



**Université Sidi Mohammed Ben Abdellah**  
**Faculté des Sciences Dhar El Mahraz- Fès**  
**Centre d'Etudes Doctorales**  
**"Sciences et Technologies"**

**Formation Doctorale : Sciences et Technologies de  
l'Information et de la Communication (STIC)**

**Discipline : Informatique**

**Spécialité : Informatique**

**Laboratoire : Laboratoire d'Informatique et Modélisation (LIM)**

## **THESE DE DOCTORAT**

Présentée par

**L a m y a e H A L O U I**

**Contributions à l'amélioration des systèmes de reconnaissance biométrique  
à base des empreintes digitales**

Soutenue le 24 / 11 / 2018 devant le jury composé de :

<b>Pr. Mohammed MEKNASSI</b>	<b>Faculté des Sciences Dhar El Mahraz- Fès</b>	<b>Président</b>
<b>Pr. Mohammed EL HASSOUNI</b>	<b>Faculté des Lettres et des Sciences Humaines- Rabat</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Pr. Arsalane ZARGHILI</b>	<b>Faculté des Sciences et Techniques- Fès</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Pr. Hassan SILKAN</b>	<b>Faculté des Sciences- El Jadida</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Pr. Saïd NAJAH</b>	<b>Faculté des Sciences et Techniques- Fès</b>	<b>Examineur</b>
<b>Pr. BOUMHIDI Jaouad</b>	<b>Faculté des Sciences Dhar El Mahraz – Fès</b>	<b>Examineur</b>
<b>Pr. Noureddine En-nahnahi</b>	<b>Faculté des Sciences Dhar El Mahraz – Fès</b>	<b>Co-directeur</b>
<b>Pr. Saïd Ouatik El Alaoui</b>	<b>Faculté des Sciences Dhar El Mahraz – Fès</b>	<b>Directeur de thèse</b>

# DEDICACES

*Je dédie cette thèse à ... ✍*

*Au meilleur des pères*

*A ma très chère maman*

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs*

*A mon cher Youssef et ma petite Ghita*

*Que j'aime énormément*

*A ma sœur Nora et mon frère Wassim*

*A qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite*

*A toute ma famille ainsi qu'à mes beaux-parents*

*A tous mes amis*

*A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études*

*A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer*

## *Remerciements*

Mes louanges et gratitude intarissable vont en premier à Dieu le Tout-Puissant qui m'a prodigué la santé, et la volonté afin d'accomplir ce travail.

Je tiens à remercier tout d'abord mes superviseurs, Pr. Ouatik El Alaoui Saïd et Pr. Noureddine En-Nahnahi.

Je suis reconnaissante à Pr. Ouatik El Alaoui pour m'avoir accueilli au sein de son équipe, pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques. Je voudrais le remercier également pour ses remarques et suggestions ainsi que pour m'avoir aidé dans toutes les démarches administratives. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

J'adresse de chaleureux remerciements également à Pr. Noureddine EN-Nahnahi pour son attention de tout instant sur mes travaux, pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. Il a plusieurs qualités humaines : le perfectionnisme, le sens de l'humour, l'empathie, l'intuition, la créativité, la passion, la responsabilité et la gentillesse. Il a été plus qu'un superviseur pour moi, il était un enseignant spirituel et un mentor. Son énergie et sa confiance ont été des éléments moteurs pour moi. J'ai pris un grand plaisir de travailler avec lui.

J'exprime ma gratitude et mon appréciation à Pr. Mohammed MEKNASSI, professeur à l'Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Directeur du Laboratoire d'Informatique et Modélisation (LIM), pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire puis pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de ma soutenance.

Je remercie les rapporteurs de cette thèse Pr. Mohammed EL HASSOUNI, Pr. Arsalane ZARGHILI et Pr. Hassan SILKAN pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. Je remercie également les examinateurs Pr. Saïd NAJAH et Pr. BOUMHIDI Jaouad pour leur temps et leur intérêt. Leurs critiques, commentaires et questions me permettront d'améliorer ce mémoire.

Ces remerciements seraient incomplets si je n'en adressais pas à l'ensemble des professeurs de département informatique, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique d'avoir rendu possible mon travail de doctorat grâce à leur bourse d'études.

Je voudrais remercier mes collègues du Laboratoire d'Informatique et Modélisation, en particulier Nisrine pour son aide, son encouragement et son amitié. Nous avons partagé de bons moments.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Les mots me manquent pour exprimer toute la reconnaissance, la fierté et le profond amour que je leur porte pour les sacrifices qu'ils ont consenti pour ma réussite.

Mes remerciements finaux et non les moindres vont à toute ma famille, en particulier à mon mari Youssef de m'avoir soutenu ces derniers mois, à mon frère Wassim et à ma sœur Nora qui m'ont toujours encouragé dans mes études.

Je remercie ma petite Ghita d'avoir été gentille et patiente durant mes nuits d'études. Ta présence me tenait compagnie, chacun de tes petits mouvements m'apportait joie et bonheur.

Je close enfin ces remerciements en dédiant cette thèse de doctorat à mes chers parents, à mon mari, à mon frère, à ma sœur et à ma petite fille.

---

## Contributions à l'amélioration des systèmes de reconnaissance biométrique à base des empreintes digitales

**Résumé :** Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de la reconnaissance biométrique en se focalisant sur le processus d'appariement des empreintes digitales. Nous nous intéressons particulièrement aux méthodes basées sur les structures triangulaires des minuties, appelées les m-triplets. En effet, nous exploitons l'information locale issue des images en niveaux de gris des deux empreintes à comparer pour valider les vraies paires des m-triplets et rejeter celles ayant été faussement appariées à base des caractéristiques géométriques des minuties. Dans un premier temps, nous décrivons l'état de l'art concernant les méthodes de vérification des empreintes digitales en se penchant sur celles basées sur les structures triangulaires des minuties. Ensuite, nous présentons deux contributions concernant la combinaison de l'information locale contenue dans les images en niveau de gris et extraite au voisinage des m-triplets, avec les caractéristiques géométriques de ces m-triplets. Dans la première contribution, nous proposons un processus supplémentaire de mesure de similarité permettant la validation de l'étape d'appariement local. Nous introduisons ce processus de validation juste avant l'étape de consolidation globale. A partir des images en niveaux de gris des deux empreintes à comparer, nous décrivons l'information locale au voisinage de chaque m-triplet par un ensemble de moments orthogonaux quaternaires. Puis, nous procédons à la validation des paires de m-triplets en calculant le degré de similarité entre leurs vecteurs caractéristiques correspondants. Dans la deuxième contribution, nous suggérons une méthode d'appariement purement locale. Le principe est de booster l'étape de mise en correspondance locale des minuties en évitant la phase coûteuse de consolidation globale. En effet, après avoir filtré correctement les paires de m-triplets en fonction de leur similarité locale, nous calculons un score de correspondance tenant compte du nombre des paires des m-triplets validées. Les deux méthodes proposées sont évaluées expérimentalement à la fois en termes de la précision de reconnaissance et du temps de calcul. Les résultats obtenus montrent que les deux méthodes proposées sont plus performantes que les principales techniques existantes.

**Mots clés:** Vérification biométrique, Empreintes digitales, Appariement des minuties, M-triplets, Moments orthogonaux, Algèbre des quaternions.

## **Contributions to the improvement of fingerprint-based biometric recognition systems**

**Abstract :** This thesis work concerns the biometric recognition by focusing on the fingerprint matching process. We are particularly interested in the methods that are based on triangular minutiae structures, namely the m-triplets. Indeed, we exploit the local information from the gray-scale images of the two fingerprints to be compared. The purpose is to validate the true m-triplets pairs while discarding those that were falsely matched by the geometric features of minutiae. We first present an extensive state-of-the-art regarding fingerprint verification particularly the methods based on minutiae triangular structures. Then, we provide our two contributions in which we combine the local information, extracted from the neighborhood of the triplets, in the gray-scale images with the geometric features of these triplets. In the first contribution, we propose a further similarity measure process to validate the local matching step. We introduce this validation process just before the global minutiae matching step. Giving two gray-level images of the fingerprints to be compared, we describe the local neighborhood information of each m-triplet via feature vectors constructed from a set of quaternion orthogonal moments. Then, we proceed to the validation of the m-triplets pairs by computing the degree of similarity between their corresponding feature vectors. In the second contribution, we introduce a fingerprint matching method that is based only on local features. The objective is to boost the local minutiae matching step while avoiding the costly global matching step. Indeed, after having correctly filtered the m-triplets pairs according to their local similarity, we calculate a matching score that takes account of the number of the validated m-triplets pairs. All the proposed methods are experimentally evaluated in terms of recognition accuracy as well as computational time. The obtained results show that the two proposed methods are more efficient than well-known existing techniques.

**Keywords:** Biometric verification, Fingerprints, Minutiae matching, M-triplets, Orthogonal Moments, Quaternion algebra.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>ii</b>
<b>Résumé/Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Table des figures</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xii</b>
<b>Liste des Abréviations</b>	<b>xiii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Systèmes biométriques</b>	<b>6</b>
1.1 Introduction . . . . .	6
1.2 Modalités Biométriques . . . . .	7
1.3 Comparaison des modalités biométriques . . . . .	11
1.4 Systèmes biométriques et modes de fonctionnement . . . . .	13
1.4.1 Structure des systèmes de reconnaissance biométrique . . . . .	13
1.4.2 Processus des systèmes biométriques . . . . .	15
1.5 Applications des systèmes biométriques . . . . .	16
1.6 Performance des systèmes biométriques . . . . .	17
1.7 Conclusion . . . . .	19
<b>2 Etat de l'art sur l'appariement des empreintes digitales</b>	<b>21</b>
2.1 Introduction . . . . .	21
2.2 Acquisition des empreintes digitales . . . . .	22
2.2.1 Capteurs avec contact . . . . .	22
2.2.2 Capteurs sans contact . . . . .	23
2.3 Représentation des empreintes digitales . . . . .	23
2.4 Extraction des caractéristiques . . . . .	26
2.4.1 Extraction de minuties dans l'image binaire . . . . .	26
2.4.2 Extraction de minuties dans l'image en niveau de gris . . . . .	29
2.5 Filtrage des minuties . . . . .	29
2.5.1 Post-traitement structurel . . . . .	29
2.5.2 Filtrage des minuties dans l'image en niveau de gris . . . . .	30
2.6 Normes d'encodage des minuties . . . . .	31
2.7 Appariement des empreintes digitales . . . . .	31
2.7.1 Corrélation . . . . .	32
2.7.2 Singularités de ligne d'empreintes digitales . . . . .	34
2.7.3 Minuties . . . . .	35

2.8	Conclusion . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Amélioration de l'appariement des minuties par des descripteurs à base des moments orthogonaux quaternaires</b>	<b>48</b>
3.1	Introduction . . . . .	48
3.2	Vue d'ensemble de l'algorithme M3gl . . . . .	49
3.3	Limitations de l'algorithme d'appariement et solution proposée . . . . .	53
3.4	Préliminaire . . . . .	55
3.4.1	Algèbre des quaternions . . . . .	55
3.4.2	Moments orthogonaux . . . . .	56
3.4.2.1	Moments de Zernike . . . . .	57
3.4.2.2	Moments de Bessel-Fourier . . . . .	57
3.4.2.3	Moments Disque-Harmoniques . . . . .	58
3.5	Méthode proposée . . . . .	59
3.5.1	Extraction du voisinage d'un triplet de minuties . . . . .	63
3.5.2	Caractérisation des m-triplets par les moments quaternioniques orthogonaux . . . . .	64
3.5.3	Validation des paires de m-triplets . . . . .	67
3.6	Résultats expérimentaux . . . . .	67
3.6.1	Bases de tests . . . . .	68
3.6.2	Mesures de performance . . . . .	68
3.6.3	Variantes proposées . . . . .	69
3.6.4	Choix des paramètres . . . . .	69
3.6.5	Evaluation des performances . . . . .	69
3.7	Conclusion . . . . .	74
<b>4</b>	<b>Méthode d'appariement local des m-triplets sans consolidation globale</b>	<b>77</b>
4.1	Introduction . . . . .	77
4.2	Vue d'ensemble des algorithmes d'appariement basés m-triplets . . . . .	78
4.2.1	Algorithme PN . . . . .	78
4.2.2	Architecture générale des algorithmes étudiés . . . . .	80
4.2.3	Limitations des algorithmes de base . . . . .	81
4.3	Méthode Proposée . . . . .	83
4.3.1	Algorithme d'appariement local proposé . . . . .	83
4.3.2	Filtrage des paires de m-triplets . . . . .	86
4.4	Résultats expérimentaux . . . . .	86
4.4.1	Bases de tests . . . . .	87
4.4.2	Variantes proposées . . . . .	88
4.4.3	Choix des paramètres . . . . .	88
4.4.4	Mesures de performances . . . . .	88
4.4.5	Impact des caractéristiques géométriques des m-triplets . . . . .	89
4.4.6	Effet du type des moments quaternaires . . . . .	89
4.4.7	Comparaison des performances . . . . .	97
4.4.8	Temps de calcul . . . . .	99
4.5	Conclusion . . . . .	102
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>103</b>

**Publications de l'Auteur**

**105**

**Références bibliographiques**

**106**

# Table des figures

1	Liste des minuties faussement appariées par les algorithmes de l'état de l'art : (a) M3gl, (b) PN et (c) MCC. . . . .	4
1.1	Exemples des modalités biométriques . . . . .	7
1.2	Analyse Zephyr : comparaison de différentes modalités selon quatre critères principaux : l'intrusivité, le pouvoir discriminant, le coût et l'effort. . . . .	13
1.3	Parts du marché des différentes modalités biométriques selon CH, 2017 . . . . .	14
1.4	Architecture générique d'un système de reconnaissance biométrique . . . . .	15
1.5	Processus d'enrôlement d'un système biométrique . . . . .	15
1.6	Processus de vérification d'un système biométrique . . . . .	16
1.7	Processus d'identification d'un système biométrique . . . . .	17
1.8	Illustration du taux des faux rejets FRR et du taux des fausses acceptations FAR	18
2.1	Zone de singularités (boîtes blanches) et core (cercles) tiré de MALTONI et al., 2009 . . . . .	24
2.2	Classes de Henry, présentées de gauche à droite : arche, arche penchée (tenté arch), boucle à gauche, boucle à droite, spires, spires imbriquées. . . . .	24
2.3	Types de minuties : (1) Terminaison, (2) Bifurcation simple, (3) Bifurcation double, (4) Bifurcation triple I, (5) Bifurcation triple II, (6) Bifurcation triple III, (7) Crochet, (8) Boucle simple, (9) Boucle double, (10) Pont simple, (11) Pont jumeaux, (12) Intervalle, (13) Point isolé, (14) Traversée, (15) Croisement, (16) Tête bêche. . . . .	25
2.4	Pores de sudation (cercles) sur une crête. . . . .	26
2.5	Extraction des minuties par Binarisation selon RAVI et al., 2010 . . . . .	28
2.6	Variations intra-classe d'une même empreinte digitale, (a) le doigt est incliné à gauche sur le capteur d'empreinte, (b) le doigt est incliné à droite, (c) le doigt est plus pressé, (d) le doigt est légèrement pressé, (e) une partie du doigt n'est pas apposée sur le capteur d'empreinte, (f) le doigt est correctement apposé sur le capteur d'empreinte, (g) le doigt est sale, (h) le doigt est propre (JAIN et MALTONI, 2003) . . . . .	32
2.7	Cartes de champs d'orientation, à gauche : le filtre h1, détecte la symétrie de type "core", à droite : le filtre h2, détecte la symétrie de type "delta" tiré de NILSSON et BIGUN, 2003. . . . .	33
2.8	Décomposition en ondelettes 2D d'une image d'empreinte digitale tiré de JIN et al., 2004. . . . .	34
2.9	Processus de FMD local tiré de OUYANG et al., 2006, (a) échantillon polaire sur le bloc d'image d'empreinte digitale, (b) échantillon polaire local de (a), (c) FMD de (a). . . . .	34
2.10	Diagramme du système de vérification à base du FingerCode tiré de JAIN et al., 2000. . . . .	35

2.11	Exemple d'application d'une transformation à une minutie tiré de RATHA et al., 1996. . . . .	37
2.12	Exemple des résultats de chaque étape du calcul de la carte de densité tiré de DINGRUI et JIE, 2006; (a) empreinte digitale originale; (b) région effective enregistrée en utilisant un code de chaîne à 16 points; (c) champ d'orientation; (d) image d'empreinte digitale améliorée; (e) carte de densité grossière et (f) carte de densité modélisée. En (e) et (f), les valeurs de niveau de gris normalisées sont utilisées pour indiquer la distance de crête. . . . .	37
2.13	Exemple d'alignement des minuties tiré de ZHU et al., 2005; (a) ensemble des minuties modèles; (b) ensemble des minuties requêtes; (c) alignement basé sur la paire de minuties ( $a, a'$ ), et deux paires de minuties en correspondances sont trouvées; (d) alignement basé sur deux paires de minuties ( $a, a'$ ) et ( $b, b'$ ), et trois paires de minuties en correspondances sont trouvées. . . . .	38
2.14	Processus de construction des clusters des points caractéristiques dans une image d'empreinte digitale tiré de FAN et al., 2000. . . . .	38
2.15	Structure locale formée d'une minutie et ses deux plus proches voisines tirée de JIANG et YAU, 2000. . . . .	39
2.16	Structures K-plet, à gauche : illustration de K-plets définie dans une empreinte digitale, à droite : système de coordonnées locales de K-plet, CHIKKERUR et al., 2005. . . . .	40
2.17	Représentation d'une empreinte digitale à l'aide de la triangulation de Delaunay des minuties tirée de DENG et HUO, 2005. . . . .	40
2.18	Représentation graphique de la structure cylindrique locale associée à une minutie tiré de CAPPELLI et al., 2010 : (a) cylindre avec le cuboïde englobant, (b) discrétisation du cuboïde en cellules (c) de taille $\Delta S \times \Delta S \times \Delta D$ : seules les cellules dont le centre est dans le cylindre sont montrées. Le cuboïde est tourné de sorte que (d) l'axe $i$ est aligné avec (e) la direction de la minutie correspondante. . . . .	42
2.19	Triplet de minuties sur l'image amincie d'une empreinte digitale tiré de GERMAIN et al., 1997. . . . .	42
2.20	Schéma général utilisé pour le calcul des caractéristiques à partir d'une représentation par la triangulation de Delaunay de l'ensemble des minuties d'une empreinte digitale, tiré de VIBERT et al., 2016. . . . .	43
2.21	Structure triangulaire locale des minuties tirée de CHEN et al., 2006. . . . .	44
2.22	Méthode de corrélation pour l'évaluation de la qualité des minuties tirée de CHEN et al., 2007. . . . .	45
2.23	Coordonnées du système à base des crêtes tirées de CHOI et al., 2011. . . . .	46
3.1	Composantes de la représentation m-triplets tirées de MEDINA-PÉREZ et al., 2012 . . . . .	50
3.2	Schéma récapitulatif des étapes de l'algorithme de base M3gl. . . . .	51
3.3	Résultats des paires de minuties retenues dans une comparaison de deux empreintes de personnes différentes en utilisant l'algorithme M3gl. . . . .	54
3.4	Passage des systèmes de coordonnées adopté par ENNAHNAHI et al., 2010. . . . .	59
3.5	Schéma récapitulatif des étapes de l'algorithme proposé. . . . .	60
3.6	Schéma détaillé de la méthode d'appariement proposée par intégration d'un processus de validation dans l'algorithme de base M3gl. . . . .	62
3.7	Extraction des caractéristiques de l'image niveaux de gris. . . . .	64

3.8	Echantillons des empreintes digitales tirés des quatre parties de la base de données FVC2004 : (a) DB1,(b) DB2,(c) DB3 et (d) DB4. . . . .	68
3.9	Courbes ROC comparant les performances de la méthode proposée en utilisant QDHM pour différents seuils dans DB1_B de FVC2002. . . . .	70
3.10	Comparaison des performances de la méthode proposée à base des moments QDHM avec l'algorithme de base M3gl dans DB1_A de la base de test FVC2002. . . . .	71
3.11	Courbes DET comparant les performances des méthodes proposées dans DB1_A (a), DB2_A (b), DB3_A (c), DB4_A (d) de la base de données FVC2004. . . . .	72
3.12	Marquage des emplacements des paires de minuties appariées dans une comparaison de deux empreintes de personnes différentes ; $n$ est le nombre de minuties appariées. . . . .	75
3.13	Résultats des paires de minuties correspondantes entre deux impressions d'une même empreinte ; $n$ est le nombre de minuties appariées. . . . .	76
4.1	Caractéristiques géométriques extraites d'une paire de minuties, connectées par un triangle tirées de PARZIALE et NIEL, 2004. . . . .	79
4.2	Schéma général commun des méthodes basiques M3gl et PN. . . . .	81
4.3	Marquage des emplacements des paires de minuties appariées ( $n$ ) dans une comparaison de deux empreintes de personnes différentes par les algorithmes de l'état de l'art : (a) M3gl, (b) PN, (c) JY, (d) MCC. . . . .	82
4.4	Schéma de la méthode d'appariement local proposée. . . . .	84
4.5	Schéma détaillant l'étape de validation proposée. . . . .	87
4.6	Courbes DET illustrant l'impact du choix des caractéristiques géométriques des m-triplets en fixant les descripteurs de validation aux moments QDHM sur (a) DB1_A, (b) DB2_A, (c) DB3_A et (d) DB4_A de la base FVC2004. . . . .	90
4.7	Courbes DET illustrant l'impact du choix des caractéristiques géométriques des m-triplets en fixant les descripteurs de validation aux moments QZM sur (a) DB1_A, (b) DB2_A, (c) DB3_A et (d) DB4_A de la base FVC2004. . . . .	91
4.8	Marquage des emplacements des minuties appariées dans une comparaison imposteur de la première impression de l'empreinte "44-1" contre la première impression de l'empreinte "63-1" de la base DB1_A de FVC2004 après l'application de différentes méthodes d'appariement : (a) M3gl, (b) PN, (c) JY, (d) MCC, (e) MQD, (f) MQZ, (j) PQD, et (h) PQZ. . . . .	92
4.9	Marquage des emplacements des minuties appariées dans une comparaison authentique de l'impression "77-5" et l'impression "77-8" de la même empreinte "77" par différentes méthodes d'appariement : (a) M3gl, (b) PN, (c) JY, (d) MCC, (e) MQD, (f) MQZ, (j) PQD, et (h) PQZ. . . . .	93
4.10	Taux moyen de paires de triplets qui sont éliminées à l'issue du processus de validation. Cette étude porte sur les quatre ensembles de données : (a) DB1_A, (b) DB2_A, (c) DB3_A, et (d) DB4_A de FVC2004. . . . .	96
4.11	Taux moyen de paires de minuties qui sont éliminées à l'issue du processus de validation. Cette étude porte sur les quatre ensembles de données : (a) DB1_A, (b) DB2_A, (c) DB3_A, et (d) DB4_A de FVC2004. . . . .	97
4.12	Courbes DET présentant les performances de l'intégration de l'étape de validation des m-triplets dans le processus d'appariement en utilisant la variante de notre algorithme basée sur les caractéristiques géométriques de l'algorithme M3gl dans DB1A (a), DB2A (b), DB3A (c) et DB4A (d) de FVC2004. . . . .	98

---

4.13	Courbes DET présentant les performances de l'intégration de l'étape validation des m-triplets dans le processus d'appariement en utilisant l'algorithme PN dans DB1A (a), DB2A (b), DB3A (c) et DB4A (d) de FVC2004. . . . .	99
4.14	Courbes DET comparant les performances en termes de précision des méthodes : M3gl, PN, MCC, MQZ et PQZ. Chaque sous-figure concerne un ensemble de données de FVC2004 : (a) DB1_A, (b) DB2_A, (c) DB3_A, et (d) DB4_A. . . . .	100

# Liste des tableaux

1.1	Tableau comparatif des différentes techniques biométriques en fonction de divers critères. H, M, B désignent respectivement Haut, Moyen, Bas (TATEPAMULWAR et PAWAR, 2014) . . . . .	12
2.1	Nombre de connexion et type des minuties tiré de RAVI et al., 2010 . . . . .	27
3.1	Polynômes radiaux $\phi_{n,m}(r)$ nécessaires au calcul de certains moments orthogonaux. . . . .	66
3.2	Quantification de la phase $\phi_{n,m}$ des moments quaternaires sur deux bits. . . . .	67
3.3	Périphériques / technologies utilisés pour la collecte de la base de données FVC2004 tiré de MAIO et al., 2004 . . . . .	68
3.4	Seuils des distances de validation pour les différentes variantes de la méthode proposée. . . . .	70
3.5	Comparaison des indicateurs de performances des variantes proposées . . . . .	73
4.1	Distances de validation pour les quatre variantes de notre méthode proposée. . . . .	88
4.2	Moyenne des triplets appariés en utilisant : PN, M3gl, PQD, PQZ, MQD, MQZ en utilisant les seuils de distances (20, 40, 60, 80). . . . .	94
4.3	Moyenne des minuties appariées en utilisant : PN, M3gl, PQD, PQZ, MQD, MQZ en utilisant les seuils de distances (20, 40, 60, 80). . . . .	95
4.4	Indicateurs de performance, EER, FMR100 et FMR1000, des algorithmes comparés sur les quatre ensembles de données FVC2004. . . . .	101
4.5	Temps d'appariement moyen par rapport à tous les ensembles de données de test exprimés en (ms). . . . .	101

# Liste des Abréviations

<b>ADN</b>	<b>Acide Désoxyribose Nucléique</b>
<b>AFIS</b>	<b>Automated Fingerprint Identification System</b>
<b>BFM</b>	<b>Bessel Fourier Moments</b>
<b>CN</b>	<b>Crossing Number</b>
<b>CTM</b>	<b>Complex Type Moments</b>
<b>DET</b>	<b>Detection Error Tradeoff</b>
<b>DHMs</b>	<b>Disc-Harmonic Moments</b>
<b>ED</b>	<b>Euclidian Distance</b>
<b>EER</b>	<b>Equal Error Rate</b>
<b>FAR</b>	<b>False Acceptation Rate</b>
<b>FFM</b>	<b>Fuzzy Feature Match</b>
<b>FMD</b>	<b>Fourier-Mellin Descriptor</b>
<b>FMR</b>	<b>False Match Rate</b>
<b>FNMR</b>	<b>False Non-Match Rate</b>
<b>FRR</b>	<b>False Rejection Rate</b>
<b>FVC2004</b>	<b>Fingerprint Verification Competition 2004.</b>
<b>GA</b>	<b>Genetic Algorithm</b>
<b>IBG</b>	<b>International Biometric Group</b>
<b>MCC</b>	<b>Minutiae Cylinder Code</b>
<b>MRM</b>	<b>Multiple Reference Minutiae</b>
<b>PIN</b>	<b>Personal Identification Number</b>
<b>PZM</b>	<b>Pseudo-Zernike Moments</b>
<b>QBFM</b>	<b>Quaternion Bessel-Fourier Moments</b>
<b>QDHM</b>	<b>Quaternion Disc-Harmonic Moments</b>
<b>QM</b>	<b>Quaternary Moments</b>
<b>QZM</b>	<b>Quaternion Zernike Moments</b>
<b>ROC</b>	<b>Receiver Operating Characteristic</b>
<b>ROI</b>	<b>Region Of Interest</b>
<b>SHT</b>	<b>Spherical Harmonic Transform</b>
<b>SVM</b>	<b>Support Vector Machine</b>
<b>Th</b>	<b>Threshold</b>
<b>ZMs</b>	<b>Zernike Moments</b>

# Introduction générale

La reconnaissance biométrique est un champ de recherche très actif et même incontournable dans de nombreuses applications où l'authentification personnelle fiable s'impose comme besoin sécuritaire prioritaire. Une transaction financière en ligne, un paiement simple dans un magasin ou un accès aux réseaux informatiques sont des exemples où la vérification de l'identité d'une personne est essentielle. En effet, le besoin en sécurité et la lutte contre les fraudes dans différents domaines allant des plus emblématiques comme le passage dans les postes frontaliers internationaux au moins ardu comme l'accès sécurisé aux informations personnelles deviennent de plus en plus importants. Il existe traditionnellement deux manières d'identifier un individu. La technique la plus fréquemment utilisée est basée sur la connaissance. Cela correspond à des informations privées, des mots de passe ou des codes PIN. Bien que cette technique soit assez simple, elle a ses propres lacunes. Des mots de passe plus longs et plus complexes offrent plus de sécurité. Cependant, les gens ont tendance à choisir des mots de passe courts et simples, car il leur sera plus facile de s'en souvenir. Cela met la sécurité en péril puisque ces mots de passe sont plus faciles à deviner ou à déchiffrer. Les mots de passe complexes sont plus difficiles à retenir et peuvent être facilement oubliés. Une autre technique couramment utilisée est basée sur la possession des cartes, des jetons ou des clés. L'inconvénient est que les possessions peuvent être volées, corrompues ou dupliquées. Une alternative plus prometteuse aux deux précédents modes d'identification est la biométrie. Elle est définie comme une technologie permettant d'identifier ou authentifier une personne sur la base de ses traits physiologiques, morphologiques ou comportementaux (KIM, 1995) telles que les empreintes digitales, l'iris, la démarche, etc. La biométrie offre des moyens d'authentification fiables qui peuvent résoudre ces problèmes de vol, d'oubli, ou de duplication et qui sont de plus en plus acceptés par les gens. En fait, l'usage de la biométrie n'est pas vraiment récent, l'utilisation des caractères anthropométriques comme le visage, la voix et la démarche pour reconnaître les individus est le moyen le plus naturel chez les êtres humains. L'utilisation des empreintes digitales remonte au 19<sup>ème</sup> siècle où ces caractéristiques ont été employées dans les enquêtes criminelles. Dans les systèmes de reconnaissance automatiques actuels, l'empreinte digitale est l'une des modalités les plus puissantes et de coût abordable. Cette modalité d'empreinte est unique et immuable. Elle est formée des lignes de crêtes et de vallées localement discontinues. Cette discontinuité entraîne l'apparition de points caractéristiques appelés *minuties* qui sont représentées par leur position et leur orientation.

