASQUE D'ANALYSE RECTANGULAIRE

On pourrait penser à un masque de forme rectangulaire tel que représenté à la figure III.4. L'intérêt de ce type de masque serait la simplicité des traitements d'analyse de l'image de l'iris de l'œil. Comme précédemment examiné, l'ouverture et la fermeture de la pupille entraîne une transformation radiale de l'iris. Cette transformation entraîne une déformation correspondante du masque rectangulaire en une forme non-rectangulaire. L'absence de l'invariance de la forme rectangulaire désirée au départ, en fonction de l'ouverture de la pupille nous amène à rejeter ce type de masque.

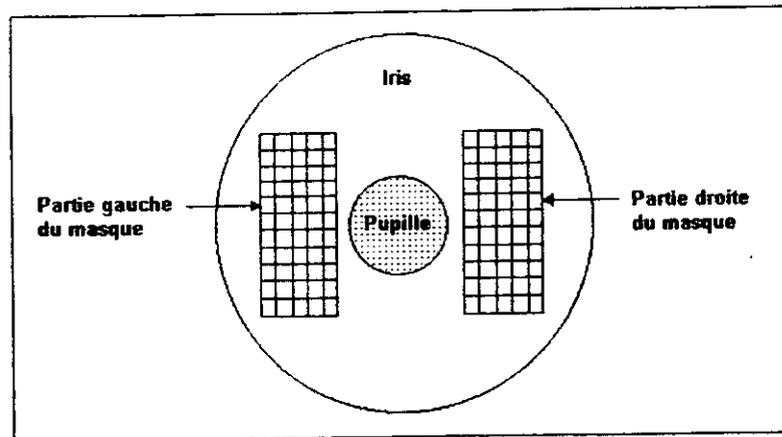


Figure III.4 : Masque d'analyse rectangulaire

4 DEFINITION DU FILTRE DE GABOR

4.1 INTRODUCTION

Le type d'information à extraire de l'image utile de l'iris est spécifique. Il s'agit, comme cité précédemment, de la texture de l'iris, par conséquent le choix de l'outil d'analyse doit être fait de façon à extraire l'information utile d'une manière normalisée et compacte. Dans ce but, on a choisi les filtres de Gabor comme outil d'analyse.

4.2 DEFINITION DU FILTRE DE GABOR

La forme générale fonctionnelle de la famille des filtres de Gabor à deux dimensions est donnée par l'équation (III.12). $G(\alpha, f, \varphi, x, y)$ est la réponse à l'impulsion [DAUGMAN 85], [DAUGMAN 88], [DAUGMAN 92], [TUNER 86].

$$G(\alpha, f, \varphi, x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right]\right\} \sin\{2\pi f[\cos\alpha.(x-x_0) + \sin\alpha.(y-y_0)] + \varphi\} \quad (\text{III.12})$$

La fonction de Gabor à deux dimensions représente le produit d'une fonction Gaussienne elliptique centrée autour du point de coordonnées (x_0, y_0) , d'un écart type σ_x suivant l'axe des x et σ_y suivant l'axe des y , par une onde plane sinusoïdale représentant la modulation harmonique de fréquence spatiale f (l'échelle), d'orientation α et de phase φ (Figure III.5).

Dans ce cas, on utilise la fonction de Gabor comme filtre de transformation et de décomposition. Les paramètres de l'onde plane favorisent ce type de filtre à fournir des opérateurs appropriés pour la discrimination de textures.

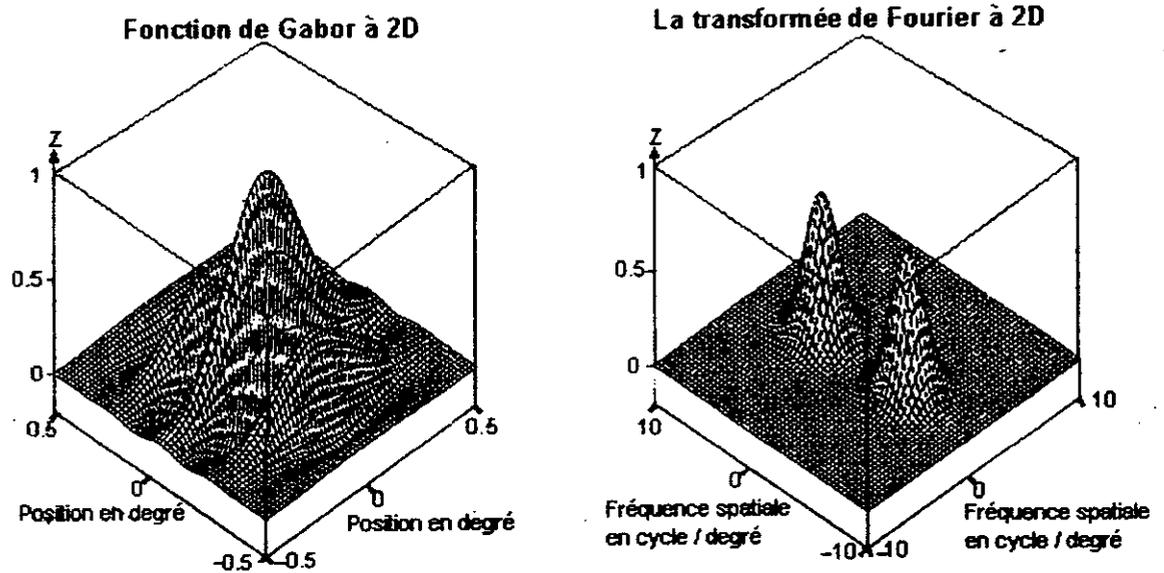


Figure III.5 : La fonction de Gabor et sa transformée de Fourier (avec $(x_0, y_0) = (0, 0)$ et $\sigma_x = \sigma_y$)

Exemple d'application:

Lorsque le signal est continu (III.13):

$$I_f(x_0, y_0) = \iint_{xy} G(\alpha, f, \varphi, x_0 - x, y_0 - y) \cdot I(x, y) \, dx \, dy \quad \text{(III.13)}$$

Lorsque le signal est discret (III.14):

$$I_f(x_0, y_0) = \sum_i \sum_j G(\alpha, f, \varphi, x_0 - i, y_0 - j) \cdot I(i, j) \quad \text{(III.14)}$$

Exemple de transformation de l'expression du signal continu vers le signal discret :
 autour de $(x_0, y_0) = (0, 0)$, si on a pour un signal continu :

$$I_f(0, 0) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \int_{x=-\infty}^{+\infty} \int_{y=-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \sin(2\pi(ax + by)) \, dx \, dy$$

son équivalent pour un signal discret est:

$$I_f(0, 0) = \frac{1}{2\pi n_x n_y} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{k^2}{2n_x^2} + \frac{l^2}{2n_y^2}\right)} \sin\left(2\pi\left(a\frac{k}{n_x} + b\frac{l}{n_y}\right)\right)$$

$G(\alpha, f, \varphi, x, y)$ est la fonction du filtre de Gabor. $I(x_0, y_0)$ et $I_f(x_0, y_0)$ représentent, respectivement, les fonctions de l'image originale et de l'image filtrée autour du point (x_0, y_0) , donc de l'image codée pour une fréquence spatiale f , une orientation α et une phase φ données, de l'onde plane sinusoïdale. En pratique, l'image complète est découpée en zone avant d'être codée. C'est à dire que chaque zone est codée individuellement.

Les filtres de Gabor sont à très fortes décroissances vers les bords ce qui rend la double intégration presque inchangée si on accroît la zone d'intégration, ceci lorsque l'essentiel des ondulations perceptibles est pris en compte.

$n\sigma_x$ en pixel définie l'écart type en x.

n_x en pixel définie la période en x.

$n\sigma_y$ en pixel définie l'écart type en y.

n_y en pixel définie la période en y.

4.3 CHOIX DES DIMENSIONS DES FILTRES

Les dimensions en pixel du filtre de Gabor doivent être de même grandeur que les dimensions d'une zone du masque d'analyse défini précédemment. Les dimensions du filtres sont H_f et V_f exprimées en pixels.

4.4 GENERATION DES FILTRES DE GABOR

Un ensemble de filtres de Gabor est appliqué à l'image utile, avec pour but de correctement extraire l'information. Un filtre de Gabor est composé d'une onde plane sinusoïdale modulée par une courbe gaussienne. L'onde plane sinusoïdale possède des paramètres spécifiques qui sont: sa fréquence et son orientation. En faisant changer ces paramètres, on obtient un ensemble de filtres de Gabor. Pour chaque fréquence spatiale et chaque orientation, une paire de filtre d'ondes sinusoïdales ayant une différence de phase initiale φ de $\pi/2$ (en quadrature de phase) est générée. L'ensemble qu'on a choisi pour appliquer à l'image utile consiste en trois fréquences (f_1 , f_2 et f_3) avec huit orientations (α_i , avec $i=0, \dots, 7$) [JOLION 99]. Ce choix définit 48 filtres (3 fréquences * 8 orientations * 2 phases) (Figure III.6).

- On prend une période (cycle) sur la largeur du filtre rectangulaire. Ainsi, la fréquence minimale, de dimension pixel^{-1} , est donnée par l'équation (III.15).

$$f_1 = \frac{1}{\min(H_f, V_f)} \quad (\text{III.15})$$

On se limite aux premières fréquences harmoniques avec $f_2 = 2.f_1$ et $f_3 = 3.f_1$.

- Les huit orientations (directions) sont espacées de $\Delta\alpha = \pi/8$.
- Les phases initiales sont en quadrature: $\varphi = \varphi_1 = 0$; $\varphi = \varphi_2 = \pi/2$

- Les écart types en x et en y sont respectivement : $n\sigma_x = H_f/6$ et $n\sigma_y = V_f/6$, ces valeurs permettent un meilleur compromis pour obtenir les raies existantes avec un faible étalement vers les raies voisines.

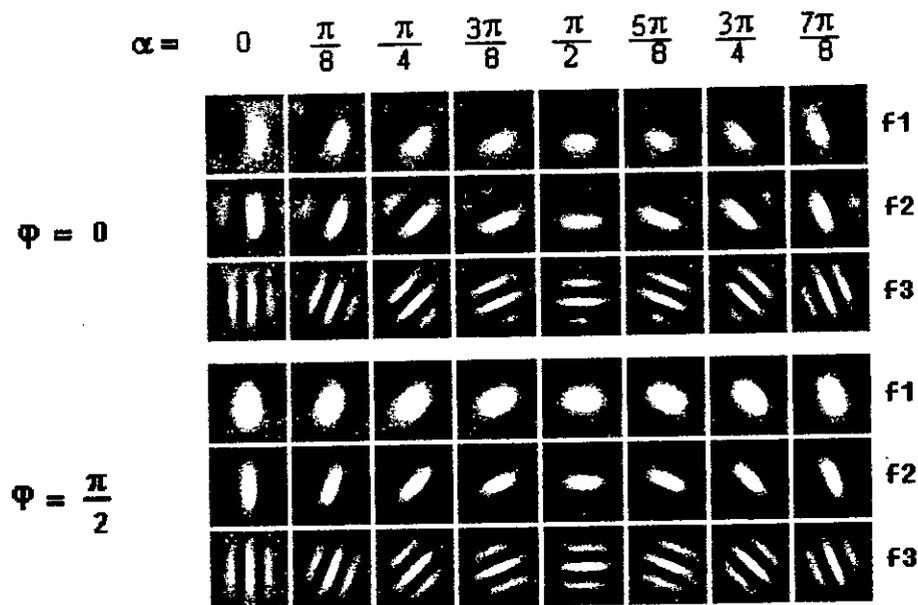


Figure III.6 : Banc de filtres de Gabor

5 CODAGE D'UNE IMAGE RECTANGULAIRE

On applique à une image $I(x,y)$ rectangulaire un ensemble de paires de filtres d'orientations et de fréquences spatiales différentes. Pour chaque orientation α et fréquence f de l'ensemble de filtres, on calcule les coefficients de Gabor (III.16) et (III.17)

$$C_1(\alpha, f) = \sum_x \sum_y G(\alpha, f, \varphi_1, x, y) I(x, y) \tag{III.16}$$

$$C_2(\alpha, f) = \sum_x \sum_y G(\alpha, f, \varphi_2, x, y) I(x, y) \tag{III.17}$$

$$C(\alpha, f) = (C_1^2 + C_2^2)^{1/2} \tag{III.18}$$

φ_1 et φ_2 sont en quadrature ($\varphi_1=0$ et $\varphi_2=\pi/2$ par exemple).

L'ensemble des coefficients $C(\alpha, f)$ obtenus (III.18), pour l'ensemble des zones de l'image, représente le code de cette image, ou "IrisData". Les coefficients $C(\alpha, f)$ sont indépendants de la phase φ initiale de l'onde plane d'analyse.

6 CODAGE D'UNE IMAGE SOUS FORME D'UN DISQUE PARTIEL

Le masque d'analyse possède la forme d'un disque partiel tandis que le filtre de Gabor est défini pour une forme rectangulaire, d'où la nécessité d'une adaptation de géométrie, en opérant la transformation d'une forme géométrique en une autre, afin et avant de coder l'image.

6.1 TRANSFORMATION D'UN RECTANGLE EN DISQUE PARTIEL ET RECIPROQUEMENT

On effectue la correspondance entre deux domaines géométriques l'un rectangulaire avec pour repère (x,y) , l'autre sous forme d'un disque partiel avec pour repère (x_p, y_p) ou (R, θ) (Figure III.7), d'où les équations (III.19):

$$\begin{cases} x_1 \leq x \leq x_2 \\ y_1 \leq y \leq y_4 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} R_1 \leq R \leq R_2 \\ \theta_1 \leq \theta \leq \theta_4 \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

On préserve la linéarité et on normalise l'expression (III.19):

$$\begin{cases} 0 \leq \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \leq 1 \\ 0 \leq \frac{y-y_1}{y_4-y_1} \leq 1 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 0 \leq \frac{R-R_1}{R_2-R_1} \leq 1; \\ 0 \leq \frac{\theta-\theta_1}{\theta_4-\theta_1} \leq 1; \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

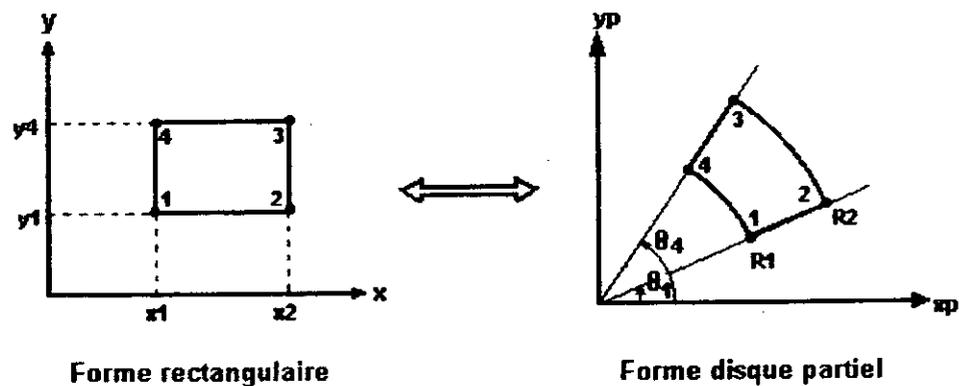


Figure III.7 : Correspondance entre une forme rectangulaire et la forme d'un disque partiel

Une variation relative pour les variables x et y entraîne la même variation relative pour les variables R et θ respectivement.

La relation de base de transformation linéaire est alors (III.21):

$$\begin{cases} \frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{R-R_1}{R_2-R_1} \\ \frac{y-y_1}{y_4-y_1} = \frac{\theta-\theta_1}{\theta_4-\theta_1} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Les variables, R et θ , sont indépendantes tout comme les variables x et y .

De la relation (III.21), on obtient:

La transformation I: disque partiel vers rectangle.

$$\begin{cases} x(R) = x_1 + \frac{R-R_1}{R_2-R_1} (x_2-x_1) & \text{avec } x_1 \leq x \leq x_2 \text{ si } R_1 \leq R \leq R_2 \\ y(\theta) = y_1 + \frac{\theta-\theta_1}{\theta_4-\theta_1} (y_4-y_1) & \text{avec } y_1 \leq y \leq y_4 \text{ si } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_4 \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

La transformation II: rectangle vers disque partiel.

$$\begin{cases} R(x) = R_1 + \frac{x-x_1}{x_2-x_1} (R_2-R_1) & \text{avec } R_1 \leq R \leq R_2 \text{ si } x_1 \leq x \leq x_2 \\ \theta(y) = \theta_1 + \frac{y-y_1}{y_4-y_1} (\theta_4-\theta_1) & \text{avec } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_4 \text{ si } y_1 \leq y \leq y_4 \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

6.2 CODAGE D'UNE ZONE D'ANALYSE D'UNE IMAGE DE L'IRIS DE L'ŒIL

Pour coder une zone d'analyse, on applique soit le filtre sur le maillage de l'image, (auquel cas il n'y a aucune altération de l'image originale), soit le maillage du filtre sur l'image. Dans ce dernier cas une interpolation de l'image est nécessaire d'où altération.

6.2.1 APPLICATION DU MAILLAGE DE L'IMAGE SUR LE FILTRE (METHODE 1)

Cette méthode consiste à appliquer le maillage (les pixels) de l'image 'abcd' à la forme rectangulaire du filtre pour effectuer l'analyse. L'image alors n'est pas altérée (Figure III.8).

Soit $I(x_p, y_p)$ une zone d'analyse de l'image de l'iris, avec x_p et y_p des entiers. S_z est la surface de la zone d'analyse. Soit aussi $G(\alpha, f, x, y)$ le filtre de Gabor, avec x et y des nombres réels.

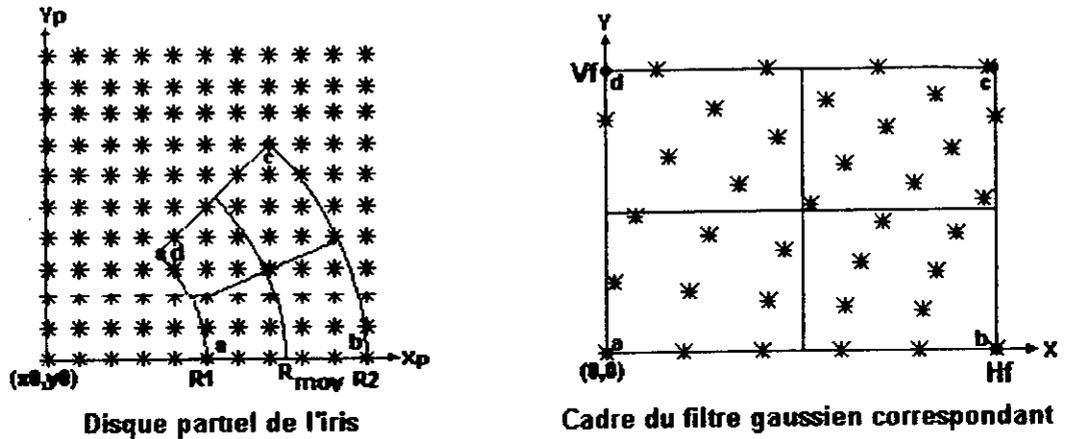


Figure III.8 : Application du maillage de l'image sur le filtre

On applique dans ce cas la transformation I (III.22) pour le calcul des coefficients C de Gabor (III.24), (III.25) et (III.26).

$$\begin{cases} C_1(\alpha, f) = \sum_{x_p} \sum_{y_p} G(\alpha, f, \varphi_1, x(R), y(\theta)) \cdot I(x_p, y_p) \cdot \frac{R_{moy}}{R} \\ C_2(\alpha, f) = \sum_{x_p} \sum_{y_p} G(\alpha, f, \varphi_2, x(R), y(\theta)) \cdot I(x_p, y_p) \cdot \frac{R_{moy}}{R} \end{cases} \quad (III.24)$$

avec

$$\begin{cases} R = \sqrt{(x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2} \\ \theta = \text{Arctg} \left(\frac{y_p - y_0}{x_p - x_0} \right) \end{cases} \quad (III.25)$$

et

$$\frac{1}{R_{moy}} = \sum_{x_p} \sum_{y_p} G(\alpha, f, \varphi_1, x(R), y(\theta)) \frac{1}{R} \quad (III.26)$$

R_{moy} est le rayon moyen défini pour normaliser le calcul des coefficients de gabor.

Il est à remarquer que les expressions (III.24) de C_1 et de C_2 gardent une dimension homogène à celle des expressions (III.16) et (III.17).

On remarque dans la figure III.8 que la densité en pixels augmente proportionnellement à l'accroissement du rayon, et les pixels positionnés à des rayons faibles sont sous représentés dans le filtre. Pour y remédier, on démontre que l'on doit pondérer l'intensité de ces pixels par un coefficient de pondération proportionnelle à $1/R$ (expressions III.24). On démontre mathématiquement que le terme $1/R$ correspond au jacobien de la transformation de la forme circulaire vers la forme rectangulaire: $\iint dr.d\theta$ vers $\iint dx.dy$ [Annexe B].

6.2.2 APPLICATION DU MAILLAGE DU FILTRE SUR L'IMAGE

Dans ce cas, on transforme le maillage rectangulaire du filtre à la forme d'un disque partiel de l'image (Figure III.9).

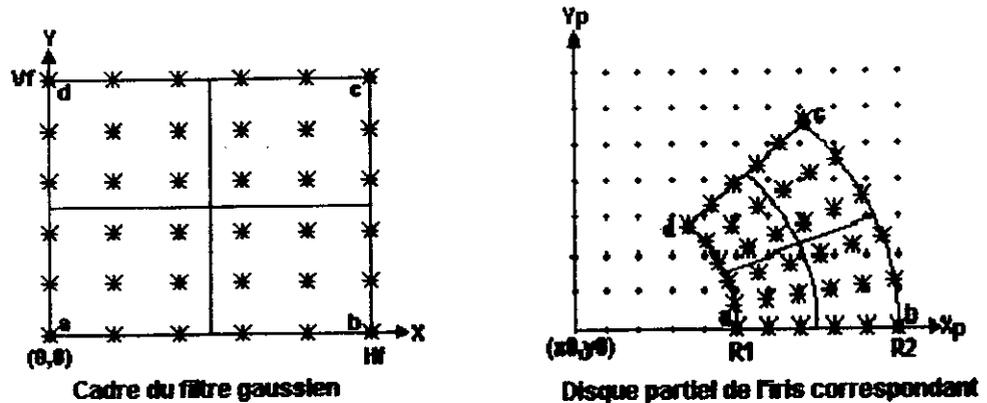


Figure III.9 : Application du maillage du filtre sur l'image

Soit $G(\alpha, f, \varphi, x, y)$ le filtre de Gabor, avec x et y des entiers, S_f est sa surface.

Soit $I(x_p, y_p)$ une zone d'analyse de l'image de l'iris. On applique dans ce cas la transformation II (III.23) pour le calcul des coefficients C de Gabor (III.27) et (III.28).

$$\begin{cases} C_1(\alpha, f) = \sum_x \sum_y G(\alpha, f, \varphi, x, y) \cdot I(x_p, y_p) \\ C_2(\alpha, f) = \sum_x \sum_y G(\alpha, f, \varphi, x, y) \cdot I(x_p, y_p) \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

avec

$$\begin{cases} x_p = x_0 + R(x) \cos[\theta(y)] \\ y_p = y_0 + R(x) \sin[\theta(y)] \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Avec cette méthode, une interpolation des pixels est nécessaire, car les coordonnées (x_p, y_p) des points correspondants aux points $(R(x), \theta(y))$ sont réelles ainsi ils ne correspondent pas forcément au maillage discret de l'image (Figure III.10).

a) Interpolation par le point le plus proche (Méthode 2)

Cette méthode consiste à interpoler au pixel de l'image le plus proche du point de coordonnées $[x(R, \theta), y(R, \theta)]$.

b) Interpolation planaire par les trois points les plus proches (Méthode 3)

Cette méthode consiste à interpoler par rapport aux trois pixels de l'image les plus proches du point de coordonnées $[x(R, \theta), y(R, \theta)]$ (interpolation planaire).