Une étape critique dans le processus d'identification par empreinte digitale consiste en la comparaison correcte des caractéristiques extraites indiquant la confirmation ou l'infirmité de la correspondance des deux empreintes appariées. Diverses approches ont été proposées pour la reconnaissance des personnes par les empreintes digitales. Parmi ces approches, nous citons celle basée sur la corrélation d'images (LINDOSO et al., 2007 ; BAZEN et al., 2000). Cette technique évalue le degré de corrélation entre les pixels dans deux images d'empreintes digitales après avoir effectué l'alignement et le pré-traitement. Les algorithmes basés sur cette approche sont assez faciles à réaliser mais leurs résultats sont sensibles aux transformations géométriques comme la rotation, le déplacement, etc. Une autre approche se base sur la texture des empreintes

digitales en considérant les relations spatiales des rides (orientation, texture, forme des rides, etc.). Bien que ces caractéristiques puissent être facilement extraites, leur pouvoir discriminatoire est faible. La troisième approche s'appuie sur les minuties. Elle est employée par la plupart des systèmes de reconnaissance des empreintes digitales. Cela est dû à l'aspect fin et unique de ces points de singularité qui représentent des caractéristiques fiables et discriminantes. L'appariement des minuties contenues dans deux empreintes consiste à trouver l'alignement qui maximise le nombre de paires de minuties mises en correspondance. Les méthodes d'appariement des minuties peuvent être classifiées en deux grandes familles :

- L'appariement global des minuties : les algorithmes de ce type abordent le processus d'alignement en prenant en considération toutes les minuties de manière globale. Puisque les composants à aligner sont, en nombre de trois au minimum, (deux directions et un angle), ces algorithmes ont une complexité élevée et procèdent à une étape de pré-alignement qui est basée sur d'autres caractéristiques extraites comme les points singuliers ou les cartes d'orientation. Nous citons à titre d'exemples, l'appariement global avec corrélation d'images (DINGRUI et JIE, 2006), celui basé sur les clusters de minuties (ZHU et al., 2005 ; FAN et al., 2000) et l'appariement par les algorithmes évolutionnaires (TAN et BHANU, 2006 ; SHENG et al., 2009 ; SHENG et al., 2007).
- L'appariement local des minuties : il consiste à comparer deux empreintes suivant des structures locales de minuties. Ces structures sont formées en considérant différentes relations basées sur la proximité entre les minuties voisines. Ces méthodes sont caractérisées par des propriétés d'invariance aux transformations globales. Ainsi, elles ne prennent pas en considération les relations globales et permettent l'appariement partiel. Les méthodes de cette approche peuvent être regroupées en deux grandes catégories :
  - Les méthodes à base de structures centrées sur une minutie : nous citons à titre d'exemple les structures par les plus proches voisins. Ce concept a été introduit par JIANG et YAU, 2000 qui ont défini une structure formée par une minutie centrale et ses deux plus proches voisins et décrite par les distances entre ces minuties. D'autres travaux ont proposé d'étendre le descripteur aux K-plus proches voisins (CHIKKERUR et al., 2005 et DENG et HUO, 2005). Les structures à rayon fixe s'inscrivent également dans la même famille de descripteurs basés sur les structures centrées sur une minutie. Les descripteurs à rayon fixe ont été introduits dans RATHA et al., 2000. Il s'agit de construire un graphe orienté de minuties, où chaque minutie se voit dotée d'un ensemble d'arêtes vers ses voisins dans un rayon fixe. Une autre structure à rayon fixe a été proposée par CAPPELLI et al., 2010, appelé le Minutiae Cylinder Code (MCC).
  - Les méthodes à base de structures non centrées : il s'agit des structures locales appelées les triplets de minuties ou aussi les *m-triplets* (GERMAIN et al., 1997). Ces structures peuvent être construites par triangulation et s'appuient sur des informations concernant les angles aux sommets, les longueurs des côtés et d'autres propriétés triangulaires telles que la direction et l'orientation. Plusieurs chercheurs ont abordé ce concept de structure triangulaire, nous citons à titre d'exemple les travaux de PARZIALE et NIEL, 2004 ; MEDINA-PÉREZ et al., 2012 ; YILONG YIN, 2005 ; CHEN et al., 2006 ; YANG et al., 2012. Les principales différences entre ces variantes résident dans le type de triangulation choisi et les caractéristiques géométriques utilisées pour caractériser les m-triplets.

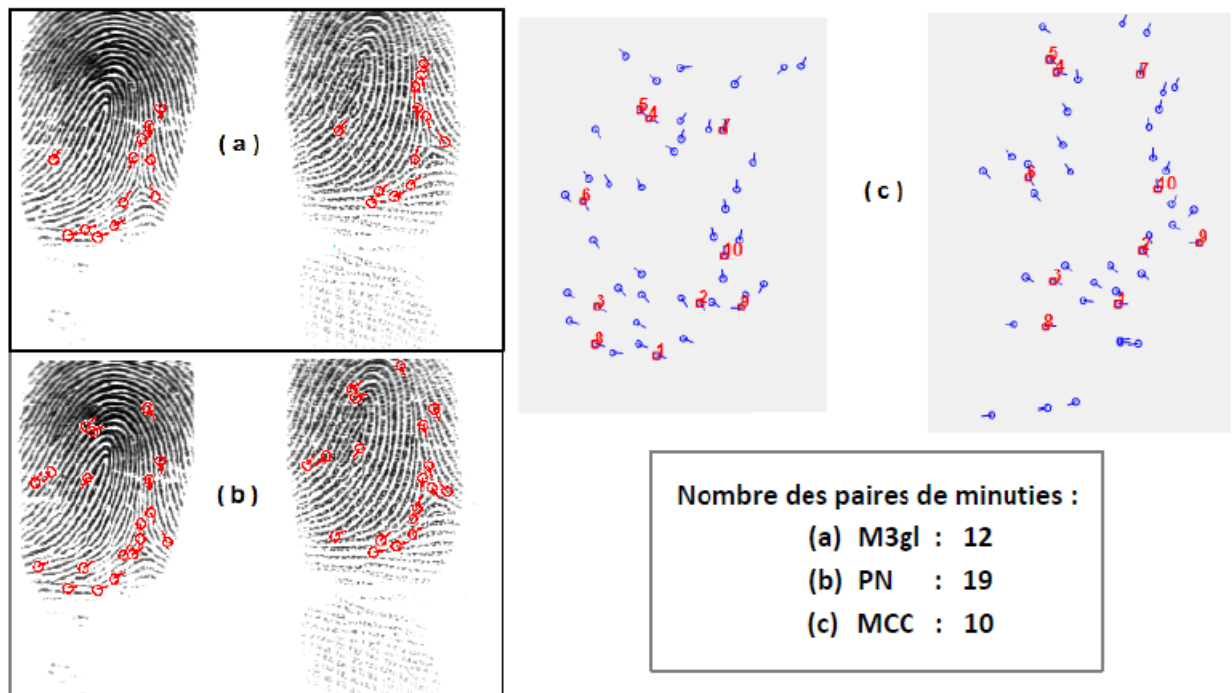
Les avantages de l'appariement local des minuties sont la simplicité, la faible complexité calculatoire et la tolérance des distorsions. Par contre, les techniques globales ont l'avantage de

manifester un fort pouvoir distinctif. D'autres méthodes adoptent une stratégie hybride permettant d'obtenir tous ces avantages. Ces méthodes effectuent, en deux étapes, un appariement local des minuties suivi d'une consolidation globale. La première étape détermine les paires de minuties qui correspondent localement et extrait un sous-ensemble d'alignements candidats pour les empreintes modèle (T) et requête (R). La seconde étape consiste à vérifier le degré avec lequel les correspondances locales contribuent à l'appariement global. Récemment, la plupart des méthodes d'appariement des minuties d'empreintes digitales conçues pour être mises en œuvre dans des systèmes temps réel ont abandonné l'idée d'une correspondance globale en faveur de l'approche locale. C'est dans cette optique que s'inscrivent nos contributions.

Bien que les systèmes basés sur les minuties puissent aboutir à des améliorations considérables en termes de fiabilité et de précision, ils ne constituent pas toujours la meilleure solution en termes de robustesse lorsque le nombre des minuties contenues dans les images d'empreintes digitales est insuffisant ou lorsque la qualité des images est mauvaise. Cet inconvénient s'explique par la perte d'information (empreinte partielle) et la présence du bruit qui est dû à plusieurs facteurs tels que l'état de la peau, le dispositif d'acquisition, la pression du doigt, etc. De plus, étant données deux impressions de la même empreinte (même doigt), elles ne sont jamais strictement identiques.

La Figure 1 illustre un exemple de trois méthodes d'appariement de minuties qui fournissent un score élevé, même s'il s'agit d'un cas imposteur. Les deux premières méthodes sont basées sur des structures non centrées établies par PARZIALE et NIEL, 2004 (PN) et MEDINA-PÉREZ et al., 2012 (M3gl) et la troisième étant basée sur une structure de minuties centrée de CAPPELLI et al., 2010 (MCC). Bien que les deux empreintes digitales gauche et droite proviennent de deux doigts différents, les trois algorithmes d'appariement de minuties (M3gl, PN, MCC) font correspondre faussement un nombre assez important de minuties. D'une manière générale, les méthodes d'appariement basées sur les minuties sont fortement influencées par le processus d'extraction des minuties. Souvent, lorsqu'une image d'empreinte digitale de mauvaise qualité est présentée au système, celui-ci peut extraire un nombre plus ou moins important de fausses minuties et seulement un nombre réduit de minuties authentiques. Bien évidemment, cet inconvénient affecte négativement le résultat de l'appariement.

Pour pallier ces inconvénients, de nombreux travaux ont porté sur l'implication de la qualité des minuties dans les mesures de similitude des minuties. Nous citons les travaux de WEN et al., 2013; CHEN et al., 2007; ZHENG et al., 2008. Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont proposé des stratégies de correspondance en fusionnant plusieurs caractéristiques, nous citons à titre d'exemple les travaux de JAIN et al., 2007; CHOI et al., 2011; WEN et al., 2013. Les caractéristiques supplémentaires utilisées sont principalement la fréquence des crêtes, les points de singularités nommés *cores* et *deltas*, et les descripteurs *FingerCode* calculés à base des filtres de Gabor appliqués sur les cartes d'orientations locales. Dans ce contexte, nous nous intéressons aux méthodes d'appariement des empreintes digitales basées sur les minuties. Nous visons à réduire les taux d'erreur qui résultent à la fois des fausses acceptations (FMR) et des faux rejets (FNMR) (ALONSO-FERNANDEZ et al., 2009). Nous nous penchons particulièrement sur les méthodes basées sur les triplets de minuties. Les principales contributions de ce travail de thèse résident dans la proposition et le développement de nouvelles méthodes en intégrant des informations locales additionnelles dans le processus d'appariement basé sur des structures triangulaires de minuties. L'intégration de cette information locale permet de tenir compte de la mauvaise qualité des impressions, la présence des distorsions non-linéaires ainsi que de l'insuffisance des données exploitées pour accomplir la mise en correspondance. Dans cette optique, les caractéristiques proposées se sont basées sur des moments orthogonaux



**FIGURE 1** Liste des minuties faussement appariées par les algorithmes de l'état de l'art : (a) M3gl, (b) PN et (c) MCC.

quaternioniques (QM) qui ont été proposés par notre équipe de recherche ENNAHNAHI et al., 2010 et DAD et al., 2014. Les moments orthogonaux quaternioniques assurent un pouvoir discriminatoire remarquable dans plusieurs applications sur les images couleur (CHEN et al., 2012; GUO et ZHU, 2011; GUO et al., 2014). Pour améliorer les méthodes d'appariement basées sur les structures m-triplets, nous intégrons une mesure locale de similarité supplémentaire permettant la validation des paires de m-triplets issus de l'étape d'appariement local. Nous avons exploité les moments orthogonaux quaternaires pour décrire de manière holistique l'information de voisinage des trois minuties qui forment un m-triplet.

## Contributions

Ce travail de thèse apporte deux contributions concernant la combinaison de l'information locale de l'image de niveau de gris au voisinage des m-triplets avec les caractéristiques géométriques de ces derniers. Dans la première, nous proposons un processus supplémentaire de mesure de similarité permettant la validation de l'étape d'appariement local basé sur les triplets de minuties. Ce processus de validation est introduit juste avant l'étape de consolidation globale en décrivant l'information locale au voisinage de deux m-triplets par un ensemble de moments orthogonaux quaternaires. Ensuite, la validation d'une paire de m-triplets est effectuée en calculant le degré de similarité entre leurs vecteurs caractéristiques correspondants. Dans la deuxième contribution, nous suggérons une méthode d'appariement purement local. Elle se base sur la mise en correspondance locale des minuties en évitant la phase coûteuse de consolidation globale. Après avoir filtré correctement les paires de m-triplets en fonction de leur similarité locale, un score de correspondance est calculé en tenant compte du nombre des paires des m-triplets.

# Organisation du mémoire

Nous avons structuré ce rapport de thèse autour de quatre chapitres en plus d'une introduction générale, d'une conclusion et des perspectives.

**L'introduction générale** souligne l'importance de l'authentification biométrique à base des empreintes digitales. Ensuite, elle décrit la motivation et les objectifs de ce travail de thèse.

**Le chapitre 1** est consacré à la présentation générale de la biométrie, le fonctionnement d'un système biométrique, les différentes modalités biométriques, la comparaison de leurs performances et les méthodes d'évaluation d'un système biométrique.

**Le chapitre 2** présente une synthèse sur les principales méthodes d'appariement des empreintes digitales en se penchant sur celles basées sur les structures triangulaires de minuties.

**Le chapitre 3** est dédié à la première contribution qui consiste à améliorer le processus d'appariement basé sur les structures triangulaires des minuties en intégrant des informations locales supplémentaires sous forme de caractéristiques des triplets de minuties. Nous détaillons la construction du nouveau descripteur basé sur les moments quaternaires orthogonaux et nous exposons l'algorithme de validation proposé. Ensuite, les résultats expérimentaux obtenus en utilisant les deux bases standards FVC2002 et FVC2004 sont présentés et analysés.

**Le chapitre 4** aborde la seconde contribution qui vise à améliorer le temps de calcul des algorithmes proposés pour l'appariement d'empreintes digitales basés sur les m-triplets. L'idée de base consiste à booster le processus de mise en correspondance locale des minuties pour éviter la phase de consolidation globale, généralement complexe et coûteuse. Après avoir rappelé les principales étapes des algorithmes améliorés, la méthode proposée est détaillée. Les expérimentations réalisées sont présentées en fin de chapitre et les résultats obtenus montrent l'intérêt de la méthode proposée.

**La conclusion générale** résume les contributions proposées et fait le point sur les perspectives des futurs travaux de recherche envisagés.

# Chapitre 1

## Systemes biométriques

### 1.1 Introduction

La biométrie est un ensemble de technologies qui exploitent des caractéristiques biométriques humaines uniques à l'individu. L'avantage de ces caractéristiques est qu'elles ne peuvent pas être volées, oubliées ou transmises à une autre personne, à la différence des mots de passe ou des PINs (numéros d'identification personnelle) qui peuvent être facilement oubliés ou exposés à l'utilisation frauduleuse, ou des objets (pièce d'identité, clef, badge, etc.) que l'individu doit porter avec lui et qui sont faciles à être volés, copiés ou perdus.

Le coût, la précision et la facilité d'utilisation sont combinés pour faire de la biométrie une solution réalisable afin de sécuriser l'accès aux ordinateurs et aux réseaux. Mais la biométrie est beaucoup plus qu'une alternative aux mots de passe ou aux codes PIN. Souvent, la technologie biométrique est utilisée dans des applications du secteur public. Nous citons à titre d'exemple les enquêtes criminelles, le maintien de l'ordre, la délivrance de visas et les contrôles frontaliers, la vérification des antécédents pour le recrutement professionnel, la défense et les services de renseignements généraux dans des applications.

Un système biométrique est essentiellement un système de reconnaissance qui identifie ou vérifie une identité prétendue d'un individu. Le succès de la technologie biométrique provient de l'exploitation des caractéristiques humaines soit morphologiques (empreinte digitale, forme de la main, réseau veineux de la rétine, iris de l'œil, voix, traits de visage, etc.), soit des caractéristiques comportementales (frappe sur un clavier d'ordinateur, dynamique du tracé de la signature, etc.), ou des traces biologiques (odeur, salive, urine, sang, ADN, etc.).

Les caractéristiques comportementales et morphologiques sont régulièrement utilisées pour vérifier ou déterminer manuellement l'identité. C'est ce que nous faisons tous les jours quand nous saluons des amis ou vérifions une carte d'identité. L'expertise humaine est envisageable sur des très petites bases de données, mais devient complètement impraticable pour des bases de données de grande taille. Pour accélérer les procédures d'authentification, les technologies biométriques sont désormais automatisées. Les systèmes biométriques sont capables d'effectuer diverses tâches de traitement, de recherche et de comparaison des milliers de données par seconde.

Dans ce chapitre, nous discutons notamment les différentes modalités biométriques existantes, les propriétés d'une information biométrique, le principe de fonctionnement des systèmes biométriques et l'évaluation de leurs performances.

## 1.2 Modalités Biométriques

La biométrie se compose du terme « bio » du grec ancien qui signifie « vie » et du terme « métrie » du grec ancien qui signifie « mesure ». Ainsi, dans son sens premier, la biométrie signifie « mesure du vivant » et fait référence à l'étude scientifique et quantitative du monde vivant et des êtres vivants. Plus simplement, la biométrie est une technique globale visant à établir l'identité d'une personne en mesurant une de ses caractéristiques physiques (Figure 1.1). Elle constitue une solution extrêmement pertinente pour répondre aux besoins de protection des données individuelles. On rencontre d'ailleurs de plus en plus de systèmes biométriques pour des applications de vie courantes. Selon l'application visée, le besoin de sécurité sera plus ou moins important, et les capteurs et les caractéristiques employés ne seront pas forcément les mêmes. En fait, il peut y avoir plusieurs types de caractéristiques physiques, les unes plus fiables que d'autres, mais toutes doivent être infalsifiables et uniques pour pouvoir être représentatives d'un et un seul individu.

Il existe trois grandes familles de modalités biométriques :

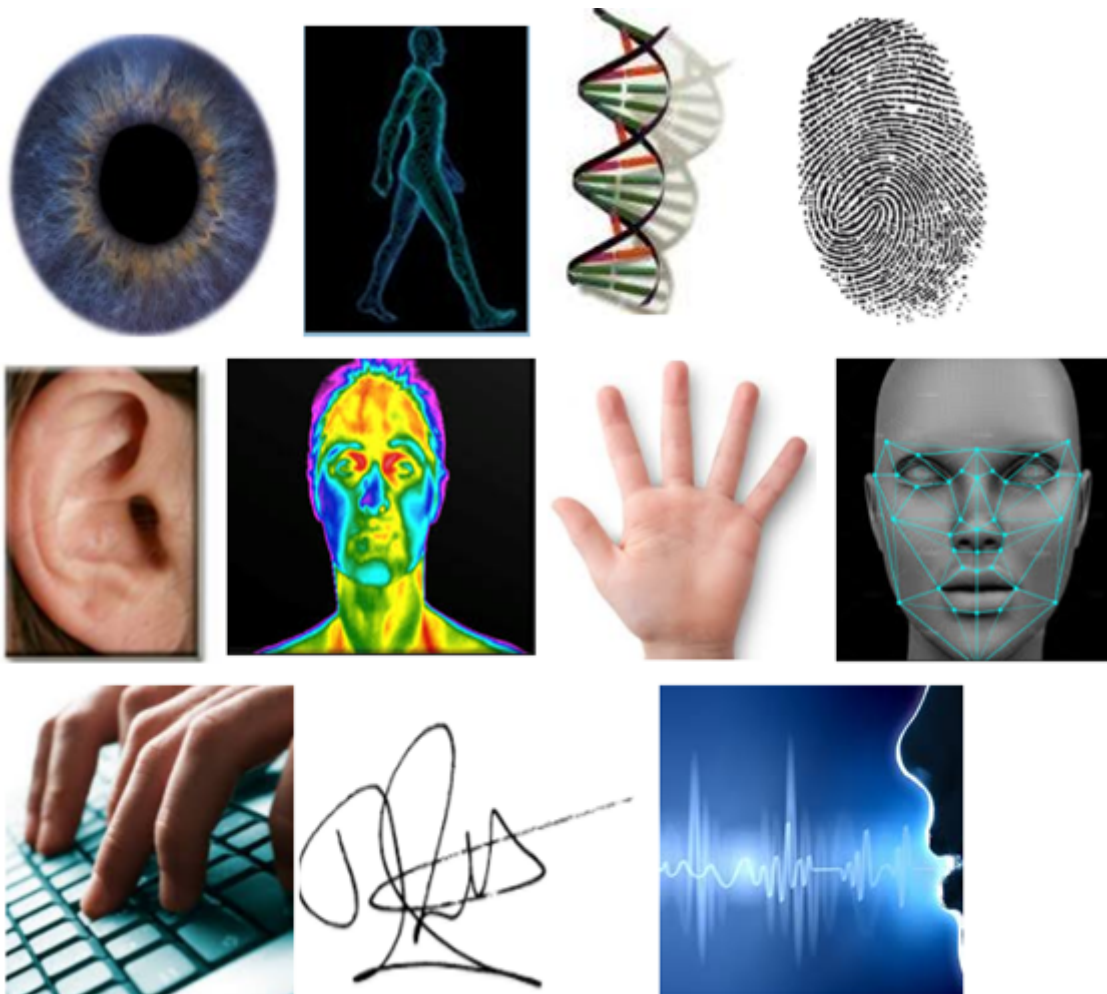


FIGURE 1.1 Exemples des modalités biométriques

- **Caractéristiques physiologiques et biologiques** : ce type de biométrie se fait à l'aide du sang de la personne, son odeur, sa salive, son urine, son ADN, ses cheveux, sa thermographie faciale, etc.

- **L'odeur corporelle** : chaque personne dégage une odeur qui lui est propre. Cette technique est basée sur l'extraction des composantes chimiques liées à l'odeur d'un individu. On peut isoler ces caractéristiques à l'aide d'un capteur spécial doté d'un spectromètre de masse pour ensuite les transformer en données comparatives.
- **L'ADN** : appelé aussi l'empreinte génétique. Présent dans les cellules du corps, il est spécifique d'un individu à un autre et permet de l'identifier à partir d'un simple fragment de peau, d'une trace de sang ou d'une goutte de salive. Il représente la marque biologique la plus sûre du monde. Mais actuellement, une analyse de l'ADN nécessite un délai et un coût très élevé, ce qui restreint son utilisation dans des domaines autres que celui de l'identification judiciaire.
- **La thermographie faciale** : cette technique requiert une caméra infrarouge afin de capturer la chaleur émise par le corps de la personne. Elle prend en considération la localisation des veines, l'épaisseur du squelette, la graisse, les muscles, etc. On peut l'utiliser dans l'obscurité ou dans de mauvaises conditions de visibilité, contrairement à la reconnaissance faciale. Mais les variations de pose, la température corporelle ou l'état émotionnel peuvent conduire à des erreurs.
- **Caractéristiques comportementales** : ce type de biométrie se base sur l'analyse de certains comportements d'une personne comme le tracé de sa signature, la dynamique de frappe sur un clavier, la parole, la démarche.
  - **La dynamique de la frappe au clavier** : les systèmes de reconnaissance à base de la dynamique de frappe au clavier nécessitent uniquement un ordinateur disposant d'un clavier. Cette technologie calcule le temps passer pour effectuer une pression sur une touche et le temps entre les frappes. La séquence de frappe est prédéterminée sous la forme d'un mot de passe. Un gabarit de référence est constitué suite à un mot de passe répété à quelques reprises par l'utilisateur.
  - **La reconnaissance vocale** : les caractéristiques de la voix, telles que le débit, la force, la dynamique et la forme des ondes produites, sont analysées pour identifier une personne. Le locuteur doit lire une série de phrases ou de mots à plusieurs reprises pour constituer la table de référence de sa voix. Un téléphone ou un ordinateur doté d'un microphone peut être utilisé comme dispositif d'acquisition, ce qui rend cette modalité relativement économique et facilement réalisable. Cependant, un individu ne parle pas toujours de la même manière. La voix peut être perturbée par l'état de santé ou émotionnel du locuteur. De plus, la mauvaise qualité de l'enregistrement et la fraude par un échantillon vocal pré-enregistré peuvent fausser les résultats de reconnaissance.
  - **La signature** : les systèmes de reconnaissance de la signature mesurent les caractéristiques spécifiques d'une signature comme la forme, la vitesse, la pression sur le crayon, le mouvement, les points et les intervalles de temps où le crayon est levé. L'utilisateur de cette technologie signe généralement avec un stylo électronique sur une tablette graphique. La signature est utilisée dans beaucoup de pays comme élément juridique ou administratif en considérant uniquement l'image statique de la signature pour la comparaison. Néanmoins, cette modalité est sujette à certaines améliorations qui font introduire le mode dynamique pour une comparaison plus discriminante. Les systèmes biométriques utilisant la signature sont très bien acceptés par les utilisateurs. La limitation de cette technique est due à la dépendance de

l'état physique de la personne à savoir l'instabilité de la vitesse de frappe (peut être très irrégulière chez certaines personnes).

- **La reconnaissance de la démarche** : il s'agit de reconnaître une personne par sa façon de marcher ou de bouger. Les systèmes de reconnaissance de la démarche mesurent différents traits comme le maintien du corps, la distance entre les deux pieds, la position des joints tels que les genoux et les chevilles et les angles de balancement. C'est une modalité d'identification à distance réalisée à partir de l'analyse des séquences d'images. La démarche est notamment appropriée pour les applications de vidéosurveillance. Les performances des systèmes à base de la démarche ne sont pas assez acceptables, car elles sont affectées par le changement de l'environnement.
- **Caractéristiques morphologiques** : ce type de biométrie se base sur l'identification des traits physiques particuliers qui, pour toute personne, sont uniques et permanents. Cette catégorie regroupe la forme du visage, la forme de la main, les empreintes digitales, la rétine et l'iris. Ces caractéristiques sont stables dans la vie d'un individu et ne subissent pas autant les effets de l'état émotionnel de la personne que l'on retrouve comme inconfort majeur dans l'identification comportementale.
  - **Le visage** : l'authentification par le visage est la technique la plus commune et la plus populaire puisqu'elle correspond à ce que nous utilisons naturellement pour reconnaître une personne. Selon le système utilisé, l'individu doit être positionné devant l'appareil ou peut être en mouvement à une certaine distance. Plusieurs parties du visage comme les joues, les yeux, le nez, la bouche sont extraites d'une photo ou d'une vidéo. Les données biométriques extraites sont analysées géométriquement (distances entre différents points, positions, formes). Cette technologie est employée dans des domaines très variés allant du contrôle d'accès physique ou logique à la surveillance ou l'accès aux distributeurs automatiques de billets. Le problème de cette méthode vient des possibles perturbations pouvant transformer le visage (maquillage, faible luminosité, présence d'une barbe ou de lunettes, expression faciale inhabituelle, changement avec l'âge). De plus ces systèmes sont sensibles aux variations d'illumination et de position.
  - **La géométrie de la main** : chaque individu possède sa propre silhouette de la main. Elle est simple à capturer et très bien acceptée par les utilisateurs sauf pour certaines catégories de population pour lesquelles étendre la main est un problème, telles que les personnes âgées ou celles qui ont de l'arthrite. Cette méthode mesure plusieurs caractéristiques de la main comme la forme de la main, la longueur des doigts, leur épaisseur, les formes des articulations et les longueurs inter articulations, etc. Pour cette raison et afin d'obtenir les trois dimensions, une caméra infrarouge prend l'image de la main sous deux angles différents. Plusieurs inconvénients limitent l'utilisation de cette modalité comme la taille et le coût du capteur. De plus, la forme de la main se ressemble fortement pour les personnes de la même famille ce qui augmente le risque des fausses acceptations et change beaucoup avec l'âge ce qui augmente le risque des faux rejets.
  - **L'empreinte digitale** : il s'agit du dessin formé par les lignes de la peau des doigts, des paumes des mains, des orteils ou de la plante des pieds. Ce dessin se forme durant la période fœtale. Les empreintes sont uniques pour chaque individu. Même des vrais jumeaux n'ont jamais des empreintes digitales identiques. La reconnaissance d'empreintes digitales est la technique biométrique la plus ancienne et c'est

l'une des plus matures modalités et des moins coûteuses. Cette technologie est généralement bien acceptée par les usagers. L'image de l'empreinte digitale peut être acquise de deux manières : la plus ancienne en couvrant le bout de doigt d'une fine couche d'encre et en imprimant l'empreinte sur une feuille de papier pour ensuite la numériser, et la deuxième manière d'une façon numérique. Plusieurs catégories de capteurs numériques peuvent être adoptées comme les capteurs optiques, thermiques, capacitifs ou à ultrasons. La performance des systèmes biométriques à base des empreintes digitales se dégrade lors de la présence des doigts détériorés par des blessures temporaires ou permanentes comme dans le cas des personnes âgées ou les travailleurs manuels. Une autre limitation provient de la position du doigt sur le scanner (parfois seule une petite partie de l'empreinte est visible), de son orientation, de son humidité (i.e. sueur) ainsi que de la pression que l'utilisateur exerce sur le capteur et qui résulte une déformation non uniforme de l'empreinte.

- **La rétine** : la reconnaissance de la rétine est une méthode assez ancienne. La détermination des caractéristiques de la rétine consiste à l'extraction de la distribution géographique des vaisseaux sanguins. L'arrangement de ses vaisseaux sanguins sous la surface de la rétine est unique et stable dans le temps. Il ne peut être affecté que par certaines maladies. La reconnaissance de la rétine est actuellement considérée comme une des méthodes biométriques les plus sûres. Lors de l'acquisition de l'image, l'utilisateur place son œil à proximité du capteur où un rayon lumineux de faible intensité illumine le fond de l'œil pour extraire des points repères. Pour cette raison, la rétine est mal acceptée par le grand public à cause de son caractère trop contraignant : Les personnes hésitent en général à approcher un organe aussi sensible que l'œil près du capteur surtout que des risques liés à la santé sont signalés. En outre, Les systèmes d'acquisition de la rétine sont coûteux, ce qui ne rend pas l'utilisation de la rétine autant répondu pour des applications quotidiennes.
- **L'iris** : l'iris est la région annulaire située entre la pupille et le blanc de l'œil. L'iris est un motif très dense et qui n'est pas dicté par les gènes. Les motifs de l'iris se forment au cours des deux premières années de la vie et sont stables. Chaque œil est unique, même les deux iris d'un individu sont différents. Une image de l'iris contient plus de 200 variables indépendantes, ce qui fait une probabilité très faible de confondre 2 individus. La couleur de l'iris peut varier, mais rarement son motif. Pour ces raisons, la reconnaissance biométrique à base de l'iris est considérée comme la modalité la plus précise pour l'identification et l'authentification. Une personne voulant s'identifier place son œil à quelques centimètres du capteur et l'image de l'iris est prise par une caméra. L'éclairage de l'œil doit être uniforme et il faut éviter les reflets. Cette méthode d'identification est relativement désagréable pour l'utilisateur car il doit garder son œil, éclairée par une source lumineuse, grand ouvert pour assurer un contraste correct. L'inconvénient majeur est son coût assez élevé, ce qui limite l'utilisation de cette modalité.
- **Biométrie multimodale** : la multi-modalité est l'utilisation de deux ou plusieurs traits biométriques d'un individu. La combinaison de plusieurs modalités a pour objectif de combler les limitations des systèmes uni-modaux. De plus, le fait d'utiliser plusieurs modalités biométriques réduit le risque d'impossibilité d'enregistrement ainsi que la robustesse aux fraudes (MALTONI et al., 2009).

Le traitement des différentes modalités peut se faire simultanément (architecture parallèle) ou successivement (architecture série). L'architecture de système biométrique multimodal dépend essentiellement de la manière du traitement des données, car l'acquisition est souvent séquentielle. En fait il n'existe pas des capteurs capables de recevoir simultanément des traits biométriques de différentes modalités, à l'exception de quelques capteurs d'empreintes multi-doigts ou palmaires. Et même l'architecture de traitement est liée à la décision. Si la décision est prise après le traitement de toutes les modalités biométriques, on parle alors d'une fusion en parallèle. Mais s'il est nécessaire d'évaluer un score de similarité pour chaque modalité avant de prendre une décision, la fusion est dite en série. Cette dernière est utilisée dans certaines applications, par exemple en cas de manque de trait biométrique (les personnes handicapées) on peut obtenir des caractéristiques issues d'une autre modalité. Néanmoins l'architecture en parallèle est la plus utilisée car elle est performante dans la mesure où elle utilise un grand nombre d'informations disponibles, toutefois elle est coûteuse en temps et en matériel.

La combinaison de plusieurs systèmes biométriques peut se faire à quatre niveaux différents : au niveau des capteurs, au niveau des caractéristiques, au niveau des scores ou au niveau des décisions.

### 1.3 Comparaison des modalités biométriques

D'après la description précédente des différentes modalités biométriques, on peut remarquer que chacune d'entre elles possède ses propres avantages et ses limitations. Certaines modalités sont rigoureuses mais sont également très contraignantes (coût élevé, collaboration de la personne indispensable dans la majorité des cas, etc.) comme dans le cas des systèmes biométriques à base de la rétine ou de l'iris. D'autres modalités sont plus conviviales mais souffrent de problèmes de précision à titre d'exemple, on trouve la signature, la voix ou la frappe au clavier. Toutes ces modalités sont certainement intéressantes mais il est nécessaire de prendre en considération les similitudes rencontrées (la ressemblance des visages des jumeaux), et aussi la variation des caractéristiques en fonction de l'âge (la forme de la main), etc. Pour ces raisons, le choix de la modalité à l'égard d'une autre est important. Ce choix s'effectue essentiellement en tenant compte d'un nombre de paramètres comme la nature de l'application, son coût, les performances espérées du système et l'acceptation de la modalité par l'utilisateur. Pour que les caractéristiques, propre à chaque individu, puissent être qualifiées de modalités biométriques, elles doivent être permanentes (chaque individu les conserve tout au long de son existence), uniques (propres à chaque individu) et universelles (présentes chez tous les individus). Notons toutefois que la permanence, l'unicité et l'universalité ne sont pas absolues, étant donné respectivement l'altération naturelle, accidentelle ou volontaire de certaines caractéristiques au cours du temps, l'existence de jumeaux biométriques et la survenance d'échecs à l'enrôlement. Une caractéristique biométrique devrait être :

- **distinctive**, différente d'un individu à l'autre ;
- **universelle**, existent chez tous les individus ;
- **permanente**, invariante dans le temps pour chaque individu ;
- **accessible**, dont l'image est facilement capturable.

Idéalement, une caractéristique biométrique devrait être en outre :

- **performante, robuste, précise, efficace et rapidement analysable ;**

- **acceptée**, dont la collecte ne soulève pas d'opposition ;
- **fiable**, dont la contrefaçon et le contournement ne sont pas aisés.

Le Tableau 1.1 compare les systèmes biométriques existants en fonction des paramètres précédents. Cette comparaison permet de définir quel est le système le mieux adapté à l'application à sécuriser. Il est important de comprendre que, dans le choix d'un moyen biométrique à exploiter, différents facteurs doivent être pris en compte.

**TABLE 1.1** Tableau comparatif des différentes techniques biométriques en fonction de divers critères. H, M, B désignent respectivement Haut, Moyen, Bas (TATEPAMULWAR et PAWAR, 2014)

<b>Biométrie</b>	<i>Universalité</i>	<i>Unicité</i>	<i>Permanence</i>	<i>Performance</i>	<i>Collectivité</i>	<i>Caractère distinctif</i>
Signature	B	B	B	B	H	B
Voix	M	B	B	B	M	B
Visage	H	B	M	B	H	B
Iris	H	H	H	H	M	H
Frappe au clavier	B	B	B	B	M	B
Rétine	H	M	M	H	B	H
Démarche	M	M	B	B	H	B
Empreinte digitale	M	H	H	H	M	H
Oreille	M	M	H	M	M	M
ADN	H	H	H	H	B	H
Odeur	H	H	H	B	B	B
Géométrie de la main	M	M	M	M	H	M

Malgré l'existence de plusieurs modalités biométriques, il n'y a pas de système biométrique parfait. Toutefois, les seules modalités éprouvées à grande échelle sur le terrain sont la reconnaissance des empreintes digitales, du visage, de l'iris et de la voix. Il se trouve que ce sont les modalités biométriques qui, à ce jour, répondent le mieux aux contraintes d'unicité, de permanence et de régularité. Par ailleurs, leur capture par des instruments étant possible de manière ergonomique et économique. Dans ce sens, le Groupe International de la Biométrie IBG (International Biometric Group) a mené une étude comparative des différentes technologies biométriques appelée Analyse Zéphyr (Figure 1.2). Cette comparaison est basée sur quatre critères :

- **Effort** : effort requis par l'utilisateur lors de l'authentification.
- **Intrusion** : information sur l'acceptation du système par les utilisateurs.
- **Coût** : coût de la technologie (lecteurs, capteurs, etc.).
- **Précision** : efficacité de la méthode (liée aux taux d'erreur).

La Figure 1.2 illustre les résultats de cette comparaison. On peut remarquer que l'empreinte digitale est proche d'être une modalité idéale par rapport aux autres caractéristiques biométriques,

par son efficacité, son coût minimal de mise en œuvre avec un moindre effort requis par l'utilisateur. Pour ces raisons, l'utilisation des empreintes digitales reste la méthode la plus aboutie avec 53% de parts de marché (voir Figure 1.3). Néanmoins d'autres méthodes commencent à trouver leur place sur le marché de la biométrie telles que la géométrie de la main et le visage. Certaines de ces techniques sont très prometteuses (iris) et commencent juste à émerger, d'autres sont encore au stade expérimental (analyse comportementale). Les systèmes à base de la voix ou du visage ne sont pas coûteux, mais leurs performances restent limitées.

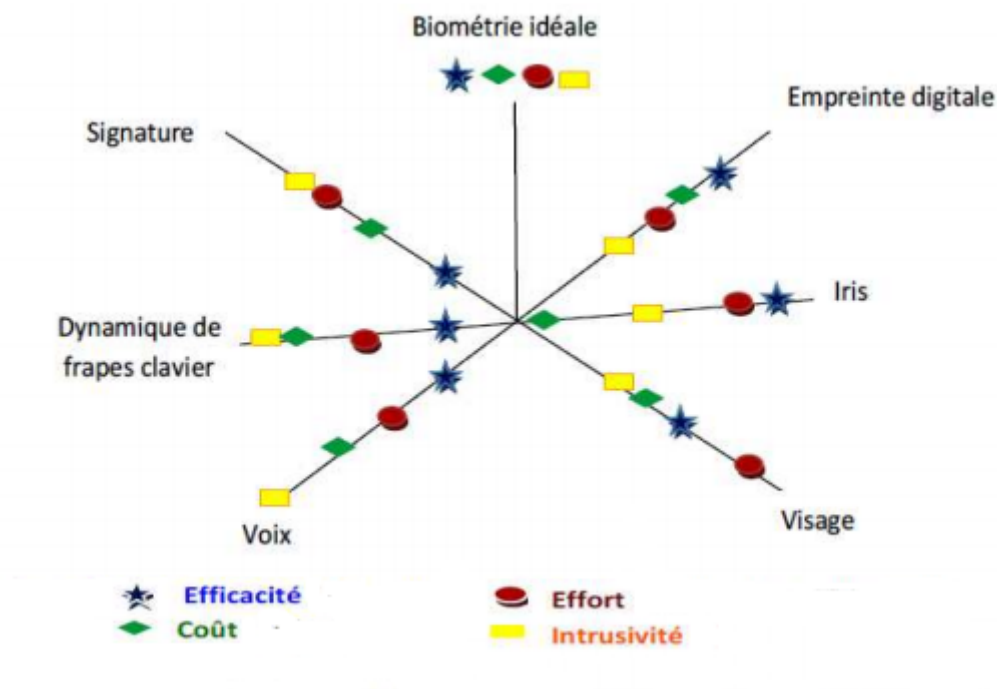


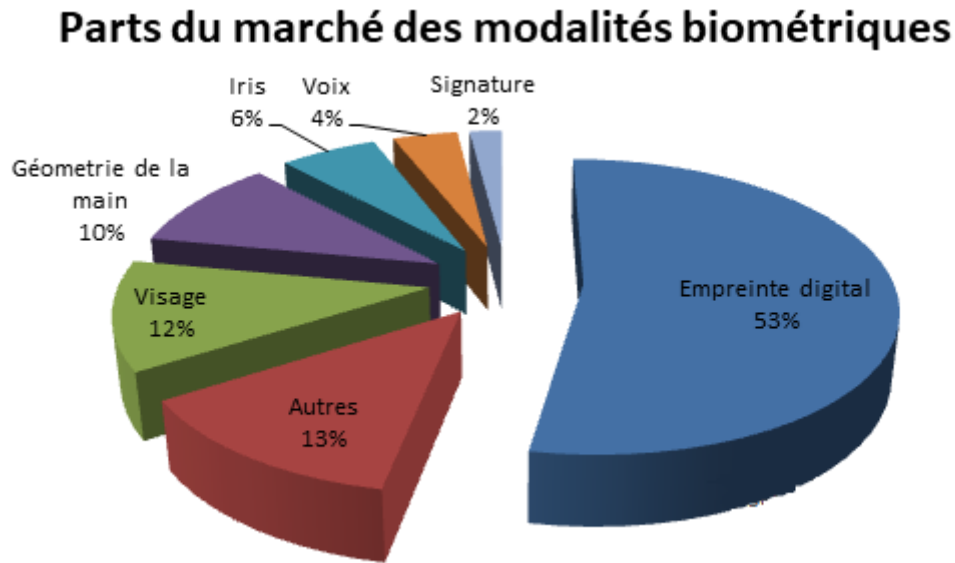
FIGURE 1.2 Analyse Zephyr : comparaison de différentes modalités selon quatre critères principaux : l'intrusivité, le pouvoir discriminant, le coût et l'effort.

## 1.4 Systèmes biométriques et modes de fonctionnement

### 1.4.1 Structure des systèmes de reconnaissance biométrique

Un système de reconnaissance biométrique typique est un système qui procède en premier par l'acquisition des données biométriques de l'individu à reconnaître, puis extrait un ensemble de caractéristiques à partir de celles-ci, enfin il compare ces caractéristiques avec les modèles de la base de données. Selon le contexte de l'application, un système de reconnaissance biométrique peut fonctionner soit en mode vérification ou identification (voir sous-section 1.4.2).

Tout système biométrique comporte deux processus qui se chargent de réaliser les opérations d'enregistrement et de reconnaissance. Lors du processus d'enregistrement, le système va acquérir les caractéristiques des utilisateurs qui serviront à construire un modèle de l'individu. Ce modèle de référence servira de point de comparaison lors de la reconnaissance. Dans chacun des deux processus précédents le système exécute quatre modules fondamentaux (voir Figure 1.4), à savoir :



**FIGURE 1.3** Parts du marché des différentes modalités biométriques selon CH, 2017

(a) **Le module de capture**

Ce processus a pour but d'acquérir les modalités biométriques d'un individu. Les caractéristiques biométriques peuvent être capturées au moyen d'un capteur tel qu'un appareil photo, un lecteur d'empreintes digitales, une caméra, etc.

(b) **Le module d'extraction**

Après l'acquisition de la modalité biométrique, on réalise habituellement un module d'extraction qui est responsable d'extraire uniquement les données les plus pertinentes de la modalité capturée et d'éliminer tous les autres composants. Les traits résultants peuvent être stockés dans une base de données comme une référence, appelée parfois référence ou gabarit biométrique. Dans certains cas, l'échantillon brut (sans extraction de traits) peut être stocké comme référence biométrique.

(c) **Le module de correspondance**

La mise en correspondance compare l'ensemble des caractéristiques extraites de l'image capturée avec les caractéristiques de l'image du modèle stocké et détermine le degré de similitude (ou de divergence) entre les deux. Les traits sont comparés à une ou plusieurs références (voir sous-section 1.4.2) et les résultats de comparaison sont transmis au sous-système de décision.

(d) **Le module de décision**

Ce module est responsable d'annoncer l'acceptation ou le refus de l'authentification d'une personne. Le système affirme la correspondance ou la non-correspondance en considérant un seuil prédéfini. Dans le cas d'une identification, la réussite de la correspondance conduit à une liste de candidats potentiels. D'autre part, le résultat de la vérification est une réponse binaire.

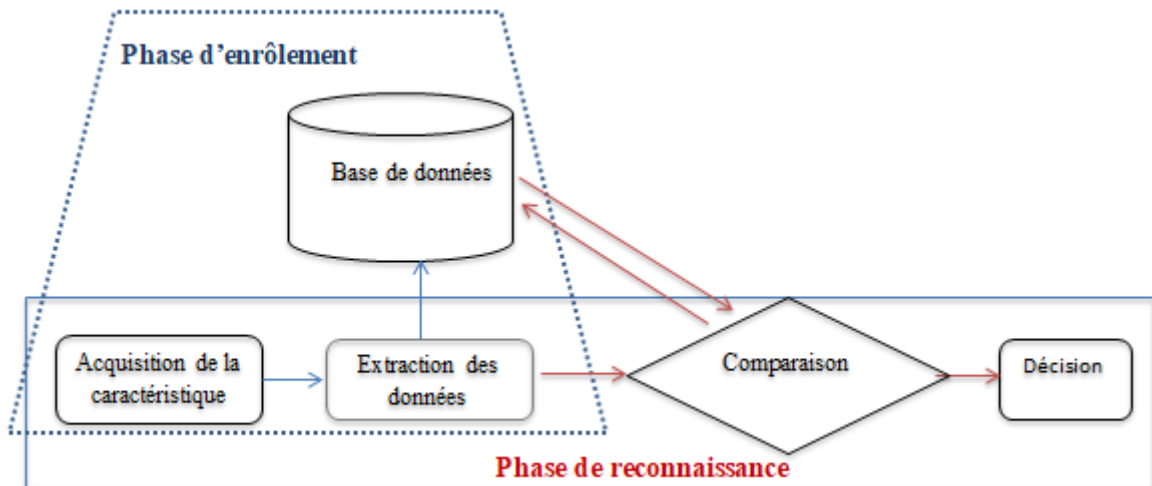


FIGURE 1.4 Architecture générale d'un système de reconnaissance biométrique

### 1.4.2 Processus des systèmes biométriques

Chaque système biométrique peut fournir trois modes de fonctionnement à savoir l'enrôlement, la vérification (un à un) et l'identification (un à plusieurs).

**Le mode d'enrôlement** vise à créer et maintenir la caractéristique biométrique des personnes. Cette caractéristique est acquise à partir d'un ensemble d'opérations successives effectuées sur l'échantillon biométrique obtenu à l'aide d'un capteur. Ces données biométriques sont associées à un identifiant unique pour chaque personne et sont enregistrées dans une base de données pour servir comme références lors des identifications ou vérifications futures. La qualité de l'information enregistrée détermine les performances futures du système. Pour cette raison, certains systèmes ont recours à des sous-systèmes de contrôle de qualité. Ces sous-systèmes de traitement de signal évaluent la validité des échantillons, traits, références, etc., et peuvent créer un modèle composite à partir de multiples échantillons d'une personne où choisir la meilleure capture (Figure 1.5).

**Le mode de vérification** consiste à effectuer une comparaison biométrique "un à un" (1 : 1)

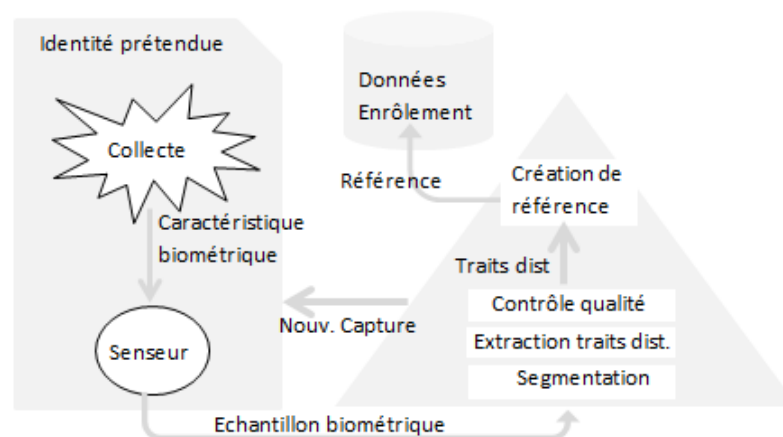


FIGURE 1.5 Processus d'enrôlement d'un système biométrique

(Figure 1.6). Ce procédé vise à accepter ou rejeter la déclaration d'identité d'une personne.

Lors de l'authentification d'un individu, il doit réclamer son propre identifiant généralement un code PIN (Personal Identification Number), un nom d'utilisateur, ou une carte à puce, ainsi qu'un échantillon biométrique. Ce dernier va être comparé avec le modèle de référence précédemment enregistré pour telle identité. Ce modèle stocké peut être hébergé dans une base de données centrale, un smartphone, ou en tant que jeton sur un identifiant comme une carte d'identité à puce. Ainsi, il est possible de vérifier la déclaration d'une personne quant à son identité, en répondant à la question : "êtes-vous la personne pour laquelle a été émis ce jeton?". A la fin du processus de comparaison, une décision est prise (réussite ou échec de la vérification biométrique). La vérification de l'identité se révèle tout particulièrement intéressante pour les applications de sécurité commerciales ou personnelles afin d'empêcher que plusieurs personnes n'utilisent la même identité.

**Le mode d'identification** est un problème de correspondance de type "un à plusieurs" (1 : n)

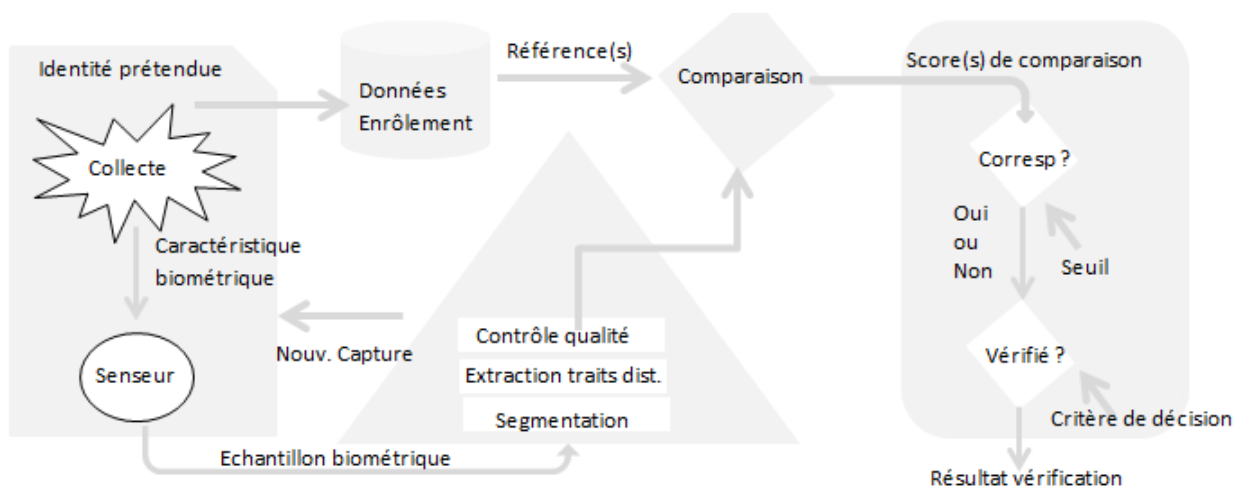


FIGURE 1.6 Processus de vérification d'un système biométrique

(Figure 1.7). Ce processus cherche à vérifier l'existence de l'identité d'un individu dans la base de référence en comparant les données biométriques capturées aux signatures de tous les utilisateurs dans la base de données du système. Dans ce mode, le système doit récupérer l'identité de la personne. Il répond donc à une question de type : "Suis-je bien connu par le système?". Par conséquent, plusieurs comparaisons seront établies afin d'identifier un individu. Si l'échantillon correspond à une identité de la base, l'identification sera validée sinon le système renvoie un échec. Dans cette deuxième situation, l'individu n'a pas à fournir son état civil, il lui suffit de prouver qu'il fait partie de la catégorie de personnes concernées. C'est dans les applications du secteur public que l'identification est le plus souvent effectuée, car la fiabilité de l'identité est essentielle à la sécurité publique. Nous citons à titre d'exemples les enquêtes criminelles, le maintien de l'ordre, la délivrance de visas et les contrôles frontaliers, la défense et les services de renseignements généraux.

## 1.5 Applications des systèmes biométriques

Les champs d'application des systèmes couvrent tous les domaines de la sécurité où il est nécessaire de connaître l'identité des personnes. Ces applications sont classées en trois catégories principales :

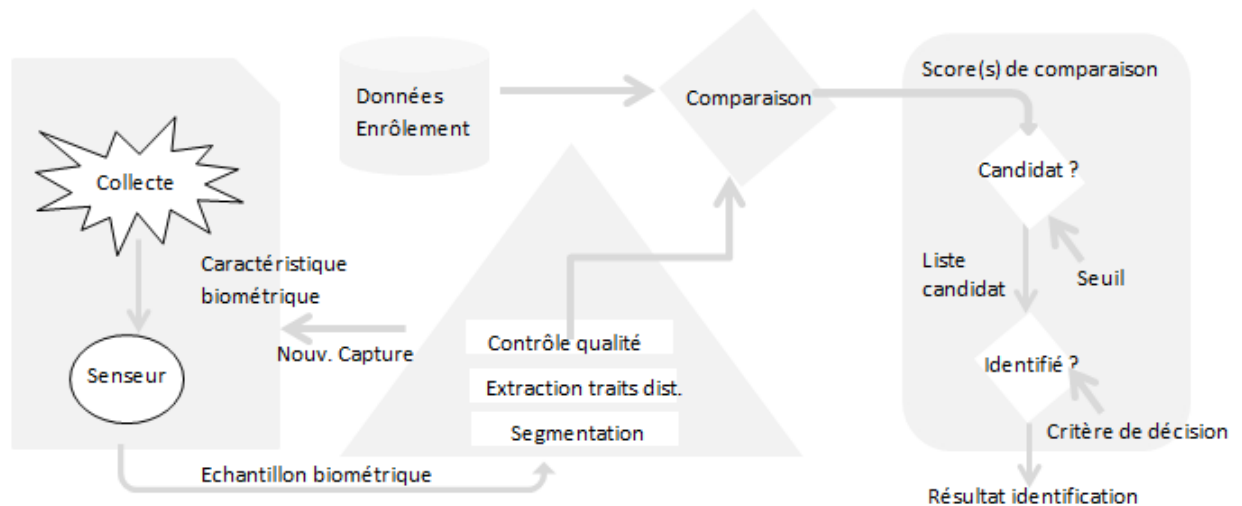


FIGURE 1.7 Processus d'identification d'un système biométrique

- **Applications de transactions** telles que le contrôle d'accès physique ou logiques, l'authentification dans les réseaux informatiques, la sécurité électronique de données, le commerce électronique, l'accès internet, l'utilisation des cartes de crédit, le contrôle d'accès physique, PC, téléphone mobile, la gestion des dossiers médicaux, l'enseignement à distance, etc.
- **Applications de gouvernement** telles que la carte d'identité nationale, le permis de conduire, la sécurité sociale, le contrôle des passeports, le contrôle aux frontières, etc.
- **Applications médico-légales** telles que l'identification de cadavre, la recherche criminelle, l'identification de terroriste, la détermination de la parentalité, etc.

## 1.6 Performance des systèmes biométriques

Bien que les systèmes d'authentification biométriques existants promettent d'être performants, leur robustesse en pratique dans un contexte d'utilisation spécifique n'est pas encore garantie jusqu'à présent. En effet, il est très difficile d'assortir exactement deux fichiers signatures. Le résultat de la comparaison est toujours un degré de similitude (score) qui doit être comparé à un seuil prédéfini lors de l'étape de décision. Ainsi le résultat n'est jamais fiable à 100% mais s'en approche selon le réglage du seuil. L'estimation du seuil de la décision est difficile et peut engendrer deux types d'erreurs : faux rejet ( $FR$ ) qui correspond à rejeter une vraie identité, et fausse acceptation ( $FA$ ) qui donne accès à un imposteur. La figure 1.8 illustre le  $FR$  et le  $FA$  à partir de distributions des scores authentiques et imposteurs. Plusieurs facteurs peuvent engendrer ces erreurs et par conséquent affectent les performances globales de ces systèmes tels que les variances intra-classe et interclasse, la qualité des traits biométriques et le coût calculatoire.