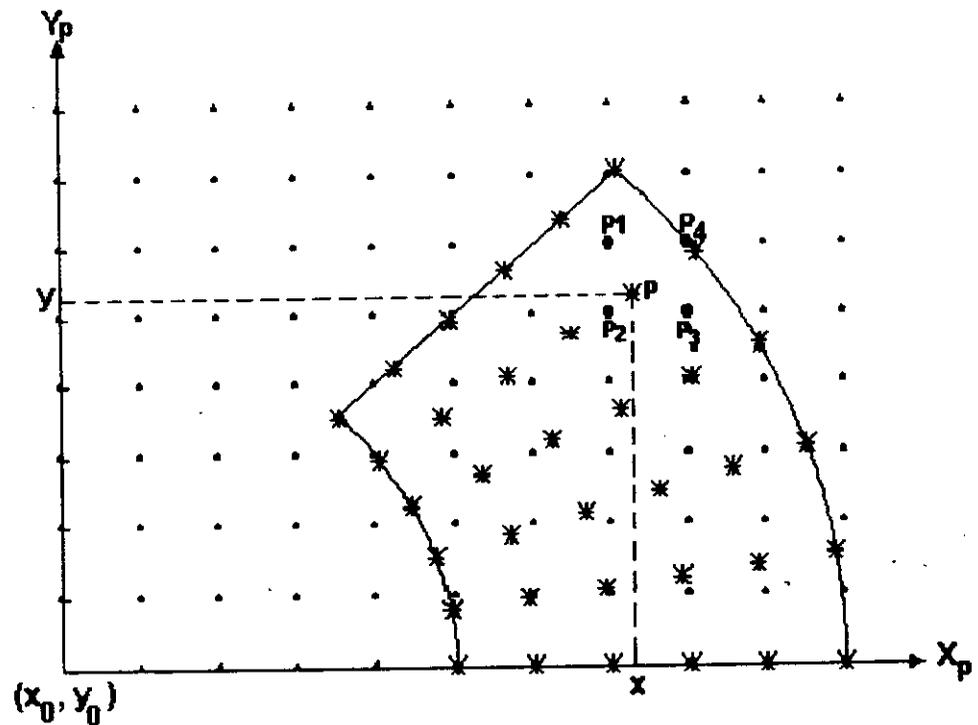


Figure III.10 : Interpolation des points de l'image

P est le point du disque partiel correspondant à un point du maillage du filtre.
 P1, P2, P3, et P4 sont les quatre points les plus proches du point P et appartenant à l'image.

Soient $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$ et $P_3(x_3, y_3)$ les trois points les plus proches du point $P(x, y)$ (Figure III.10). Leur intensité est z_1 , z_2 et z_3 respectivement. L'intensité z du point P est calculée à partir de l'équation spatiale du plan passant par les points P_1 , P_2 et P_3 (III.29).

$$a x + b y + c z = d \tag{III.29}$$

avec

$$\begin{cases} a = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (y_3 - y_1)(z_2 - z_1) \\ b = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (z_3 - z_1)(x_2 - x_1) \\ c = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1) \\ d = a \cdot x_1 + b \cdot y_1 + c \cdot z_1 \end{cases} \tag{III.30}$$

de l'équation (III.29), on déduit la valeur de l'intensité z du point P:

$$z = \frac{d - ax - by}{c} \text{ avec } c \neq 0 \tag{III.31}$$

7 RESULTATS COMPARATIFS DES TROIS METHODES SUR UNE ZONE D'ANALYSE

Image= D6.Bmp (choix de l'image d'un iris pour le test),

Dimensions H=296 , V=261 / Centre de l'iris X0=150, Y0=115

Rayons interne et externe Ri=50, Re=125

Nombre de fréquences et d'orientations Nf=3, Nα=4 (0, π/4, π/2, 3π/4)

Les écarts types de la gaussienne suivant les axes des x et des y sont respectivement : $\sigma_x = H_f / 6$ et $\sigma_y = V_f / 6$, avec H_f, V_f les dimensions du filtre de gabor.

Soit C1, C2, et C3 respectivement les codes des méthodes 1, 2 et 3.

Les écarts relatifs entre les méthodes sont:

$$\begin{cases} ER(1,2) = 2|C_1 - C_2| / (C_1 + C_2) \\ ER(1,3) = 2|C_1 - C_3| / (C_1 + C_3) \\ ER(2,3) = 2|C_2 - C_3| / (C_2 + C_3) \end{cases} \quad (III.32)$$

Coefficients Méthode 1	Coefficients Méthode 2	Coefficients Méthode 3	ER(1,2)	ER(1,3)	ER(2,3)	α(°)	f
1.627e+1	1.629 e+1	1.628 e+1	7.32 e-4	4.19 e-5	6.90 e-4	0	f1
1.202 e+1	1.201 e+1	1.201 e+1	8.52 e-5	5.01 e-4	4.16 e-4	45	
8.813 e+0	8.810 e+0	8.809 e+0	4.51 e-4	5.60 e-4	1.09 e-4	90	
1.202 e+1	1.202 e+1	1.202 e+1	8.40 e-5	3.82 e-4	4.66 e-4	135	
1.405 e+1	1.406 e+1	1.405 e+1	5.88 e-4	1.92 e-4	3.96 e-4	0	f2
4.072 e+0	4.068 e+0	4.075 e+0	9.32 e-4	7.83 e-4	1.71 e-3	45	
1.467 e+0	1.470 e+0	1.481 e+0	1.91 e-3	9.67 e-3	7.75 e-3	90	
4.093 e+0	4.093 e+0	4.098 e+0	1.25 e-4	1.14 e-4	1.02 e-3	135	
7.629 e+0	7.625 e+0	7.638 e+0	5.25 e-4	1.25 e-3	1.77 e-3	0	f3
8.082 e-1	7.909 e-1	8.230 e-1	2.16 e-2	1.82 e-2	3.99 e-2	45	
4.734 e-1	4.316 e-1	4.804 e-1	9.22 e-2	1.47 e-2	1.07 e-1	90	
7.003 e-1	6.784 e-1	6.992 e-1	3.18 e-2	1.67 e-3	3.01 e-2	135	

Tableau III.2: Comparaison des écarts relatifs entre les différentes méthodes de transformation géométrique.

Le tableau III.2 montre les erreurs relatives entre les diverses méthodes. Ces erreurs sont très faibles: de l'ordre de quelques millièmes. A remarquer que l'erreur relative augmente statistiquement lorsque la fréquence spatiale augmente car le nombre de pixels par période décroît. On remarque aussi que la pondération de la méthode 1 diminue l'erreur relative car dans ce cas les pixels positionnées à des rayons faibles sont mieux représentés dans le filtre.

L'équivalence des trois méthodes de codage confirme la justesse de la méthodologie d'analyse ainsi que l'exactitude des résultats chiffrés

8 NORMALISATION DU CONTRASTE

la normalisation du contraste est nécessaire dans ce cas afin que les coefficients ne dépendent que de la texture de l'iris. Pour optimiser son impact, la normalisation du contraste est appliquée sur chacune des zones prise isolément.

8.1 NORMALISATION LINEAIRE DU CONTRASTE

8.1.1 NORMALISATION LINEAIRE SANS TRONCATURE DE L'HISTOGRAMME

Le principe de cette méthode de normalisation consiste à répartir uniformément les intensités des pixels de l'image sur tout l'intervalle des intensités $[0, N_g - 1]$, avec N_g le nombre de niveaux de gris. Ainsi on ramène l'intensité minimale I_{\min} de l'image au niveau 0 (noir) et l'intensité maximale I_{\max} de l'image au niveau $N_g - 1$ (blanc).

Soit $N(i)$ le nombre de pixels d'intensité i , dans l'image I (Figure III.11a), avec $0 \leq i \leq N_g - 1$ ($N(i)$ représente l'histogramme de l'image I).

L'intensité normalisée est donnée par l'équation (III.33)

$$i_n(i) = (i - I_{\min}) \frac{N_g - 1}{I_{\max} - I_{\min}} \text{ pour } I_{\min} \leq i \leq I_{\max} \quad (\text{III.33})$$

Le niveau de gris normalisé i_n étant entier, on prend la valeur entière la plus proche de l'expression (III.33).

Le nombre de pixels des intensités normalisées $N_n(i_n)$ est donné par l'expression (III.34). Il présente le nouvel histogramme de l'image après normalisation (Figure III.11c).

Pour i donné, on a:

$$N_n(i_n(i)) = N(i) \text{ pour } I_{\min} \leq i \leq I_{\max} \quad (\text{III.34})$$

L'expression (III.34) indique que la raie de l'histogramme réel est déplacée; on garde le même nombre $N(i)$ avec pour nouvelle position i_n . Les positions des raies dans l'histogramme normalisé sont définies par un étalement de la zone utile $[I_{\min}, I_{\max}]$ sur l'ensemble des niveaux de gris $[0, N_g - 1]$.

Propriété:

Soit C_e le coefficient d'étalement avec:

$$C_e = \frac{Ng - 1}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (\text{III.35})$$

On a alors:

$$i_n(i+1) - i_n(i) = C_e \quad I_{\min} \leq i \leq I_{\max} \quad (\text{III.36})$$

L'expression (III.36) indique que l'espacement théorique entre deux raies successives est constant; il est défini par le coefficient d'étalement C_e (III.35).

La figure III.11.b montre l'histogramme d'une image I_2 , de même information utile (texture) que l'image I_1 , mais de luminance et de contraste différents. L'histogramme de cette image à contraste normalisé $N(i_n)$ est montré par la figure III.11c. On remarque ici que les images I_1 et I_2 ont le même histogramme à contraste normalisé, car elle présente la même information de texture.

8.1.2 NORMALISATION LINEAIRE AVEC TRONCATURE DE L'HISTOGRAMME

Les pixels aberrants (le bruit éventuel) dans une image peuvent donner une normalisation inefficace du contraste. Le nombre des pixels aberrants est très faible par rapport à celui qui représente l'information utile. Pour éliminer l'influence de ces pixels, il suffit de repérer les limites des intensités minimales I_{pmin} et maximale I_{pmax} de l'image à étendre (Figure III.12). I_{pmin} est obtenue en éliminant un nombre de pixels N_1 d'intensité inférieure à I_{pmin} . Et I_{pmax} est obtenue en éliminant un nombre de pixels N_1 d'intensité supérieure à I_{pmax} .

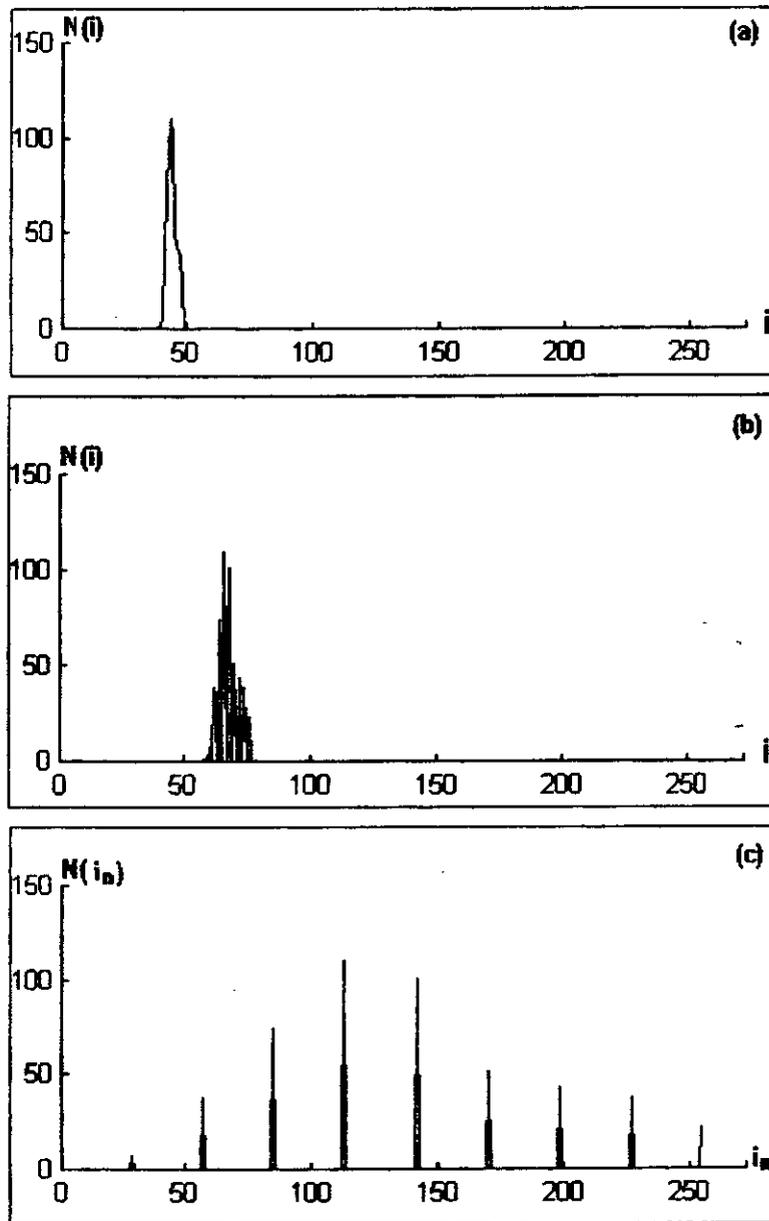
Si N est le nombre total des pixels de l'image, on a:

$$N_1 = P \cdot N \quad (\text{III.37})$$

P est la proportion des pixels aberrants à éliminer vers le haut et vers le bas dans l'échelle des niveaux de gris, P étant préalablement fixée.

L'intensité normalisée deviendra:

$$i_n(i) = \begin{cases} 0 & \forall i < I_{pmin} \\ \frac{i - I_{pmin}}{I_{pmax} - I_{pmin}} (Ng - 1) & \forall i \in [I_{pmin}, I_{pmax}] \\ Ng - 1 & \forall i > I_{pmax} \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

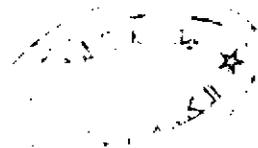


(a) Histogramme de l'image I1
 (b) Histogramme de l'image I2 avec $I2 = 2 \cdot I1 - 20$
 (c) Histogramme des images I1 et I2 à contrastes normalisés

Figure III.11 : Normalisation linéaire sans troncature du contraste

Le niveau de gris normalisé i_n étant entier, on prend la valeur entière la plus proche de l'expression (III.38).

On observe, sur l'histogramme à contraste normalisé (Figure III.12b), l'apparition de deux raies l'une à l'origine $i=0$, l'autre pour $i=N_g-1$ qui regroupent les raies inférieures à I_{pmin} pour le premier et les raies supérieures à I_{pmax} pour le second.



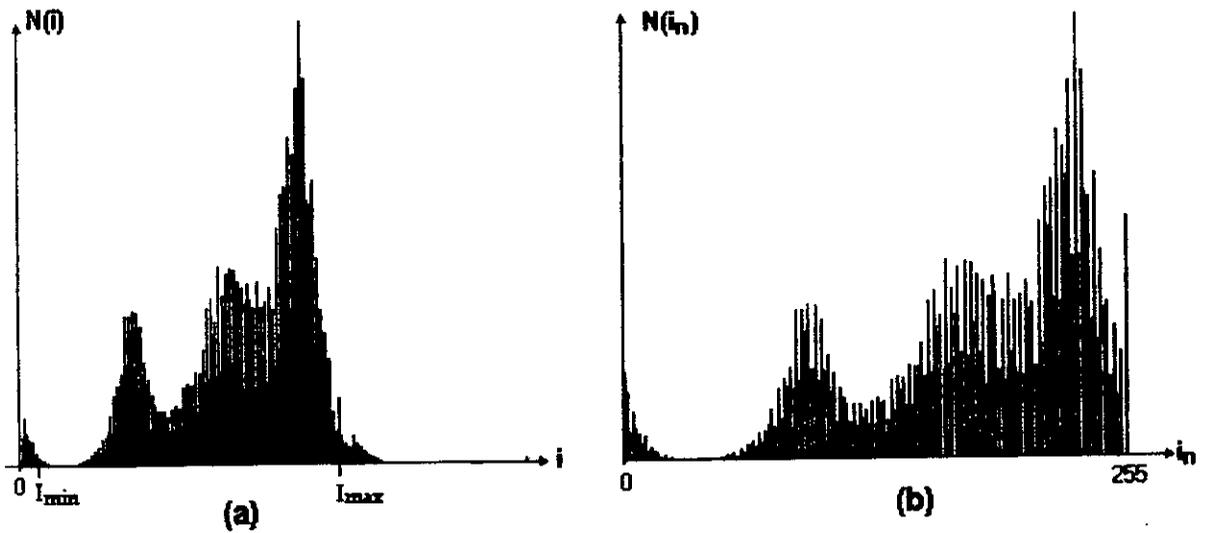


Figure III.12 : Normalisation linéaire avec troncature de l'histogramme

(a): Histogramme d'origine

(b): Histogramme normalisé

8.2 NORMALISATION PAR HISTOGRAMME DU CONTRASTE

La normalisation dans ce cas consiste à effectuer une répartition moyenne constante de l'histogramme (nombre de pixels), d'une image \$I_1\$, sur l'axe des intensités.

Soit \$N(i)\$ le nombre de pixels d'intensité \$i\$, dans l'image (Figure III.13a), avec \$0 \leq i \leq Ng-1\$ où \$Ng\$ est le nombre total de niveaux de gris (\$N(i)\$ représente l'histogramme de l'image \$I_1\$).

Soit \$N\$ le nombre total de pixels contenu dans l'image (III.39). On a:

$$N = \sum_{i=0}^{Ng-1} N(i) \quad (III.39)$$

La moyenne du nombre de pixels par intervalle de niveau de gris est donnée par l'équation:

$$M = \frac{N}{Ng-1} \quad (III.40)$$

Pour \$0 \leq i \leq Ng-1\$ on a:

$$i_n(i) = \frac{\sum_{m=0}^i N(m) - \frac{N(i)}{2}}{M} \quad (III.41)$$

Le niveau de gris normalisé \$i_n\$ étant entier, on prend la valeur entière la plus proche de l'expression (III.41).

Il est inutile de calculer \$i_n(i)\$ lorsque \$N(i) = 0\$.

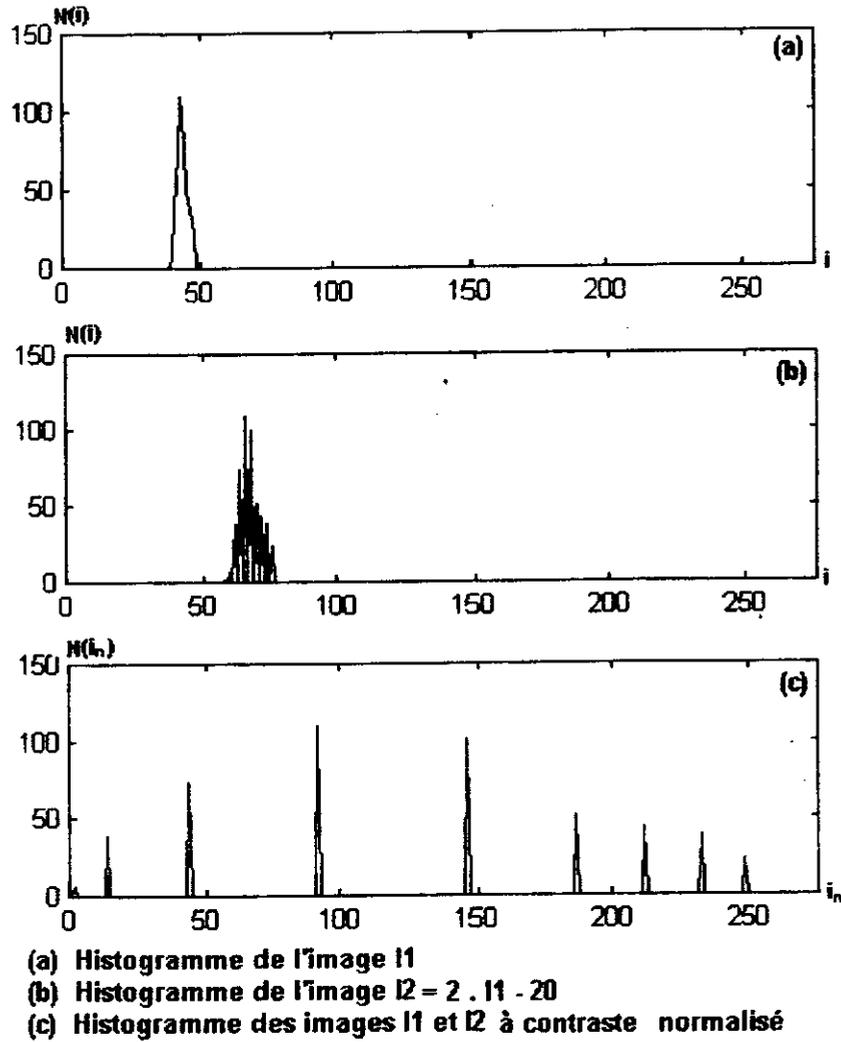


Figure III.13 : Normalisation par histogramme du contraste

Soit $N_n(i_n)$ le nombre de pixels d'intensité normalisée (i_n) (Figure III.13c). Il représente le nouvel histogramme de l'image après normalisation. Pour i donné, on a:

$$N_n(i_n(i)) = N(i) \quad \forall i \in [0, N_g-1] \tag{III.42}$$

L'expression (III.42) indique que la raie de l'historgramme réel est déplacée; on garde le même nombre $N(i)$ avec pour nouvelle position i_n . Les positions des raies dans l'historgramme normalisé sont définies par l'expression (III.41).

Propriété:

$$\frac{\frac{1}{2} [N_n(i_n(i+1)) + N_n(i_n(i))]}{i_n(i+1) - i_n(i)} = M \quad \forall i \in [0, N_g-1] \tag{III.43}$$

Si $N_n(i_n(i+1)) + N_n(i_n(i))$ élevé $\Rightarrow i_n(i+1) - i_n(i)$ élevé

Si $N_n(i_n(i+1)) + N_n(i_n(i))$ faible $\Rightarrow i_n(i+1) - i_n(i)$ faible

L'expression (III.43) indique que l'espacement théorique entre deux raies successives est proportionnel à la demi-somme de leurs hauteurs (plus la raie est haute et plus elle est espacée de ses voisines).

La figure III.13b montre l'histogramme d'une image I_2 , de même information utile (texture) que l'image I_1 , mais de luminance et de contraste différents. L'histogramme de cette image dont le contraste est normalisé, est présenté à la figure III.13c.

On remarque ici que les images I_1 et I_2 de contraste normalisé ont le même histogramme, car elle présente la même information de texture.

Il est à remarquer que l'image résultant d'une normalisation de contraste par histogramme possède des pixels d'intensité moyenne d'environ $N_g/2$.

Le problème des pixels aberrants dans ce cas ne se pose pas, car il est résolu automatiquement par la propriété (III.43), puisque le nombre de pixels aberrants est généralement petit les intervalles d'intensité associés à ces pixels seront négligeables.

Exemple de normalisation de contraste par histogramme:

Prenant $N_g-1 = 7$ et trois raies successives avec: $N_1=20$ pixels, $N_2=40$ pixels, $N_3=10$ pixels et quelle que soit leurs positions(Figure III.14a et III.14b).

Pour la normalisation et des expressions (III.39), (III.40) et (III.41) on calcul respectivement:

Cas de la figure III.14a:

- $N = (20+40+10) = 70$
- $M = 70/7 = 10$
- $i_n(1) = (20 - 20/2) / 10 = 1$
- $i_n(3) = (20+40 - 40/2) / 10 = 4$
- $i_n(6) = (20+40+10 - 10/2) / 10 = 6.5$

ainsi on obtient le nouveau histogramme normalisé (Figure III.14c).