- **Forte variance intra-classe** : Les données acquises d'un utilisateur lors de la phase d'enrôlement et de reconnaissance ne sont jamais identique à 100%. Ces variations peuvent être dues à une mauvaise interaction de l'utilisateur avec le capteur biométrique (tel que le changement de la pose lors de la reconnaissance faciale), à des conditions d'acquisition différentes par exemple l'utilisation de capteurs différents lors de la phase d'enrôlement et de reconnaissance, ou à des changements inhérents à la modalité biométrique comme

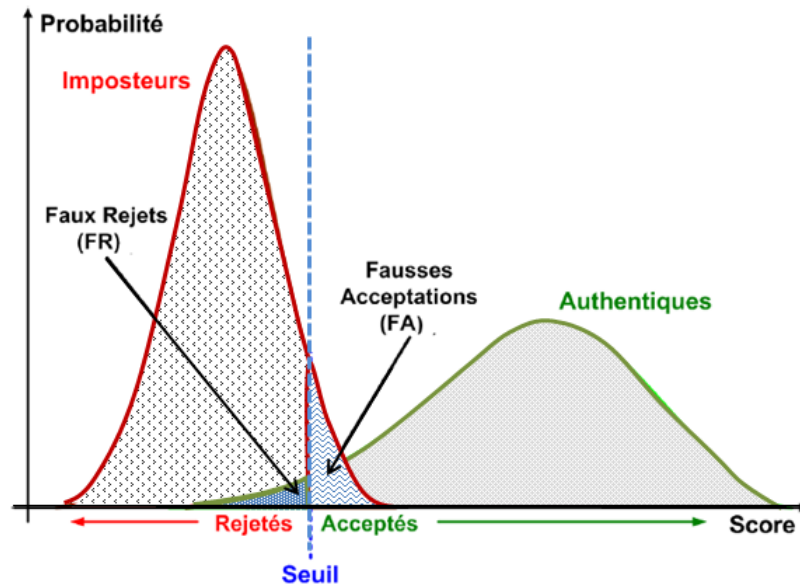


FIGURE 1.8 Illustration du taux des faux rejets FRR et du taux des fausses acceptations FAR

une empreinte digitale avec une cicatrice ou une voix altérée par le froid. Ces problèmes peuvent engendrer une instabilité de performances et augmenter la fréquence des rejets par rapport aux personnes qui doivent être correctement vérifiées. Dans ce cas, le système biométrique subit une augmentation du taux des faux rejets  $FRR$  (False Reject Rate).

- **Faible variance interclasse :** Ce scénario se produit lorsque les caractéristiques extraites sont relativement similaires alors qu'elles proviennent de deux données biométriques différentes (deux utilisateurs différents). Par exemple, la ressemblance des vrais jumeaux lors d'une reconnaissance faciale. Une faible variance interclasse conduit généralement à une faible précision et augmente le taux des fausses acceptations  $FAR$  (False Acceptance Rate) du système biométrique.
- **Qualité des données capturées :** La qualité des données biométriques acquises est surtout sensible aux bruits résultant des équipements utilisés qui sont défectueux ou mal entretenus (exemple l'accumulation de la saleté ou de la poussière sur le lecteur). L'extraction des caractéristiques est très difficile (voire impossible) si la qualité de l'image est mauvaise. Ces défauts influent sur les algorithmes de reconnaissance et dégradent la performance des systèmes. La principale conséquence est l'augmentation du taux de faux rejets (FRR) du système biométrique dû à la mise en correspondance incorrectes des données biométriques.
- **Le coût calculatoire :** Il s'agit du temps requis pour une analyse et le coût associé. En cherchant à atteindre des taux FRR et FAR satisfaisants, les systèmes d'authentification biométriques actuels font souvent recours à des traitements complexes en termes de ressources matérielles et algorithmiques. Ce coût calculatoire élevé peut devenir parfois dissuasif, surtout dans le cas d'une application exigeante en matière de temps de réponse.

Dans la littérature, il existe plusieurs métriques et plusieurs types de courbes (ALONSO-FERNANDEZ et al., 2009) pour définir les performances d'un système biométrique, voici quelques-unes les plus utilisées :

- **Taux de fausses acceptations (False Acceptance Rate, FAR)** : ce taux, appelé aussi *FMR* (False Match Rate), détermine la probabilité pour qu'un système reconnaisse une personne qui normalement n'aurait pas dû être reconnue.

$$FAR = \frac{\text{nombre des imposteurs acceptés (FA)}}{\text{nombre total d'accès d'imposteurs}} \quad (1.1)$$

- **Taux de faux rejets (False Rejection Rate, FRR)** : ce taux, appelé aussi *FNMR* (False Non Match Rate), détermine la probabilité pour qu'un système rejette une personne qui normalement aurait dû être reconnue.

$$FRR = \frac{\text{nombre des personnes rejetées (FR)}}{\text{nombre total d'accès de clients}} \quad (1.2)$$

- **Taux d'égal erreur (Equal Error Rate, EER)** : Ce taux est calculé à partir des deux premiers critères. Ce point correspond à l'endroit où  $FRR = FAR$ , c'est-à-dire le meilleur compromis entre les faux rejets et les fausses acceptations.

$$EER = \frac{\text{nombre de fausses acceptations} + \text{nombre de faux rejets}}{\text{nombre total d'accès}} \quad (1.3)$$

- **La courbe ROC (Receiver Operating Characteristics)** : Cette courbe représente en ordonnée la proportion de tests positifs parmi les utilisateurs authentiques (la sensibilité) en fonction de la proportion de tests positifs parmi les imposteurs (complément de la spécificité ou  $1 - \text{spécificité}$ , en abscisse) pour toutes les valeurs des seuils de test envisageables.
- **La courbe DET (Detection Error Tradeoff)** : Cette courbe illustre la relation entre le *FRR* et le *FAR*. Elle est obtenue en faisant varier le seuil de décision et en calculant à chaque fois les deux valeurs *FRR* et *FAR*. Un seuil élevé réduit le taux de faux positifs mais augmente le taux de faux négatifs. Un seuil faible réduit le taux de faux négatifs mais augmente le taux de faux positifs.
- **FMR100** : FNMR le plus bas obtenu pour un  $FMR \leq 1\%$
- **FMR1000** : FNMR le plus bas obtenu pour un  $FMR \leq 0.1\%$
- **ZeroFMR** : FNMR le plus bas obtenu pour un  $FMR = 0\%$ .

## 1.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons abordé la biométrie qui fournit une alternative aux systèmes de reconnaissance traditionnels. L'étude présentée montre que les caractéristiques physiologiques et morphologiques ont l'avantage d'être stables durant la vie d'un individu et ne subissent pas autant de changements liés aux effets du stress contrairement aux modalités comportementales. Cependant, aucune des modalités étudiées ne se révèle être totalement exacte, car il s'agit bien là d'une des caractéristiques de tout organisme vivant : on s'adapte à l'environnement, on vieillit, on subit des traumatismes plus ou moins importants, bref on évolue et les mesures biométriques peuvent changer durant la vie de l'individu. Les travaux de recherche réalisés dans ce domaine ne s'intéressent pas à la sécurité absolue, mais cherchent à obtenir des solutions opérationnelles et pratiques. On cherche à diminuer le taux de faux rejets (False Rejection Rate, FRR), tout en maintenant un taux relativement bas de fausses acceptations (False Acceptation Rate, FAR). Une fausse acceptation peut arriver si la personne a falsifié la donnée

biométrique ou si la mesure la confond avec une autre personne. D'autre part, un système peut rejeter un utilisateur légitime et dans ce cas on parle de faux rejets. Dans la pratique, on doit obtenir un bon compromis entre ces deux taux, FRR et FAR tout en prenant en compte le temps de traitement des données biométriques et leur stockage. Une comparaison des technologies biométriques existantes a montré que l'utilisation de l'empreinte digitale comme moyen de reconnaissance représente nettement la solution préférée par la communauté. Sa force tient au fait qu'elle est efficace (faible risque d'accepter ou de rejeter une personne par erreur), moins intrusive et moins coûteuse.

## Chapitre 2

# Etat de l'art sur l'appariement des empreintes digitales

### 2.1 Introduction

L'empreinte digitale est la modalité la plus acceptable parmi les techniques de reconnaissance biométriques. Elle reçoit une attention accrue dans le domaine de recherche du fait de ses caractères. En fait, elle est naturelle, non-intrusive et facile à utiliser. Le développement des technologies telles que les capteurs et les dispositifs mobiles a contribué son déploiement à large échelle. De plus, l'empreinte digitale est l'une des modalités les plus performantes et son acceptation parmi les individus est plutôt bonne. En se basant sur les calculs, la probabilité pour que les empreintes de deux individus différents se correspondent est de 1 sur 64 Billions. Tous ces faits nous ont encouragés initialement à orienter notre travail de thèse sur cette modalité spécifique. Certes, l'unicité, la permanence, l'universalité, la richesse en information font de l'empreinte digitale une modalité biométrique particulièrement pertinente. Cependant, malgré tous ces avantages, certains problèmes influençant les performances de ces systèmes doivent être résolus. Ces problèmes sont dûs principalement par :

- **L'acquisition des empreintes digitales** est usuellement effectuée par contact du doigt sur un support d'enregistrement. Récemment, de nouvelles technologies de capteurs permettant une acquisition sans contact du doigt, sont mises en œuvre pour régler certains problèmes, en générant aussi de nouveaux.
- **La grande variabilité** entre deux impressions de la même empreinte digitale est due au mode d'acquisition, aux conditions d'acquisition et à des facteurs physiologiques et environnementaux.
- **La complexité** de l'étape d'appariement d'empreintes digitales, engendrée entre autre par les deux points précédents.

De nombreuses méthodes de vérification des empreintes digitales ont été proposées depuis plus de trois décennies, cependant ces systèmes de reconnaissance restent complexes et offrent un grand challenge pour les chercheurs. L'amélioration de taux de reconnaissance, la diminution de taux de fausse acceptation, en tenant en compte du temps requis pour une analyse et le coût associé sont des défis auxquels les algorithmes proposés doivent faire face.

Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur la biométrie des empreintes digitales qui a été traitée plus particulièrement dans ce travail de thèse. L'objectif de ce chapitre est de présenter un état de l'art complet sur la biométrie des empreintes digitales. Nous visons surtout deux objectifs. Le premier est de présenter les principaux éléments théoriques liés aux empreintes digitales et à la biométrie associée, utiles à la bonne compréhension de notre problématique. Le deuxième

est de discuter les problèmes actuels rencontrés en biométrie des empreintes digitales, puis les grands enjeux qui ont justifié ce projet de thèse.

## 2.2 Acquisition des empreintes digitales

L'acquisition d'empreinte est la première étape d'un système de reconnaissance qui permet d'obtenir une image d'empreinte. Le principe de l'acquisition se résume dans la découverte des points de contact du doigt avec le capteur. Avant, le seul moyen été l'utilisation de l'encre sur les doigts et puis le faire rouler sur une feuille de papier. On appelle ce procédé "ink & paper". L'empreinte digitale obtenue est ensuite numérisée à l'aide d'un scanner ou d'une caméra CCD. Le grand avantage de cette méthode d'acquisition est qu'elle permet d'obtenir des images d'empreintes digitales complètes, dites "nail to nail". Ce procédé d'acquisition amène à une qualité d'image médiocre, en plus le processus d'extraction et de comparaison est très long et pénible. Actuellement, le développement des systèmes automatisés d'identification des empreintes digitales (Automated Fingerprint Identification System (AFIS)) et l'augmentation considérable des applications de la biométrie ont encouragé le développement de capteurs permettant d'automatiser le processus d'acquisition, c'est-à-dire capable de numériser directement les empreintes digitales. On les appelle capteurs "livescan" d'empreintes digitales (BOLLE et al., 2003). Les capteurs livescan fonctionnent en deux modes d'acquisition différents : le mode d'acquisition par contact du doigt sur une surface dédiée du capteur et le mode sans contact. Nous signalons que l'acquisition d'empreintes digitales en trois dimensions, par capture de photo ou de vidéo de doigts sans contact avec un capteur, commence à se répandre, néanmoins à l'heure actuelle une part significative des bases de données d'empreintes digitales est toujours constituée d'acquisitions planes.

### 2.2.1 Capteurs avec contact

Les capteurs avec contact sont utilisés avec un certain succès depuis maintenant plusieurs années. Le principe de base de ces scanners est d'imager les points du doigt qui sont en contact avec la surface du capteur. Les scanners standard avec contact sont basés sur trois grandes technologies ; les capteurs optiques, les capteurs à silicium et les capteurs à ultrasons. Le choix du capteur est important et dépend de plusieurs facteurs comme la population utilisatrice, la qualité de l'image digitale qui peut varier selon que la peau du doigt soit sale, trop humide, trop sèche ou affligée d'une coupure.

- **Capteur optique** : Le capteur optique utilise une mini caméra CCD (dispositif couplé chargé) contenant une rangée de LED (diodes électroluminescentes). Après avoir placé le doigt sur une platine en plastique dur ou en quartz, l'appareil photo récupère l'image telle que les zones en contact apparaissent en sombre alors que les zones qui n'ont pas de contact apparaissent en clair. L'avantage principal de ce capteur est dû à son coût abordable. Il est intrinsèquement protégé contre les décharges électrostatiques et il résiste très bien aux fluctuations de température, mais il est gêné par une lumière ambiante trop forte. Le principal inconvénient de ces capteurs optiques est qu'il est possible que les empreintes des utilisateurs précédents restent latentes, d'où une possibilité de dégradation de l'image par surimpression (XIA et O'GORMAN, 2003).
- **Capteur à silicium** : Le capteur à silicium est basé sur les quatre phénomènes caractéristiques des semi-conducteurs : l'effet piézo-électrique, l'effet capacitif, l'effet thermo-électrique et l'effet photo-électrique. Il est en général de très petite taille, d'une durée

de vie assez longue, et son coût est assez bas. Mais, il est fragile aux décharges électrostatiques et il peut être détruit si des règles de fabrication et d'installation ne sont pas observées. Ces nouvelles technologies visent surtout les applications de masses, grâce à la taille réduite et les coûts moins importants que ceux des lecteurs optiques. L'inconvénient majeur est qu'elles sont vulnérables aux attaques extérieures fortuites ou volontaires.

- **Capteur à ultrasons** : Le capteur à ultrasons utilise une onde ultra sonore qu'il envoie vers le doigt, puis calcule le temps mis par l'onde pour faire un aller-retour et, point par point, fournit l'image de l'empreinte. Ce type de capteur a été introduit dans le domaine de la biométrie des empreintes digitales dans le but de résoudre les problèmes inhérents à la technologie des capteurs optiques et capacitifs et la dégradation de la qualité des images en situations d'acquisitions difficiles telles qu'un niveau excessif de sécheresse, d'humidité, de saleté du doigt ou du capteur (XIA et O'GORMAN, 2003 ; RATHA et GOVINDARAJU, 2007 ; MAEVA et SEVERIN, 2009). Dans ce sens, les résultats des études menées par RATHA et GOVINDARAJU, 2007 ont montré que la technologie ultrasons était plus robuste et que les images résultantes étaient de qualité plus stable. Cependant, malgré cet avantage, les capteurs à ultrasons sont assez volumineux et donc difficile à mettre en place. Par ailleurs le temps d'acquisition peut être assez élevé (plusieurs secondes) par rapport à celui des capteurs optiques ou capacitifs.

### 2.2.2 Capteurs sans contact

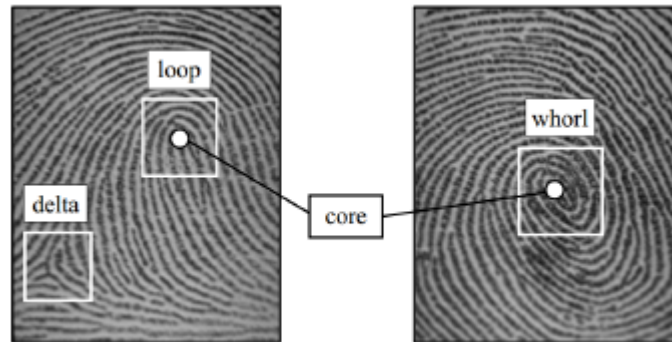
Les capteurs sans contact du doigt sur le capteur ont été développés pour affranchir les problèmes de déformation des doigts, de contacts pas correctement réalisés et d'empreintes latentes causées par les senseurs avec contact. Le capteur sans contact a un fonctionnement semblable à celui du capteur optique. En général, il y a une glace optique de précision à une distance de 5 à 7 cm de l'empreinte digitale. L'empreinte digitale est mise sur un support avec une ouverture. Un des inconvénients à considérer est que la poussière et la saleté peuvent se déposer sur la vitre optique, donnant un mauvais résultat d'image. D'autre part, à cause de l'absence de contact et de la distance entre le doigt et le capteur, les vallées et les crêtes ne sont pas bien différenciées.

## 2.3 Représentation des empreintes digitales

Une empreinte digitale est constituée d'un ensemble de lignes localement parallèles formant un motif unique pour chaque individu. Des rangées de papilles dermiques issues du derme soulèvent l'épiderme pour dessiner ce motif sur les doigts. L'épiderme des extrémités des doigts est caractérisé par un dessin complexe de relief, composé de crêtes et de vallées. Les empreintes digitales se forment chez le fœtus vers le septième mois de grossesse et varient très peu durant l'existence d'un individu, et même après le décès, à l'exception de dégradations majeures de la peau dues aux cicatrices ou aux maladies. Les experts en biométrie distinguent plusieurs caractéristiques visuelles d'une empreinte digitale qui peuvent être classées selon trois niveaux :

- **Niveau 1**, on trouve les crêtes et vallées. Une crête est un segment continu de relief de peau ascendant, et les crêtes sont séparées par des vallées, reliefs de peau descendant. La largeur des crêtes est couramment située entre  $100 \mu m$  et  $300 \mu m$ , avec une période entre crêtes de l'ordre de  $500 \mu m$ . Le flux de crêtes présente des singularités, nommées cores et deltas, correspondant respectivement à des points singuliers de type foyer et de type col. Le point core peut être aussi défini empiriquement comme le point le plus haut de la

boucle de crête la plus intérieure de l'empreinte digitale. De manière simple, le point core est le lieu de convergence des stries et le point delta correspond au lieu de divergence. Ces singularités sont illustrées par la Figure 2.1.

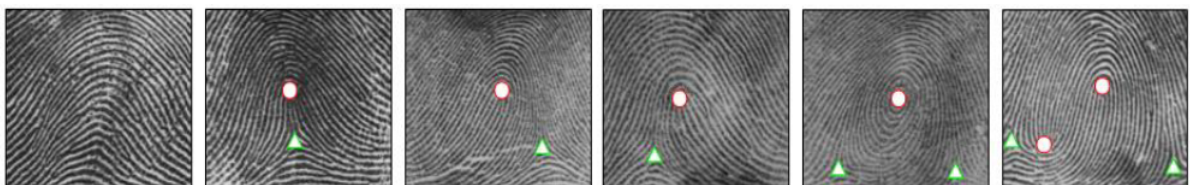


**FIGURE 2.1** Zone de singularités (boîtes blanches) et core (cercles) tiré de MALTONI et al., 2009

La forme générale du flux de crêtes est utilisée également pour définir les classes des empreintes digitales. C'est ainsi que Francis Galton les a subdivisées en trois grandes familles (GALTON, 1892) :

- Les Boucles (Loops) : une empreinte est de classe boucle si ses stries rentrent d'un côté et ressortent du même côté et si elle possède un point singulier de type boucle et un point singulier de type delta. Les boucles représentent 65% des empreintes des doigts humains.
- Les Spires (Whorls) : une empreinte appartient à la classe spire si elle possède au moins une strie qui fait 360°. Elle peut aussi contenir jusqu'à deux régions singulières de type boucles et deux régions singulières de type deltas. Les spires représentent 30% des empreintes des doigts humains.
- Les Arches (Archs) : une empreinte est de classe arche si elle possède des stries qui rentrent d'un côté et ressortent du côté opposé et si elle ne contient ni boucle ni delta comme points singuliers. Les arches ne représentent que 5% des empreintes des doigts humains.

Le système de HENRY, 1900, illustré par la Figure 2.2, permet de définir six sous-classes principales : arche, boucle à gauche (left loop), boucle à droite (right loop), arche penchée (tented arch), spires et spires imbriquées ou boucles jumelles.



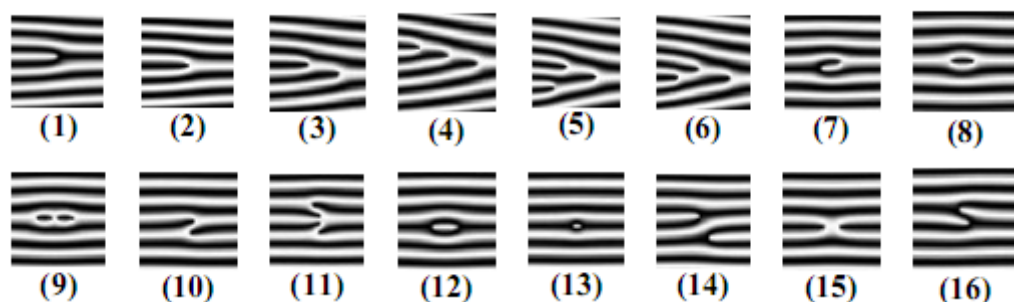
**FIGURE 2.2** Classes de Henry, présentées de gauche à droite : arche, arche penchée (tented arch), boucle à gauche, boucle à droite, spires, spires imbriquées.

- **Niveau 2**, un autre type de caractéristique est considéré : les terminaisons et les intersections des crêtes. Ces objets sont ponctuels, orientés par leur crête d'appartenance, et sont appelés minuties. Ce sont des points d'irrégularités se trouvant sur les lignes papillaires. Dans des empreintes digitales, on se réfère à diverses façons dont les crêtes peuvent être discontinues. On peut relever jusqu'à seize types de minuties (voir Figure 2.3), mais les algorithmes généralement s'intéressent qu'aux bifurcations et terminaisons qui permettent d'obtenir les autres types par combinaison. Une minutie est définie par une position  $(x,y)$ , un type (bifurcation, terminaison, etc.) et une orientation. L'orientation représente l'angle entre la tangente à la ligne de crête et l'axe horizontal. Ce calcul d'orientation rend égal l'angle de minuties terminaisons et bifurcations et soulève le problème de bifurcations qui ressemble aux terminaisons et vice versa.

On peut intégrer également des détails supplémentaires sur les minuties. Ce sont des informations supplémentaires étroitement liées aux minuties qui peuvent être extraites en utilisant un algorithme avancé. Ces détails sont considérés comme des caractéristiques supplémentaires, différentes de la position, de la direction et du type, obtenues directement à partir du jeu de minuties et sont essentielles à la réalisation d'une technique d'appariement effective. Dans ce qui suit, nous présentons les plus importants :

- Le **Compteur de Crêtes (CC)** : ce détail est associé à chaque minutie centrale de la structure locale et représente le nombre de crêtes qui sont coupées à travers la ligne joignant deux minuties. Pour effectuer le compte, l'algorithme d'extraction nécessite l'accès à l'image d'empreinte binarisée ou squelettisée.
- Les **Propriétés des Crêtes (PC)** : la crête à laquelle la minutie appartient est analysée en fonction de son degré de courbure ou en échantillonnant quelques points équidistants le long de sa courbe pour capturer des relations relatives à la minutie centrale. Dans ce cas, l'algorithme extracteur des minuties exige d'explorer l'image d'empreinte squelettisée pour parcourir les crêtes.

CHAMPOD et al., 2004 ont estimé que dans une empreinte de bonne qualité, le nombre de minuties est entre 40 et 100 minuties avec les densités moyenne de 0.49 et 0.18  $minuties/mm^2$  à l'intérieur des régions du singulier et en dehors des régions du singulier respectivement.



**FIGURE 2.3** Types de minuties : (1) Terminaison, (2) Bifurcation simple, (3) Bifurcation double, (4) Bifurcation triple I, (5) Bifurcation triple II, (6) Bifurcation triple III, (7) Crochet, (8) Boucle simple, (9) Boucle double, (10) Pont simple, (11) Pont jumeaux, (12) Intervalle, (13) Point isolé, (14) Traversée, (15) Croisement, (16) Tête bêche.

- **Niveau 3**, on trouve les informations les plus détaillées des empreintes digitales : déformations fines, largeur des crêtes, micro-crêtes incises dans des crêtes plus larges et pores de sudation (Figure 2.4). Ces détails peuvent être détectés sur une empreinte digitale quand la résolution de l'image est suffisamment élevée, de l'ordre de 1000 *dpi*.

ASHBAUGH et PRESS, 1999 ont précisé que généralement le nombre de pores dans une crête est entre 9 et 18 et le nombre de pores suffisant pour identifier une personne est entre 20 et 40. L'extraction des caractéristiques de niveau 3 nécessite une résolution très élevée et une image de qualité. Pour ces raisons, les techniques de mise en correspondance qui utilisent ce niveau sont très limitées.

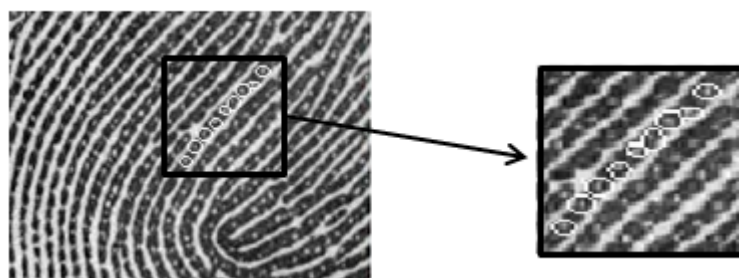


FIGURE 2.4 Pores de sudation (cercles) sur une crête.

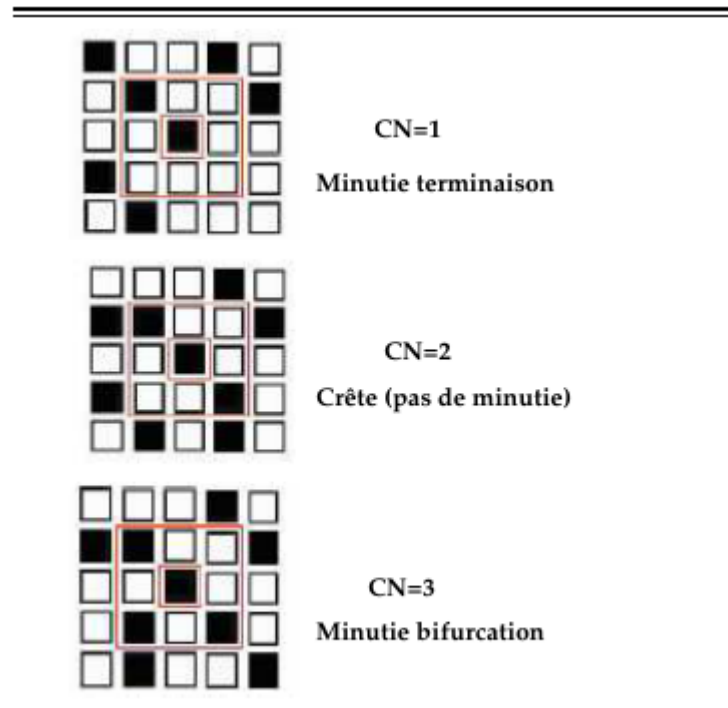
## 2.4 Extraction des caractéristiques

Nous focalisons nos travaux de recherche sur les systèmes de reconnaissance d'empreintes digitales à base des minuties. Dans cette section, nous présentons les méthodes pour extraire les minuties à partir d'empreintes digitales. Un algorithme d'extraction des minuties cherche des fins de crêtes et des bifurcations dans les empreintes digitales. Si les crêtes sont bien déterminées, alors cette tâche devient relativement simple. Cependant, dans la pratique, il n'est pas toujours possible d'obtenir une carte parfaite de crêtes. Donc la performance des algorithmes actuellement disponibles d'extraction de minuties dépend fortement de la qualité des images des empreintes digitales.

Plusieurs méthodes ont été développées pour réaliser une extraction de minuties efficace. Les méthodes d'extraction de minuties peuvent être classées dans la littérature en deux grandes catégories : celles qui se basent sur la binarisation de l'image et celles qui se basent directement sur l'image en niveau de gris (RATHA et BOLLE, 2003).

### 2.4.1 Extraction de minuties dans l'image binaire

L'extraction des minuties par la binarisation de l'image d'empreinte digitale est l'approche la plus répandue dans la littérature (MALTONI et al., 2009). Dans cette approche, l'image en niveau de gris est convertie en une image binaire. Ensuite, une phase intermédiaire de débruitage et de correction de l'image binarisée est appliquée. A la fin, l'empreinte est amincie (squelettisée) afin de diminuer l'épaisseur des stries (Figure 2.5). A ce stade, la détection des minuties devient évidente (RAVI et al., 2010). Elle consiste à prendre l'image squelettisée en entrée et en



**TABLE 2.1** Nombre de connexion et type des minuties tiré de RAVI et al., 2010

extraire les pixels représentant les minuties telles que les pixels ayant trois voisins sont identifiés comme bifurcations, et les pixels ayant un seul voisin sont identifiés comme terminaisons. Pour cela un coefficient de connectivité  $CN$  (crossing number) est défini en chaque point  $P$  de l'image par la moitié de la somme des différences en valeur absolue de pixels adjacents dans un voisinage de 8 pixels entourant  $P$  (RAVI et al., 2010).  $CN$  d'un pixel  $P$  se calcule par la formule suivante :

$$CN(P) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^8 |P_i - P_{i-1}| \quad \text{avec } P_8 = P_0 \text{ et } P_i \in \{0, 1\} \quad (2.1)$$

Les valeurs de  $CN$  définissent les types de minuties (Figure 2.1) :

- $CN = 0$  : Pixel isolé, très rare et non pris en considération car il est probablement dû à un bruit.
- $CN = 1$  : Minutie de type terminaison.
- $CN = 2$  : Le pixel se situe sur une ride. Il n'y a pas de minutie.
- $CN > 2$  : Minutie de type bifurcation.

Le problème de la binarisation a été largement étudié dans le domaine de traitement d'image et de la vision par ordinateur. Les approches de binarisation classiques reposent sur un seuillage global ce qui n'est pas envisageable dans la grande majorité des cas, du fait de la variabilité parfois grande du contraste et de l'intensité au sein d'une même image d'empreinte. Ainsi l'utilisation des seuils dynamiques adaptés localement est souvent préférée pour ce type d'image.