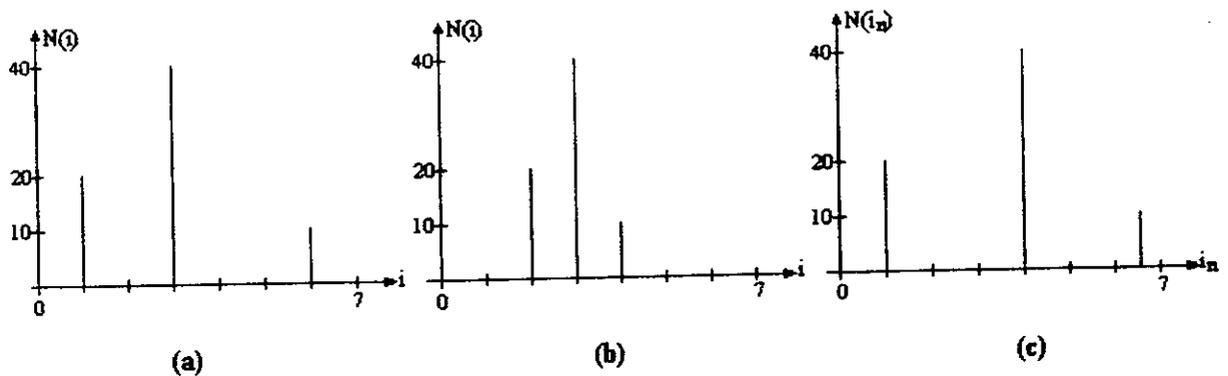


Figure III.14 : Exemple de normalisation du contraste par histogramme

Cas de la figure III.14a:

- $N = (20+40+10) = 70$
- $M = 70/7 = 10$
- $i_n(2) = (20 - 20/2) / 10 = 1$
- $i_n(3) = (20+40 - 40/2) / 10 = 4$
- $i_n(4) = (20+40+10 - 10/2) / 10 = 6.5$

ainsi on obtient le nouveau histogramme normalisé (Figure III.14c).

9 RECAPITULATION DU PROTOCOLE D'ANALYSE

Ce qui suit décrit succinctement (en quelques étapes) le protocole d'analyse retenu pour l'image de l'iris de l'œil.

- 1) L'image de l'iris de l'œil est délimitée par le masque d'analyse polaire,
- 2) On normalise le contraste de l'image par histogramme (afin d'éliminer automatiquement les pixels aberrants),
- 3) Puis on code l'image de l'iris de l'œil. Pour le codage, toutes les méthodes étant équivalentes, on choisit la méthode 1, car dans ce cas l'image n'est pas altérée.

10 STRUCTURE DU FICHIER "IrisData"

Ce paragraphe décrit la façon dont est structuré le fichier "IrisData". On trouve successivement dans le fichier:

- Des informations générales sur la personne (En-tête),

- Des informations sur le code (InfoCode),
- L'ensemble des valeurs des coefficients de Gabor (Code).

1. En-tête

- Nom et prénom
- Date et lieu de naissance
- Poste de travail occupé
- Date de recrutement

2. InfoCode

- N_f : nombre de fréquences spatiales
- N_o : nombre d'orientation
- N_p : nombre de pistes contiguës de chaque coté du masque d'analyse
- N_z : nombre de zones contiguës par piste
- N_c : nombre total des coefficients de Gabor
- k : rapport entre la largeur exploitable du disque de l'iris et la largeur réelle
- θ_i : angle d'ouverture des pistes avec $i=1$ à $2N_p-1$

3. Code

Cette partie regroupe les coefficients de gabor calculés pour chaque zone analysée.

Chaque coefficient est stocké sur 4 octets, ainsi la taille du code est de $N_c * 4$ octets avec :

$$N_c = N_z * N_f * N_o \quad (\text{III.44})$$

N_z est le nombre total des zones (voir l'expression (III.6)).

Le code est constitué de deux listes consécutives de même taille, la première concerne la partie droite de l'iris et la deuxième la partie gauche. Les zones des deux parties de l'iris sont traitées de bas en haut. Les pistes de la partie droite sont explorées de gauche à droite et celles de la partie gauche du masque de droite à gauche.

11 CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES (Phase apprentissage)

Pendant la phase d'apprentissage, chaque personne se présente devant la caméra afin de photographier chacun des deux yeux. Les images obtenues sont analysées, codées ensuite enregistrées dans un fichier "*IrisData*". L'ensemble des fichiers "*IrisData*" constitue la base

de donnée (bibliothèque ou dictionnaire). Ainsi, la bibliothèque est générée lors de la phase d'apprentissage et elle sert de référence lors de la phase de reconnaissance.

12 CONCLUSION

Le présent chapitre propose un ensemble de traitements de l'image irienne en vue de la coder. Les fichiers "*IrisData*", qui en résultent, regroupent un ensemble de coefficients de Gabor de chaque iris. Ces fichiers représentent l'information de base de l'empreinte irienne, spécifique à chaque individu. La comparaison de l'"*IrisData*" d'un inconnu aux "*IrisData*" d'une base de référence (bibliothèque) permettrait de l'identifier lors de la phase de reconnaissance.

IDENTIFICATION

1 INTRODUCTION

La phase de reconnaissance est réalisée après la constitution de la base de donnée lors de la phase apprentissage. La reconnaissance se compose des étapes suivantes:

- Acquisition de l'image de l'œil de la personne à identifier,
- Localisation de l'iris,
- Extraction du code "IrisData",
- Comparaison avec les codes "IrisData" de la base de données,
- Décision d'identification.

Les trois premières étapes sont les mêmes que dans le cas de la phase d'apprentissage. On consacre le présent chapitre à l'étude de la comparaison entre les "IrisData" et à la décision d'identification.

L'identification revient donc à déterminer l'identité d'une personne parmi un ensemble compris dans une base de données. L'authentification est un cas particulier où l'identité de la personne est déclarée à priori; cette identité est confirmée ou infirmée par le système de reconnaissance.

2 COMPARAISON

La comparaison est un processus d'évaluation de correspondance d'un code "IrisData" avec les codes de référence précédemment stockés.

On compare le code de l'"IrisData" de la personne présentée pour l'identification avec les codes des "IrisData" stockés dans la base de données.

La comparaison se fait par le calcul de la distance entre les coefficients des deux codes. La distance retenue est donnée par l'expression (IV.1). Elle est simple à mettre en œuvre.

$$d = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |C_k - C'_k| \quad (\text{IV.1})$$

3 NOMBRE DE DEGRES DE LIBERTE

Le système d'identification, proposé par John DAUGMAN, possède un code de 256 octets ou 2048 bits, un tel code possède un nombre de degrés de liberté nettement inférieur à 2048, cela est dû à deux raisons: la première est qu'il y a des corrélations radiales substantielles dans un iris. Par exemple, un sillon donné tend à se propager à travers une distance radiale significative dans l'iris, exerçant son influence sur plusieurs coefficients du code de l'iris, de ce fait réduisant leur indépendance. La seconde raison est due au fait que des corrélations inhérentes sont présentées par la propriété passe-bande des filtres de Gabor à deux dimensions [DAUGMAN 97].

Le nombre de degré de liberté est en général obtenu après que les deux sources de corrélations aient été prises en compte (celle résultant des filtres de Gabor à 2D et celle inhérente dans l'iris). Il peut être estimé en examinant la distribution des distances de Hamming [DAUGMAN 97], entre les codes des iris différents d'une population. En comparant bit par bit les paires de codes (A, B) de cette population, on obtient des distances de Hamming normalisées définies par l'expression (IV.2).

$$HD = \frac{1}{2048} \sum_{j=1}^{2048} A_j (\text{XOR}) B_j \quad (\text{IV.2})$$

où l'opérateur booléen (XOR) est égal à 1 si et seulement si les deux bits A_j et B_j sont différents. Chaque comparaison entre les deux bits a la chance d'être égale à 1 ou 0, il y a donc une probabilité de $p=0.5$ que n'importe quelle paire de bits des deux codes soit différente.

Si chacun des 2048 bits du code de l'iris était entièrement indépendant des autres bits du code, alors la distribution prévue des distances de Hamming entre deux différents codes serait une distribution binomiale avec $p=0.5$, et $N=2048$, dans ce cas le nombre de degrés de liberté est égal à 2048. Mais en réalité les deux sources de corrélations déjà citées font nettement diminuer ce nombre de degré de liberté.

La distribution réelle [DAUGMAN 97] des distances de Hamming entre les codes pour différents iris est montrée par le graphe de la figure IV.1, qui est le résultat de 2064 comparaisons complètes entre les paires de code d'iris différents. Cette distribution empirique a un écart type $\sigma=0.038$, avec une moyenne de $\mu=0.497$. Puisque l'écart type d'une distribution binomiale est donnée par:

$$\sigma = \sqrt{p q / N} \quad (\text{IV.3})$$

où q est la probabilité complémentaire à p , $q=1-p$, et N est le nombre de degrés de liberté. Cette distribution de la distance de Hamming correspondrait à un processus binomiale où $N=173$.

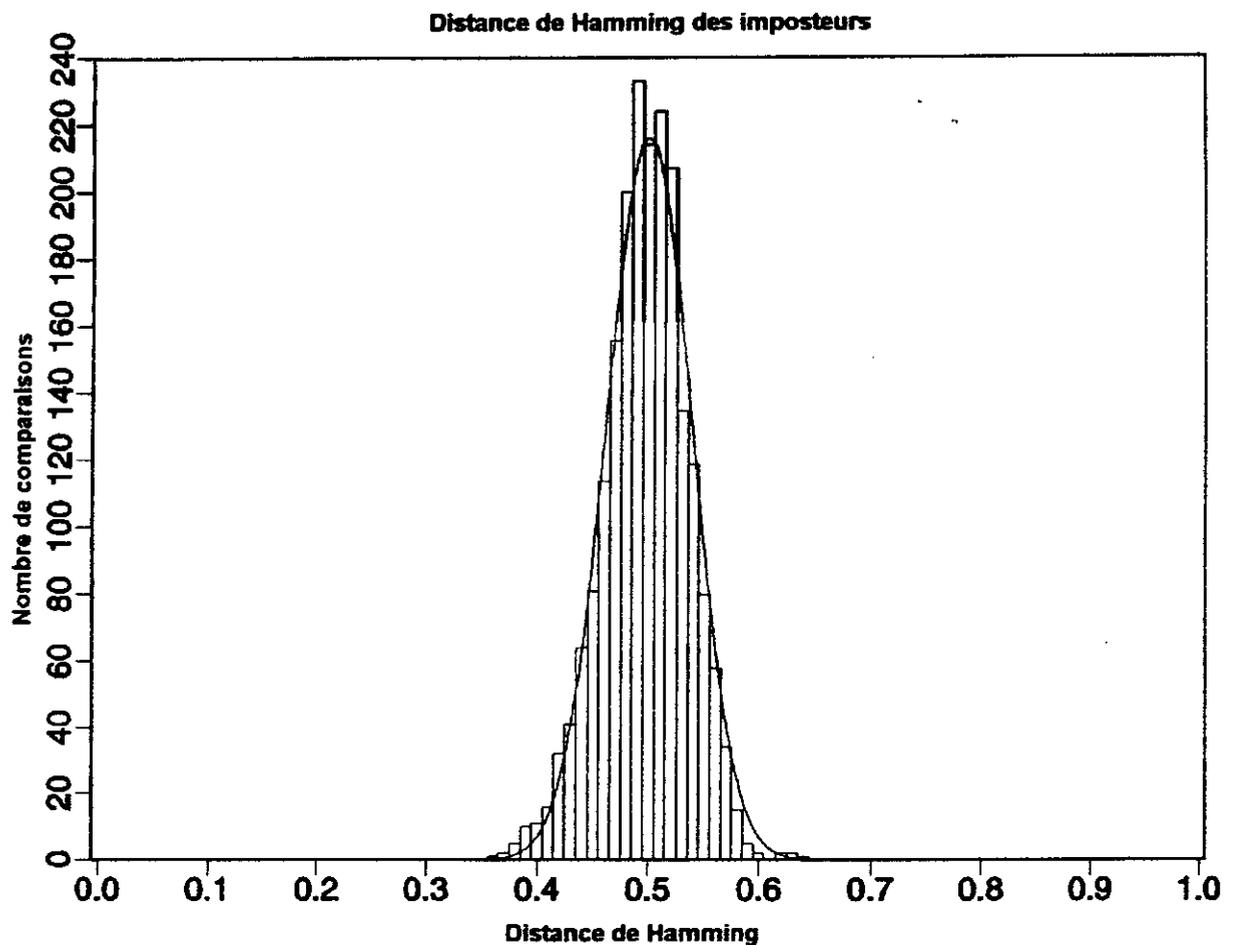


Figure IV.1 : Distribution des distances de Hamming entre les codes des iris différents.

La distribution binomiale de N épreuves, avec les probabilités p et q prévoit que la probabilité d'observer une fraction $x=m/N$ événements parmi les N épreuves est donnée par l'expression (IV.4) :

$$f(x) = \frac{N!}{m! (N - m)!} p^m q^{(N-m)} \quad (\text{IV.4})$$

Le tracé théorique de la fonction de la densité de probabilité liée à un processus binomiale avec $N=173$ et $p= 0.5$, est également montré dans la figure IV.1 comme courbe lisse en pointillés, et elle offre un bon ajustement aux données.

En résumé le nombre de degrés de liberté obtenu expérimentalement est d'environ 173 pour un code d'iris de 2048 bits, en tenant compte des corrélations présentées par les filtres de Gabor à 2D et celles inhérentes dans l'iris. Ainsi la probabilité de confondre deux iris différents est de 2^{-173} ou d'environ 10^{-52} [DAUGMAN 97].

4 THEORIE STATISTIQUE DE LA DECISION

Le problème d'identification par comparaison du code d'un iris donné à une grande base de données ou juste par une comparaison avec un code pour une authentification, peut être formulé dans le cadre de la théorie statistique de la décision. Ce cadre résout également le problème critique d'assigner un niveau de confiance à une telle décision d'identification.

4.1 DEFINITIONS

- **DECISION**

C'est l'acceptation ou le refus d'une personne, elle est fondée sur le dépassement ou non du seuil par la distance calculée.

- **SEUIL DE DECISION**

L'acceptation ou rejet d'une donnée biométrique dépend du passage de la distance calculée au-dessus ou au-dessous du seuil. Ce dernier est ajustable pour rendre le système biométrique plus ou moins strict, cela dépend des éléments requis par tout système application biométrique

- **AA (Acceptation d'un Authentique)**

L'acceptation d'un authentique apparaît lorsqu'un système biométrique a été capable de reconnaître une personne légitimement enregistrée et s'étant convenablement identifiée comme telle. Dans le contexte le plus courant, l'utilisateur d'un système biométrique doit prendre l'acceptation d'un authentique comme un avantage.

- **RI (Rejet d'un Imposteur)**

Le rejet d'un imposteur apparaît lorsqu'un système biométrique a été capable de rejeter une personne qui n'est pas enregistrée. Dans le contexte le plus courant, l'utilisateur d'un système biométrique doit prendre le rejet d'un imposteur comme un avantage.

- **RA (Rejet d'un Authentique)**

Le Rejet d'un authentique (ou faux rejet) apparaît lorsqu'un système biométrique n'a pas été capable de reconnaître une personne légitimement enregistrée. Dans le contexte le plus courant, l'utilisateur d'un système biométrique doit prendre le Faux Rejet comme un inconvénient.

- **AI (Acceptation d'un Imposteur)**

L'acceptation d'un imposteur (ou fausse acceptation) intervient quand un système biométrique accepte à tort une identité en deux caractéristiques biométriques de deux individus différents. Dans les cas les plus courants, la fausse acceptation représente un aléas de sécurité

- **TRA (Taux de Rejet d'Authentiques)**

Le taux de rejet d'authentiques se réfère à la probabilité statistique qu'un système biométrique ne soit pas capable de vérifier l'identité d'une personne enregistrée, ou échoue dans l'authentification d'une personne dont l'identité est légitimement clamée.

- **TAI (Taux d'Acceptation d'un Imposteurs)**

Le Taux d'acceptation d'imposteurs se rapporte à la probabilité d'une fausse acceptation ou d'une vérification erronée.

Les fournisseurs de systèmes biométriques utilisent souvent le TAI et le TRA ensemble pour décrire les possibilités du système. De toute évidence, le TAI et le TRA sont dépendants du niveau seuil de décision. Diminuer ce dernier réduirait la probabilité de AI et ainsi améliorerait la sécurité, toutefois, la validité du système serait réduite en raison de l'augmentation du TRA.

4.2 FORMALISME DE NEYMAN-PEARSON

La décision d'identification, Accepter / Rejeter, prise par l'algorithme peut être correcte ou incorrecte. Cette décision engendre quatre éventualités, qui sont : l'acceptation d'un

authentique (AA), l'acceptation d'un imposteur (AI), le rejet d'un authentique (RA) et le rejet d'un imposteur (RI). La première et la quatrième éventualités sont désirées, par contre la deuxième et la troisième sont des erreurs à éviter. Le but de l'algorithme de prise de décision est de maximiser les probabilités conditionnelles du (AA) et du (RI), tout en minimisant les probabilités du (AI) et du (RA). Les compensations, entre les probabilités de ces quatre éventualités, peuvent être manipulées par paires en fonction de l'application désirée (voir pour cela le paragraphe 6 de ce chapitre).

Le formalisme de décision de Neyman-Pearson est illustré à la figure IV.2. Ce formalisme est basé sur la connaissance des deux distributions des distances de Hamming : la distribution des authentiques et celle des imposteurs.

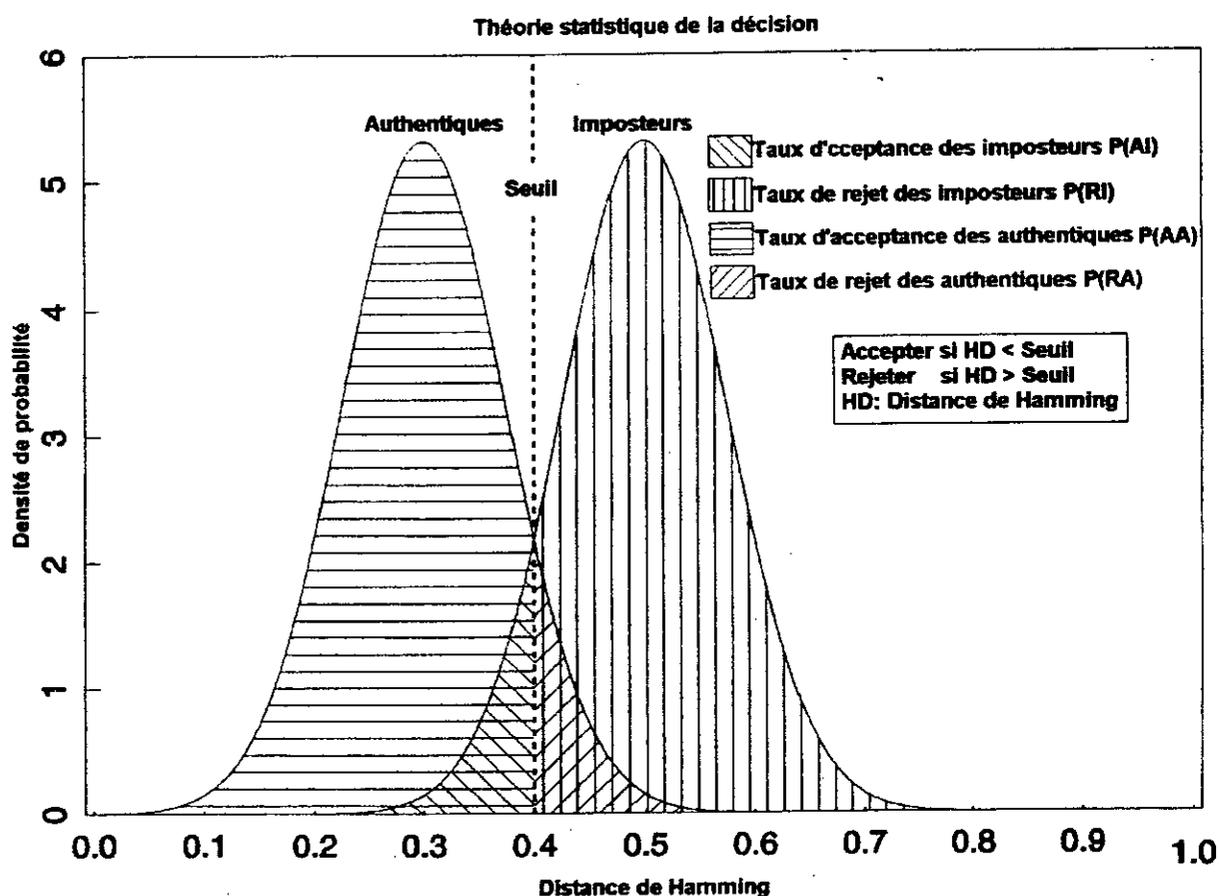


Figure IV.2 : Théorie statistique de la décision: formalisme pour des décisions avec incertitude

L'axe des abscisses représente la distance de Hamming entre deux codes d'iris. Cette distance est considérée comme étant un échantillon provenant de l'un des deux processus aléatoires ("Authentique" ou "Imposteur"), dont les distributions des probabilités ont été arbitrairement montrées ici comme des Gaussiennes avec un grand chevauchement. Les deux

distributions $P_{Au}(x)$ et $P_{Im}(x)$, indiquent respectivement la densité de probabilité d'une distance de Hamming x , surgissant d'une comparaison de deux exemplaires du même iris, ou de la comparaison d'iris différents. Quelle que soit la valeur calculée de la distance de Hamming inférieure au seuil de décision indiqué par la ligne pointillée sur la figure IV.2 est supposée appartenir à la distribution d'authentiques, alors que quelle que soit la valeur calculée de la distance de Hamming supérieure au seuil de décision est supposée appartenir à la distribution d'imposteurs.

Les probabilités des quatre résultats possibles $P(AA)$, $P(AI)$, $P(RA)$ et $P(RI)$ sont proportionnelles aux aires comprises entre les fonctions $P_{Au}(x)$ et $P_{Im}(x)$, le seuil S et l'axe des abscisses.

$$P(AA) = \int_0^S P_{Au}(x) dx \quad (IV.5)$$

$$P(RA) = \int_S^1 P_{Au}(x) dx \quad (IV.6)$$

$$P(AI) = \int_0^S P_{Im}(x) dx \quad (IV.7)$$

$$P(RI) = \int_S^1 P_{Im}(x) dx \quad (IV.8)$$

Ces quatre probabilités sont représentées par les quatre zones hachurées sur la figure IV.2.

4.3 STRATEGIE DE DECISION

La stratégie de la décision permet de choisir entre les deux alternatives suivantes: l'identité de l'utilisateur correspond à l'identité proclamée (ou recherchée) ou elle ne correspond pas. L'estimation du seuil de la décision constitue la plus grande difficulté de ces techniques, et elle peut engendrer deux types d'erreurs, souvent prises comme mesures de performances pour ces techniques d'identification et/ou d'authentification: rejeter un authentique (RA) ou accepter un imposteur (AI).

Un système d'identification idéal est celui qui donne $P(RA)=P(AI)=0$ (pas de chevauchements entre les deux courbes). Malheureusement, dans les conditions réelles, ceci peut s'avérer impossible. Quand $P(RA)$ diminue, $P(AI)$ augmente et vice versa. Par exemple, si l'accès est donné à tout le monde, $P(RA)=0$ ce qui signifie que $P(AI)=1$. Par contre, un accès refusé à tout le monde correspond à $P(AI)=0$, mais entraîne un $P(RA)=1$.

Par conséquent, un compromis doit être fait dans le choix du seuil, et ce dernier est très dépendant de l'application : $P(AI)$ doit avoir une valeur très faible dans les applications bancaires par exemple afin de garantir plus de sécurité.

Les quatre probabilités $P(AA)$, $P(RA)$, $P(AI)$ et $P(RI)$ sont séparées en deux paires qui doivent s'additionner pour donner l'unité, et deux paires sont régies par des inégalités :

$$P(AA) + P(RA) = 1 \quad (\text{IV.9})$$

$$P(AI) + P(RI) = 1 \quad (\text{IV.10})$$

$$P(AA) > P(AI) \quad (\text{IV.11})$$

$$P(RI) > P(RA) \quad (\text{IV.12})$$

Il est clair que les taux d'erreurs $P(RA)$ et $P(AI)$ pourraient être réduits à des minimum acceptables si les deux distributions des distances de Hamming $P_{Au}(x)$ et $P_{Im}(x)$ avaient un chevauchement minimal. Leur chevauchement serait réduit si leurs deux moyennes étaient distantes, ou si leurs écart-types étaient plus petits. En réalité, les deux distributions possèdent des formes des écart-types différents.

La figure IV.3 illustre le diagramme de stratégie de décision qui représente $P(AA)$ en fonction de $P(AI)$. Soit m le point de courbe dont la flèche (distance entre la courbe et la diagonale) est maximale.

Dans la partie inférieure de la courbe (inférieur à m), la probabilité d'accepter un authentique $P(AA)$ croît nettement plus rapidement que la probabilité d'accepter un imposteur $P(AI)$. Cette partie du graphe correspond à la stratégie de décision dite stricte ou sévère, adaptée aux domaines bancaires ou militaires par exemple. Dans la partie supérieure de la courbe (supérieur à m), la probabilité $P(AA)$ continue de croître mais nettement moins rapidement que la probabilité $P(AI)$.

Le choix du seuil de décision S dans les équations (IV.5) et (IV.8) permet d'implémenter différentes stratégies de décision adaptées chacune à une application donnée. On donne dans ce qui suit quelques exemples d'applications pratiques.

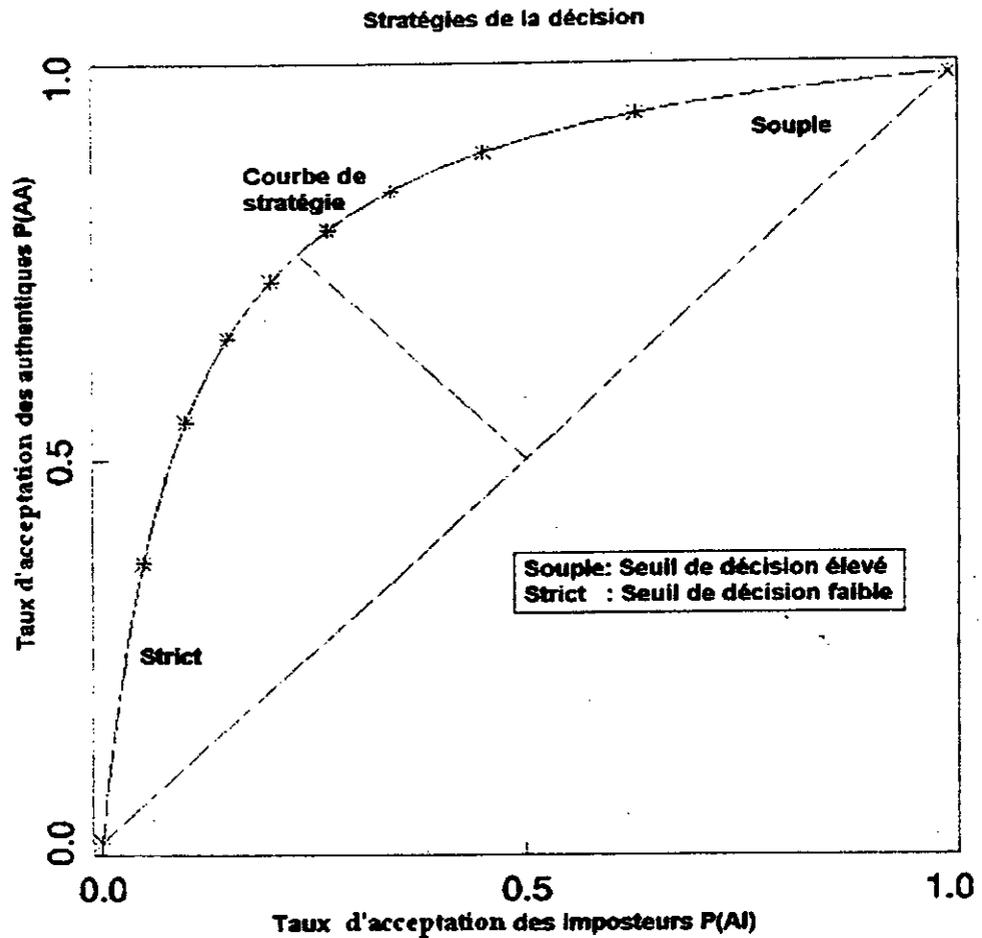


Figure IV.3 : Courbe de stratégie de décision

5 RESULTATS PRATIQUES OBTENUS

Le tableau suivant présente des informations en pixel sur les images d'iris disponibles. Les données représentent les coordonnées du centre (X0, Y0) et les rayons interne R1 et externe R2 de chaque iris, mesurés en pixel.

	Gabi.bmp	Iri11.bmp	Iri22.bmp	Iri33.bmp	Iri44.bmp	Iri55.bmp
X0	246	322	308	354	294	30
Y0	177	218	216	244	190	238
R1	124	86	100	160	90	94
R2	230	340	300	354	220	330

Tableau IV.1 : Informations sur les images des iris (en pixels)

Le tableau IV.2 qui regroupe les distances entre les codes de ces iris, comparés deux à deux.

	Gabi.bmp	Iri11.bmp	Iri22.bmp	Iri33.bmp	Iri44.bmp	Iri55.bmp
Gabi .bmp	-	26.26	34.61	30.13	29.20	36.43
Iri11.bmp	-	-	41.75	30.51	15.85	28.70
Iri22.bmp	-	-	-	46.81	50.72	53.71
Iri33.bmp	-	-	-	-	33.05	21.59
Iri44.bmp	-	-	-	-	-	32.54

Tableau IV.2 : Distances entre les codes d'iris différents

La moyenne de ces distances est $M_{im}=34.12$ et l'écart type $\sigma_{im}=10.43$.

Dans la figure IV.4 , la courbe continue représente une gaussienne de moyenne M_{im} et d'écart type σ_{im} , c'est une représentation de la distribution des distances entre iris différents (distribution des imposteurs). Pour se rapprocher de la distribution réelle il faut impérativement, posséder un nombre important d'images d'iris de personnes différentes. On ne dispose quant à nous, que de six images d'iris exploitables.

La distribution des distances entre authentiques est simulée en comparant les codes de mêmes iris. Mais par manque de ce type d'images, on a procédé à une simulation qui consiste à comparer chaque iris avec le même décalé horizontalement de 2 % de sa largeur. On effectue cette opération sur toutes les images du tableau IV.1, le résultat est présenté dans le tableau IV.3.

Gabi	Iri11	Iri22	Iri33	Iri244	Iri55
8.10	3.42	7.77	3.05	7.33	3.17

Tableau IV.3: Distances des iris avec les mêmes décalés de 2 % horizontalement..

La moyenne de ces distances est $M_{au} = 5.47$, et l'écart-type $\sigma_{au}=2.49$.

La courbe discontinue de la figure IV.4, représente un gaussienne de moyenne M_{au} et l'écart-type σ_{au} . C'est une simulation de la distribution des distances entre codes des mêmes iris (distribution des authentiques).

M_{au}	M_{im}	σ_{au}	σ_{im}	σ_{opt}	Probabilité d'erreur minimal $[P(RA)+P(AD)]_{s0}$
5.47	34.12	2.49	10.43	11.84	0.00362

Tableau IV.4: Données récapitulatives.

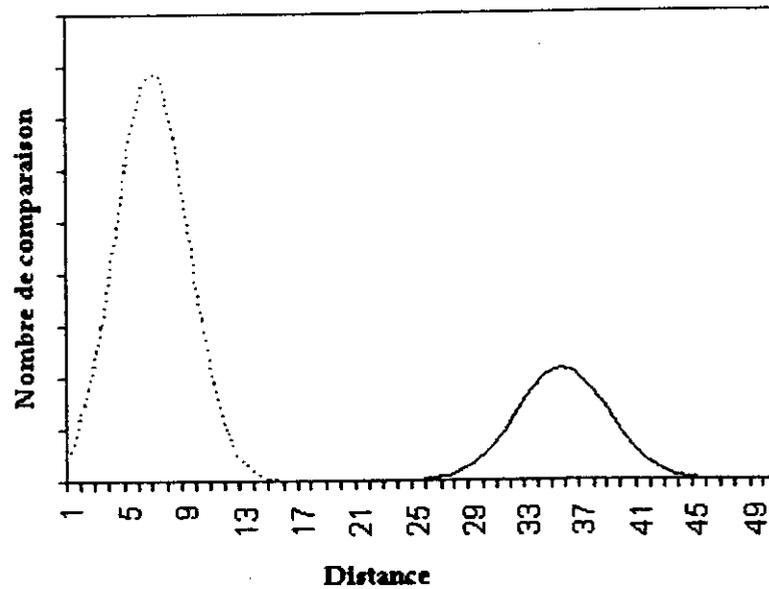


Figure IV.4 : Distributions des distances entre iris

6 EXEMPLE D'APPLICATIONS PRATIQUES

Une application donnée repose sur le choix de la valeur du seuil de décision, cette dernière engendre les deux probabilités $P(AI)$ et $P(RA)$ qui sont souvent prisent comme mesures de performances pour les techniques d'identification. Le système d'identification de Daugman est pris, dans ce qui suit, comme exemple pour le calcul de probabilité $P(AI)$ et $P(RA)$ en fonction de la valeur du seuil de décision, les résultats sont présentés dans le tableau IV.5.

Seuil de décision	Taux d'acceptation d'un imposteur $P(AI)$	Taux de rejet d'un authentique $P(RA)$
0.25	1 sur 13.5 milliards	1 sur 1490
0.26	1 sur 2.04 milliards	1 sur 2660
0.27	1 sur 339 millions	1 sur 4850
<u>0.28</u>	<u>1 sur 60 millions</u>	<u>1 sur 9000</u>
0.29	1 sur 12 millions	1 sur 17100
0.30	1 sur 2.4 millions	1 sur 32800
0.31	1 sur 603000	1 sur 64200
<u>0.32</u>	<u>1 sur 115000</u>	<u>1 sur 128000</u>
0.33	1 sur 39800	1 sur 260000
<u>0.34</u>	<u>1 sur 11500</u>	<u>1 sur 536000</u>
0.35	1 sur 3630	1 sur 1.12 million

Tableau IV.5: $P(AI)$ et $P(RA)$ en fonction du seuil de décision

6.1 APPLICATION "OPTIMALE"

Certaines applications exigent que l'erreur globale soit minimisée. L'erreur globale correspond à l'ensemble des erreurs réunies celle d'accepter un imposteur ainsi que celle de rejeter un authentique. Minimiser l'erreur globale revient à rechercher la valeur du seuil de décision qui égalise les deux types d'erreurs [Annexe D]. Pour notre exemple la valeur du seuil de décision se trouve au point m de la courbe de la stratégie de décision de la figure IV.3. sur la figure IV.5, le seuil optimal S_{opt} apparaît à l'intersection des 2 distributions "authentiques" et "imposteurs". Avec les données du tableau IV.4, cela correspondrait au seuil $S=0.32$. on remarque, dans ce cas, une équivalence approximative des taux d'erreurs des deux types $P(AI)$ et $P(AA)$. L'examen du tableau permet de vérifier qu'un autre choix du seuil donnerait une probabilité cumulée supérieure à celle du cas $S=0.32$. Ce type d'application optimale s'applique dans les domaines où le coût des deux genres d'erreurs est semblable, par exemple, au niveau d'un accès à une usine de fabrication de produits pharmaceutiques.

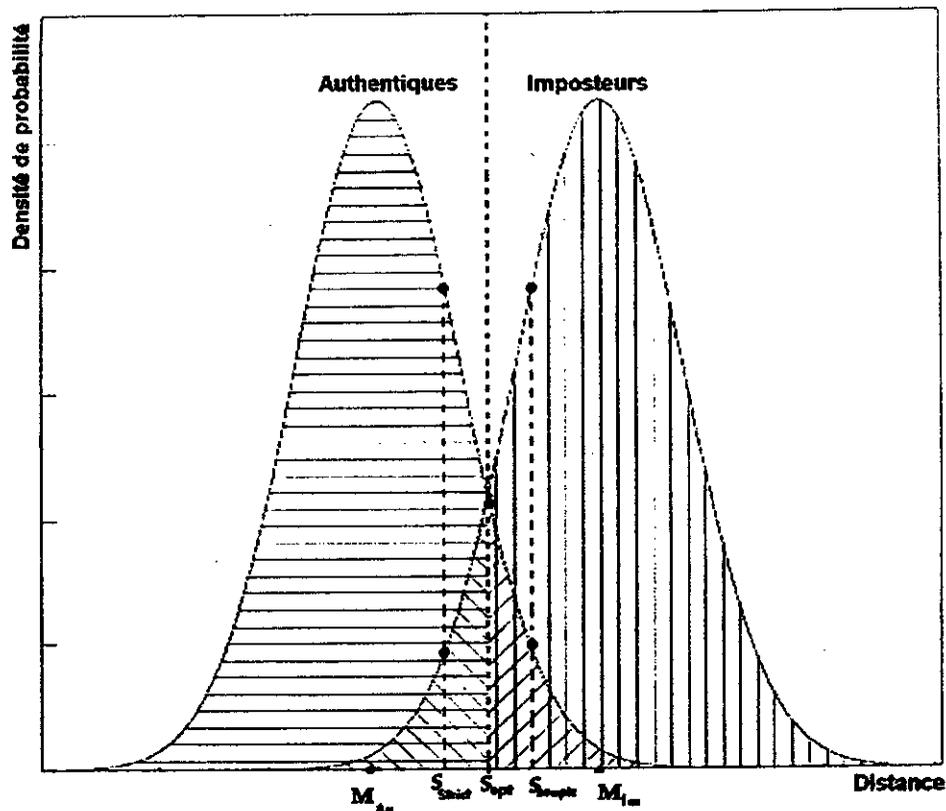


Figure IV.5 : Position des seuils

6.2 APPLICATION DANS LE DOMAINE MILITAIRE

Dans ce domaine d'application, l'accès à un imposteur est strictement inacceptable, cela correspond à $P(AI)$ très faible mais en contre partie la probabilité $P(RA)$ de rejeter un militaire véritable autorisé est un peu plus élevée tout en étant acceptable. Le rejet d'une personne authentique dans ce cas peut se produire plus souvent. Pour atteindre cet objectif, il faut prendre la valeur du seuil strict inférieure à celle correspondant au point m de la courbe figure IV.3. Sur la figure IV.5, le seuil S_{strict} est inférieur au seuil optimal S_{opt} .

La valeur 0.28 du seuil de décision du tableau IV.4 donne une chance sur 60 millions d'accepter un imposteur, et une chance sur 9000 de rejeter un militaire autorisé, ce qui pourrait être adéquat à ce type d'application. Le seuil pourrait être compris entre 0.25 et 0.30 par exemple selon les exigences spécifiques demandées par les autorités militaires.

6.3 APPLICATION DANS UN CENTRE DE CALCUL POUR ENSEIGNANTS A L'UNIVERSITE

Prenons l'exemple d'un centre de calcul réservé aux enseignements à l'université. La base de données renferme les empreintes de tous les enseignants de l'université visée. L'accès à ce centre de calcul exige une sécurité certes, mais qui demeure nettement moins stricte que pour l'application militaire (ou bancaire) comme présentée précédemment. En effet, les seuls véritables imposteurs potentiels sont représentés par les étudiants de cette université. Le fait qu'un étudiant tente exceptionnellement d'accéder au centre de calcul ne porte pas véritablement à conséquence. La mesure de sécurité est plus vue ici comme une mesure d'organisation et de discipline. On choisirait donc, un seuil dans la zone de stratégie de décision souple qui assure une excellente probabilité $P(AA)$ d'accepter les enseignants quitte à retenir une probabilité $P(AI)$ très légèrement dégradée d'accepter des étudiants intrus, ce qui n'est pas si grave en soi à l'université. Par exemple un seuil $S=0.34$ donne un risque sur 536000 de rejeter un enseignant de cette université et un risque sur 11500 d'accepter un étudiant au cas faiblement probable où il venait à se présenter à la porte d'accès.

7 CONCLUSION

La comparaison des iris est assurée par le calcul d'une distance entre les deux "Iris Data". L'analyse de la répartition des distances se présente sous forme de deux distributions approximativement gaussiennes, chacune ayant une moyenne et écart-type propre. Le faible chevauchement entre les deux distributions permet d'espérer une qualité et une facilité dans l'identification. Ce faible chevauchement des deux distributions est une indication de la

qualité de l'analyse du traitement de l'image proposée. Le faible nombre d'échantillons d'image d'iris disponible ne nous permet pas de présenter les distributions définitives. L'enrichissement de la base de donnée d'image d'iris permettra d'affiner et d'améliorer nos résultats et d'espère une amélioration des taux de reconnaissance et améliorer ainsi l'efficacité du système d'identification des personnes basé sur l'exploitation des empreintes iriennes.

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire, se rapporte au développement d'un système d'identification et d'authentification, à l'aide de l'empreinte de l'iris oculaire.

Les caractéristiques spécifiques de la texture de l'iris, l'ont habilité comme moyen biométrique privilégié dans les systèmes d'identification.

L'acquisition de l'image de l'œil, exige un matériel spécialisé adapté à la nature de l'empreinte irienne. La caméra destinée à l'acquisition des images iriennes, est de préférence de haute résolution afin d'exploiter au maximum les détails fins de l'iris de l'œil.

La constitution ou l'enrichissement d'une base de données de référence, ainsi que l'identification irienne, exigent le traitement de l'empreinte irienne en vue de son exploitation.

L'image est prétraitée pour éliminer les bruits. On a opté pour le filtre de lissage par la moyenne des pixels contigus.

Pour la localisation de l'iris de l'œil, on a proposé et mis en œuvre un algorithme simple, rapide et efficace. Les résultats obtenus sont très satisfaisants, même dans le cas d'images contenant des taches de flash. L'algorithme proposé se déroule en deux étapes successives: la localisation de la pupille et la localisation et le dimensionnement de l'iris. Les contours de l'image de l'œil, sont préalablement détectés à l'aide du filtre de Sobel seuillé. Ce filtre est caractérisé par son efficacité et son insensibilité au bruit.

Afin de délimiter l'information utile, on a proposé un masque d'analyse choisi de façon à éviter les paupières et les limites interne et externe de l'iris. Ce masque épouse la forme quasi-circulaire de l'iris et s'adapte à l'iris de manière à conserver la même information quelle que soit l'ouverture de la pupille.

Les filtres de Gabor sont exploités pour coder la texture de l'iris délimitée par le masque d'analyse, On a étudié trois méthodes différentes pour le calcul des coefficients de Gabor, qui fournissent des résultats concordants. Ceci confirme la justesse de la méthodologie d'analyse proposée.

Après cette analyse d'image de l'iris de l'œil, il en résulte un fichier "*IrisData*", qui regroupe un ensemble défini de coefficients de Gabor, pour chaque iris. Ces fichiers représentent l'information de base de l'empreinte irienne, spécifique à chaque individu.

La comparaison d'un "*IrisData*" d'un individu aux "*IrisData*" d'une base de référence permettrait de l'identifier, lors de la phase d'identification et/ou d'authentification.

Des tests à grande échelle restent à effectuer et si on devait apporter un complément logique au travail effectué, les améliorations portant sur l'ensemble de l'application, seraient les suivantes:

- Proposer un protocole complet de prise d'image,
- Le rejet ou l'acceptation de l'image de l'œil en fonction du degré d'occlusion des paupières,
- Analyser automatiquement l'image de l'œil en fonction de l'orientation de la tête et du mouvement de l'œil dans son orbite.

Pour finir, on souligne que certaines méthodes exposées dans ce mémoire, peuvent être utilisées utilement dans d'autres applications en traitement d'image en raison de leurs généralité. Parmi ces méthodes on cite:

- les transformations de la forme rectangulaire à la forme disque partiel et réciproquement,
- la méthode des cercles concentriques,
- les normalisations du contraste,
- l'approximation de fonctions circulaires..

ANNEXE A

Texture stochastique de l'iris

L'iris possède une importante propriété qui est la morphogenèse aléatoire de ses minuties. La génétique de l'être humain détermine la forme anatomique de l'iris de l'œil, sa physiologie, sa couleur et son aspect général. La texture de l'iris quant à elle est stochastique ou probablement chaotique. Puisque sa morphogenèse détaillée dépend des conditions initiales dans le mésoderme embryonnaire à partir duquel elle se développe [DAVSON 90], même l'expression phénotypique de deux iris avec le même génotype (les jumeaux identiques ou la paire possédée par un individu) ont des minuties non-corrélatives. A ces égards l'unicité de chaque empreinte digitale, génotype commun ou pas [DAUGMAN 97].

ANNEXE B

Jacobien

Considérons une fonction f de \mathbb{R}^2 dans \mathbb{R}^2 , qui à $X=(x_1, x_2)$ associe $(f_1(X), f_2(X))$. La matrice jacobienne de f est :

$$M(f) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(X) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(X) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(X) & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(X) \end{bmatrix}$$

et le *jacobien* J de f en est le déterminant que l'on note souvent :

$$J = \frac{D(f_1, f_2)}{D(x_1, x_2)}$$

Cette définition s'étend à une fonction de n variables de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^n . Le jacobien trouve son emploi dans la résolution des équations différentielles, dans le calcul des intégrales multiples (généralisation du changement de variable dans les intégrales simples), en géométrie différentielle...

Par exemple, dans le cas usuel du passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées polaires, posons :

$$X = (x, y) = h(r, \theta), \quad \theta(x, y) = (r \cdot \cos \theta, r \cdot \sin \theta)$$

$$\text{la matrice jacobienne } M(h) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -r \sin \theta \\ \sin \theta & r \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\text{et le jacobien } J(h) = \text{Dét}(M(h)) = r.$$

on démontre que le jacobien de la transformation inverse est tel que :

$$J(h^{-1}) = 1 / J(h) = 1 / r.$$

ANNEXE C

Approximation circulaireAlgorithme 1

On présente dans cette annexe un des algorithmes simples d'approximation circulaire tiré des références [MENACER 98a, b et c] et [MENACER 2002b et c]. Il s'agit de l'approximation d'un ensemble de points par un cercle. Cette approximation se fait en deux étapes:

- La détermination des coordonnées du centre du cercle,
- Puis l'estimation du rayon du cercle.

Principe: La médiatrice de la corde qui relie deux points d'un cercle passe nécessairement par le centre (x_0, y_0) du cercle. Chaque médiatrice est exprimée par une équation où x_0 et y_0 sont des inconnues. L'ensemble des équations des médiatrices forme un système linéaire d'équations à deux inconnues. La solution (x_0, y_0) , à partir de ce système surdimensionné, est obtenue comme meilleure approximation au sens des moindres carrés. Le rayon R du cercle est estimé en minimisant l'écart du cercle approximé avec la position de l'ensemble des points initiaux.

- Le système d'équation peut être écrit sous la forme explicite comme suit:

$$\begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \\ \vdots & \vdots \\ (x_i - x_j) & (y_i - y_j) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (x_2^2 + y_2^2) - (y_1^2 + x_1^2) \\ \vdots \\ (x_i^2 + y_i^2) - (y_j^2 + x_j^2) \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{Mat} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{D}$$

où i et $j = 1, N$ avec $i \neq j$ car inutile et $P_i(x_i, y_i)$, $P_j(x_j, y_j)$ sont deux points distincts de l'ensemble de points et le vecteur $\mathbf{V} = (x_0, y_0)^T$ qui regroupe les coordonnées du centre du cercle recherché. En générale les médiatrices des cordes $P_i P_j$ ne peuvent avoir un même point d'intersection si les points n'appartiennent pas exactement au cercle recherché. La matrice \mathbf{Mat} n'est pas carrée et ne possède pas de matrice inverse. Ainsi le système d'équation ne possède pas de solution exacte. On cherche alors une solution approchée, au sens des moindres carrés:

$$\mathbf{V} = (x_0, y_0)^T = \text{pinv}(\mathbf{Mat}) * \mathbf{D} \quad (\text{C-1})$$

avec $\text{pinv}(\mathbf{Mat})$ est la matrice pseudoinverse de \mathbf{Mat} .