MOAYER et FU, 1976 ont procédé à une méthode de binarisation basée sur l'application itérative d'un opérateur Laplacien et d'une paire de seuils dynamiques : l'image initiale est fusionnée de

façon itérative avec sa convolution avec un Laplacien pour rehausser les contrastes, et des seuils dynamiques sont utilisés pour binariser progressivement les valeurs extrêmes à 0 ou 1.

Une méthode similaire a été proposée par VERMA et al., 1987 où un seuil dynamique par fenêtre de voisinage local est employé, de manière à équilibrer le nombre de 0 et de 1 dans chaque voisinage local de l'image.

RATHA et al., 1995 ont développé un algorithme de segmentation basé sur le flux d'orientation. Pour segmenter les crêtes, une fenêtre 16x16 orientée le long de la direction de la crête est positionnée autour de chaque pixel. La projection le long de la direction des crêtes est ensuite calculée. Les centres des crêtes apparaissent comme les pics de projection.

DOMENICONI et al., 1998 ont proposé de lisser l'image en utilisant le principe de diffusion anisotrope, ensuite les crêtes et vallées d'une image d'empreinte sont localisées en calculant les maxima locaux. Elles sont localisées en utilisant la matrice de Hessien calculée en tout point de l'image.

TICO et KUOSMANEN, 1999 ont introduit une méthode basée sur les propriétés topographiques de la surface de l'image du doigt. L'image est traitée comme une réalisation bruitée d'une fonction continue sous-jacente qui est approximée par des polynômes d'interpolation orthogonaux de Chebyshev. Les crêtes et les vallées sont ensuite extraites en utilisant le signe des maxima de la courbure normale de ces polynômes.

MIAO et al., 2007 ont conçu une méthode qui se base sur les principales courbes pour extraire les minuties des empreintes digitales. Ils ont exploité l'algorithme proposé par KÉGL, 1999 pour obtenir ces courbes et qui ont servi comme squelette de l'image de l'empreinte digitale. Les minuties aux extrémités des principales courbes sont extraites par un filtre logique.

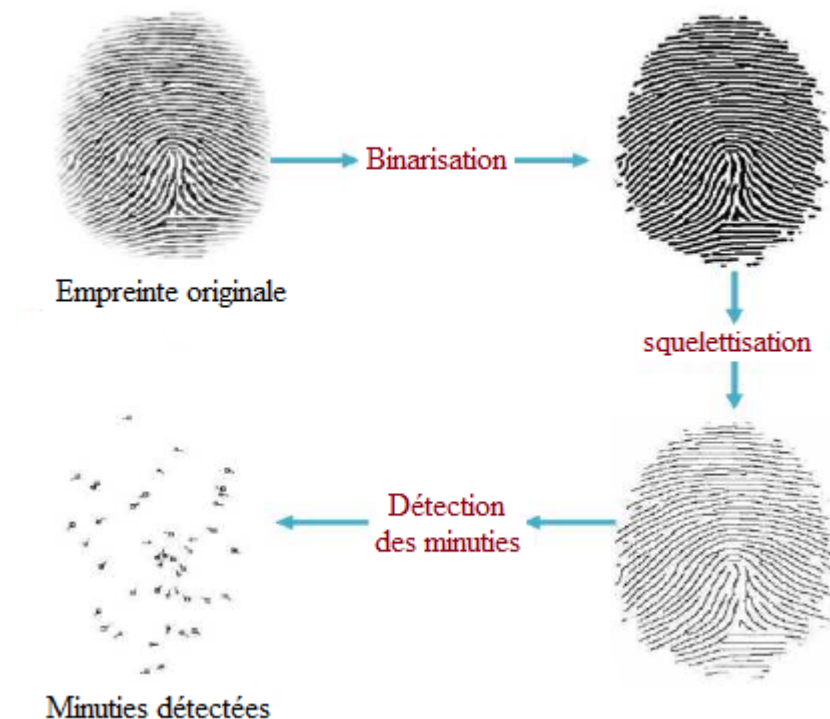


FIGURE 2.5 Extraction des minuties par Binarisation selon RAVI et al., 2010

### 2.4.2 Extraction de minuties dans l'image en niveau de gris

Pratiquement, peu de méthodes d'extraction directes de minuties à partir des images en niveau de gris sont proposées dans la littérature :

MAIO et MALTONI, 1997 ont développé une méthode de détection de crête reposant sur la localisation des maxima locaux par le suivi de directions orthogonales à l'orientation locale. Un ensemble de points de départ est déterminé en superposant une grille carrée sur l'image en niveaux de gris. Pour chaque point de départ, l'algorithme continue à suivre les lignes de crêtes jusqu'à ce qu'elles se terminent ou se croisent avec d'autres lignes de crêtes (détection de minuties). Une stratégie d'étiquetage est adoptée pour examiner chaque ligne de crête une seule fois et localiser les intersections entre les lignes de crête.

LEUNG et al., 1990 ont introduit les réseaux de neurones pour la détection des minuties dans les images en niveau de gris. Les images d'empreintes digitales sont d'abord traitées avec des filtres de Gabor complexes et les signaux résultants de phase et d'amplitude sont transmis aux réseaux de neurones pour identifier les régions de minuties dans les images en niveau de gris.

DARLOW et ROSMAN, 2017 ont proposé une variante notable en développant un modèle de réseau de neurones convolutionnels profonds pour aborder le problème d'extraction des minuties.

## 2.5 Filtrage des minuties

Une étape de post-traitement est souvent utile pour éliminer les minuties parasites détectées dans des régions d'empreintes digitales hautement corrompues ou introduites par des étapes de traitement précédentes par exemple lors de la phase d'amincissement. Dans la littérature, deux types principaux de post-traitement ont été proposés :

### 2.5.1 Post-traitement structurel

Des règles structurelles simples peuvent être utilisées pour détecter la plupart des fausses minuties qui affectent habituellement les images d'empreintes digitales binaires amincies.

XIAO et RAAFAT, 1991 ont identifié les structures des fausses minuties les plus courantes et ont introduit une approche "ad hoc" pour les éliminer. Cet algorithme est basé sur des règles et nécessite en entrée certaines caractéristiques numériques associées aux minuties comme la longueur de la ou des arêtes associées, l'angle de la minutie et le nombre de minuties face à face dans un voisinage.

HUNG, 1993 ont exploité la dualité des minuties pour éliminer les fausses minuties extraites d'images binaires amincies. Les squelettes des crêtes et des vallées sont extraits et seules les minuties des crêtes ayant une contrepartie (de type complémentaire) dans le squelette des vallées sont conservées. Un graphe est défini pour les squelettes de crêtes et de vallées en assignant un sommet à chaque fin de crête et en affectant un bord à chaque bifurcation de crête. Chaque arête est caractérisée par la longueur de la crête correspondante et le degré d'un sommet est donné par le nombre d'arêtes convergentes. Les éperons (c'est-à-dire, les bords très courts) et les trous (c'est-à-dire les boucles avec un très petit diamètre) sont d'abord éliminés en considérant certaines propriétés du graphique de crête. Les ponts entre les crêtes adjacentes sont ensuite éliminés en exploitant leur relation avec les ruptures dans l'espace double.

FARINA et al., 1999 ont éliminé les éperons et les ponts en observant que dans une fausse bifurcation, seules deux branches sont généralement alignées alors que la troisième est presque orthogonale aux deux autres. Les crêtes courtes sont éliminées sur la base de la relation entre la

longueur de la crête et la distance moyenne entre les crêtes. Les terminaisons et les bifurcations sont ensuite validées topologiquement. Elles sont : (i) supprimées si les exigences topologiques ne sont pas satisfaites; (ii) classées comme moins fiables si les exigences ne sont pas entièrement satisfaites; (iii) sinon considérées comme minuties très fiables.

KIM et al., 2001 ont proposé une méthode légèrement différente de l'élimination des minuties. Dans leur travail, l'orientation locale et le flux des crêtes sont des facteurs clés pour le post-traitement afin d'éviter d'éliminer les vraies minuties.

BHOWMICK et al., 2002 ont attribué un score à chaque minutie en fonction de la clarté du flux de la crête et de la vallée et du niveau de bruit dans la position de la minutie.

CHEN et MOON, 2007 ont aussi attribué des scores aux minuties en fonction de la connectivité, de l'espacement et de la symétrie de la crête locale. Les scores peuvent ensuite être utilisés soit pour un filtrage immédiat, soit pour une pondération de minuties pendant l'appariement.

ZHAO et TANG, 2007 ont suggéré que pour la plupart des fausses minuties, il existe au moins une structure de pont. Un H-point est défini comme une structure de pont dans l'un des deux squelettes (crête ou vallée) et son correspondant dans le squelette double. Une règle simple est ensuite définie pour détecter et supprimer les points H, éliminant ainsi de nombreuses fausses minuties.

## 2.5.2 Filtrage des minuties dans l'image en niveau de gris

Une technique de filtrage des minuties au niveau de gris réexamine l'image en niveau de gris dans le voisinage spatial d'une minutie détectée dans le but de vérifier la présence d'une véritable minutie.

MAIO et MALTONI, 1998 ont utilisé un réseau de neurones à poids partagés pour vérifier les minuties détectées par l'algorithme proposé par (GOLFARELLI et al., 1997). Les voisinages de minuties dans l'image originale de niveau de gris sont normalisés, en respectant leur angle et la fréquence locale des crêtes, avant de les passer à un classificateur de réseau neuronal, qui les classe comme terminaison, bifurcation et non-minutie. Pour profiter de la dualité crêtes-terminaison / bifurcation, le voisinage et sa version négative constituent tous les deux l'entrée du classificateur de réseau neuronal. De plus, pour éviter les problèmes liés à la formation de grands réseaux, la dimensionnalité des voisinages normalisés est réduite par la transformation de Karhunen-Loeve (JOLLIFFE, 1986). Une architecture de réseau de neurones à trois couches typique a été adoptée, où un partage de poids partiel permet d'exploiter la dualité de terminaison / bifurcation.

PRABHAKAR et al., 2003 ont opéré sur les voisinages en niveau de gris extraits de l'image originale après amélioration par le filtre de Gabor (HONG et al., 1998). Les voisinages de minuties sont normalisés en respectant l'angle des minuties et la fréquence locale des crêtes. Les modèles résultants sont classés à l'aide d'un quantificateur de vecteur d'apprentissage (KOHO-NEN et al., 1992) formé de manière supervisée pour faire la distinction entre les minuties et les non-minuties. Les auteurs ont obtenu une précision de classification de 87% et une réduction d'environ 4% de l'erreur d'appariement des empreintes digitales lorsque leur algorithme de vérification des minuties était intégré dans le système de vérification des empreintes digitales basé sur les minuties décrit par JAIN et al., 1997.

CHIKKERUR et RATHA, 2005 ont proposé deux vérificateurs de minuties. Le premier est basé sur un réseau à propagation avant afin de classifier les entrées en tant que voisinage de minuties ou non-minuties. Le deuxième encode les voisinages de minuties sous la forme d'une somme linéaire d'images de base composées de fonctions élémentaires multi-résolution de Gabor. Une

classification bayésienne paramétrique est ensuite appliquée. Les auteurs ont rapporté une exactitude de vérification de minuties de 98%.

## 2.6 Normes d'encodage des minuties

Des normes ont été introduites pour définir la manière dont les informations sur les minuties doivent être codées. Le modèle de coordonnées des minuties adopté par ANSI / NIST-ITL 1 (2007) est différent de ceux adoptés par d'autres normes telles que ANSI / INCITS 378 (2004), ISO / IEC 19794-2 (2005) et CDEFFS (2008). Par exemple, ISO / IEC 19794-2 (2005) nécessite d'extraire à la fois les squelettes des crêtes et des vallées et de placer : (i) les minuties de type bifurcation en correspondance avec les terminaisons du squelette des crêtes ( $CN(p) = 3$ ); et (ii) les minuties de type terminaison en correspondance avec les bifurcations dans le squelette des vallées (ceci exploite la dualité de terminaison / bifurcation). La direction de minutie  $\theta$  est calculée dans les deux cas (terminaison et bifurcation) comme la bissectrice des deux branches les plus proches angulairement au départ de la minutie.

L'objectif principal des normes est de réaliser l'interopérabilité entre les minuties modèles extraites par différentes approches. A cet effet, des règles claires et non ambiguës devraient être données. Cependant, aucune des normes actuelles n'est suffisamment claire et exhaustive et de nouveaux efforts doivent être réalisés pour les améliorer. L'évaluation de l'interopérabilité menée dans les projets a clairement mis en évidence de telles limites. Les principaux problèmes sont :

- La position des minuties est souvent définie en recourant au squelette d'une image d'empreinte binaire, mais le squelette lui-même dépend des algorithmes d'amélioration, de binarisation et d'amincissement.
- Certains critères sont donnés pour valider les minuties et filtrer les minuties parasites (par exemple, si l'une des branches partant d'une minutie ne peut pas être suivie pendant plus d'une longueur donnée, la minutie est invalide), mais l'application itérative non ordonnée de ces règles peut également conduire à la suppression involontaire de minuties valides.
- Aucune règle spécifique n'est donnée pour définir comment traiter des régions très bruyantes ou des régions de courbures élevées (c'est-à-dire des singularités) où les minuties ont tendance à se regrouper.

## 2.7 Appariement des empreintes digitales

L'appariement des empreintes digitales représente la tâche la plus triviale dans un système de reconnaissance. Il consiste à comparer deux images d'empreintes avec un degré de similitude sous forme d'une décision binaire (similaire/ non similaire). Dans la suite de notre rapport de thèse, nous désignerons l'empreinte d'un individu acquise au moment de la vérification par empreinte requête  $Q$  (Query en anglais). Et nous utilisons le terme modèle  $T$  (Template en anglais) pour désigner l'image de l'empreinte de référence préalablement acquise et stockée dans une base de données. Lorsque l'on compare deux empreintes digitales, deux hypothèses sont envisageables :

- Soit les deux empreintes sont deux acquisitions d'un même doigt d'une même personne, dans ce cas on dit que les empreintes sont correspondantes.
- Soit les deux empreintes ne sont pas issues d'un même doigt, dans ce cas on dit que les empreintes sont non correspondantes.

Plusieurs méthodes d'appariement des empreintes digitales, capables de fournir automatiquement un score de comparaison reflétant la probabilité de correspondance entre deux empreintes digitales, ont été développées. La plupart de ses méthodes n'ont aucune difficulté en cas des images de bonne qualité. Cependant, dans la réalité, deux impressions d'un même doigt, même prises dans un intervalle de temps très court, ne peuvent jamais donner une égalité parfaite, notamment parce que l'individu ne présente jamais deux fois son doigt de la même façon, en exerçant la même pression sur le capteur etc. Ainsi, par exemple, un déplacement du doigt de  $2mm$  qui est imperceptible à l'œil humain provoque une translation d'à peu près 40 pixels dans une image scannée à une résolution de  $500dpi$  (JAIN et MALTONI, 2003). Donc les algorithmes de comparaison doivent prendre en compte tous ces paramètres. La figure 2.6 illustre quelques exemples des images d'une même empreinte digitale extraites de la base de données *FVC2002*.



**FIGURE 2.6** Variations intra-classe d'une même empreinte digitale, (a) le doigt est incliné à gauche sur le capteur d'empreinte, (b) le doigt est incliné à droite, (c) le doigt est plus pressé, (d) le doigt est légèrement pressé, (e) une partie du doigt n'est pas apposée sur le capteur d'empreinte, (f) le doigt est correctement apposé sur le capteur d'empreinte, (g) le doigt est sale, (h) le doigt est propre (JAIN et MALTONI, 2003)

Dans la littérature, diverses approches d'appariement ont été formulées, elles sont classifiées en trois grandes familles :

### 2.7.1 Corrélation

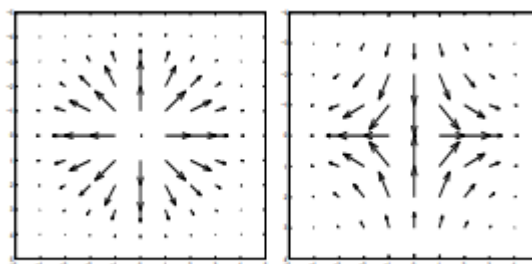
Génériquement, l'appariement par corrélation des images survient lorsque deux images d'empreintes sont superposables et leur similarité est calculée à travers la corrélation entre les pixels correspondants pour différents alignements. Cependant, cette opération bien qu'elle s'avère simple, conduit rarement à des résultats acceptables, notablement à cause des changements indésirables de la structure globale, de l'illumination et du contraste de l'image, qui sont liés aux distorsions de l'état de la peau. En fait les différentes impressions d'une même empreinte peuvent donner des images très différentes, ce qui rend les valeurs de leurs pixels différents (voir la Figure 2.6). De plus, ce processus peut exiger des coûts calculatoires importants.

Dans la littérature spécialisée, plusieurs alternatives permettant de pallier quelques problèmes associés à l'appariement basé-corrélation ont été proposées :

CHARLES L. WILSON, 1997 ont mis en œuvre une méthode basée sur le partitionnement des deux images afin de les comparer localement. La corrélation maximale mesure la similarité pour chaque paire de régions dans le domaine de Fourier.

BAZEN et al., 2000 ont surmonté le problème de la distorsion non linéaire de l'empreinte digitale en effectuant une corrélation locale. Les régions "intéressantes" dans l'image d'empreinte digitale sont sélectionnées pour effectuer cette corrélation puisque les auteurs ont considéré que les arêtes simples ne portent aucune information à l'exception de leur orientation et de leur fréquence. Les régions "intéressantes" comprennent les régions autour des minuties, les régions de fortes courbures et les régions autour des points singuliers tels que le core et le delta.

NILSSON et BIGUN, 2003 ont procédé à l'alignement des points singuliers avec corrélation. Les points singuliers sont extraits du champ d'orientation complexe estimé à partir de la structure globale de l'empreinte digitale, c'est-à-dire le motif global des crêtes et des vallées. Des filtres complexes, appliqués au champ d'orientation dans plusieurs échelles de résolution, sont utilisés pour détecter les points core et delta. Deux filtres différents sont utilisés, un pour le point de type core et un pour le point de type delta (voir Figure 2.7).



**FIGURE 2.7** Cartes de champs d'orientation, à gauche : le filtre h1, détecte la symétrie de type "core", à droite : le filtre h2, détecte la symétrie de type "delta" tiré de NILSSON et BIGUN, 2003.

JIN et al., 2004 ont proposé une méthode de corrélation basée sur les ondelettes et la transformée de Fourier-Mellin afin d'atténuer les problèmes de distorsions, les variations de position, d'échelle et d'orientation (Figure 2.8). La transformée en ondelettes avec sa fonction de compactage énergétique, est utilisée pour réduire le bruit dans le domaine de basse fréquence après la décomposition de l'image, rendant ainsi les images d'empreintes digitales moins sensibles à la distorsion de la forme. La transformée de Fourier-Mellin (FMT) est considérée pour produire une fonction d'invariance de translation, de rotation et d'échelle.

OUYANG et al., 2006 ont repris le produit normalisé dans l'espace de Fourier (Phase-Only Correlation) combiné à un descripteur de Fourier-Mellin (FMD) (Figure 2.9). Le descripteur de Fourier-Mellin est employé pour aligner les deux images d'empreintes digitales comparées.

KUNDU et RAY, 2015 ont proposé récemment une méthode de corrélation basée sur la somme de la distance de Hamming entre l'empreinte modèle et l'empreinte requête. Les distances de Hamming calculées indiquent le pourcentage de similarité entre deux points correspondants dans les deux images d'empreintes digitales. Le procédé proposé implique des opérations de calcul au niveau des bits et nécessite moins d'étapes de prétraitement.

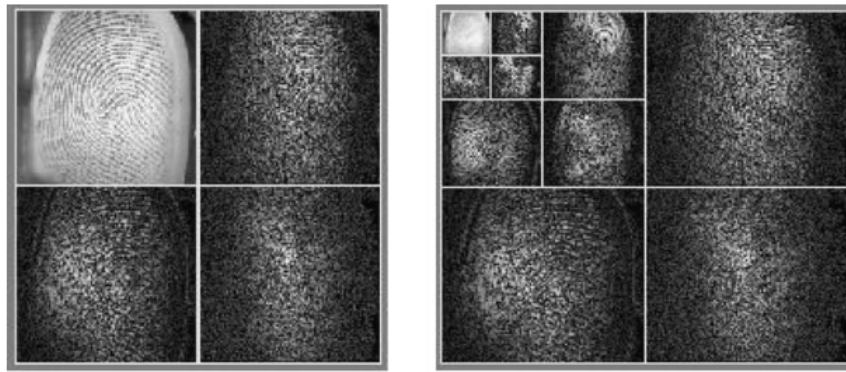


FIGURE 2.8 Décomposition en ondelettes 2D d'une image d'empreinte digitale tiré de JIN et al., 2004.

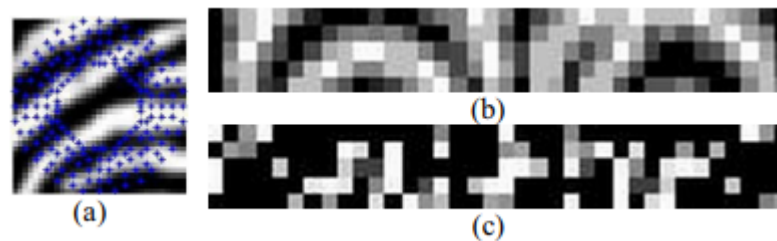


FIGURE 2.9 Processus de FMD local tiré de OUYANG et al., 2006, (a) échantillon polaire sur le bloc d'image d'empreinte digitale, (b) échantillon polaire local de (a), (c) FMD de (a).

## 2.7.2 Singularités de ligne d'empreintes digitales

Lorsque la qualité de l'image de l'empreinte digitale est mauvaise l'extraction des minuties est très difficile voire même impossible (JONATHAN D. STOSZ, 1994). D'autres particularités des rides d'empreinte telles que l'orientation locale, la fréquence, la texture, les pores de respirations, la forme des rides etc. peuvent être extraites plus facilement que les minuties, cependant la distinction de ces singularités est faible, pour cela ces techniques sont très peu utilisées.

Une des plus populaires méthodes d'appariement à base de l'information texture est le FingerCode de JAIN et al., 2000. Le principe de base de cette méthode est de comparer les cartes d'orientation. En fait, l'empreinte est caractérisée par un pavage circulaire centré sur un core de l'empreinte. Puis, dans chaque secteur de ce pavage, la valeur moyenne de la carte d'orientation locale est calculée au moyen d'un banc de filtres de Gabor. La représentation finale est un vecteur de taille fixe, permettant des calculs de distance simples entre représentation d'empreintes digitales. Un ensemble de rotations du FingerCode est calculé lors du codage et la distance conservée est la plus petite des distances entre tous les appariements de FingerCode (Figure 2.10).

Les caractéristiques FingerCode ont été exploitées dans des travaux ultérieurs. JIANG et al., 2006 ont incité à construire des patches de carte d'orientation et de fréquence de crêtes autour du core.

Une variante récente du FingerCode a été développée par SEIN et WIN, 2012, qui repose sur la combinaison d'un score à base de FingerCode et d'un score utilisant des distances entre des patches de carte d'orientation centrés et orientés sur le core.

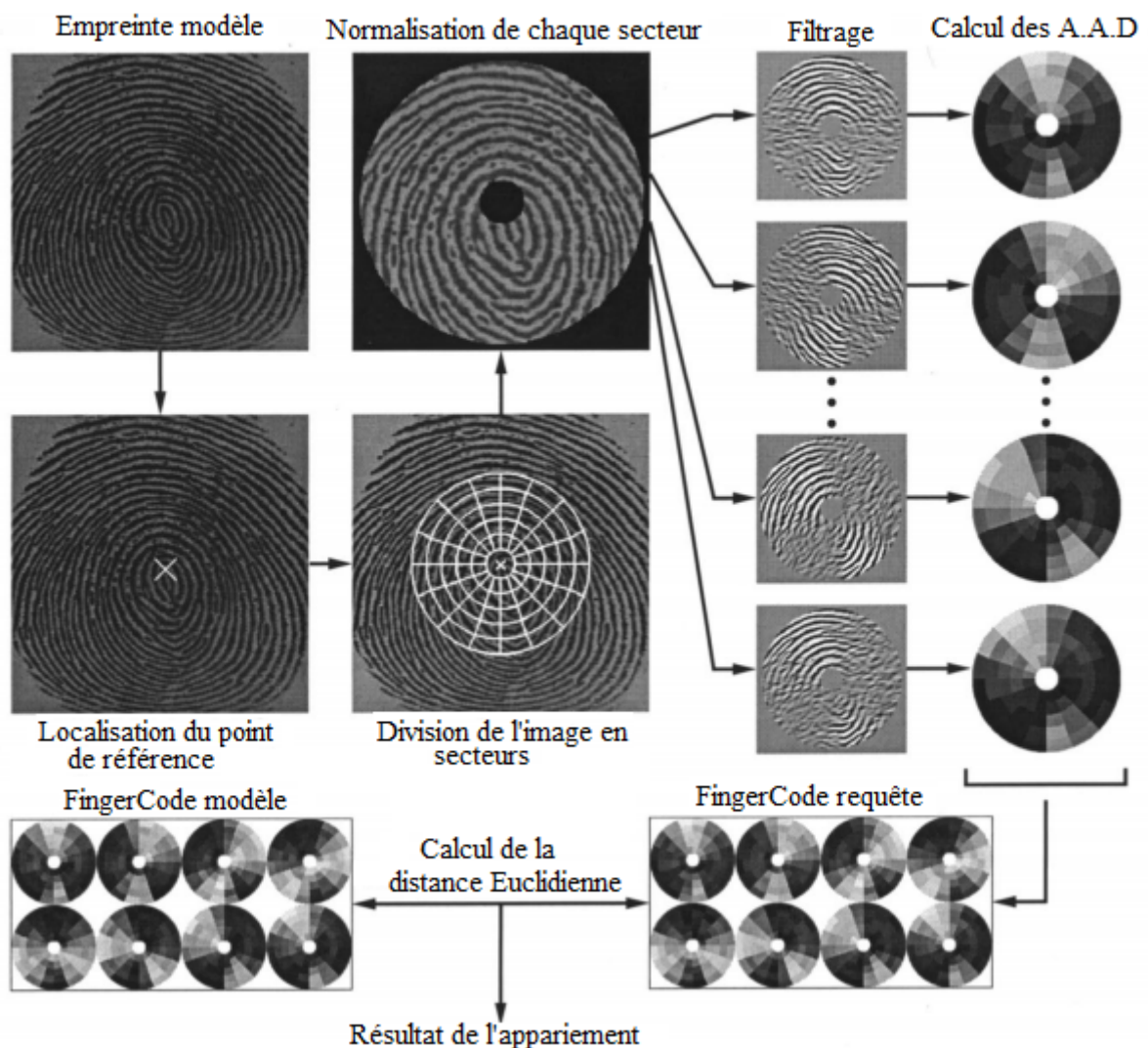


FIGURE 2.10 Diagramme du système de vérification à base du FingerCode tiré de JAIN et al., 2000.

PAREKH et al., 2013 ont présenté une méthode d'appariement d'empreintes digitales utilisant un ensemble de caractéristiques basées sur la texture. Les caractéristiques sont dérivées d'un coefficient de corrélation, d'un coefficient d'entropie et d'un coefficient d'énergie. Chacune de ces trois caractéristiques est représentée comme des valeurs scalaires et le vecteur caractéristique combiné est un vecteur à trois éléments.

### 2.7.3 Minuties

C'est l'approche la plus utilisée dans la littérature, les minuties sont extraites à partir des deux empreintes digitales et stockées sous forme d'un ensemble de points dans le plan de deux dimensions. L'appariement des minuties consiste à trouver l'alignement entre deux modèles qui maximise le nombre de paires de minuties mises en correspondance. De plus, les méthodes d'appariement des minuties peuvent être classifiées en locales et globales (JIANG et al., 2006), alignées ou non (ZHU et al., 2005), etc..

Les résultats de l'étape d'extraction des minuties est, au moins, un ensemble de minuties.

Les empreintes modèle  $T$  et requête  $R$  possèdent  $n$  et  $m$  minuties, respectivement. Une minutie  $M_j$  de  $R$  est considérée appariée avec une autre  $M_k$  de  $T$  lorsqu'elle se trouve dans la boîte de tolérance de  $M_k$ . La boîte de tolérance est définie comme étant la différence maximale en termes de distance spatiale et directionnelle permise pour compenser les erreurs inévitables faites par les extracteurs de minuties et les changements de positions dus aux distorsions.