• On dispose maintenant des coordonnées approchées du centre du cercle (x_0 et y_0) fournies par l'équation (C-1). On détermine maintenant le rayon R en calculant la moyenne quadratique des distances de chacun des points initiaux par rapport au centre du cercle estimé (x_0, y_0), d'où l'équation (C-2)

$$R = \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\text{Dist}(P_k, P_0))^2 \right]^{1/2} \quad (\text{C-2})$$

Algorithme 2

Il existe un algorithme simple, d'approximation circulaire, qui ne fait intervenir que des opérations élémentaires. Nous présentons ci-dessous, sans démonstration, les expressions (C-3) du centre du cercle optimal [MENACER 2002c].

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\overline{y_c^2 \cdot x_c \cdot (x^2 + y^2)} - \overline{x_c y_c \cdot y_c \cdot (x^2 + y^2)}}{2 \left[\overline{x_c^2 \cdot y_c^2} - (\overline{x_c y_c})^2 \right]} \\ y_0 = \frac{\overline{x_c^2 \cdot y_c \cdot (x^2 + y^2)} - \overline{x_c y_c \cdot x_c \cdot (x^2 + y^2)}}{2 \left[\overline{x_c^2 \cdot y_c^2} - (\overline{x_c y_c})^2 \right]} \end{cases} \quad (\text{C-3})$$

avec :

$$x_c = x - \bar{x} \quad (\text{C-4})$$

$$y_c = y - \bar{y} \quad (\text{C-5})$$

étant entendu que la barre supérieure représente la moyenne de l'ensemble des éléments auxquels elle s'applique.

ANNEXE D

Calcul du seuil de probabilité optimale

On calcule dans cette annexe la valeur du seuil de probabilité qui permet de minimiser l'erreur globale (accepter un imposteur et rejeter un authentique).

La somme des probabilités à minimiser est :

$$P(s) = \int_s^{+\infty} f_1(x) dx + \int_{-\infty}^s f_2(x) dx$$

où $f_1(x)$ et $f_2(x)$ sont des fonctions gaussiennes de moyennes m_1 et m_2 et d'écart types σ_1 et σ_2 .

La dérivée par rapport à la variable 's' donne :

$$\frac{dP(s)}{ds} = -f_1(s) + f_2(s)$$

A remarquer le signe '-' qui apparaît pour $f_1(x)$, car la variable 's' apparaît comme limite inférieure de l'intégration dans l'expression de $P(s)$.

$P(s)$ est à minimiser d'où $\frac{dP(s_0)}{ds} = 0$

$$\Rightarrow f_1(s_0) = f_2(s_0)$$

$P(s_0)$ est minimal si et seulement si la dérivée seconde est positive. Calculons la dérivée seconde :

$$\frac{d^2 P(s)}{ds^2} = 2 \left(\frac{s-m_1}{\sigma_1^2} \right) \cdot f_1(s) - 2 \left(\frac{s-m_2}{\sigma_2^2} \right) \cdot f_2(s)$$

Posons $m_1 < s < m_2$ et $f_1(s_0) = f_2(s_0)$ alors

$$\Rightarrow \frac{d^2 P(s_0)}{ds^2} > 0 \Rightarrow P(s_0) \text{ minimum}$$

s_0 est donc bien situé à l'intersection des deux fonctions $f_1(x)$ et $f_2(x)$ car on a $f_1(s_0) = f_2(s_0)$.

On démontre aussi que s_0 est solution de l'équation, du second ordre, suivante :

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} \right) s_0^2 + \left(\frac{m_2}{\sigma_2^2} - \frac{m_1}{\sigma_1^2} \right) s_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{m_1^2}{\sigma_1^2} - \frac{m_2^2}{\sigma_2^2} \right) + \text{Log} \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 0$$

ANNEXE E

Quelques traitements classiques en traitement d'image

1 NOTIONS ELEMENTAIRES

Le traitement d'images est l'ensemble des méthodes et techniques opérant sur celle-ci, dans le but de rendre cette opération possible, plus simple, plus efficace et plus agréable, d'améliorer l'espace visuel de l'image et d'en extraire des informations pertinentes.

1.1 IMAGE NUMERIQUE

Les images manipulées par un ordinateur sont numériques (représentées par une série de bits). L'image numérique est l'image dont la surface est divisée en éléments de tailles fixes appelées cellules ou pixels, ayant chacune comme caractéristique un niveau de gris ou de couleur prélevé à l'emplacement correspondant dans l'image réelle, ou calculé à partir d'une description interne de la scène à représenter [KADDOUR 99].

La numérisation d'une l'image est la conversion de celle-ci de son état analogique (distribution continue d'intensité lumineuse dans un plan xOy) en une image numérique représentée par une matrice bidimensionnelle de valeurs numériques $f(x,y)$ où :

x, y : coordonnées cartésiennes d'un point de l'image.

$f(x, y)$: niveau de gris de ce point.

Pour des raisons de commodité de représentation pour l'affichage et l'adressage, les données images sont généralement rangées sous formes de tableau I de n lignes et p colonnes. Chaque élément $I(x, y)$ représente un pixel de l'image et à sa valeur est associé un niveau de gris codé sur m bits (2^m niveaux de gris ; $0 = \text{noir}$; $2^m - 1 = \text{blanc}$). La valeur en chaque point exprime la mesure d'intensité lumineuse perçue par le capteur d'image.

1.2 CARACTERISTIQUE D'UNE IMAGE NUMERIQUE

L'image est un ensemble structuré d'informations caractérisées par les paramètres suivants [KADDOUR 99]:

- **PIXEL**

Contraction de l'expression anglaise "*picture element*" : élément d'image, le pixel est le plus petit point de l'image. Si le bit est la plus petite unité que peut traiter un ordinateur, le pixel est le petit élément que peut manipuler les matériels et logiciels d'affichage ou d'impression.

La quantité d'information que véhicule chaque pixel donne des nuances entre images monochromes et images couleurs. Dans le cas d'une image monochrome, chaque pixel est codé sur un octet par exemple, et la taille mémoire nécessaire pour afficher une telle image est directement liée à la taille de l'image.

- **DIMENSION**

C'est la taille de l'image. Cette dernière se présente sous forme de matrice dont les éléments sont des valeurs numériques représentatives des intensités lumineuses (pixels). Le nombre de lignes de cette matrice multiplié par le nombre de colonnes nous donne le nombre total de pixels dans une image.

- **RESOLUTION**

C'est la clarté ou la finesse de détails atteinte par un moniteur ou une imprimante dans la production d'image. Sur les moniteurs d'ordinateurs, la résolution est exprimée en nombre de pixel par unité de mesure (pouce ou centimètre). On utilise aussi le mot résolution pour désigner le nombre total de pixels affichable horizontalement ou verticalement sur un moniteur; plus grand est ce nombre, meilleure est la résolution.

- **BRUIT**

Un bruit (parasite) dans une image est considéré comme un phénomène de brusque variation de l'intensité d'un pixel par rapport à ses voisins, il provient de l'éclairage des dispositifs optiques et électroniques du capteur.

- **LUMINANCE**

C'est l'intensité lumineuse (le degré de luminosité) des points de l'image. Elle est définie aussi comme étant le quotient de l'intensité lumineuse d'une surface par unité de l'aire apparente de cette surface.

- **BRILLANCE**

Pour un observateur lointain, la brillance correspond à l'éclat global d'un objet. Ce qui correspond à une intégration de toutes les luminances individuelles de l'image. L'éclat est plus élevé si on se rapproche de l'objet.

- **CONTRASTE**

C'est l'opposition marquée entre deux régions d'une image, plus précisément entre les régions sombres et les régions claires de cette image. Le contraste est défini en fonction des luminances de deux zones d'image.

Soient L1 et L2 les degrés des luminances respectivement de deux zones voisines A1 et A2 d'une image, le contraste C est défini par le rapport :

$$C = \frac{L1 - L2}{L1 + L2} \quad (1)$$

- **IMAGE A NIVEAU DE GRIS**

Le niveau de gris est la valeur de l'intensité lumineuse en un point. L'intensité du pixel peut prendre des valeurs allant du noir au blanc en passant par un nombre fini de niveaux intermédiaires. Donc pour représenter les images à niveau de gris, on peut attribuer à chaque pixel de l'image une valeur correspondant à la quantité de lumière émise. Cette valeur peut être comprise par exemple entre 0 et 255. Chaque pixel n'est donc plus représenté par un bit, mais par un octet.

Le nombre de niveaux de gris dépend du nombre de bits utilisés pour décrire l'intensité lumineuse de chaque pixel de l'image. Plus ce nombre est important, plus les niveaux possibles sont nombreux est plus la nuance lumineuse est plus élevée.

- **IMAGES BITMAP ET IMAGES VECTORIELLES**

Les images appartiennent à deux grandes familles : bitmap (image-bit) et vectorielle. Alors qu'une image vectorielle est décrite à l'aide de courbes et d'équations mathématiques, une image bitmap est constituée de pixels et se réduit donc à une matrice de points. Si les images vectorielles peuvent être manipulées mathématiquement avec beaucoup de facilité, les modifications de taille, par exemple, apportées à une image bitmap ne se font pas sans altération. Les images vectorielles exigent généralement moins d'espace mémoire que les images bitmap. En contre partie le codage et la génération de l'image se font après calcul pour l'image vectorielle alors qu'ils sont directement disponibles pour l'image bitmap.

1.3 FORMATS DES FICHIERS IMAGES

Les formats de fichiers sont nombreux et incompatibles [KADDOUR 99]. Ils sont souvent liés à un producteur de matériel (Hewlett Packard: format HPGL), de logiciel (Adobe : format Postscript ; DeLuxePaint : format LBM) ou une image graphique (TIFF).

1.3.1 PRINCIPAUX FORMATS DE DONNEES IMAGES

Type	Extension	Nom	Spécificité – Domaine
Vecteur	PS	Postscript (Adobe)	Lang. Description de page
Vecteur	HPGL	Hewlett Packard Graphic	Langage interprété
	DRW	Language Micrografx Drawing	CAO Arts graphiques
	WMF	Windows Meta File	
	DXF	Autocad	Arts graphiques CAO DAO
Bitmap	EPS	Encapsulated Postscript	Bitmap encapsulé dans postscript
	GIF	Graphic Information Format (ATT)	Comprimé LZW
	IFF	Interchange File Format	Comprimé RLE. Gère aussi le son
	TIFF	Tagged Image File Format	De nombreuses versions pour les images bitmap 256 à 256 x 256 x 256 couleurs
	PCX	Paint Brush – Zsoft	Format vieillissant.
	BMP	Bitmap Windows	Format des images Windows Microsoft
	PICT	Bitmap Apple	Apple Macintosh

1.3.2 ORGANISATION D'UN FORMAT GRAPHIQUE BITMAP: EN-TETE + DONNEES

Un fichier graphique est en général constitué de deux parties [KADDOUR 99], [PLANÇON 01] :

- Un *en-tête* contenant les informations nécessaires à la reconstitution de l'image.
 1. Informations indispensables : largeur de l'image en pixels, hauteur en nombre de lignes, nombre de bits pour coder un pixel.
 2. Informations supplémentaires éventuelles : type de codage, numéro de version et signature du logiciel, abscisse et ordonnée d'origine à l'écran, palette de couleurs, etc.
- Les données de l'image proprement dites.

La plupart des logiciels d'imagerie sont capables de lire les principaux formats de fichiers : GIF, TIFF, éventuellement PCX et BMP sur PC, PICT sur Macintosh. Le passage à partir et vers des formats plus exotiques nécessite des outils de conversion. Le logiciel en freeware Pbm (Portable bit format) est tout à fait adapté à ce type de tâche.

2 TRAITEMENT D'IMAGE

Le traitement d'image consiste à améliorer le contenu d'une image pour en extraire de l'information : par exemple localiser l'iris dans une image de l'œil. Ainsi, traiter une image c'est lui ajouter du son par un procédé automatique le plus souvent. Pour cela il peut être nécessaire de supprimer le bruit, rehausser les signaux utiles contribuant à une meilleure lisibilité. Nous examinerons donc deux types de transformations. Celles qui affectent tout (ou partie) des pixels de l'image sans qu'intervienne la notion de position spatiale des pixels, ce sont des transformations globales. Enfin des opérations plus élaborées, dites de convolution, portent sur plusieurs pixels voisins et ont donc un caractère local.

2.1 LES ETAPES D'ANALYSE D'IMAGE

La plupart des applications de traitement d'image passent par les étapes suivantes [FRUITET 00] :

- Acquisition
- Analyse globale de l'image et transformation ponctuelle
- Opération entre images
- Amélioration, filtrage et segmentation
- Interprétation et sémantique

2.2 FILTRAGE

Filtrer une image c'est lui appliquer une transformation mathématique qui modifie la valeur du niveau de gris de tout ou partie des pixels. Si cette fonction est linéaire au sens algébrique du terme, on parle de *filtrage linéaire*. Si cette fonction prend en compte les valeurs de gris voisinage de chaque pixel transformé, on parle de fonction de convolution. Le terme le plus général est celui d'*anamorphose*, qui signifie "image grotesque donnée un miroir courbe".

Exemples d'opérations de filtrage

- Remplacer chaque pixel $f(x)$ par $g(x) = a \cdot f(x) + b \rightarrow$ transformation homothétique : compression (ou extension) linéaire et décalage.
- Remplacer chaque pixel inférieur à une valeur de seuil par 0 \rightarrow seuillage.
- Remplacer chaque pixel par la moyenne des valeurs de ses immédiats \rightarrow lissage.

2.3 OPERATIONS GLOBALES SUR L'IMAGE

Pour mesurer de façon objective la qualité d'une image, on fait appel à un ensemble d'outils statistiques, qui donnent une information quantitative non localisée, à partir de laquelle il est possible d'introduire des modifications globales de l'image, c'est-à-dire affectant tous les pixels.

2.3.1 HISTOGRAMME

L'historique des niveaux de gris d'une image est une fonction qui donne la fréquence d'apparition de chaque niveau de gris dans l'image. Pour diminuer l'erreur de quantification, pour comparer deux images obtenues sous des éclairages différents, ou encore pour mesurer certaines propriétés sur une image, on modifie souvent l'histogramme correspondant. Il permet de donner un grand nombre d'information sur la distribution des niveaux de gris et de voir entre quelles bornes est répartie la majorité des niveaux de gris dans les cas d'une image trop claire ou d'une image trop foncée.

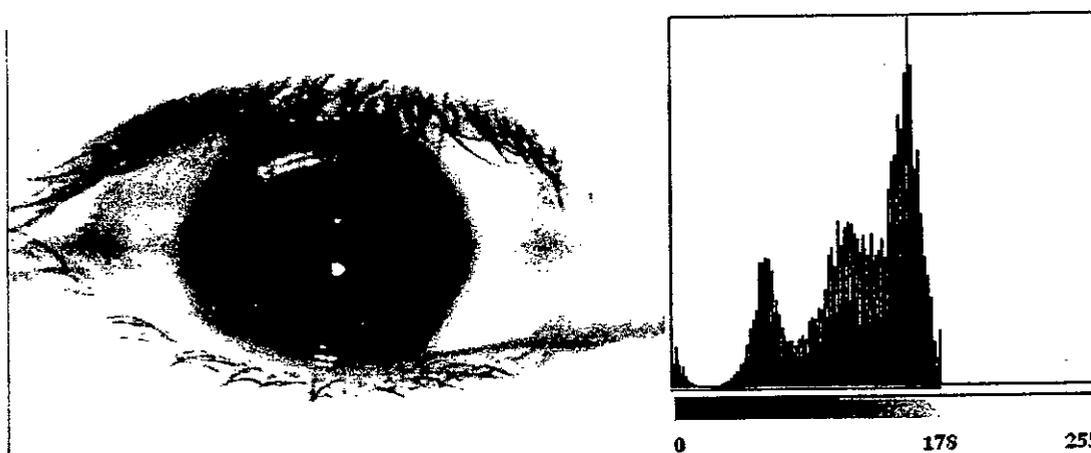


Figure 1 : Image de l'œil et l'histogramme correspondant

Minimum et maximum

La plus petite valeur et la plus grande valeur de niveau de gris contenues dans l'image; sur l'histogramme, ce sont les bornes minimale et maximale. La distribution présente une grande dynamique si cet intervalle est large (dans la figure III.1, on a: $I_{min}=0$, $I_{max}=174$).

2.3.2 NORMALISATION DU CONTRASTE

L'idée est de modifier la répartition des niveaux pour obtenir un histogramme étendu à l'ensemble des valeurs possibles. Dans cette opération la dynamique originale $[I_{min}, I_{max}]$ est étalée à $[0, 255]$, dans le cas de niveau de gris codé sur un octet (Figure 2). Cela a pour

effet d'obtenir la même information à partir de plusieurs images représentant le même objet mais qui ont des contrastes différents.

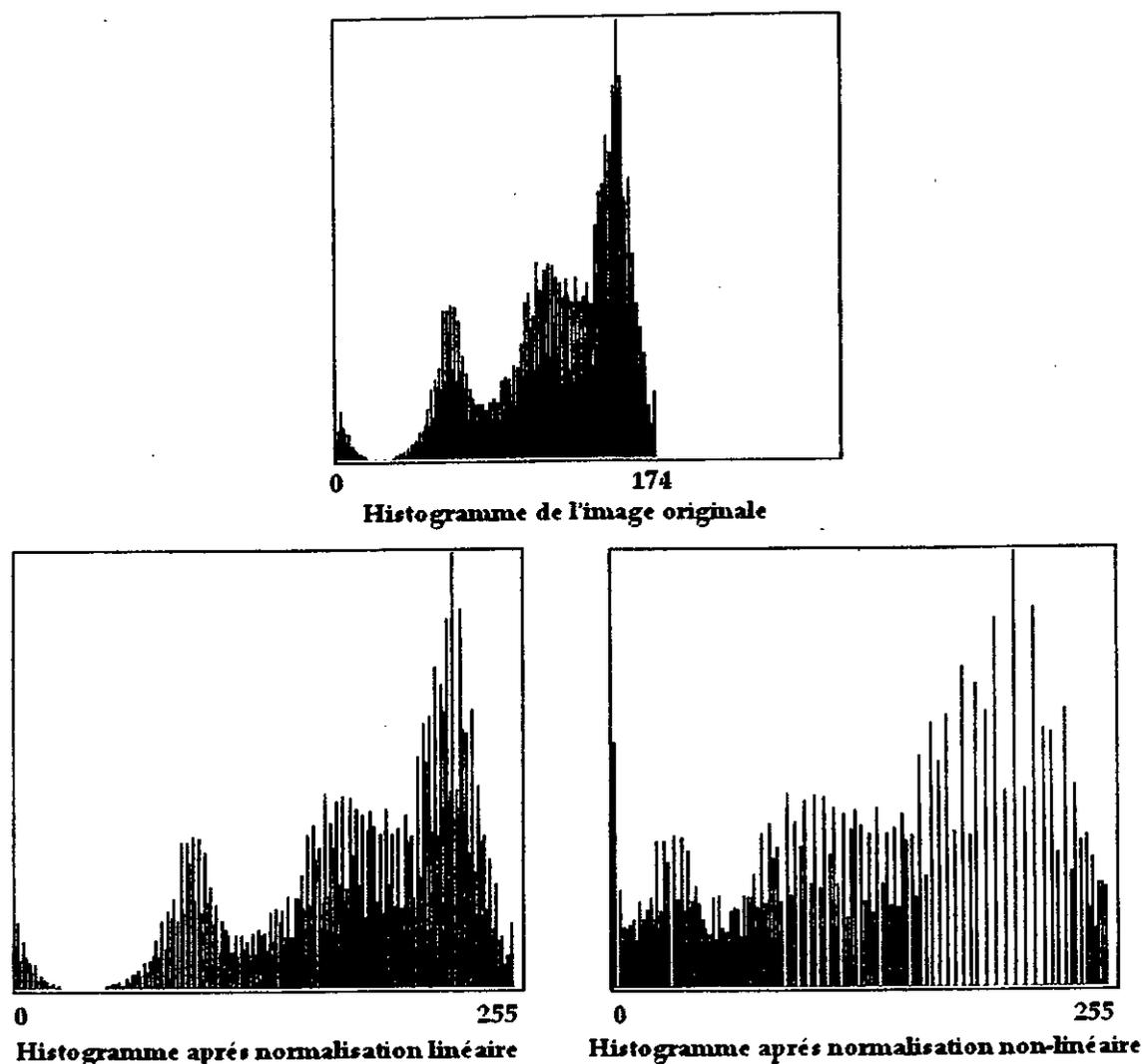


Figure 2 : Normalisation du contraste

2.4 AMELIORATION D'IMAGE

Pour extraire un objet d'une image, il faut en général séparer celui-ci de son environnement.

2.4.1 ELIMINER LE BRUIT

En faisant la somme de n acquisitions, le bruit n'apparaissant pas statistiquement au même endroit sera uniformément réparti; par contre le signal apparaissant au même point sera renforcé.

2.4.2 SEUILLAGE

L'opération de seuillage a pour but d'isoler les pixels dont la valeur est entre deux bornes fixes. Cette opération permet de créer une image binaire à partir de l'image d'origine, soit pour isoler une partie de l'image (masquage), soit pour y effectuer des transformations morphologiques [SOUCHIER 91].

2.5 TRANSFORMATIONS LINEAIRES ET FILTRES DE CONVOLUTION

2.5.1 LINEARITE

$f(x)$ est une fonction relative à une image en niveau de gris.

- Une transformation est dite linéaire si, ayant $f(x) = k_1.f_1(x) + k_2.f_2(x)$, la transformée est $Tf(x) = k_1.Tf_1(x) + k_2.Tf_2(x)$
- Une transformation $Tf(x)$ commute les transformations d'agrandissement et de rétrécissement si $T(k.f(x)) = k.(Tf(x))$ avec k paramètre d'agrandissement de $f(x)$ dans $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$.
- Une transformation est continue si, ayant $f_1(x) \rightarrow f(x)$, on a $Tf_1(x) \rightarrow Tf(x)$.

Les transformations ayant ces propriétés sont des filtres linéaires.

2.5.2 PRODUIT DE CONVOLUTION

Par ailleurs les filtres linéaires sont des *produits de convolution* : quelle que soit la fonction f , il existe une fonction h permettant de calculer directement la fonction transformée Tf par produit de convolution, noté $Tf = f * h$, qui est par définition égal à :

$$Tf(x) = f(x) * h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x-y) \cdot h(y) \cdot dy \quad (2)$$

autrement dit, la valeur de la transformée au point x dépend des valeurs de son environnement.

- **Produit de convolution discrète à deux dimensions**

$$f(x,y) * L(x,y) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} f(k,l) \cdot L(x-k, y-l) \quad (3)$$

- **Calcul dans une fenêtre**

Pour effectuer les calculs, les bornes infinies sont ramenées à des limites de variation finies qui correspondent à la taille de l'image $L(x, y)$. Le produit de convolution et la fonction de corrélation sont calculés avec une fenêtre $V(k, l)$ réduite (3x3 ou 5x5).

2.6 FILTRAGE NUMERIQUE

Contrairement aux manipulations d'histogrammes, qui sont des ponctuelles sur tous les pixels de l'image, les filtrages sont des produits de convolution qui mettent en jeu l'environnement (voisinage) de chaque pixel.

Un filtre est défini par :

- Une fenêtre carrée de dimension impaire (3 ou 5) qui est déplacée sur l'image
- Une matrice de coefficients de même dimension (3 ou 5)

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

- Une transformation combine les valeurs recouvertes par la fenêtre et les valeurs de la matrice.

Le filtre est linéaire si l'opération est une combinaison linéaire. Si $N_e(x, y)$ est le niveau d'entrée du pixel de coordonnées x et y , le niveau de sortie de ce pixel sera donné par la combinaison linéaire :

$$\begin{aligned} N_s(x, y) = & a_{11} \cdot N_e(x-1, y-1) + a_{12} \cdot N_e(x-1, y) + a_{13} \cdot N_e(x-1, y+1) \\ & + a_{21} \cdot N_e(x, y-1) + a_{22} \cdot N_e(x, y) + a_{23} \cdot N_e(x, y+1) \\ & + a_{31} \cdot N_e(x+1, y-1) + a_{32} \cdot N_e(x+1, y) + a_{33} \cdot N_e(x+1, y+1) \end{aligned} \quad (4)$$

L'application du filtre à l'image consiste à déplacer la fenêtre et à remplacer la valeur de chaque pixel par le résultat de l'opération portant sur ses voisins. Une nouvelle image est ainsi générée (un facteur de normalisation permet de conserver un intervalle de valeurs identique en entrée et en sortie).

2.7 ELIMINATION DU BRUIT

Le lissage est une opération destinée à éliminer le bruit dans une image. Les lissages sont des filtres passe-bas, ce qui signifie qu'ils éliminent les signaux de haute fréquence, caractérisés par de grandes variations de niveau de gris entre pixels voisins.

2.7.1 LISSAGES LINEAIRE

C'est la technique où chaque pixel voisins [BESANÇON 88]. Par exemple, le filtrage par moyenne, dont la valeur de chaque pixel est la moyenne de ses voisins.

a) Lissage fort

$$\text{son masque est : } \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Normalisé par un facteur 1/9 pour ramener les valeurs entre 0 et 255, il remplace chaque pixel par la moyenne des 9 pixels voisins.

b) Lissage moyen

$$\text{son masque est : } \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Normalisé par 1/16. Le coefficient plus élevé du pixel central atténue l'effet du lissage.

2.7.2 LISSAGE NON-LINEAIRE

Ce type de filtrage s'oppose au précédent dans sa dénomination car il n'est pas le résultat d'une combinaison linéaire de pixels [TOUMAZET 90]. L'exemple classique de filtre non-linéaire est le filtre médian de Tuckey. Son principe est celui de la figure 3 et il peut être décomposé selon les étapes suivantes :

Pour chaque pixel de l'image

- On classe les pixels voisins du pixel courant, compris dans la fenêtre, par valeurs croissantes,
- On prend la valeur médiane des pixels classés et on l'affecte au pixel courant.

Ainsi le filtre médiane de Tuckey remplace le pixel central d'une fenêtre par la valeur médiane. Ce filtre non-linéaire permet d'éliminer des pixels isolés ou les traînées fines noyées dans des zones relativement homogènes.

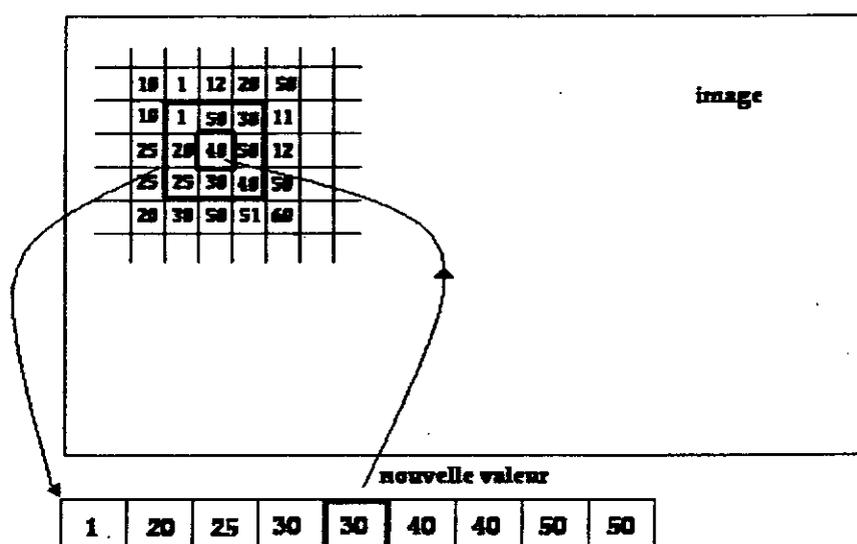


Figure 3 : Principe du filtre médian de Tuckey

2.8 DETECTION DE CONTOURS

La détection de contour est une opération inverse du lissage. Sa fonction est d'accentuer les différences entre pixels voisins, pour détecter les contours de zones homogènes [CASTAN 92].

2.8.1 DEFINITION

Un contour dans une scène, correspond généralement aux changements brusques des objets. Dans une image, on définit le contour comme une brusque variation de niveau de gris [TOUMAZET 90].

L'extraction de contour est réalisée en dérivant l'image une fois; on obtient alors le *gradient*, ou bien deux fois, et on obtient un *Laplacien*.

2.8.2 LE GRADIENT

L'amplitude du gradient en un point est un bon indicateur pour la détection de contours. Le gradient est défini par :

$$G(x, y) = \text{sqrt}((df/dx)^2 + (df/dy)^2). \quad (5)$$

Avec : $df/dx = f(x+1, y) - f(x, y)$ et $df/dy = f(x, y+1) - f(x, y)$

Le calcul est simplifié avec des formules approchées comme :

$$G(x,y) = \max (\text{abs}(df/dx), \text{abs}(df/dy)) \quad (6)$$

Ou bien:

$$G(x,y) = (\text{abs}(df/dx), \text{abs}(df/dy)) / 2 \quad (7)$$

N.B. : Ces deux formules ne sont pas indépendantes de la direction du gradient.

• Opérateur de Sobel

En principe, l'intensité de l'image près d'un contour change de manière brusque. Ce changement peut être mesuré par la magnitude du gradient de l'intensité de l'image. Un contour est présent si la magnitude du gradient excède un certain seuil. L'opérateur de Sobel est un opérateur semblable au gradient sauf qu'il est calculé à partir d'un voisinage plus grand. Le filtre utilisé est d'une grandeur 3X3. Cet opérateur a comme avantage d'être moins sensible au bruit. Les deux opérateurs de Sobel sont comme suit :

Opérateur de Sobel horizontal

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Opérateur de Sobel vertical

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Remarque: on peut inverser les nombres positifs et négatifs dans les filtres sans changer la valeur finale de l'opérateur de Sobel, puisqu'on ne considère que la valeur absolue des résultats.

Supposons maintenant que l'on choisisse un pixel dans notre image, nommons-le x_5 , et que l'on veuille vérifier s'il y a un contour vertical près de ce pixel. Nommons les pixels voisins de x_5 de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ X_4 & X_5 & X_6 \\ X_7 & X_8 & X_9 \end{bmatrix}$$

Ce voisinage du pixel x_5 est appelé " 8-voisinage " d'un pixel.

La valeur $G_{hor} [x_5]$ associée au pixel x_5 sera :

$$G_{hor} [x_5] = -1 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 1 \cdot x_3 - 2 \cdot x_4 + 0 \cdot x_5 + 2 \cdot x_6 - 1 \cdot x_7 + 0 \cdot x_8 + 1 \cdot x_9 = (x_3 + 2x_6 + x_9) - (x_1 + 2x_4 + x_7)$$

Tandis que la valeur $G_{vert} [x_5]$ associée au pixel x_5 sera :

$$G_{vert} [x_5] = -1 \cdot x_1 - 2 \cdot x_2 - 1 \cdot x_3 + 0 \cdot x_4 + 0 \cdot x_5 + 0 \cdot x_6 + 1 \cdot x_7 + 2 \cdot x_8 + 1 \cdot x_9 = (x_7 + 2x_8 + x_9) - (x_1 + 2x_2 + x_3).$$

Finalement, la valeur de $G [x_5]$ sera :

$$G[x_5] = (G_{vert}^2 + G_{hor}^2)^{1/2}$$

Des procédures d'amincissement et de lissage sont souvent nécessaires parce que les frontières sont souvent brisées et épaisses après avoir appliqué la technique du seuil (Figure 4).

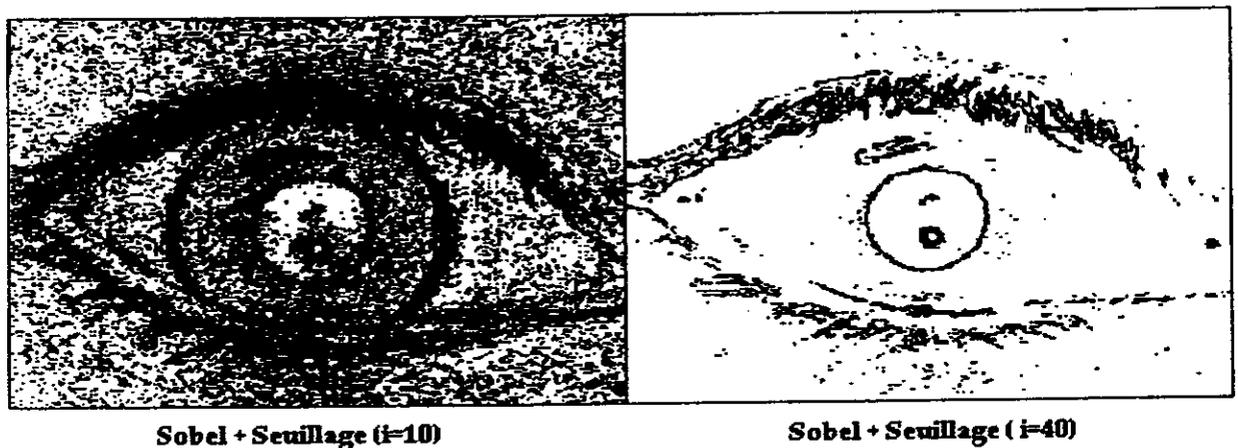


Figure 4 : Détection de contour de l'image de l'œil

- **Opérateur de Prewitt**

Même principe que Sobel, son masque est :

Opérateur de Prewitt horizontal

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Opérateur de Prewitt vertical

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

2.8.3 LAPLACIEN

L'opérateur Laplacien consiste à calculer la dérivée seconde de l'image. Il existe plusieurs masques du Laplacien tous similaires, tels que :

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

On obtient après application du Laplacien sur une image, un résultat où les points de contours correspondent aux valeurs nulles, bordées de deux extremums. Le contour est ensuite déterminé par la détection des passages par zéro du Laplacien de l'image. Notons que le passage par zéro étant unique, le Laplacien fournit directement des contours d'un pixel d'épaisseur. Le Laplacien possède, cependant, un inconvénient majeur qui est sa grande sensibilité au bruit (Figure 5).

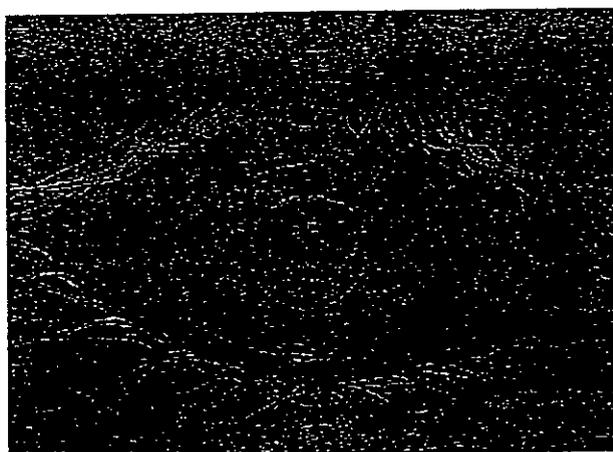


Figure 5 : Application de l'opérateur Laplacien sur l'image de l'œil

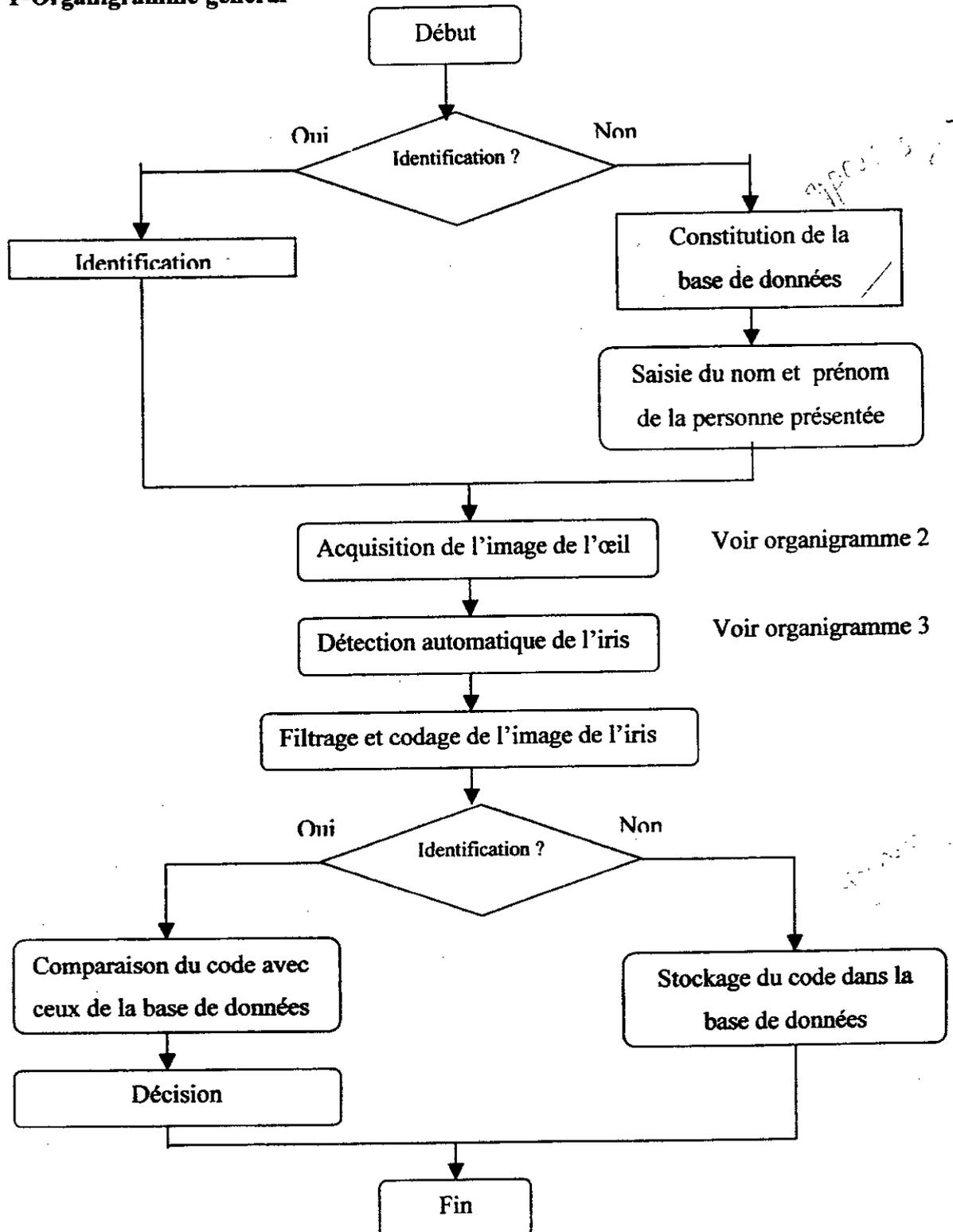
3. CONCLUSION

On a présenté dans les sections précédentes quelques méthodes de filtrage. Ces méthodes sont souvent utilisées dans le traitement classique de l'image. Nous n'avons pas eu besoin, dans notre approche d'analyse, de toutes les méthodes de filtrage bien qu'elles soient présentes dans le logiciel. Toutefois, l'utilisateur de l'application peut toujours y faire appel, pour améliorer une image donnée. En ce qui concerne la détection de contour, on a préféré l'opérateur Sobel car il est moins sensible au bruit, et les résultats obtenus sont satisfaisants pour l'analyse recherchée.

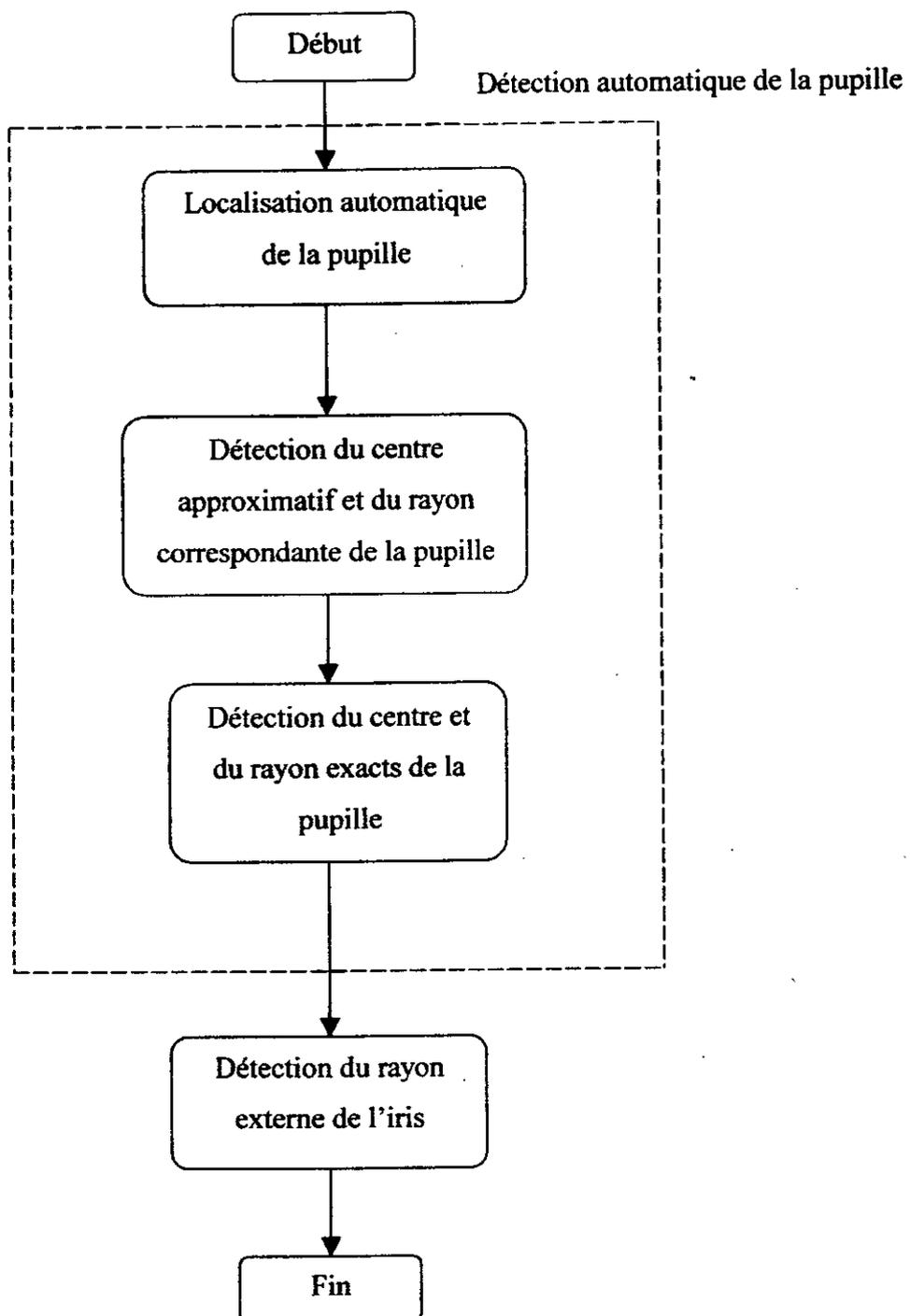
ANNEXE F

Organigrammes et menus de l'application

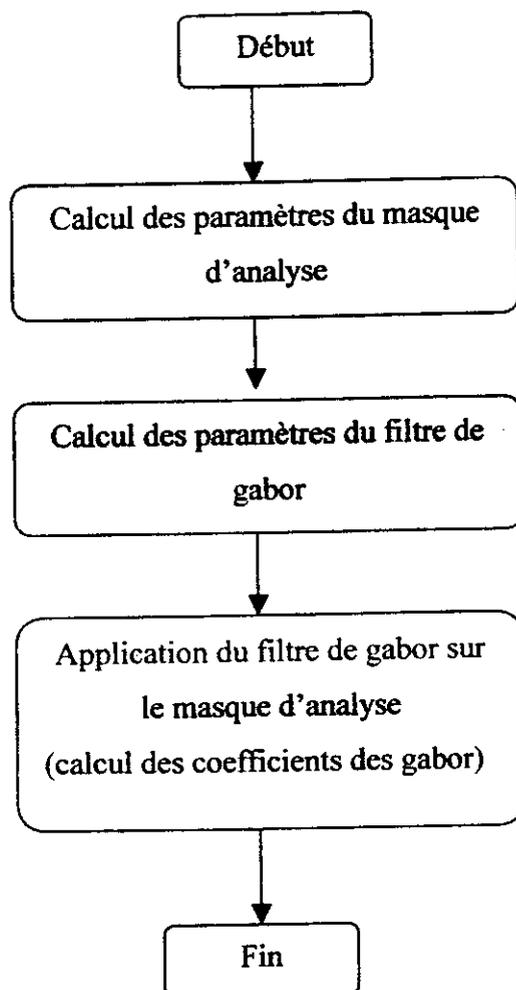
1-Organigramme général



2-Organigramme de la détection automatique de l'iris

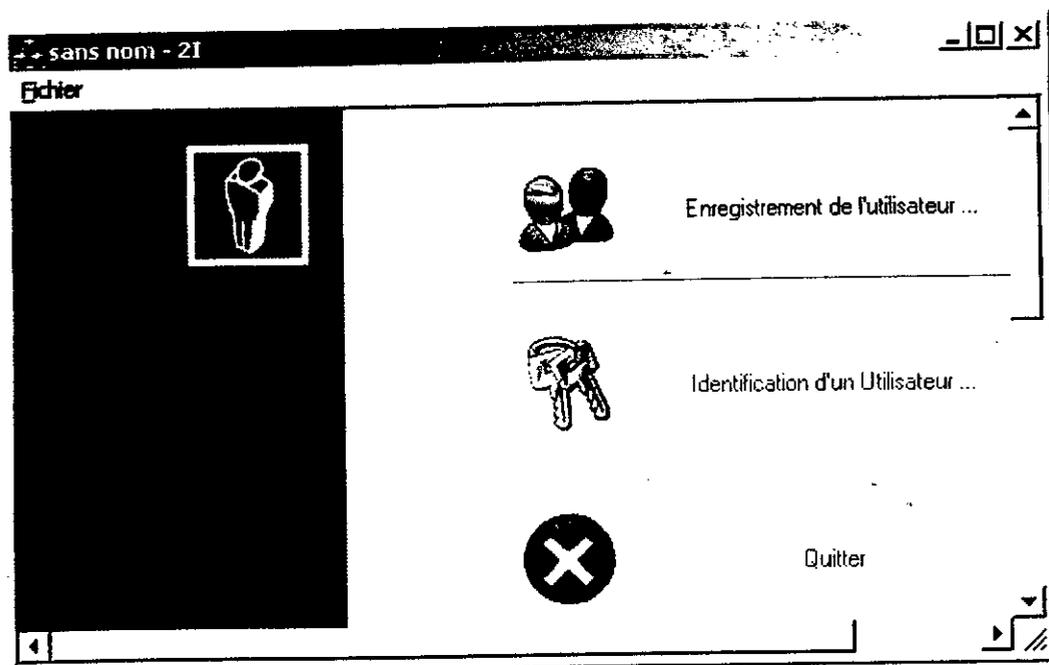


3-Organigramme du filtrage et codage de l'iris (calcul des coefficients du filtre de gabor)

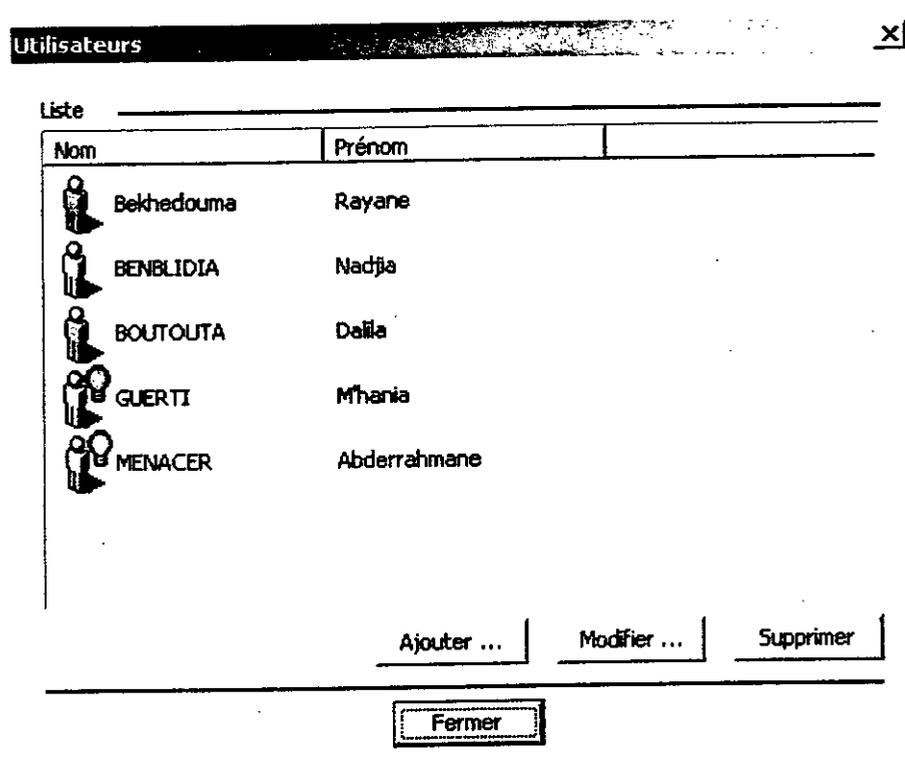


Menu de l'application globale

Le menu globale est présenté comme suit :



L'icône "Enregistrement de l'utilisateur" permet de construire la base de données. Le choix de cette icône entraîne l'ouverture de la fenêtre suivante, et la visualisation de la liste des utilisateurs:



Fenêtre 1

- Le logiciel donne la possibilité de supprimer un utilisateur en sélectionnant son nom sur la liste des utilisateurs, et en appuyant sur le bouton Supprimer.