Évidemment, il est indispensable d'obtenir le déplacement optimal et l'alignement rotationnel des empreintes pour maximiser le nombre de minuties appariées. Ceci implique aussi le redimensionnement et des transformations géométriques avancées. Après alignement, un score d'appariement est calculé. Accomplir un appariement optimal n'est pas une tâche triviale lorsque l'alignement correct n'est pas connu, comme dans la plupart des cas pratiques. Par exemple, une minutie de  $R$  peut se trouver à l'intérieur de la boîte de tolérance de deux minuties ou plus. Un algorithme d'affectation, préférablement rapide et simple, est souvent employé pour cette tâche. Finalement le score final d'appariement peut être calculé par une formule comme suit :

$$score = \frac{k}{(n+m)/2} \quad (2.2)$$

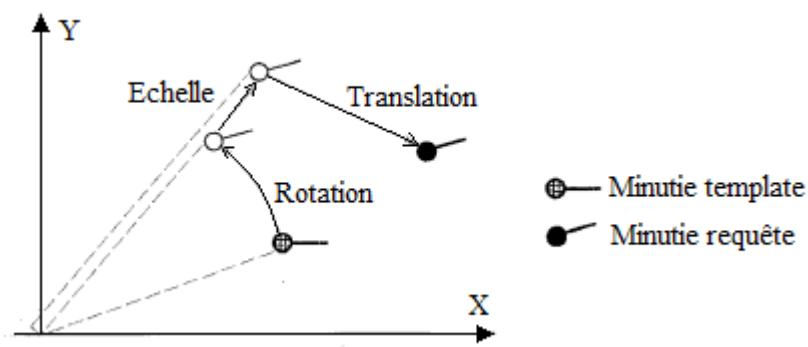
Où  $k$  est le nombre des minuties appariées. C'est une expression simple commune. Cependant des modèles avancés exploitent d'autres informations telles que la qualité des minuties et des paramètres ajustés par des techniques d'optimisation.

L'appariement des minuties peut être divisé en deux familles :

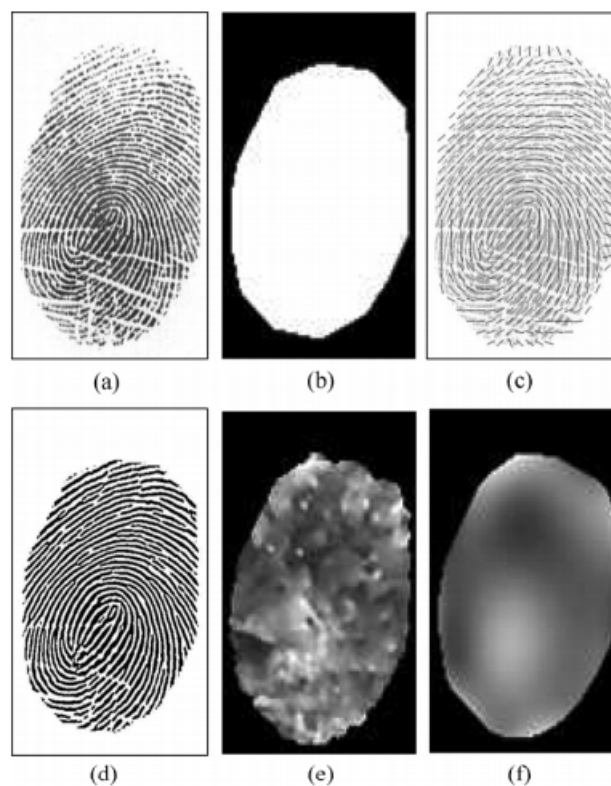
- **Appariement global** : les algorithmes de ce type nécessitent de retrouver explicitement les paramètres d'alignement en prenant en considération toutes les minuties de manière globale. Il s'agit d'estimer les paramètres de transformation (translation, rotation et changement d'échelle) durant le processus d'appariement en discrétisant l'espace de recherche. Ces algorithmes, sans pré-alignement explicite, sont fiables en termes de performance mais leur complexité de calcul est assez importante puisque les composants à aligner sont, en nombre de trois au minimum, (deux directions et un angle). Souvent, une étape de pré-alignement qui est basée sur d'autres caractéristiques extraites comme les points singuliers ou les cartes d'orientation est nécessaire dans ce type de méthodes d'appariements.

La méthode par la transformée de Hough est la méthode la plus représentative de l'appariement global. La transformée de Hough a été proposée par DUDA et HART, 1972 comme une technique pour l'isolation des objets de formes géométriques simples (des lignes, des cercles, des courbes, ... etc.) dans l'image. RATHA et al., 1996 ont développé une variante de l'algorithme classique nommée la transformée de Hough généralisée. L'ensemble de toutes les transformations permises est discrétisé, et pour chaque transformation, le score correspondant est calculé. La transformation avec le score maximal est considérée comme la bonne (Figure 2.11).

Puis vient l'emploi des méthodes qui se basent sur la corrélation d'images. Nous citons à titre d'exemple la méthode proposée par DINGRUI et JIE, 2006 et qui consiste à utiliser la carte de densité pour la représentation globale des empreintes digitales. Un modèle polynomial est utilisé pour approximer la carte de densité, et ce modèle est considéré comme un reflet intuitif de la densité des crêtes. Un exemple des résultats de chaque étape du calcul de la carte de densité est illustré dans la figure 2.12.

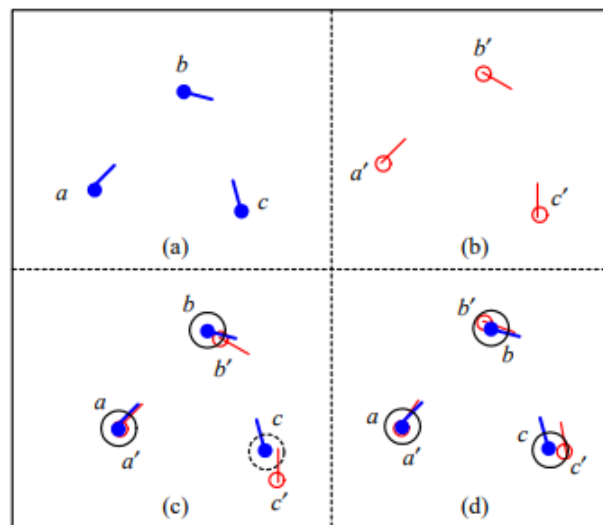


**FIGURE 2.11** Exemple d'application d'une transformation à une minutie tiré de RATHA et al., 1996.



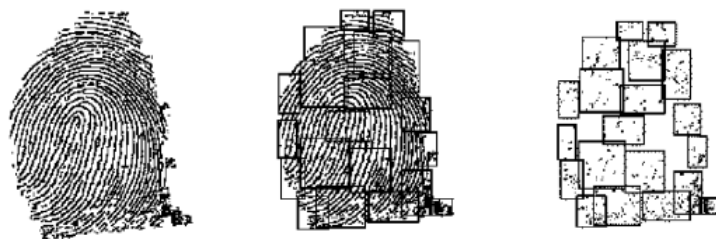
**FIGURE 2.12** Exemple des résultats de chaque étape du calcul de la carte de densité tiré de DINGRUI et JIE, 2006; (a) empreinte digitale originale; (b) région effective enregistrée en utilisant un code de chaîne à 16 points; (c) champ d'orientation; (d) image d'empreinte digitale améliorée; (e) carte de densité grossière et (f) carte de densité modélisée. En (e) et (f), les valeurs de niveau de gris normalisées sont utilisées pour indiquer la distance de crête.

D'autres méthodes globales utilisent les clusters de minuties comme celle développée par ZHU et al., 2005. Cette méthode de correspondance de minutie est basée sur l'alignement global de plusieurs paires de minuties de références (Multiple Reference Minutiae MRM). Les minuties de références sont généralement distribuées dans différentes régions d'empreintes digitales. Lors de l'appariement, ces paires de minuties de références doivent être globalement alignées (Figure 2.13).



**FIGURE 2.13** Exemple d'alignement des minuties tiré de ZHU et al., 2005 ; (a) ensemble des minuties modèles ; (b) ensemble des minuties requêtes ; (c) alignement basé sur la paire de minuties  $(a, a')$ , et deux paires de minuties en correspondances sont trouvées ; (d) alignement basé sur deux paires de minuties  $(a, a')$  et  $(b, b')$ , et trois paires de minuties en correspondances sont trouvées.

FAN et al., 2000 ont proposé un modèle de graphe basée sur la logique floue (fuzzy bipartite weighted graph model) pour résoudre le problème de correspondance des empreintes digitales. L'image de l'empreinte est d'abord pré-traitée pour former les clusters des points caractéristiques. Ensuite, vingt-quatre attributs sont extraits pour chaque cluster de point caractéristique. Les attributs sont caractérisés par des valeurs floues. Les attributs d'une empreinte test sont considérés comme l'ensemble des nœuds gauches dans le graphe, et les attributs de l'image d'empreinte digitale modèle sont considérés comme l'ensemble des nœuds droits dans le graphe. Ainsi le problème d'appariement des empreintes digitales est converti en un problème de correspondance de graphe biparti pondéré flou (Figure 2.14).



**FIGURE 2.14** Processus de construction des clusters des points caractéristiques dans une image d'empreinte digitale tiré de FAN et al., 2000.

D'autres travaux d'appariement global par les algorithmes évolutionnaires ont été réalisés. En particulier, TAN et BHANU, 2006 ont mis l'accent sur les algorithmes génétiques (GA) comme solution globale optimisée pour la transformation entre deux ensembles de minuties extraites de deux images d'empreintes digitales différentes. Afin de traiter les images d'empreintes digitales de mauvaise qualité, une fonction de fitness basée sur les

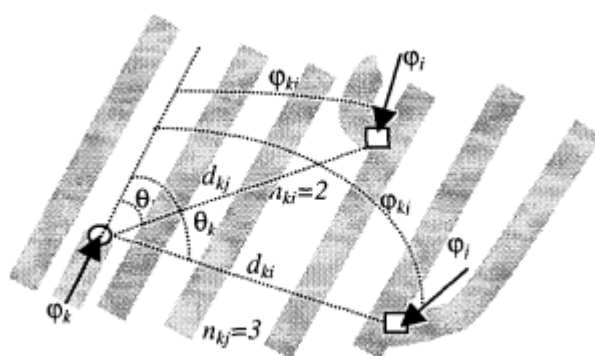
propriétés locales de chaque triplet de minuties est retenue. Ces propriétés locales comprennent les angles, la direction du triangle, la densité des minuties, le nombre de crêtes, etc.

SHENG et al., 2009 ont suggéré une méthode génétiquement guidée afin d'optimiser la fonction consensus d'appariement pour l'alignement et la vérification simultanée des empreintes digitales. La méthode proposée utilise la fonctionnalité de recherche globale d'un algorithme génétique (GA) avec une opération de correspondance locale pour l'initialisation de la population afin d'identifier l'alignement global optimal ou quasi-optimal entre deux empreintes digitales.

- **Appariement local des minuties** : La mise en correspondance locale est basée sur le calcul de la similarité suivant des structures locales de minuties, dans le but d'obtenir l'invariance relative aux translations et aux rotations. Pour l'alignement des minuties, les régions sont associées à des sous-groupes de minuties qui présentent un certain type de relation, principalement en fonction de la localisation et de la proximité. Par conséquent, ces sous-groupes de minuties sont organisés en structures locales et peuvent être construits sous différentes hypothèses.

La multiplication des travaux sur l'appariement local à base des minuties a entraîné la mise au point de nombreux schémas traitant la mise en correspondance de ces points caractéristiques de manières différentes. Les stratégies d'appariement local de minuties proposées peuvent être regroupées en deux approches principales :

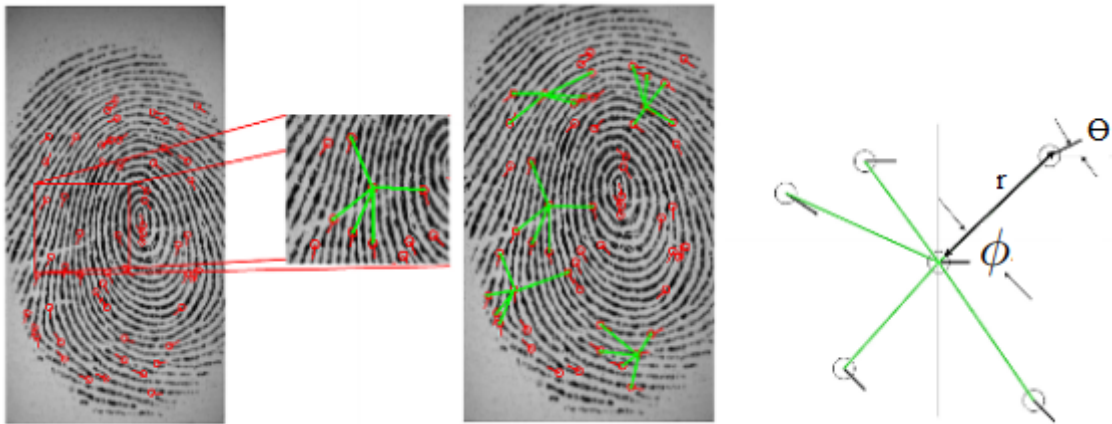
- **Les structures centrées sur une minutie** : ce concept a fait l'objet d'un certain nombre de travaux. Nous citons parmi eux : (i) les structures par plus proches voisins, (ii) les structures à rayon fixe.
  - (i) Les structures par plus proches voisins : Ce concept a été introduit par JIANG et YAU, 2000 qui définissait un descripteur par une minutie centrale et ses deux plus proches voisines et utilisait les distances entre les minuties comme caractéristiques. Les distances entre les minuties fournissent alors des caractéristiques du descripteur invariante aux rotations affines (Figure 2.15).



**FIGURE 2.15** Structure locale formée d'une minutie et ses deux plus proches voisins tirée de JIANG et YAU, 2000.

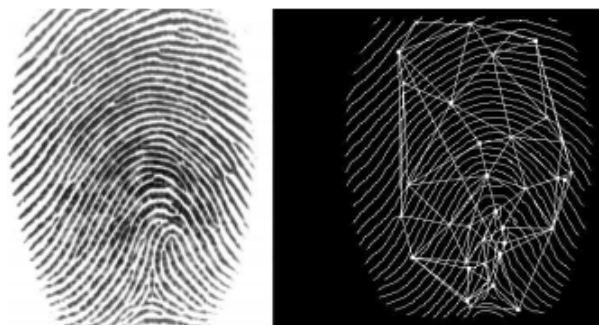
CHIKKERUR et al., 2005 ont proposé d'étendre le descripteur aux  $K$  plus proches (Figure 2.16). Ce descripteur nommé  $K$ -Plet est formé à partir de la minutie de référence en considérant ses  $K$  plus proches voisins en termes de distance euclidienne. Les minuties les plus proches voisines sont réparties

équitablement dans les quatre quadrants autour de la minutie centrale. Les voisines sont ensuite triées suivant l'ordre croissant de leurs directions relatives à la minutie de référence. Puis, un graphe orienté est construit où chaque sommet représente une minutie et chaque voisinage est représenté par une arête orientée, et la consolidation est faite par l'algorithme Coupled BFS qui propage simultanément dans les deux empreintes mais en ne passant que par les sommets appariés, à la fin un score est calculé à partir du nombre maximale des minuties appariées.



**FIGURE 2.16** Structures K-plet, à gauche : illustration de K-plets définie dans une empreinte digitale, à droite : système de coordonnées locales de K-plet, CHIKKE-RUR et al., 2005.

Une autre variante, développée par DENG et HUO, 2005, sélectionne les minuties les plus proches parmi les sommets liés d'une triangulation de Delaunay afin de restreindre le nombre potentiellement très élevé de minuties voisines quand  $K$  augmente. Une telle représentation graphique permet de limiter le nombre d'arêtes à examiner (Figure 2.17).



**FIGURE 2.17** Représentation d'une empreinte digitale à l'aide de la triangulation de Delaunay des minuties tirée de DENG et HUO, 2005.

Il est bien connu que l'inconvénient majeure des structures basées voisinage est la possibilité de manquer ou d'ajouter un voisin à cause des problèmes d'oubli ou de fausses minuties résultantes du module d'extraction.

- (ii) les structures à rayon fixe : Il s'agit de la deuxième alternative d'appariement par les structures centrées sur une minutie. Dans cette approche, on crée une structure locale à partir d'une minutie centrale en utilisant une distance maximale ( $dm_{max}$ ) dans le graphe  $(V_i, E_i)$  défini comme suit : (1) un ensemble de sommets  $V_i$  contenant toutes les minuties dont la distance spatiale est inférieure ou égal à  $dm_{max}$  et, (2) un ensemble d'arêtes  $E_i$  reliant la minutie centrale à tous les sommets de  $V_i$ . Il est à noter que la distance  $dm_{max}$  est spécifiée comme paramètre d'entrée et les structures locales sont définies par l'ensemble des arêtes selon le sens des aiguilles de la montre, tout en utilisant des distances appropriées ainsi que des angles absolus et relatifs.

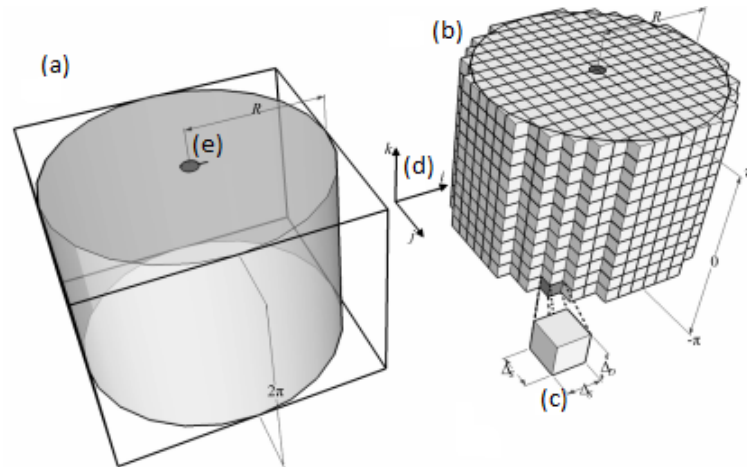
Le nombre de minuties étant variable, le processus de comparaison des descripteurs locaux de minuties est plus complexe que pour des descripteurs par plus proches voisins, mais aboutit à une plus grande robustesse aux données bruitées ou occultées.

Les descripteurs à rayon fixe ont été introduits par RATHA et al., 2000, qui construisaient un graphe orienté de minuties, où chaque minutie se voit dotée d'un ensemble d'arêtes vers les minuties voisines dans un rayon fixe.

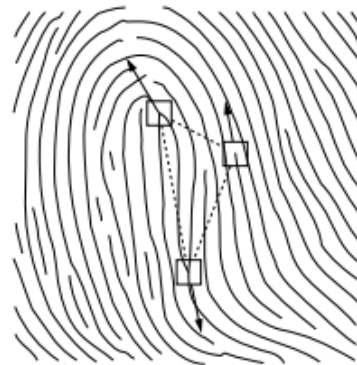
Le même type de descripteur est élaboré par CAPPELLI et al., 2010, appelé le Minutiae Cylinder Code (MCC) (Figure 2.18). Le MCC permet de définir un codage invariant de longueur fixe pour chaque minutie en fonction d'une discrétisation d'un cuboïde dans les cellules. Le cylindre est configuré en utilisant le rayon comme base et la différence de direction entre les minuties comme hauteur. Ainsi, le MCC est composé d'un ensemble de disques, chaque disque correspondant à une différence d'orientation quantifiée entre les minuties du voisinage et la minutie centrale. La présence d'une minutie est manifestée par les valeurs d'une fonction gaussienne centrée sur la position estimée de la minutie du voisinage par rapport à la minutie centrale. L'utilisation de fonctions gaussiennes pour représenter la présence d'une minutie permet de donner une certaine marge d'erreur sur la localisation et l'orientation des minuties. L'idée sous-jacente est de permettre la représentation binaire des structures locales de deux minuties pour une correspondance rapide en termes du temps de calcul.

- **Les structures non centrées** : il s'agit des structures locales appelées les triplets de minuties (GERMAIN et al., 1997). Initialement exploitées pour l'indexation des empreintes digitales, ces structures triangulaires sont également intéressantes pour produire des structures locales. Contrairement aux structures à K plus proches voisins décrites ci-dessus, les structures triangulaires ne sont pas définies autour d'une minutie centrale, mais directement comme un ensemble de triplets voisins (Figure 2.19).

Les triplets de minuties peuvent être construits par un type de triangulation et s'appuient sur des informations concernant les angles des sommets, la longueur des côtés et certaines propriétés triangulaires telles que la direction et l'orientation. Plusieurs chercheurs ont abordé ce concept de structure triangulaire, nous citons à titre d'exemple les travaux de PARZIALE et NIEL, 2004; MEDINA-PÉREZ et al., 2012; YILONG YIN, 2005; CHEN et al., 2006; YANG et al., 2012. Les principales différences entre ces variantes reposent sur le type de triangulation choisi et les caractéristiques géométriques utilisées pour caractériser les triplets.



**FIGURE 2.18** Représentation graphique de la structure cylindrique locale associée à une minutie tiré de CAPPELLI et al., 2010 : (a) cylindre avec le cuboïde englobant, (b) discrétisation du cuboïde en cellules (c) de taille  $\Delta S \times \Delta S \times \Delta D$  : seules les cellules dont le centre est dans le cylindre sont montrées. Le cuboïde est tourné de sorte que (d) l'axe  $i$  est aligné avec (e) la direction de la minutie correspondante.

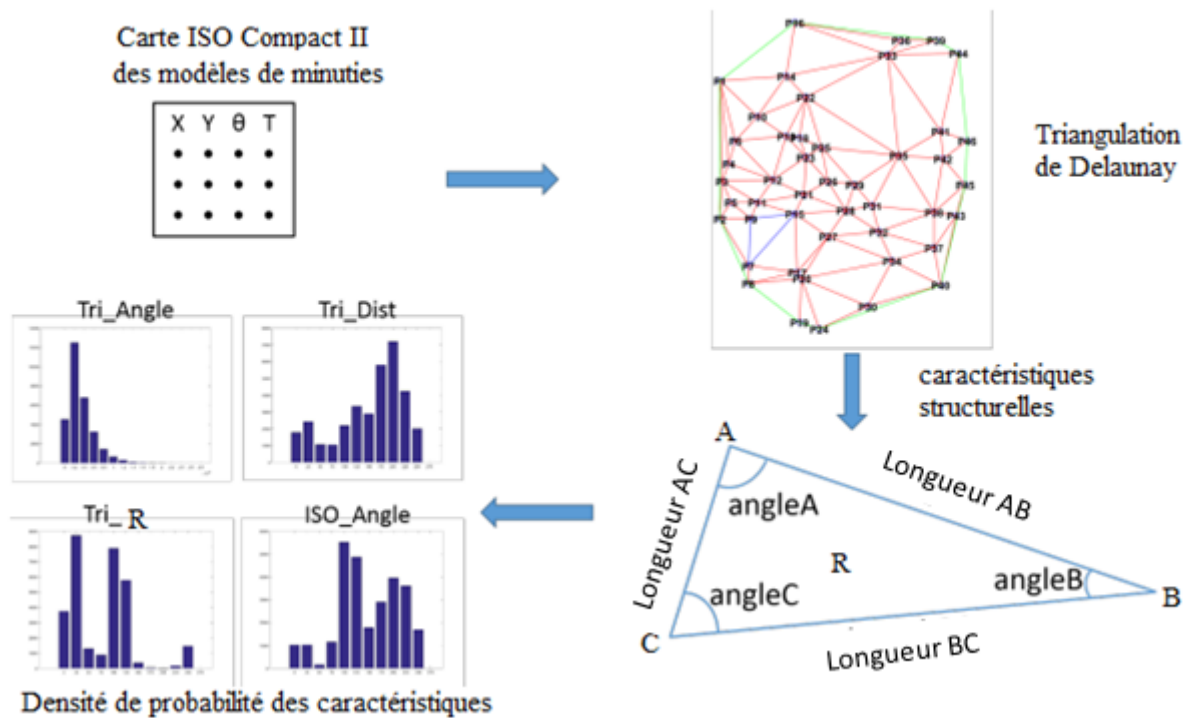


**FIGURE 2.19** Triplet de minuties sur l'image amincie d'une empreinte digitale tiré de GERMAIN et al., 1997.

PARZIALE et NIEL, 2004 ont décrit une méthode qui connecte les minuties à l'aide d'une triangulation de Delaunay et analyse la position et l'orientation de chaque minutie par rapport à ses voisines obtenues par la structure triangulaire. Nous allons développer en détail les concepts et l'utilisation de cette méthode un peu plus tard dans le chapitre 4.

Récemment VIBERT et al., 2016 ont repris le même concept basé sur la triangulation de Delaunay pour créer un vecteur d'attributs où les sommets des triangles sont les minuties. Ce vecteur d'attributs permet de décrire un ensemble de minuties. Pour chacun des triangles, l'ensemble des caractéristiques calculées sont les valeurs des angles d'un triangle, les longueurs des côtés, l'aire du triangle et l'orientation des minuties. A partir de ce vecteur de caractéristiques, un histogramme normalisé est calculé afin de prendre en compte la densité de chaque ensemble de paramètres (Figure 2.20).

MEDINA-PÉREZ et al., 2012 ont conçu une stratégie de vérification améliorée en



**FIGURE 2.20** Schéma général utilisé pour le calcul des caractéristiques à partir d'une représentation par la triangulation de Delaunay de l'ensemble des minuties d'une empreinte digitale, tiré de VIBERT et al., 2016.

s'appuyant sur des triplets de minuties (m-triplets), appelé M3gl. L'auteur a employé une représentation des triplets de minuties dans le sens horaire sans avoir besoin d'une minutie centrale. Pour cela une mesure de similarité qui effectue trois rotations possibles des triplets a été mise au point pour trouver la meilleure correspondance de minuties en réalisant l'invariance de l'ordre de minutie et la sensibilité à la réflexion des triplets de minuties. Nous allons nous focaliser sur les détails liés à cette méthode dans le chapitre 3 et 4.

CHEN et al., 2006 ont employé une fonction basée sur un ensemble de caractéristiques locales de triangle pour faire face aux empreintes digitales déformées, appelée (Fuzzy Feature Match FFM). L'empreinte digitale est représentée par l'ensemble de caractéristiques floues : l'ensemble de caractéristiques locales du triangle. Ensuite, une mesure de similitude floue pour deux triangles est introduite et étendue pour construire un vecteur de similarité incluant les similitudes de tous les triangles dans les deux empreintes digitales comparées (Figure 2.21).

Les avantages de l'appariement local des minuties sont la simplicité, la faible complexité calculatoire et la tolérance des distorsions, tandis que les techniques globales manifestent un fort pouvoir distinctif. Cependant, tous ces avantages peuvent être obtenus en adoptant des stratégies hybrides qui effectuent un appariement local des minuties suivi par une étape de consolidation. La première étape détermine les paires de minuties qui correspondent localement et extrait un

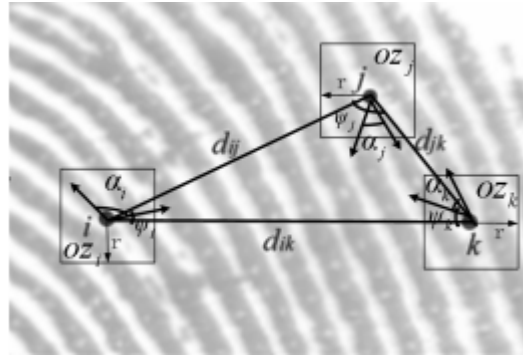


FIGURE 2.21 Structure triangulaire locale des minuties tirée de CHEN et al., 2006.

sous ensemble d'alignement candidat pour les empreintes modèle ( $T$ ) et requête ( $R$ ). La seconde étape, qui n'est pas strictement obligatoire, est destinée à vérifier le degré avec lequel les correspondances locales contribuent à l'appariement global. Récemment, la plupart des propositions d'appariement des minuties d'empreintes digitales conçues pour être mises en œuvre dans des systèmes réels ont renoncé à l'idée d'une correspondance globale en faveur d'une correspondance locale.

Généralement, les systèmes basés sur les minuties ont permis d'aboutir à des améliorations considérables en termes de fiabilité et de précision. Cependant, ils ne constituent pas toujours le meilleur compromis entre précision et robustesse lorsque les minuties présentes dans les images d'empreinte digitale sont insuffisantes ou lorsque la qualité des images est mauvaise. L'inconvénient vient de la perte d'information (empreinte partielle) et du bruit dû à plusieurs facteurs tels que l'état de la peau, le dispositif de prise de vue, la pression du doigt, etc. En fait, on ne peut pas trouver deux impressions strictement identiques de la même empreinte. Bien évidemment, ces critères affectent le résultat d'appariement et la décision finale.

Pour pallier ces inconvénients, deux solutions sont possibles : l'implication de la qualité des minuties dans les mesures de similitude des minuties ou la proposition des stratégies de correspondance à plusieurs caractéristiques.

- L'implication de la qualité des minuties dans les mesures de similitude des minuties : la précision de l'appariement des empreintes digitales à base des minuties est étroitement liée au processus d'extraction de ces dernières. Des fausses minutes peuvent être extraites en raison des erreurs, d'une part, et de la mauvaise qualité de l'image d'empreinte digitale d'entrée, d'autre part. Pour cela, de nombreux travaux ont tenté de filtrer les fausses minuties qui possèdent des scores de qualité très faibles ou bien combiner ces scores de qualité à la mesure de similarité. Nous citons principalement quatre œuvres :

WEN et al., 2013 ont intégré la qualité des minuties dans la zone de chevauchement de leurs régions en tant qu'une série de caractéristiques globales. Pour les minuties dans les zones chevauchantes, la moyenne et la variance de leurs qualités à la fois révèlent la fiabilité de l'appariement local. Une moyenne des qualités de minuties élevée indique un appariement local fiable, traitant ainsi les cas difficiles ou peu de minuties sont extraites. Une moyenne des qualités de minuties faible ou une variance de qualité élevée indique un appariement local non fiable. Cela correspond aux zones frontières ou bruyantes d'une empreinte digitale. Les minuties de mauvaises qualités ou les structures locales d'appariement non fiables sont ignorées avant de passer au calcul.