- Pour enregistrer un utilisateur, il suffit de choisir le bouton Ajouter..., la fenêtre suivante apparaîtra :

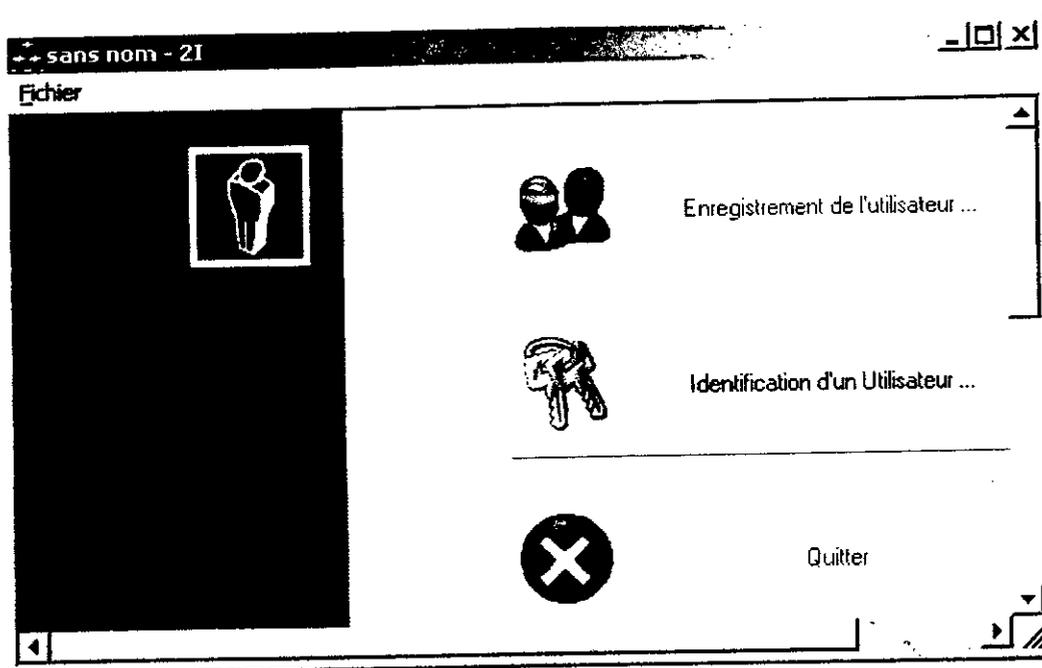
The screenshot shows a window titled "Informations Utilisateur". It has a title bar with a close button (X). Below the title bar, there are two text input fields labeled "Nom" and "Prénom". To the right of these fields are two buttons: "Enregistrer" and "Annuler". Below the input fields, there is a label "Coefficients de Garbour non calculés". At the bottom left of the window, there are two buttons: "Acquisition" and "Codage". The main area of the window is a large rectangular frame containing a high-contrast, black and white image of a human eye, which appears to be an iris scan.

Fenêtre 2

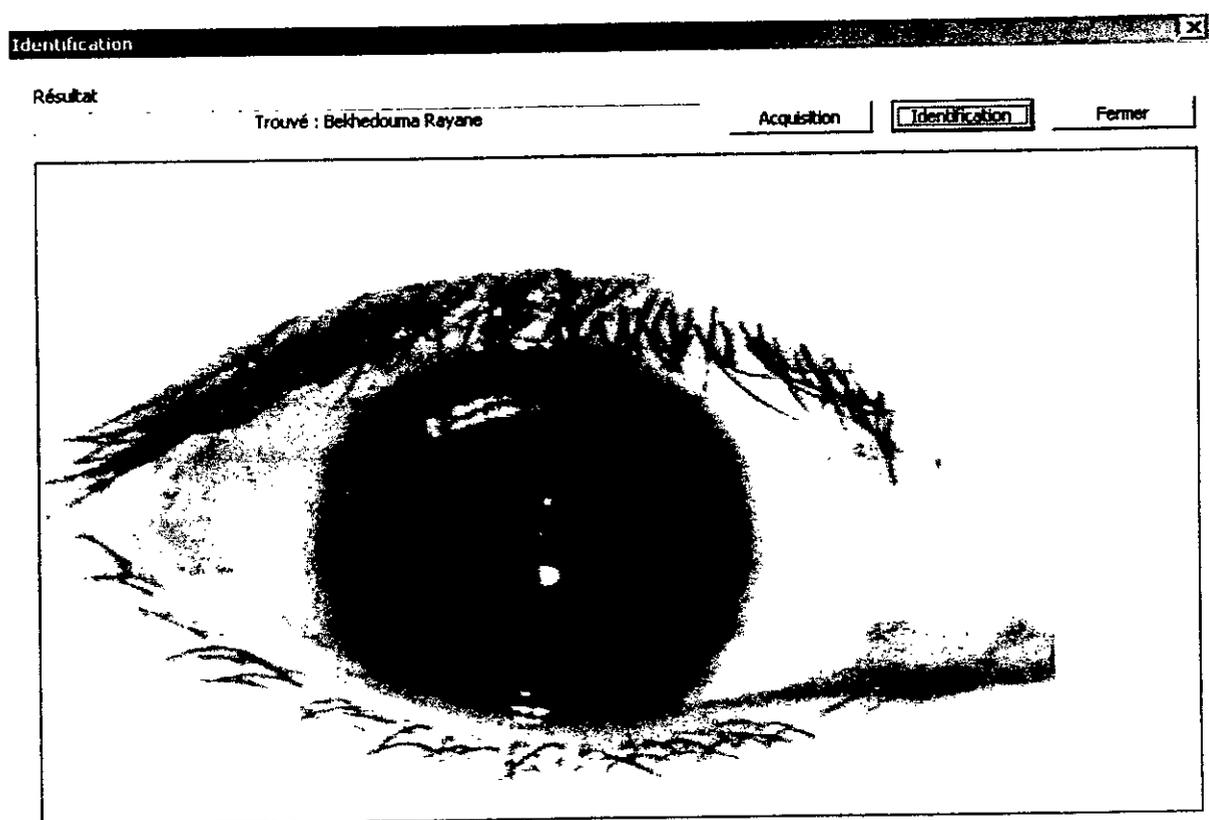
On introduit le nom et le prénom de l'utilisateur à enregistrer, on appui, ensuite sur le bouton Acquisition pour l'acquisition de l'image de l'œil de l'utilisateur et si l'image est bonne alors on appuie sur le bouton Codage afin de coder l'image de son iris, en dernier le bouton Enregistrer permet le stockage du code dans la base de données. On peut, aussi, enregistrer le nom et prénom d'un utilisateur sans le codage de son iris, (l'acquisition et le codage sont exécutés ultérieurement), dans ce cas le symbole d'une ampoule apparaît devant le nom enregistré sur la liste des utilisateurs (voir fenêtre 1).

- Le bouton Modifier donne les possibilités suivante :
 - de corriger le nom et prénom d'un utilisateur, sans modifier son code,
 - de modifier le code d'un utilisateur, sans changer le nom et le prénom,
 - de modifier et le nom et prénom et le code de l'utilisateur.

L'icône "Identification" du menu principale permet de comparer le code de l'iris d'une personne, qui se présente pour l'identification, avec les codes de la base de données.



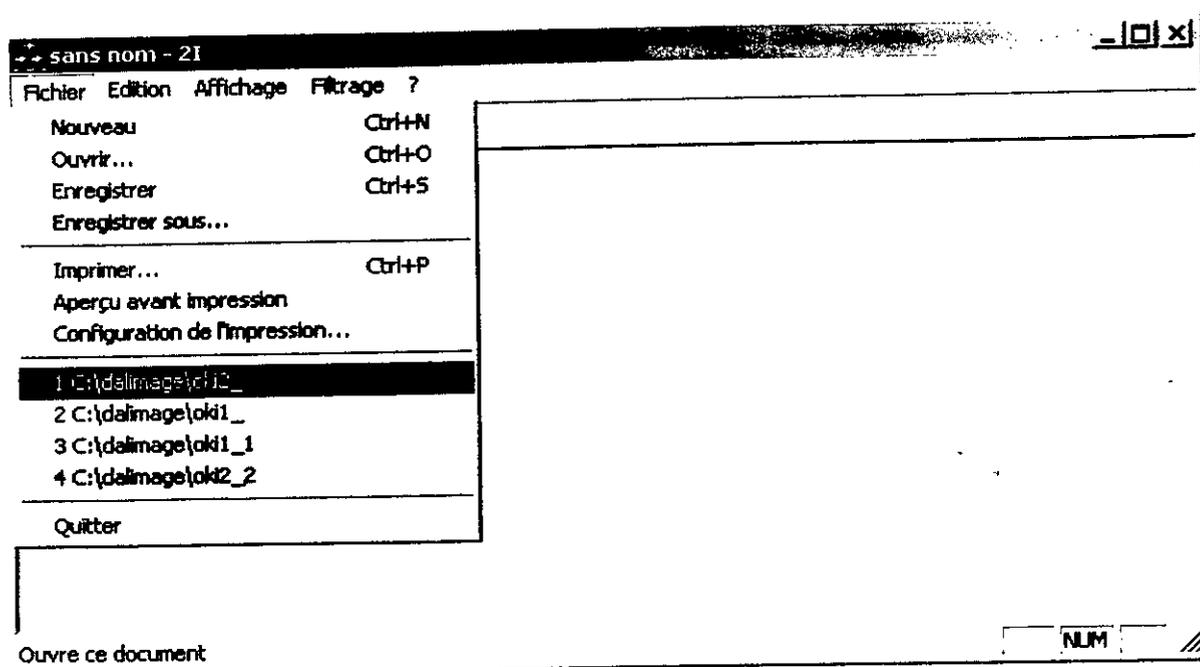
Le choix de cette icône entraîne l'ouverture de la fenêtre 3. Afin de capturer l'image de l'œil de l'utilisateur, il suffit d'appuyer sur le bouton Acquisition . Le bouton Identification lance le codage et la comparaison. Le résultat est affiché dans la fenêtre.



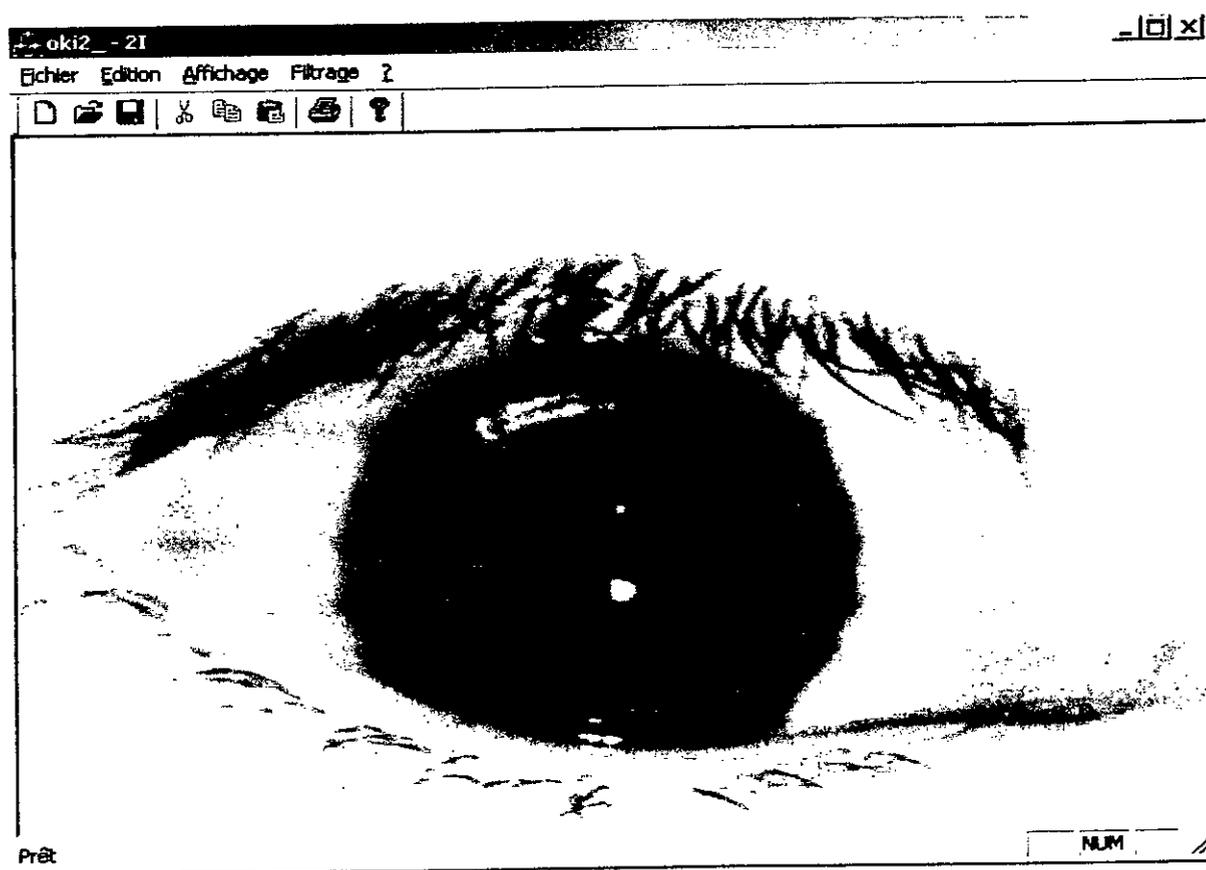
Fenêtre 3

Menu de l'application détaillé

Dans ce qui suit, on présente le menu qui permet d'exécuter les organigrammes 2 et 3 séparément.

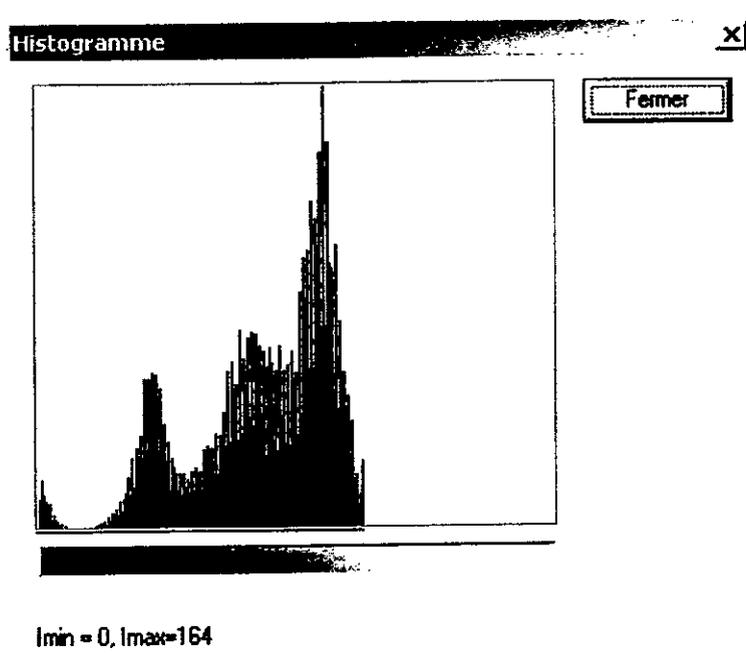
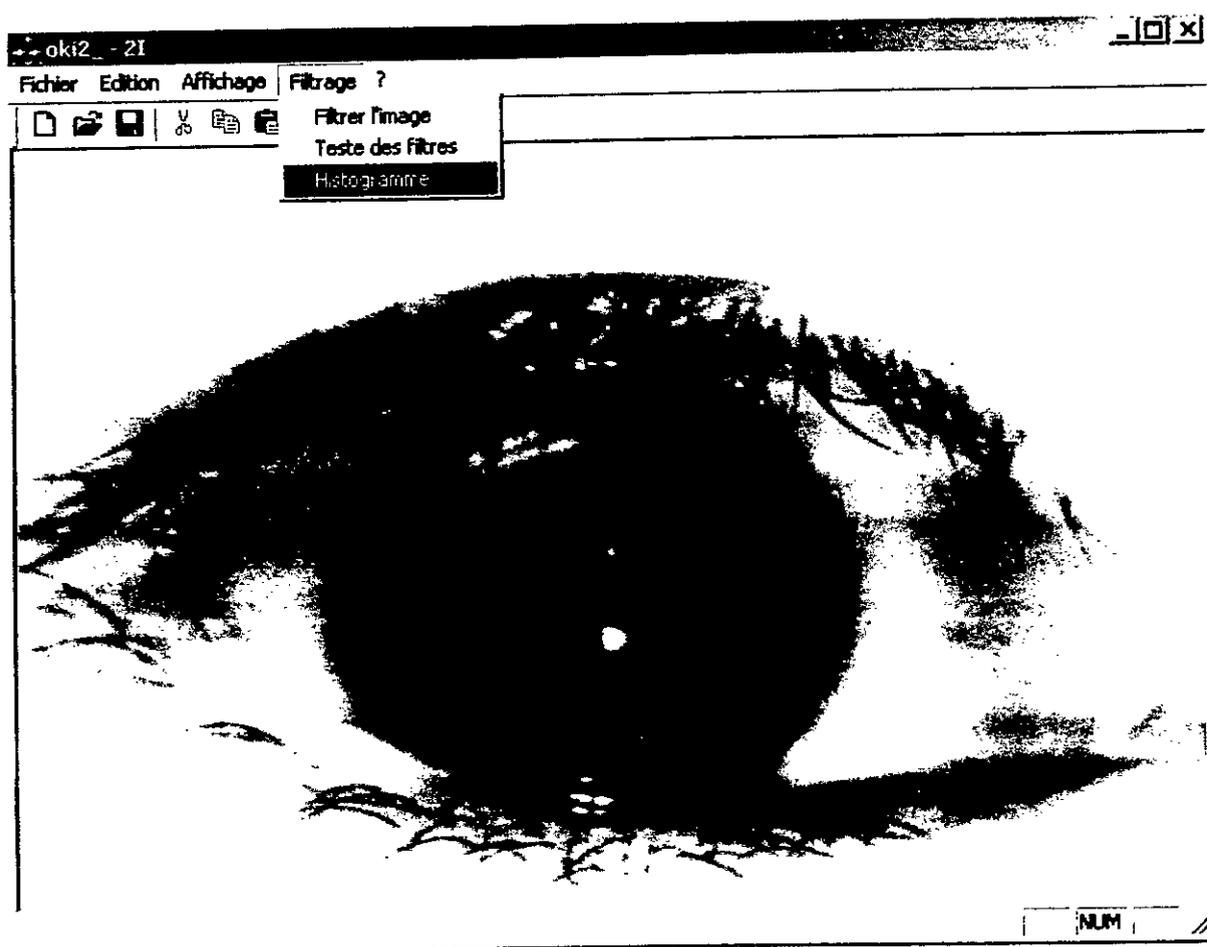


En premier lieu, il faut charger une image de l'œil:

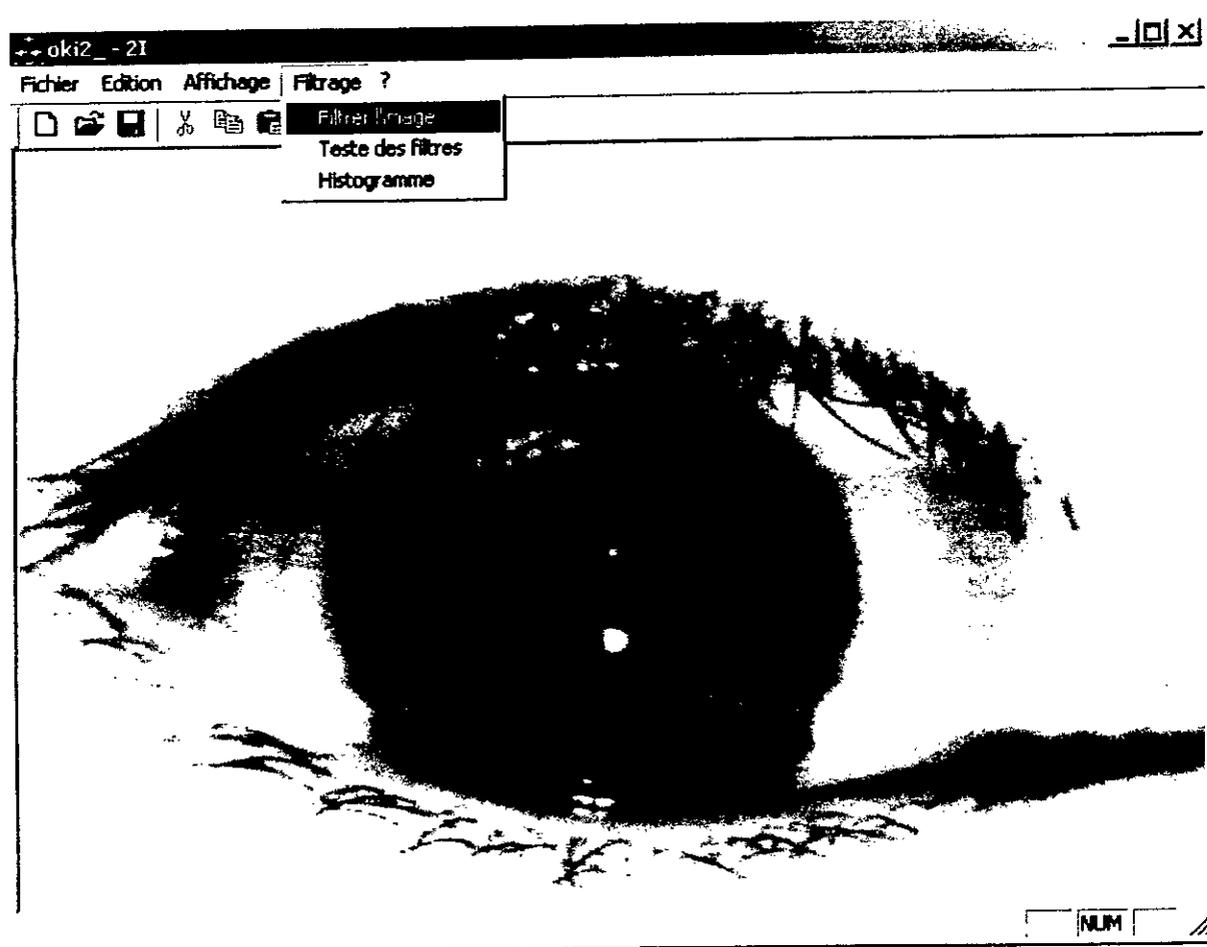


Le bouton Filtrage du menu, permet :

- 1) d'afficher l'histogramme de l'image en cliquant sur :Histogramme.