CHEN et al., 2007 ont mené des expérimentations approfondies pour évaluer deux algorithmes d'estimation de la qualité des minuties : l'un est basé sur le modèle de crêtes locales et l'autre est basé sur une corrélation avec des images de haute qualité situées autour des minuties. Ces auteurs ont étudié quatre stratégies d'appariement d'empreintes digitales en utilisant des scores de qualité relatives aux minuties. Ils ont montré que seules des combinaisons appropriées permettent d'améliorer l'exactitude de l'appariement (Figure 2.22).

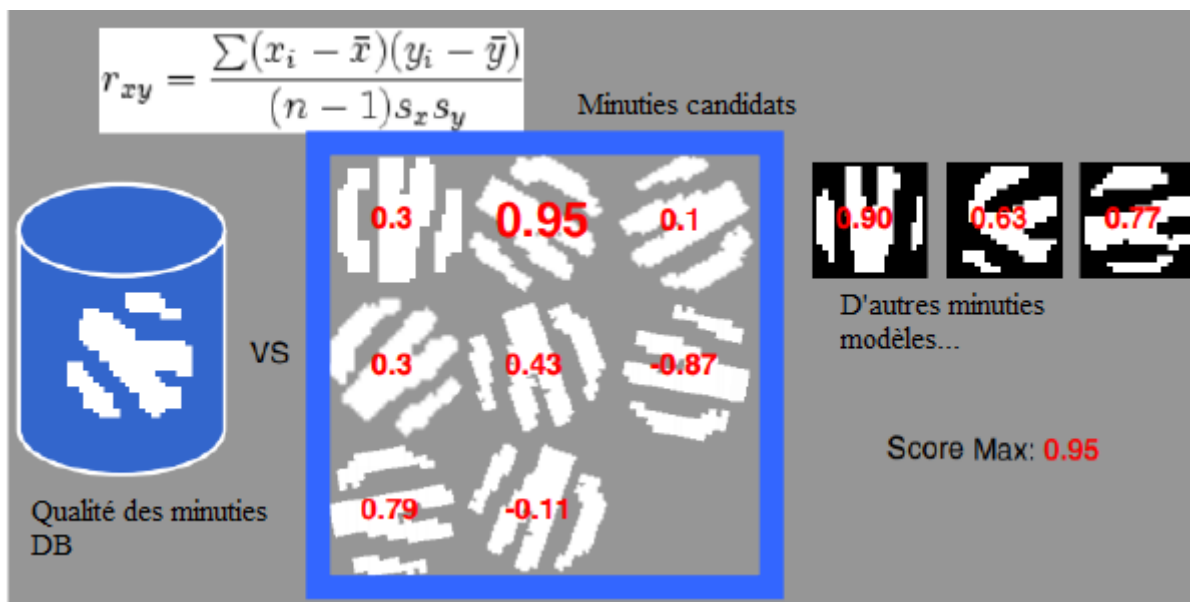


FIGURE 2.22 Méthode de corrélation pour l'évaluation de la qualité des minuties tirée de CHEN et al., 2007.

ZHENG et al., 2008 ont combiné la règle du produit et le poids linéaire des facteurs de qualité de trois niveaux l'image globale du bloc, et la structure du voisinage. Ils ont obtenu un score de qualité de minuties qu'ils ont incorporé dans l'appariement des empreintes digitales.

CAO et al., 2011 ont analysé la discrimination des minuties selon deux aspects, leur répartition spatiale globale et leur qualité locale. Ainsi, ils ont estimé la qualité des minuties et l'ont incorporé à la mesure de similitude des minuties. Les minuties voisines sont utilisées pour mesurer la qualité de la minutie centrale.

- La proposition des stratégies de correspondance à plusieurs caractéristiques : d'autres types de méthodes croisant les caractéristiques de plusieurs catégories, ont été également développées ;

JAIN et al., 2007 ont proposé un système hiérarchique de mise en correspondance des empreintes digitales qui utilise les caractéristiques des trois niveaux à savoir le niveau 1 (forme des crêtes), le niveau 2 (minuties) et le niveau 3 (pores et contours). Les caractéristiques de niveau 3, y compris les pores et les contours des crêtes, sont extraites à l'aide des filtres de Gabor et de la transformée en ondelettes et sont appariées localement à l'aide de l'algorithme ICP (Iterative Closest Point). Ils ont démontré que les caractéristiques de niveau 3 devraient être examinées afin d'affiner la mise en correspondance des minuties.

JAIN et al., 2001 ont présenté un système d'appariement d'empreintes digitales qui utilise à la fois les minuties et les informations de texture disponibles dans l'empreinte digitale. Le filtre de Gabor est appliqué pour extraire les caractéristiques à partir des cellules tessellées des deux images d'empreintes digitales comparées. Dans ce travail, les déformations non linéaires présentes dans les images d'empreintes digitales n'ont pas été prises en compte, justifié par l'utilisation de la taille petite de la zone de contact qui atténue les effets de ces déformations.

Par ailleurs, CHOI et al., 2011 ont introduit une méthode d'appariement d'empreintes digitales utilisant à la fois les caractéristiques de crête et les caractéristiques de minuties pour améliorer les performances de la reconnaissance contre les déformations non linéaires présentes dans les empreintes digitales (Figure 2.23). Les caractéristiques d'une crête sont composées de quatre éléments : le nombre de crêtes, la longueur de la crête, la direction de la courbure de la crête et le type de crête. Les caractéristiques de minuties sont le type de minuties, l'orientation et la position. Les caractéristiques de crête sont utilisées pour représenter les informations de topologie des motifs de crêtes existant entre deux minuties puisqu'elles sont invariantes aux déformations non linéaires du doigt.

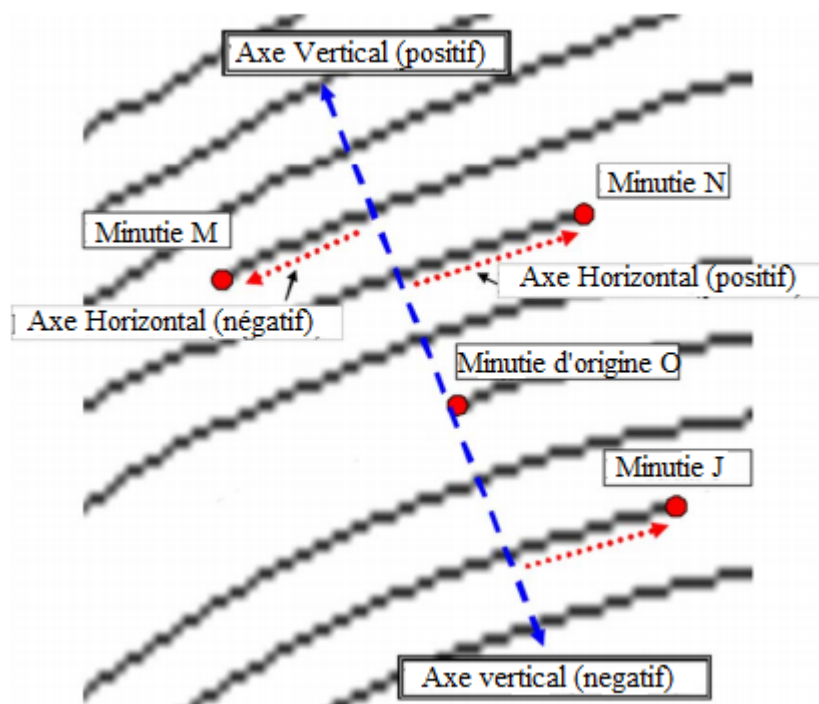


FIGURE 2.23 Coordonnées du système à base des crêtes tirées de CHOI et al., 2011.

Récemment, CHEN et LI, 2016 ont mené une étude comparative sur la combinaison de plusieurs caractéristiques afin de sélectionner la meilleure fusion des descripteurs d'empreintes digitales. Ils ont montré que plus les caractéristiques utilisées sont nombreuses, meilleures sont les performances. Cependant, au-delà de quatre caractéristiques, l'amélioration des performances est négligeable.

## 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait un tour d'horizon sur les caractéristiques principales et les différentes représentations possibles de l'empreinte digitale. Ce chapitre suggère que ce domaine de recherche est largement étudié et peut être abordé à partir de différents points, à savoir la proposition de nouvelles méthodes de vérification des empreintes digitales, l'amélioration de la précision de calcul, le développement d'algorithmes de calcul rapides. En fait, il est toujours utile de connaître les performances de chaque système de reconnaissance par les empreintes digitales sous un examen approfondi et dans des situations problématiques différentes. Cela nous a amené à étudier les avantages et les inconvénients de chacune des approches proposées.

Nous nous sommes intéressés aux approches d'appariement des empreintes digitales. Nous avons vu que l'appariement par corrélation des images s'avère simple, mais conduit rarement à des résultats acceptables, notablement à cause des changements indésirables de la structure globale, de l'illumination et du contraste de l'image, qui sont liés aux distorsions de l'état de la peau. De plus, ce processus peut exiger des coûts calculatoires importants. En outre, on peut opter pour la comparaison basée sur les singularités de ligne d'empreintes digitales telles que l'orientation locale, la fréquence, la texture, les pores de respirations, la forme des rides etc., cependant la distinction de ces singularités est faible. Pour pallier à ces difficultés, on peut comparer les empreintes digitales à partir d'un ensemble de minuties. Cette approche est la plus utilisée dans la littérature puisque les méthodes d'appariement à base de ces points caractéristiques ont permis d'aboutir à des améliorations considérables en termes de fiabilité et de précision. Dans la littérature, l'appariement des minuties peut être élaboré d'une manière locale, globale ou hybride. Récemment, la plupart des propositions d'appariement des minuties d'empreintes digitales conçues pour être mises en œuvre dans des systèmes réels ont renoncé à l'idée d'une correspondance globale en faveur d'une correspondance locale. Par ailleurs, ces méthodes ne constituent pas toujours le meilleur compromis entre précision et robustesse lorsque les minuties présentes dans les images d'empreinte digitale sont insuffisantes ou lorsque la qualité des images est mauvaise. En fait, la précision de l'appariement de l'empreinte digitale à base des minuties est étroitement liée au processus d'extraction de ces dernières. Généralement, des fausses minutes peuvent être extraites en raison des erreurs, d'une part, et de la mauvaise qualité de l'image d'empreinte digitale d'entrée, d'autre part.

Pour surmonter ses limitations, on peut filtrer les fausses minuties qui possèdent des scores de qualité très faibles ou combiner d'autres caractéristiques avec les minuties dans les stratégies de correspondance. Il faut signaler que lorsqu'on dispose d'une empreinte partielle, le nombre de minuties extraites est déjà limité et par conséquent il faut tirer davantage de caractéristiques pour éviter de rater la mise en correspondance de deux empreintes authentiques. En termes techniques, cela se traduit par un taux de pénétration très faible, conjointement à un taux de faux rejets raisonnable.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter notre descripteur quaternaire proposé pour améliorer les méthodes d'appariement basées sur les structures non centrées, en intégrant une mesure locale de similarité supplémentaire.

## Chapitre 3

# Amélioration de l'appariement des minuties par des descripteurs à base des moments orthogonaux quaternaires

### 3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons détaillé les approches d'appariement des empreintes digitales. Nous avons vu que les méthodes de comparaison à base des minuties sont les plus utilisées dans la littérature puisqu'elles permettent d'aboutir à des améliorations considérables en termes de fiabilité et de précision.

Parmi ces méthodes d'appariement des empreintes digitales à base des minuties, on trouve celles basées sur les triplets de minuties. Les avantages de ces méthodes basées sur les structures triangulaires résident dans le fait qu'elles tolèrent les déformations des empreintes digitales, qu'elles sont plus rapides et plus précises, comparées aux méthodes basées sur d'autres représentations, et qu'elles sont appropriées pour les systèmes embarqués car la représentation et la comparaison des triplets de minuties peuvent être réalisées efficacement. De plus, les triplets de minuties ont un pouvoir discriminatoire plus élevé que les structures basées sur une seule minutie ou les paires de minuties.

De nombreux chercheurs ont étudié ce type de méthodes pour traiter l'appariement des empreintes digitales, tels que PARZIALE et NIEL, 2004; MEDINA-PÉREZ et al., 2012; YILONG YIN, 2005; CHEN et al., 2006; YANG et al., 2012.

A la différence des travaux de MEDINA-PÉREZ et al., 2012, les méthodes basées sur les triplets de minuties ne remplissent pas tous les paramètres de qualité, ce qui a un impact négatif sur leur précision. Par exemple, les travaux de JIANG et YAU, 2000 sont limités par l'ordre des minuties dans le triplet et sont insensibles pour sélectionner un seul alignement. La méthode proposée par KOVACS-VAJNA, 2000 souffre de la sensibilité de la réflexion des triplets de minuties et des directions des minuties relatives aux cotés des triangles. La méthode développée par PARZIALE et NIEL, 2004 ne tolère pas les erreurs de l'extraction des minuties, et présente une sensibilité de la réflexion des triplets. La méthode introduite par JEA et GOVINDARAJU, 2005 est non déterministe et dépend à l'ordre des minuties dans le triplet.

En général, les performances de la plupart des systèmes de reconnaissance se dégradent en particulier lorsque la qualité des images est mauvaise. Dans la pratique, les caractéristiques géométriques et triangulaires des m-triplets peuvent être fortement similaires même dans le cas de deux empreintes différentes.

Dans notre première contribution, nous suggérons une nouvelle stratégie permettant d'améliorer les performances de l'algorithme M3gl proposé par MEDINA-PÉREZ et al., 2012 et

MEDINA-PÉREZ et al., 2014 en intégrant des informations locales supplémentaires dans le processus d'appariement. Pour ce faire, nous nous basons sur des informations additionnelles qui possèdent un pouvoir discriminatoire suffisamment élevé pour permettre une validation des paires de m-triplets effectivement similaires et le nettoyage des paires invalides qui ont pu être faussement appariées par l'algorithme de base. Nous interposons juste avant l'étape de consolidation globale, une étape de caractérisation des m-triplets par un ensemble de moments quaternioniques orthogonaux suivie d'une autre étape de mesure de similarité qui sert à valider les paires de m-triplets issus de l'étape d'appariement local.

Dans ce chapitre, nous commençons par une vue d'ensemble de l'algorithme M3gl avec ses différentes étapes. Nous décrivons ses limitations qui nous ont poussées à cette contribution. Puis, nous détaillons les préliminaires de l'algèbre des quaternions et des moments orthogonaux. Ensuite, nous présentons notre méthode proposée et les résultats expérimentaux qui mettent en évidence l'efficacité du chapitre 3. Les performances de différents moments orthogonaux quaternaires proposés dans la littérature sont comparées.

## 3.2 Vue d'ensemble de l'algorithme M3gl

Dans cette section, nous rappelons l'algorithme M3gl. Pour cela, nous présentons le calcul des structures des m-triplets, les composantes de la représentation triangulaire ainsi que les différentes étapes de cet algorithme.

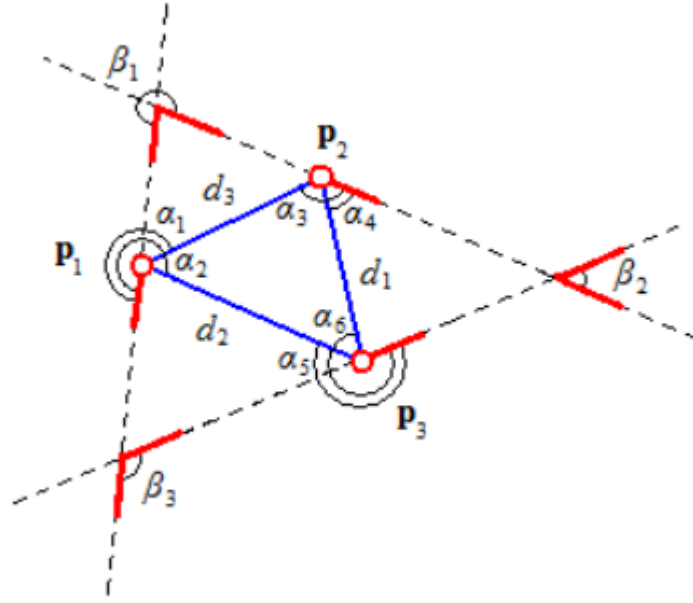
L'algorithme M3gl développé par MEDINA-PÉREZ et al., 2012 se base sur des structures locales représentées par trois minuties, appelées les triplets de minuties.

Étant donné une empreinte digitale décrite par l'ensemble de minuties  $P$ , le calcul des m-triplets est comme suit : l'algorithme M3gl cherche les minuties les plus proches dans  $P$  et construit l'ensemble des différents m-triplets. Ces derniers sont ensuite triés en fonction de la longueur du plus grand côté du triangle pour effectuer une recherche binaire lors de la sélection des m-triplets similaires.

Les composantes de la représentation des m-triplets sont illustrées dans la Figure 3.1. L'ensemble des composantes est le suivant :

- Les minuties  $p_i \in P$  sont arrangées dans le sens horaire en commençant par la minutie  $P_1$ .
- Les distances  $d_{i \in 1 \dots 3}$ , où  $d_i$  est la distance euclidienne entre les minuties différentes de  $p_i$ .
- La distance maximum  $d_{max}$ , la distance moyenne  $d_{mid}$  et la distance minimum  $d_{min}$  dans le triplet  $T$ .
- Les angles  $\alpha_{i \in 1 \dots 6}$  nécessaires pour faire tourner la direction  $\theta$  d'une minutie pour la superposer aux vecteurs associés aux deux autres minuties du triplet.
- Les angles  $\beta_{i \in 1 \dots 3}$  où  $\beta_i$  est l'angle nécessaire pour faire pivoter la direction de la minutie  $p_k$  afin de superposer à la direction de la minutie  $p_j$ .

Les m-triplets sont sensibles aux directions des minuties par rapport aux côtés du triangle (angles  $\alpha$ ). Dans cette représentation, les minuties sont disposées dans le sens horaire sans avoir besoin d'une minutie centrale. Par conséquent, afin de comparer les m-triplets, la fonction de similarité (équation 3.1) considère les trois rotations possibles des minuties. Ceci garanti l'invariance à l'ordre des minuties et la sensibilité à la réflexion des triplets de minuties.



**FIGURE 3.1** Composantes de la représentation m-triplets tirées de MEDINA-PÉREZ et al., 2012

Soit deux triplets  $t_1$  et  $t_2$ , la fonction de similarité entre les deux triplets est :

$$S_{inv}(t_1, t_2) = \max\{S_{part}(t_1, t_2), S_{part}(t_1, shift(t_2)), S_{part}(t_1, shift(shift(t_2)))\} \quad (3.1)$$

où :  $shift(t)$  est le m-triplet  $t$  déplacé dans le sens horaire et  $S_{part}$  est la fonction de similarité de base définie comme suit :

$$S_{part}(t_1, t_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } S_\theta(t_1, t_2) = 0 \vee S_d(t_1, t_2) = 0 \vee S_\alpha(t_1, t_2) = 0 \\ 1 - (1 - S_d(t_1, t_2))(1 - S_\alpha(t_1, t_2))(1 - S_\beta(t_1, t_2)), & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

La fonction de similarité de base  $S_{part}$  est définie en utilisant les fonctions  $S_\theta$ ,  $S_d$ ,  $S_\alpha$  et  $S_\beta$ , qui considèrent les différentes composantes des m-triplets. Selon l'équation 3.2, deux m-triplets sont totalement non similaires s'ils ont au moins un composant non similaire. Si toutes les similarités des composants sont supérieures à 0, la règle du produit fait augmenter la similarité si au moins un composant est proche de 1.

La fonction  $S_\theta$  incorpore l'information de rotation. Deux m-triplets sont considérés non similaires si la différence des directions des minuties est de plus de  $\pi/4$  :

$$S_\theta(t_1, t_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } \exists i(ad_\pi(\theta_i^{t_1}, \theta_i^{t_2}) > \pi/4) \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.3)$$

avec  $ad_\pi(\gamma, \delta)$  est la fonction qui calcule l'angle minimum requis pour superposer deux vecteurs de même origine et d'angles  $\gamma$  et  $\delta$  respectivement, calculée comme suit :

$$ad_\pi(\gamma, \delta) = \min(|\gamma - \delta|, 2\pi - |\gamma - \delta|) \quad (3.4)$$

La fonction  $S_d$  compare les m-triplets en fonction des longueurs des côtés du triangle formés par les trois minuties du triplet.  $S_d$  renvoie des valeurs dans l'intervalle  $[0, 1]$ .  $S_d$  renvoie 0 si au moins une différence de longueur est supérieure au seuil  $t_l$ .  $S_d$  renvoie 1 si toutes les différences

de longueur sont 0 ; c'est-à-dire que les triangles formés par les deux m-triplets sont identiques.

$$S_d(t_1, t_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } \exists i (|d_i^{t_1} - d_i^{t_2}| > t_l) \\ 1 - \max_{i=1..3} \{|d_i^{t_1} - d_i^{t_2}|\} / t_l & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.5)$$

La fonction  $S_\alpha$  compare les m-triplets en fonction des angles formés par les minuties et les côtés des triangles (les angles  $\alpha$  dans la Figure 3.1).

$$S_\alpha(t_1, t_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } \exists i (ad_\pi(\alpha_i^{t_1}, \alpha_i^{t_2}) > t_\alpha) \\ 1 - \max_{i=1..6} \{ad_\pi(\alpha_i^{t_1}, \alpha_i^{t_2})\} / t_\alpha & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.6)$$

La fonction  $S_\beta$  compare les m-triplets en fonction des directions des minuties (les angles  $\beta$  dans la Figure 3.1)

$$S_\beta(t_1, t_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } \exists i (ad_\pi(\beta_i^{t_1}, \beta_i^{t_2}) > t_\alpha) \\ 1 - \max_{i=1..3} \{ad_\pi(\beta_i^{t_1}, \beta_i^{t_2})\} / t_\alpha & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.7)$$

Les équations (3.6) et (3.7) renvoient des valeurs dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Elles renvoient 0 si au moins deux angles comparés diffèrent plus que le seuil  $t_\alpha$ . Moins les angles diffèrent, plus la valeur de similarité renvoyée par les équations est élevée ; par conséquent, les équations retournent 1 si les angles comparés sont identiques.

L'algorithme M3gl comprend trois étapes majeures (Figure 3.2) : (a) l'appariement local des minuties, (b) l'appariement global des minuties et (c) le calcul du score de similarité .

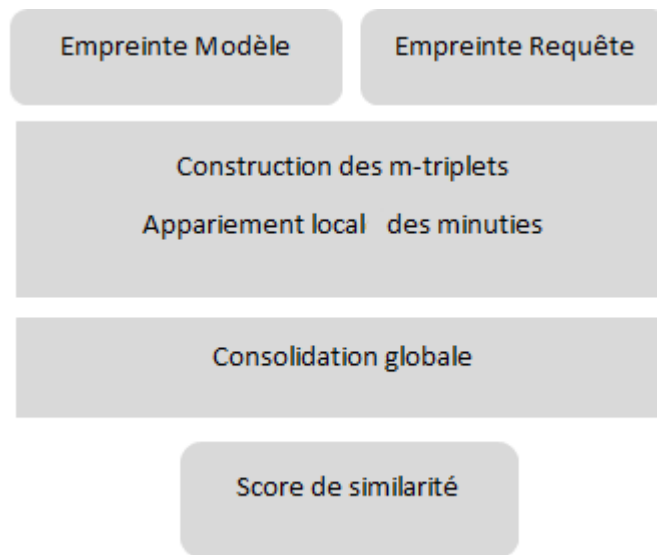


FIGURE 3.2 Schéma récapitulatif des étapes de l'algorithme de base M3gl.

- (a) **Appariement local des minuties** Cette étape cherche d'abord les m-triplets similaires dans l'empreinte modèle en utilisant une recherche binaire. Ensuite, elle trie toutes les paires correspondantes en fonction de la valeur de similarité  $S_{inv}$  (équation 3.1) et filtre les paires de minuties appariées localement.

Formellement, l'algorithme de l'appariement local des minuties est le suivant :

1. Soit  $Q$  et  $P$  les ensembles des minuties extraites respectivement des empreintes digitales modèle et requête.  
Soit  $R$  et  $T$  les ensembles des m-triplets extraits respectivement des empreintes digitales modèle et requête.  
Soit  $A \leftarrow \{\}$  l'ensemble qui contiendra les paires des m-triplets appariées localement.
2. Pour chaque m-triplet requête  $r_i \in R$ , effectuer une recherche binaire dans les m-triplets modèles  $\{t_1, t_2, \dots, t_u\} \subset T$  et ajouter les paires  $(r_i, t_1), (r_i, t_2), \dots, (r_i, t_u)$  dans  $A$  dont la valeur de similarité est supérieure à 0.
3. Trier par ordre décroissant toutes les paires  $(r, t)$  dans  $A$  en fonction de la valeur de similarité.
4. Soit  $M \leftarrow \{\}$  l'ensemble qui contiendra les paires des minuties appariées localement.
5. Pour chaque  $(r, t) \in A$  faire
  - i) Soit  $B \leftarrow \{(q_1, p_1), (q_2, p_2), (q_3, p_3)\}$  les minuties appariées qui maximisent  $S_{inv}(r, t)$  où  $q_1, q_2, q_3 \in Q$  et  $p_1, p_2, p_3 \in P$  et la fonction  $S_{inv}$  est définie dans l'équation 3.1.
  - ii) Pour chaque  $(q_i, p_i) \in B$  faire :  
S'il n'y a pas de paire  $(q_j, p_j) \in M$  où  $q_j = q_i$  ou  $p_j = p_i$  alors  $M \leftarrow M \cup (q_i, p_i)$

(b) **Appariement global des minuties** La procédure de consolidation globale considère chaque paire de minuties comme une paire de référence pour la rotation des empreintes digitales et effectue une transformation des minuties de l'image requête suivant chaque paire de référence. Puis, elle sélectionne la transformation qui maximise le nombre de minuties correspondantes.

Cette étape se base sur trois critères pour déterminer si deux minuties correspondent au niveau global en tenant en compte de la tolérance à la distorsion non linéaire. Premièrement, la distance euclidienne ne doit pas dépasser le seuil  $t_g$ . Deuxièmement, les directions de minutie ne doivent pas dépasser le seuil  $t_a$ . Troisièmement, les différences de directions par rapport à la paire de minuties de référence ne doivent pas dépasser le seuil  $t_a$ .

L'algorithme formel de l'étape d'appariement global des minuties est le suivant :

1. Soit  $n \leftarrow 0$  le nombre maximum des minuties appariées calculé après avoir effectué toutes les rotations d'empreintes digitales.
2. Pour chaque  $(q_i, p_i) \in M$  faire :
  - i. Soit  $E \leftarrow \{\}$  l'ensemble contenant les paires de minuties appariées au niveau global pour l'itération courante.
  - ii. Pour chaque  $(q_j, p_j) \in M, si \forall ((q_k, p_k) \in E[(q_j \neq q_k) \wedge (p_j \neq p_k)])$ 
    - Calculer  $q' = (x', y', \theta')$  ainsi
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) & -\sin(\Delta\theta) & 0 \\ \sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 - x_1 \\ y_3 - y_1 \\ \theta_3 - \theta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$
où  $q_i = (x_1, y_1, \theta_1), p_i = (x_2, y_2, \theta_2), \Delta\theta = \theta_2 - \theta_1, q_j = (x_3, y_3, \theta_3)$ .
    - Soit  $p_j = (x_4, y_4, \theta_4); si ed(q', p_j) \leq t_g \wedge ad_\pi(ad_{2\pi}(\theta_2, \theta_1), ad_{2\pi}(\theta_4, \theta_3)) \leq t_a \wedge ad_\pi(\theta', \theta_4) \leq t_a, alors E \leftarrow E \cup \{(q_j, p_j)\}$
  - iii. *si*  $n < |E|$  *alors*  $n \leftarrow |E|$ .