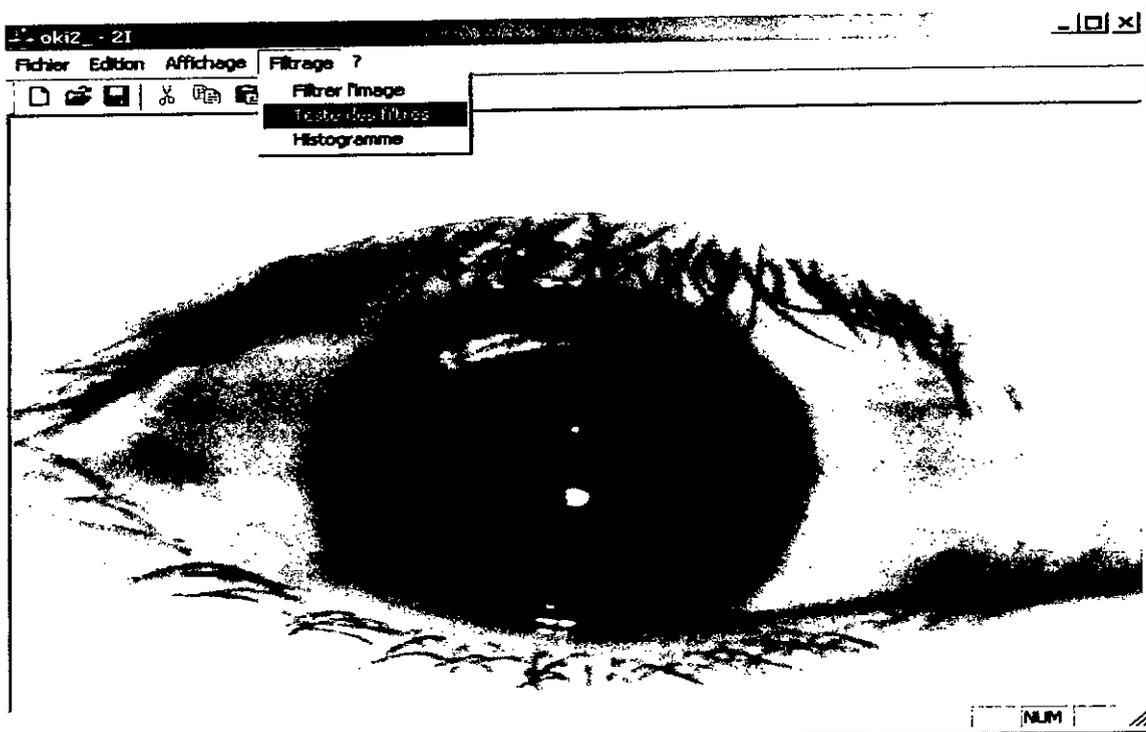
2) De coder l'image de l'iris en cliquant sur : Filtrer l'image.



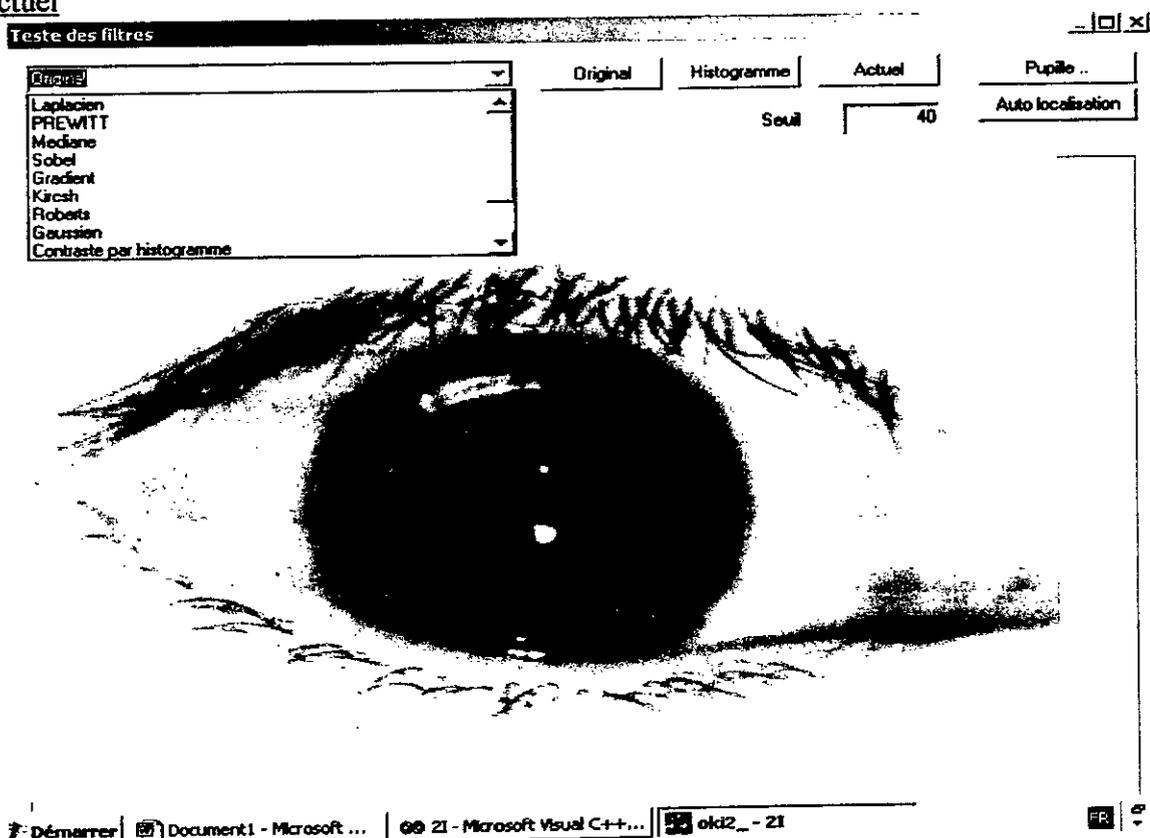
La fenêtre si-dessous permet d'introduire manuellement les paramètres de l'image de l'iris ainsi que ceux du filtre de Gabor.

Initialisation des paramètres du filtre					
X0	<input type="text" value="0"/>	Y0	<input type="text" value="0"/>	<input type="button" value="OK"/>	
R1	<input type="text" value="0"/>	R2	<input type="text" value="0"/>	<input type="button" value="Annuler"/>	
NPC	<input type="text" value="0"/>	NZC	<input type="text" value="0"/>		
KR	<input type="text" value="0"/>	Teta max	<input type="text" value="0"/>		

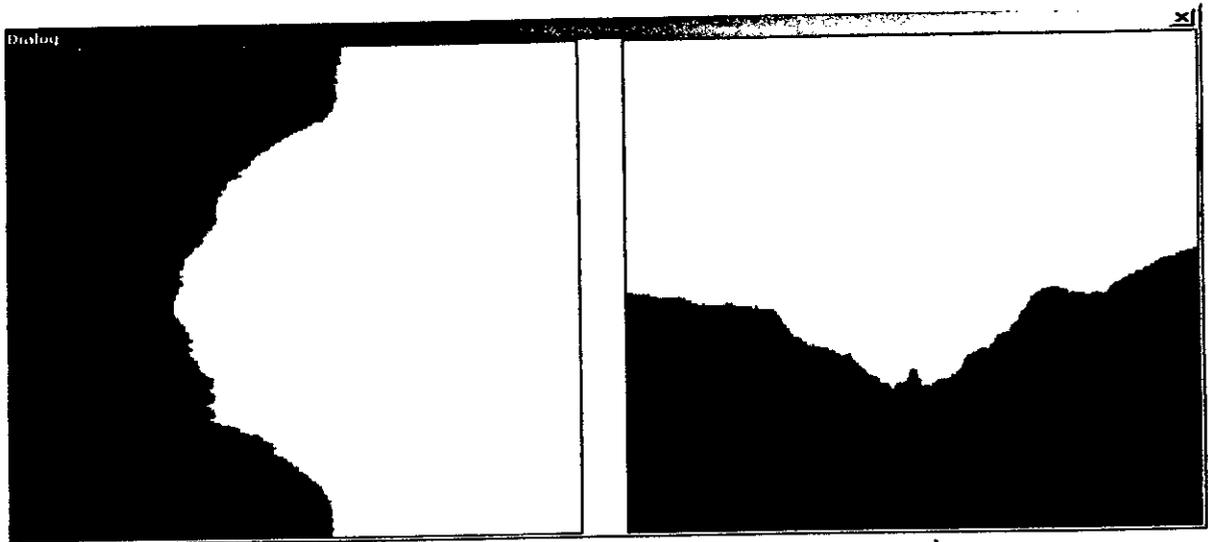
- 3) De détecter automatiquement l'iris de l'œil et d'appliquer quelques filtres sur l'image de l'œil en cliquant sur : Teste des filtres.



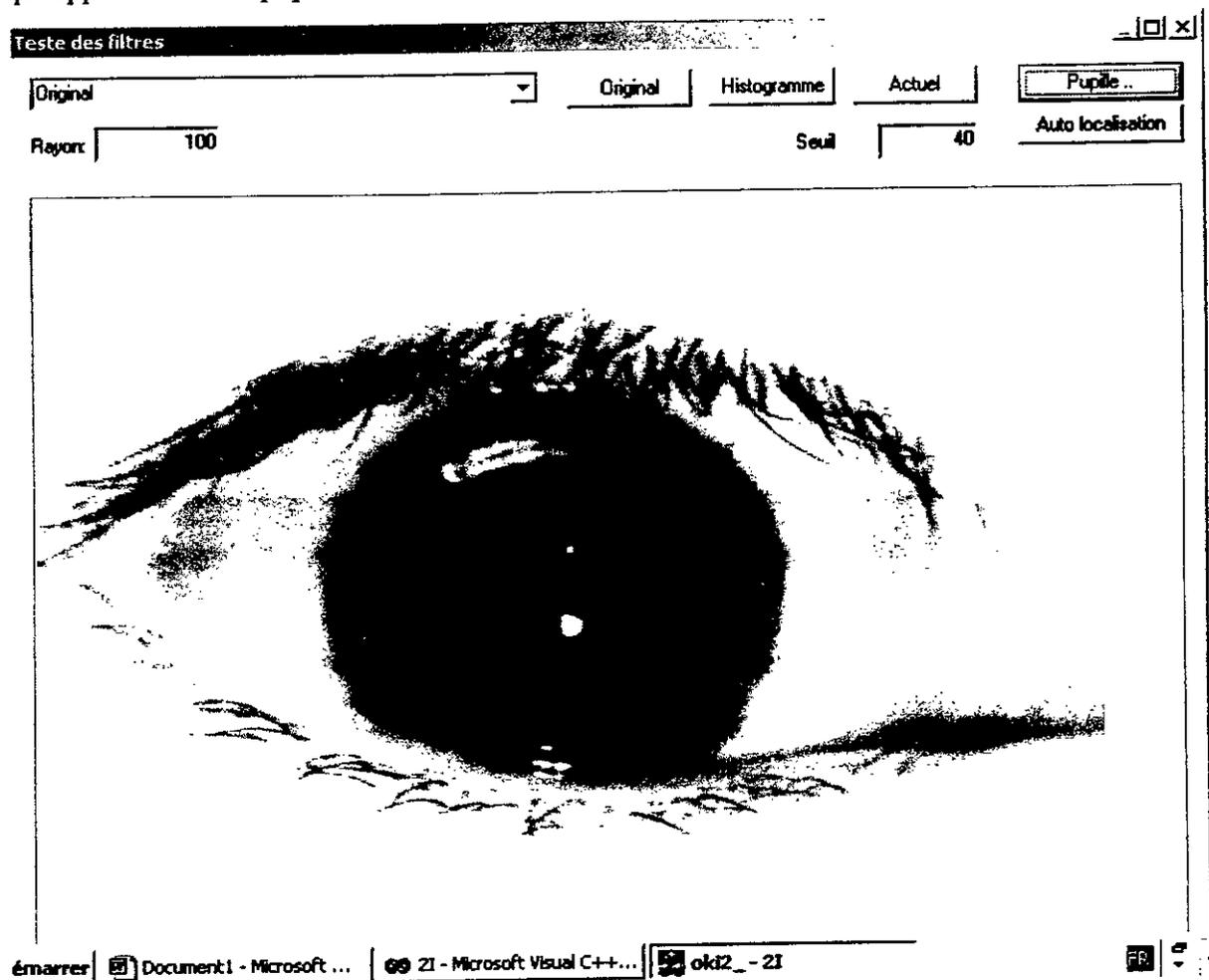
Le menu suivant, permet d'appliquer un filtre sur l'image de l'œil en le sélectionnant sur la liste des filtres. On a la possibilité d'appliquer ces filtres soit à l'image originale, chargée dans le menu principale, soit à l'image déjà filtrée en sélectionnant l'un des boutons Original ou Actuel



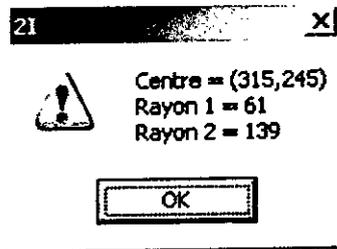
La localisation automatique de la pupille, s'exécute en activant le bouton Pupille... , on obtient ainsi les projections des intensités sur les axes des X et des Y.



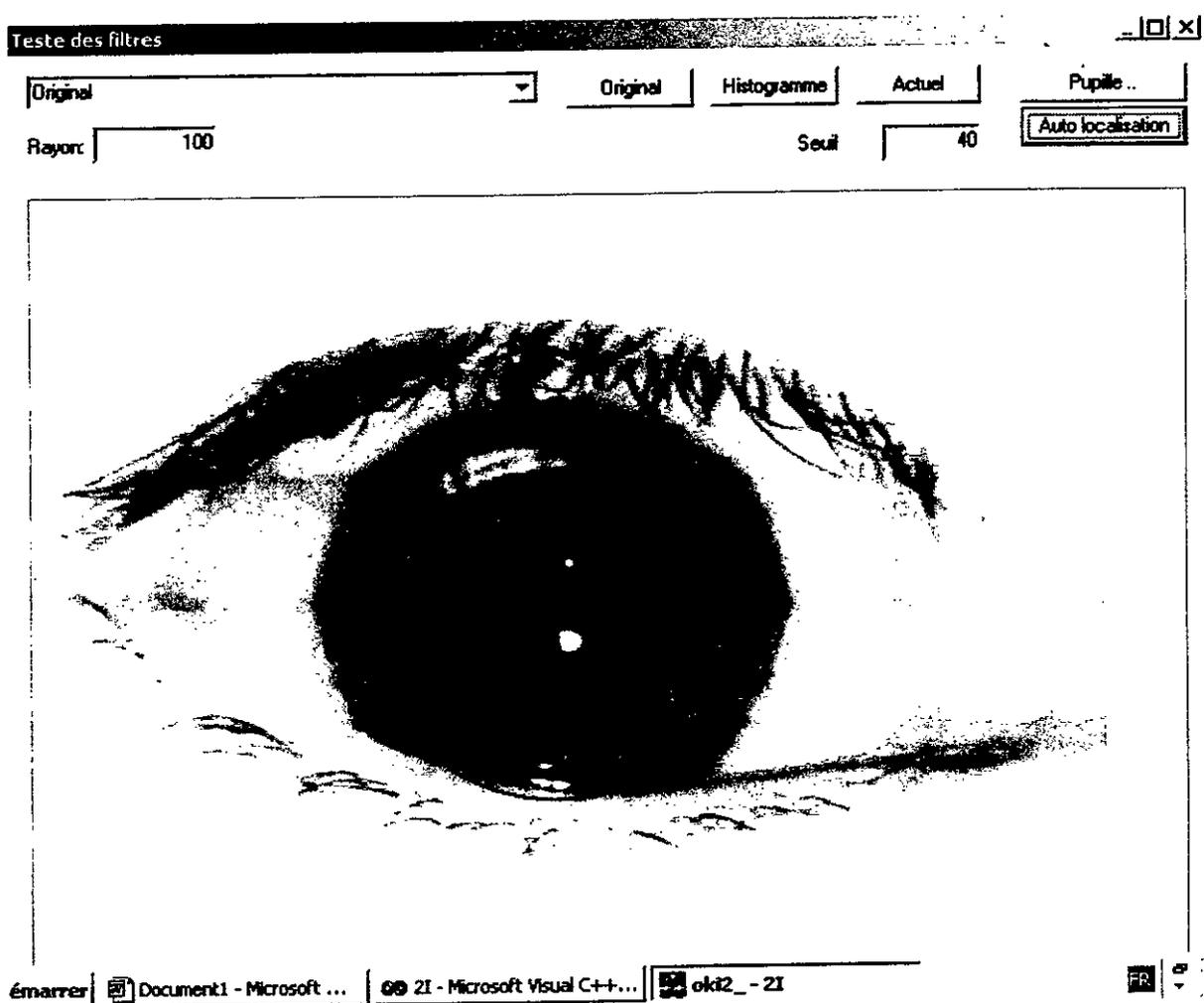
L'intersection des deux minimum des projections des intensités donne la position approximative de la pupille dans l'image de l'œil. Cette position est figurée par le point rouge qui apparaît dans la pupille.



Enfin, pour avoir la position exacte de l'iris, il faut cliquer sur le bouton Auto Localisation . On obtient ainsi les coordonnées du centre de l'iris et la valeur ses rayons interne et externe affichés dans une fenêtre :



L'action sur le bouton OK de la fenêtre précédente permet de tracer le centre de l'iris et ses limites interne et externe.



BIBLIOGRAPHIE

- ADLER F. H., *"Physiology of the Eye"*, St. Louis MO: Mosby, 1965.
- BERGGREN L., *"Iridologie: A critical review"*, Acta Ophthalmologica, Vol. 63, pp.1-8, 1985.
- BERTILLON A., *"La couleur de l'iris"*, Rev. Sci., Vol. 36, N° 3. pp.65-73, 1985.
- BESANÇON Jacques E., *"Vision par ordinateur en deux et trois dimensions"*, EYROLLES, 1988.
- CASTAN Serge, *"Vision par ordinateur Evolution"*, Techniques de l'ingénieur, fiche H1980, Juin 1992.
- COSCAS G., LIMON S., MASCLEF P., OFRET H., *"Anatomie de l'uvée"*, Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Paris, Ophtalmologie, 3.24.11, 21003 C-10., 1969.
- COTTARD Martin, *"Iris"*, <http://biometrie.online.fr/doc/osiris/start.html>, 2000.
- DAUGMAN John, *"Uncertainty relation for resolution in spatial frequency, and orientation optimized by two-dimentional visual cortical filters"*, J. Opt. Soc. Am. A/Vol.2, N°., pp1160-1169, 7/July 1985.
- DAUGMAN John, *"Complete discrete 2D Gabor transforms by neural networks for image analysis and compression"*, I.E.E.E Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Vol.36. N°.7, pp1169-1178, July 1988.
- DAUGMAN John, *"Biometric signature security system"*, Harvard University, Cambridge, MA. Tech. Rep.,1990.
- DAUGMAN John, *"High confidence personal identification by rapid video analysis of iris texture"*, Proceeding of the I.E.E.E. International Carnahan Conference on Security Technology. pp50-60, 1992.
- DAUGMAN John, *"High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence"*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 15(11), pp. 1148-1161,1993.

- DAUGMAN John, "*Biometric Personal Identification System Based on Iris Analysis*", U.S. Patent No. 5,291,560 issued March 1, 1994.
- DAUGMAN John, "*High confidence recognition of persons by their iris patterns*", <http://www.aditech.co.uk/downloads/Irisrecogsci.pdf>, 1997.
- DAUGMAN John, "*Iris recognition for personal identification*", http://www.cl.cam.ac.uk/users/jgd1000/iris_recognition.html, 2000.
- DAVSON H., "*Davson's Physiology of the Eye*", 5th edition. London: Macmillan Press, 1990.
- FLOM Leonard, SAFIR Aran, "*Iris recognition system*", United States Patent, Patent Number: 4,641,349. Date of Patent: Feb. 3.1987.
- FRUITET Jean, "*Outils et méthodes pour le traitement des images par ordinateur*", http://pczenith.univ-mlv.fr/~jf/Trait_image/an_imag.html, 2000.
- JOLION Jean-Michel, "*La texture*", <http://telesun.insa-lyon.fr/wolf/imchar>, Novembre 1999.
- KADDOUR Chakib, "*Généralités sur le traitement d'image*", <http://iquebec.ifrance.com/kadchakib/>, 1999.
- MAHMOUDI Djamila, "*Biométrie et authentification*", <http://sic.epfl.ch/SA/publications/FI00/fi-sp-00/sp-00-page25.html>, Juillet 2000.
- MENACER Abderrahmane, MENACER Mohamed, MENACER Saïd, AROUSSI Abdelwahab, "*A fast variant of the novel approximation algorithm of circular functions*", Proceedings of the IASTED International Conference Signal and Image Processing, pp 217-220, October 28-31, 1998, Las Vegas, Nevada-USA.
- MENACER Abderrahmane, MENACER Mohamed, MENACER Saïd, "*A fast and efficient algorithm for circular function approximation based on an optimization method*", Proceedings of the IASTED International Conference Signal and Image Processing, pp 221-224, October 28-31, 1998, Las Vegas, Nevada-USA.
- MENACER Abderrahmane, AROUSSI Abdelwahab, MENACER Mohamed, MENACER Saïd, "*A fast algorithm of circular approximating functions by error minimization*", Proceedings of the IASTED International Conference Signal and Image Processing, pp 225-228, October 28-31, 1998, Las Vegas, Nevada-USA.
- MENACER Abderrahmane, BOUTOUTA / BEKHADDOUMA-ABDI Dalila, "*Présentation d'un protocole d'analyse de l'image de l'iris de l'œil*", à paraître, 2003.

- MENACER Abderrahmane, MENACER Mohamed, MENACER Saïd, "*La pseudoinverse quadratique: application à l'approximation de fonctions circulaires*", à paraître, 2002.
- MENACER Abderrahmane, MENACER Mohamed, MENACER Saïd, "*L'approximation circulaire canonique*", à paraître, 2002.
- MILLER Benjamin, "*Vital signs of identity*", IEEE Spectrum, pp.22-30, February 1994.
- MILLIOT Frédéric, "*Reconnaissance de l'iris: la sécurité ultime*", http://www.distributique.fr/PRODUITS/2001/315_27_tendancereconna00.shtml, 2000.
- PLANÇON Philippe, "*Structure des fichiers Bitmap*", <http://docvb.free.fr/vbplus/Infograp/imagebitmap.php3>, 2001.
- ROHEN J., "*Morphology and pathology of the trabecular meshwork*" in *The Structure of the Eye*, ed. Smelser, pp. 335-341, New York: Academic Press, 1961.
- SOUCHIER Catherine, "*Analyse d'images*", Techniques de l'ingénieur, fiche P855, Juillet 1991.
- TOUMAZET J.-J., "*Traitement d'image par l'exemple*", SYBEX, 1990.
- TUNER M. R., "*Texture discrimination by Gabor functions*", Biological Cybernetics, pp 71-82, 1986.
- WILDES Richard P., "*Iris Recognition for security access control: Final report*", National Information Display Laboratory, Princeton, NJ, Tech. Rep., 1992.
- WILDES Richard P., Asmuth J. C., Green G. L., Hsu S. C., Kolezynski R. J., Matey J. R., and McBride S. E., "*A machine vision system for iris recognition*", Mach. Vision Applicat., vol. 9, pp. 1-8, 1996.
- WILDES Richard P., "*Iris Recognition: An Emerging Biometric Technology*", Proceeding of The IEE, Vol. 8, N°9, pp.1348-1350, September 1997.