Le seuil de distance globale  $t_g$  et le seuil d'angle  $t_a$  sont des paramètres de l'algorithme réglés à base des caractéristiques de l'image. Pour deux angles  $\gamma$  et  $\delta$ ,  $ad_\pi(\gamma, \delta)$  est la fonction qui calcule l'angle minimum requis pour superposer deux vecteurs de même origine et d'angles  $\gamma$  et  $\delta$  respectivement, calculée comme suit :

$$ad_\pi(\gamma, \delta) = \min(|\gamma - \delta|, 2\pi - |\gamma - \delta|) \quad (3.8)$$

(c) **Calcul du score de similarité** Le score de similarité est calculé en utilisant la formule suivante :

$$score = \frac{n^2}{|P||Q|} \quad (3.9)$$

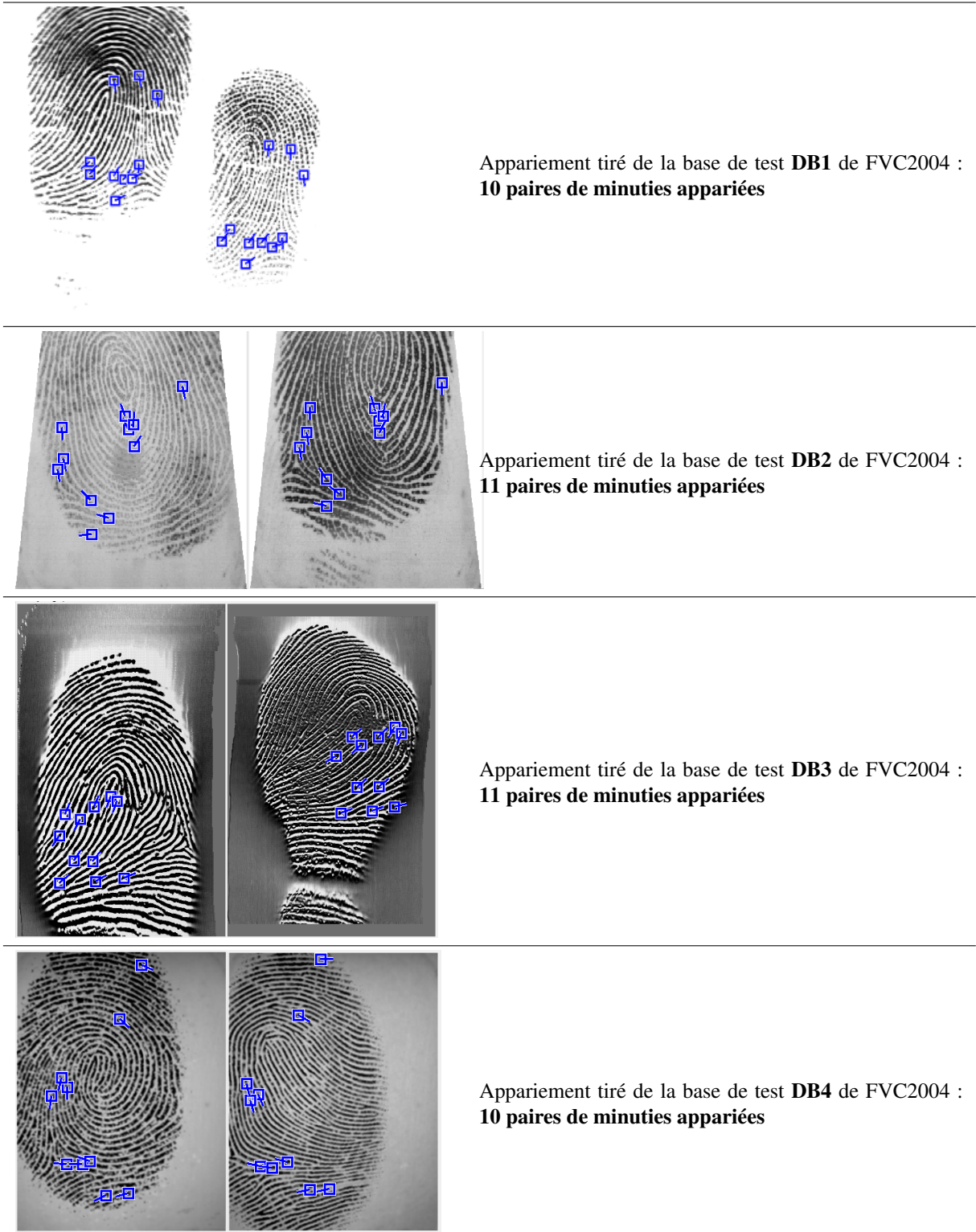
où  $|P|$  et  $|Q|$  sont les ensembles des minuties modèles et requêtes respectivement; et  $n$  est le nombre de paires de minuties appariées.

### 3.3 Limitations de l'algorithme d'appariement et solution proposée

Rappelons que la méthode d'appariement des empreintes digitales (M3gl) exploite certaines caractéristiques géométriques et spatiales entre les trois minuties formant le triplet, et ignore toute autre information additionnelle extraite de l'image de l'empreinte digitale. En dépit des performances acceptables de cet algorithme, nous rapportons à la Figure 3.3 un contre-exemple illustratif où l'algorithme M3gl peut fournir un score élevé même lors d'une vérification de l'identité d'un utilisateur imposteur.

La Figure 3.3 montre quatre exemples de comparaisons imposteurs tirés des quatre parties (DB1, DB2, DB3 et DB4) de la base de données FVC2004 (MAIO et al., 2004). En effet, l'image de l'empreinte digitale gauche et celle de droite proviennent de deux doigts différents, cependant l'algorithme de correspondance de minuties (M3gl) peut encore trouver de nombreuses paires de minuties correspondantes.

D'une manière générale, toutes méthodes d'appariement basées sur les minuties sont fortement influencées par la façon dont ces points sont extraits. Souvent, lorsqu'une image d'empreinte



**FIGURE 3.3** Résultats des paires de minuties retenues dans une comparaison de deux empreintes de personnes différentes en utilisant l'algorithme M3gl.

digitale de mauvaise qualité est présentée au système, on peut extraire un nombre plus ou moins important de fausses minuties et seulement quelques-unes qui sont authentiques. Bien évidemment, cet inconvénient affecte le résultat d'appariement et la décision finale.

L'idée centrale de notre première contribution consiste à l'intégration d'une étape de raffinement qui vise à valider les vraies paires m-triplets et rejeter certaines des fausses. Cette étape de validation est interposée entre l'étape de mise en correspondance locale des paires de m-triplets et l'étape de consolidation globale.

## 3.4 Préliminaire

Cette sous-section est consacrée aux préliminaires concernant l'algèbre des quaternions et leurs formules de calcul. Ensuite, elle décrit le calcul de certains moments orthogonaux que nous utilisons pour la description des informations d'image niveaux de gris situées autour des minuties.

### 3.4.1 Algèbre des quaternions

Un quaternion (ED. et CORR. M., 1844) est une généralisation d'un nombre complexe. Il se compose d'une partie réelle et de trois parties imaginaires comme  $q = q^a + q^b i + q^c j + q^d k$ . Dans ce travail, le voisinage d'un m-triplet est rassemblé pour construire une fonction  $f(r, \theta)$  représentée par un quaternion pur comme dans Eq. (3.30).

Les parties imaginaires  $i, j$  et  $k$  vérifient les combinaisons :

$$\begin{aligned} i^2 &= j^2 = k^2 = -1, \\ ij &= k, jk = i, ki = j, \\ ji &= -k, kj = -i, ik = -j. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Le conjugué, le module et la phase d'un quaternion  $q$  sont définis, respectivement, par :

$$q^* = q^a - q^b i - q^c j - q^d k, \quad (3.11)$$

$$\|q\| = \sqrt{(q^a)^2 + (q^b)^2 + (q^c)^2 + (q^d)^2} \quad (3.12)$$

$$\phi = \arctan \left( \frac{|iq^b + jq^c + kq^d|}{q^a} \right) \quad (3.13)$$

Le produit scalaire entre deux quaternions  $q_1$  et  $q_2$  est défini par :

$$q_1 \bullet q_2 = q_1^a q_2^a + q_1^b q_2^b i + q_1^c q_2^c j + q_1^d q_2^d k, \quad (3.14)$$

et le produit croisé est défini par :

$$\begin{aligned} q_1 \otimes q_2 &= (q_1^a q_2^a - q_1^b q_2^b - q_1^c q_2^c - q_1^d q_2^d) + (q_1^a q_2^b + q_1^b q_2^a + q_1^c q_2^d - q_1^d q_2^c) i \\ &+ (q_1^a q_2^c - q_1^b q_2^d + q_1^c q_2^a + q_1^d q_2^b) j + (q_1^a q_2^d + q_1^b q_2^c - q_1^c q_2^b + q_1^d q_2^a) k. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Notons que le produit croisé des quaternions  $\otimes$  n'est pas commutatif.

### 3.4.2 Moments orthogonaux

Les moments orthogonaux circulaires sont largement utilisés pour la reconnaissance de formes, l'analyse d'images et la vision par ordinateur. Ils ont la capacité de caractériser, d'évaluer et de manipuler des informations numériques avec un minimum d'information redondante et un niveau élevé de robustesse au bruit (XIAO et al., 2014). Ils présentent des avantages en termes de capacité de reconstruction d'images et d'invariance à la rotation. De plus, les moments orthogonaux peuvent être étendus au cadre de quaternions (quaternion des moments orthogonaux) pour le traitement d'image en couleurs et la reconnaissance d'objets en couleur.

TEAGUE, 1980 fut le premier à introduire la notion de moments orthogonaux circulaires sur l'ensemble de base des polynômes de Zernike. Il a utilisé un noyau composé d'un polynôme orthogonal radial et d'une fonction complexe de Fourier angulaire. Les moments peuvent être définis comme les projections d'une fonction d'image sur des fonctions de Kernel particulières, en coordonnées cartésiennes :

$$Z_{nm}^c = \int \int_{R^2} h_{nm}(x, y) f(x, y) dx dy, \quad (3.16)$$

En coordonnées polaires :

$$Z_{nm}^p = \int_0^1 \int_0^{2\pi} h_{nm} f(r, \theta) r dr d\theta \quad (3.17)$$

où  $Z_{nm}^c$  désigne les moments d'une fonction d'image  $f(x, y)$  représenté dans les coordonnées Cartésiennes,  $Z_{nm}^p$  désigne les moments d'une fonction d'image  $f(r, \theta)$  représenté dans les coordonnées polaires  $n, m = 0, 1, 2, \dots$ , et  $h_{nm}(x, y)$  et  $h_{nm}(r, \theta)$  sont les fonctions Kernel.

Les moments sont orthogonaux si leurs fonctions Kernel satisfont les conditions suivantes :

$$\int_0^1 \int_0^1 h_{nm}(x, y) h_{st}(x, y) dx dy = k_1 \delta_{ns} \delta_{mt}, \quad \int_0^1 \int_0^{2\pi} h_{nm}(r, \theta) h_{st}(r, \theta) r dr d\theta = k_2 \delta_{ns} \delta_{mt} \quad (3.18)$$

où  $k_1$  et  $k_2$  sont les coefficients de normalisation et  $\delta_{ns}$  est la fonction delta de Kronecker.

Les fonctions de Kernel des moments orthogonaux définis en coordonnées cartésiennes sont construites sur des polynômes orthogonaux normaux. Les moments orthogonaux définis en coordonnées cartésiennes peuvent être divisés en deux types, les moments orthogonaux continus et discrets, selon la fonction de Kernel  $h_{nm}(x, y)$  si elle est orthogonal sur des domaines continus ou discrets. Par exemple, les moments de Legendre (TEAGUE, 1980) et les moments de Gaussian-Hermite (YANG et al., 2015) sont des moments orthogonaux continus. Les moments orthogonaux discrets incluent principalement les moments de Tchebichef (MUKUNDAN et al., 2001), les moments de Krawtchouk (YAP et al., 2003), les moments de Hahn (YAP et al., 2007) et les moments de Racha (ZHU et al., 2007).

Les moments orthogonaux définis dans les coordonnées polaires sont appelés les moments orthogonaux radiaux. Les fonctions de Kernel définissent le type des moments obtenus. Les moments orthogonaux radiaux incluent principalement les moments de Zernike (TEAGUE, 1980), les moments de pseudo-Zernike (CHONG et al., 2003a), les moments de Fourier-Mellin (SHENG et SHEN, 1994), les moments de Chebyshev-Fourier (PING et al., 2002)[21], les moments de Jacobi-Fourier (ZHU et al., 2016), les moments de Bessel-Fourier (XIAO et al., 2010) et les moments Disque-Harmoniques (ENNAHNAHI et al., 2010).

Dans ce qui suit, nous présentons les moments de Zernike, les moments de Bessel-Fourier et les moments Disque-Harmoniques.

### 3.4.2.1 Moments de Zernike

TEAGUE, 1980 a été le premier à introduire la notion des moments orthogonaux dans l'analyse d'images, en particulier les moments de Zernike (ZM) et les moments de Legendre. Il a proposé les moments de Zernike invariants jusqu'à l'ordre huit, qui peuvent être représentés en termes de moments géométriques habituels. Teague a également pris en considération le fait que les moments d'une image doivent être indépendants de la taille de l'objet, de son déplacement latéral et de son orientation. L'invariance d'échelle et de translation a été prise en compte par l'utilisation de moments centraux normalisés, tandis que l'invariance en rotation et en réflexion a été construite mathématiquement en conservant le module des moments complexes. Dans le domaine du traitement de l'information, les moments de Zernike ont beaucoup été utilisés pour leur propriété d'orthogonalité qui permet la génération de descripteurs non redondants et leurs propriétés d'invariance en translation, en échelle et en rotation. Ainsi, on retrouve les moments de Zernike dans beaucoup de travaux concernant la reconnaissance d'images de personnes, l'appariement des empreintes digitales, l'indexation d'images dans les bases de données, l'analyse et la description de forme d'objet 2D ou 3D, etc.

Les moments de Zernike d'ordre  $m$  et de répétition  $n$  sont définis pour une image en niveaux de gris  $f(r, \varphi)$  comme suit :

$$ZM_{n,m} = \frac{n+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 R_{n,m}(r) e^{-jm\varphi} f(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (3.19)$$

où  $n$  est un entier positif ou nul et  $m$  représente des entiers relatifs ( $\in \mathbb{Z}$ ) tels que  $n - |m|$  pair et  $|m| \leq n$ .

Les polynômes radiaux  $R_{n,m}$  sont définis par :

$$R_{n,m}(r) = \sum_{k=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+|m|}{2} - k\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - k\right)!} r^{n-2k} \quad (3.20)$$

Les moments de Zernike sont complets sur le disque unité et satisfont la relation d'orthogonalité suivante :

$$\int_0^{2\pi} \int_0^1 [R_{n,p}(r) e^{jp\varphi}]^* R_{m,q}(r) e^{jq\varphi} r dr d\varphi = \frac{\pi}{n+1} \delta_{n,m} \delta_{p,q} \quad (3.21)$$

où  $\delta$  est le symbole de Kronecker.

### 3.4.2.2 Moments de Bessel-Fourier

Les moments de Bessel-Fourier (BFM) ont été proposés par XIAO et al., 2010. Ils sont basés sur la fonction orthogonale de Bessel du premier espèce. Les moments de Bessel-Fourier ont donné de bonnes performances en raison de leur bonne orthogonalité. Les moments de Bessel-Fourier d'ordre  $n$  et de répétition  $m$  d'une image  $f(r, \varphi)$  sont définis comme suit :

$$BFM_{n,m} = \frac{1}{2\pi a_n} \int_0^{2\pi} \int_0^1 J_\nu(\lambda_n r) e^{-jm\varphi} f(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (3.22)$$

où  $\lambda_n$  est le  $n^{\text{ème}}$  zéro des polynômes de Bessel du premier espèce  $J_\nu$  d'ordre  $\nu$  mis à 1. Ce dernier peut être exprimé en fonction de la fonction Gamma  $\Gamma$ , qui généralise la fonction factorielle avec des valeurs non entières :

$$J_\nu(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(\nu + k + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{\nu+2k}, \quad (3.23)$$

et  $a_n$  est la constante de normalisation :

$$a_n = \frac{[J_{\nu+1}(\lambda_n)]^2}{2} \quad (3.24)$$

Ces moments sont orthogonaux sur le disque unité selon la formule suivante :

$$\int_0^{2\pi} \int_0^1 [J_\nu(\lambda_n r) e^{-jp\varphi}]^* J_\nu(\lambda_m r) e^{-jq\varphi} r dr d\varphi = 2\pi a_n \delta_{nm} \delta_{pq}, \quad (3.25)$$

où  $\delta$  est le symbole de Kronecker.

### 3.4.2.3 Moments Disque-Harmoniques

Les moments disque-harmoniques (DHM) ont été introduits par ENNAHNAHI et al., 2010 comme une adaptation de la transformée en harmoniques sphériques (SHT) pour la description des formes 2D en utilisant le passage sphère-disque suivant :

$$\sin(\theta) = \sqrt{1 - r^2} \quad , \quad \cos(\theta) = r \quad , \quad \varphi_{sphere} = \varphi_{disc}, \quad (3.26)$$

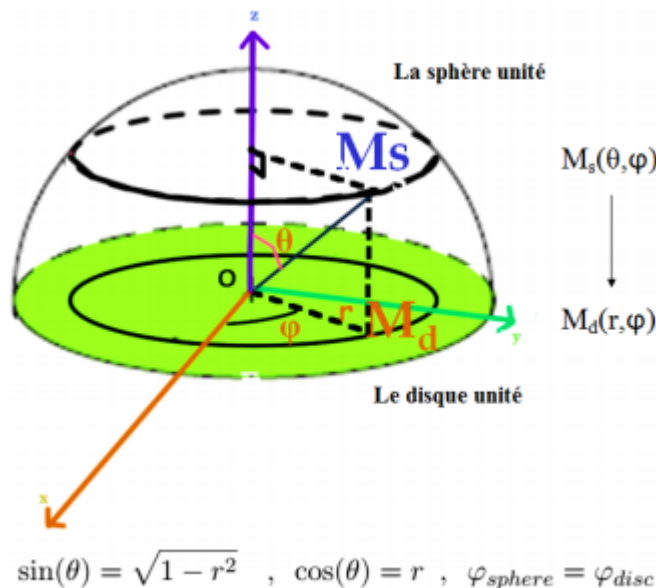
où  $(\theta, \varphi_{sphere})$  représente les coordonnées sphériques et  $(r, \varphi_{disque})$  les coordonnées polaires, tel que  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ,  $0 \leq \theta \leq \pi/2$  et  $0 \leq r \leq 1$ . Sur la sphère,  $\theta$  varie entre 0 et  $\pi$ , néanmoins, comme  $r$  doit être positif, la mise en correspondance avec le disque unité a été limitée seulement à l'hémisphère nord ( $0 \leq \theta \leq \pi/2$ ) comme indiqué sur Figure 3.4.

En effet, les DHM, inspirés par la SHT, ont été proposés comme un ensemble de moments orthogonaux définis sur le disque unité, qui peuvent être considérés sous la catégorie des moments orthogonaux. Pratiquement, les auteurs ont adapté les harmoniques sphériques afin de concevoir une transformation définie sur le disque unité. Les parties réelles et imaginaires de la fonction harmonique à valeurs complexes employées par les moments disques-harmoniques jusqu'à l'ordre  $n = 8$  sont calculées selon l'équation suivante :

$$\begin{aligned} H_{n,m}(r, \varphi) &= N_{n,m} P_{n,m}(r) e^{jm\varphi}, \\ &= N_{n,m} P_{n,m}(r) \cos(m\varphi) + j(N_{n,m} P_{n,m}(r) \sin(m\varphi)) \end{aligned} \quad (3.27)$$

où  $(r, \varphi)$  sont les coordonnées polaires,  $P_{n,m}$  est le polynôme de Legendre associé et  $N_{n,m}$  est le coefficient de normalisation donné par :

$$N_{n,m} = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}}. \quad (3.28)$$



**FIGURE 3.4** Passage des systèmes de coordonnées adopté par ENNAHNAHI et al., 2010.

Les moments disque-harmoniques complexes d'ordre  $n$  et de répétition  $m$  sont définis pour une image en niveaux de gris  $f(r, \varphi)$  comme suit :

$$CDHM_{n,m}(f) = \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \varphi) H_{n,m}^*(r, \varphi) r dr d\varphi, |m| \leq n, \quad (3.29)$$

où  $X^*$  est le conjugué du nombre complexe  $X$ .

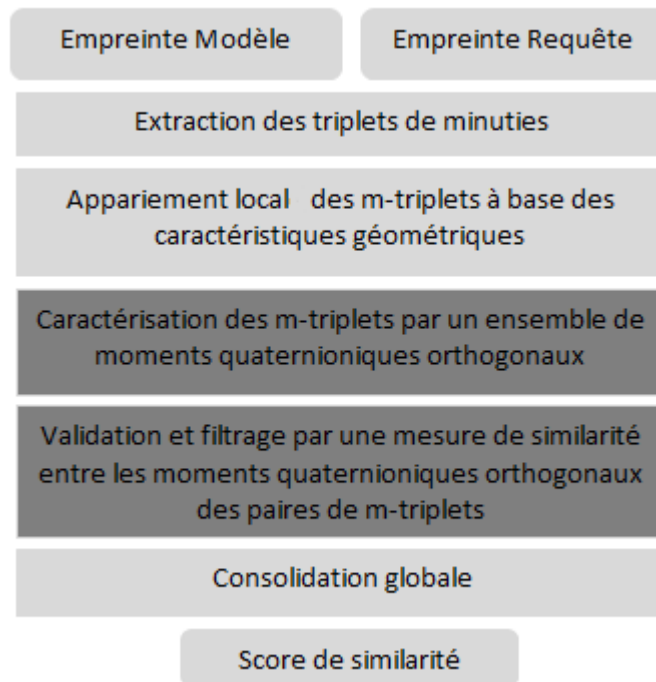
Selon ENNAHNAHI et al., 2010, les modules de ces moments complexes ont permis d'obtenir un descripteur invariant, robuste et facile à calculer. En effet, les moments disques-harmoniques héritent des propriétés de complétude, d'orthonormalité, d'invariance rotationnelle de la transformée en harmoniques sphériques. L'invariance de translation a été obtenue en utilisant une étape de pré-traitement, qui déplace la forme au centre et normalise toutes les images à une échelle standard. En ce qui concerne l'invariance de rotation, le module des moments est utilisé. Il a été montré expérimentalement que les moments disques-harmoniques surpassent certains descripteurs par exemple, le descripteur de Fourier (ZHANG et LU, 2002, ZHANG et LU, 2001), le descripteur des moments de Zernike (TEAGUE, 1980; CHONG et al., 2003b), et des descripteurs de moments géométriques (HU, 1962; TEH et CHIN, 1988; GABRIEL TAUBIN, 1991). Plus de détails sur les moments peuvent être trouvés dans *Moments and moment invariants in pattern recognition*; SHU et al., 2007; DAD et al., 2016.

### 3.5 Méthode proposée

L'idée de base sur laquelle repose notre première contribution consiste à apporter une solution à la constatation suivante : Étant donné que les caractéristiques géométriques et triangulaires des  $m$ -triplets peuvent être fortement similaires même dans le cas de deux empreintes différentes, comment peut-on enrichir l'algorithme M3gl par des informations locales supplémentaires ? Pour ce faire, il est recommandé de se baser sur des informations additionnelles qui possèdent un

pouvoir discriminatoire suffisamment élevé pour permettre une validation réussie des paires de m-triplets effectivement similaires et le nettoyage des paires invalides qui ont pu être faussement appariées par l'algorithme de base.

La Figure 3.5 récapitule les différentes étapes de l'algorithme proposé. Nous avons interposé juste avant l'étape de consolidation globale, une étape de caractérisation des m-triplets par un ensemble de moments quaternioniques orthogonaux suivie d'une autre étape de mesure de similarité qui sert à valider les paires de m-triplets issus de l'étape d'appariement local.



**FIGURE 3.5** Schéma récapitulatif des étapes de l'algorithme proposé.

Notons que les moments complexes tels que ceux de Zernike (ZM) et Pseudo-Zernike (PZM) ont été largement utilisés pour l'appariement des empreintes digitales.

Par exemple, ABDEL QADER et al., 2007 ont proposé une méthode de reconnaissance d'empreinte digitale consistant à pré-traiter l'image, à détecter et à découper une région d'intérêt (ROI) liée au point de référence et enfin à extraire un vecteur descripteur de moments ZMI invariants. L'étape de comparaison est effectuée en utilisant la distance euclidienne entre les deux vecteurs caractéristiques relatifs aux deux empreintes requête et modèle. Enfin, cette mesure de similarité est comparée à un seuil pour prendre une décision d'acceptation ou de rejet.

Le système de vérification des empreintes digitales proposé par POKHRIYAL et LEHRI, 2010 opère en trois étapes. Tout d'abord, l'image est décomposée en différents coefficients d'ondelettes. Cette décomposition en ondelettes donne lieu à des images de sous-bandes à résolution réduite. Ensuite, une image d'empreinte digitale à résolution inférieure est prise, et des PZM sont appliqués pour l'extraction de caractéristiques. Pour calculer les PZM d'une image d'empreinte digitale, les auteurs prennent le centre des images en tant qu'origine, puis mappent les coordonnées des pixels sur le disque unité. Enfin, une distance euclidienne simple est utilisée pour la mesure de similarité.

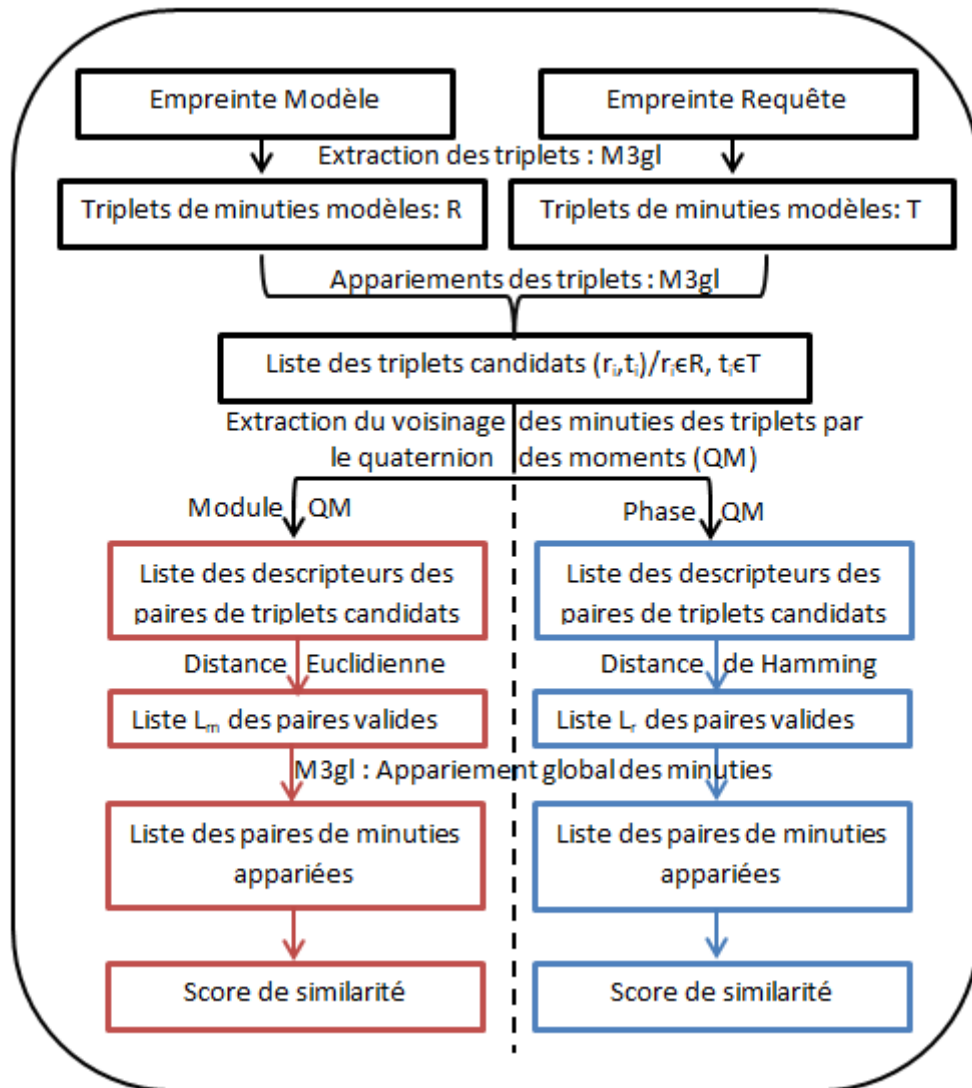
DEEPIKA et al., 2010 ont exploité les PZM pour créer des vecteurs caractéristiques invariants et ils ont opté pour un classificateur bayésien pour la prise de décision.

LI et al., 2012 ont proposé une méthode basée sur la texture pour la vérification de l'empreinte digitale. Ils calculent les caractéristiques ZM de la ROI, qui se compose de plusieurs disques concentriques, appelés multidisques. Les ZM d'une région d'intérêt multidisques sont pondérés selon la localisation des régions des disques.

WABLE et LAULKAR, 2013 ont assemblé des moments géométriques invariants et des ZM et ils les ont appliqués pour décrire la région d'intérêt. Ensuite, ils ont choisi un classificateur Machine à Vecteurs de Support SVM pour effectuer l'identification. Tous les moments décrits ci-dessus traitent l'image d'empreinte digitale dans son ensemble et extraient des caractéristiques globales de l'image en niveaux de gris.

Cependant, KAHYAEI et MOIN, 2016 ont proposé un algorithme d'appariement en utilisant des PZM sur des images traitées par des correctifs. Leur système contient trois phases. D'abord, l'élimination de l'arrière-plan, le redimensionnement et l'amélioration du contraste sont effectués. Ensuite, l'image est partitionnée en 16 blocks de même taille. Puis, les PZM sont extraits de chaque patch et concaténés pour créer le vecteur caractéristique de l'image. Enfin, pour effectuer la reconnaissance, l'appariement de l'empreinte digitale est réalisé à base de la distance euclidienne calculée entre les vecteurs caractéristiques des échantillons d'entrée et ceux des modèles stockés.

Dans cette première contribution, nous proposons de booster le processus d'appariement local des minuties. Pour cela, nous nous appuyons sur les moments orthogonaux pour caractériser les régions au voisinage de ces minuties. Cela signifie que notre descripteur est destiné à la correspondance locale. En outre, nous traitons les trois disques autour des trois minuties ensemble au moyen de l'algèbre des quaternions (HALOUI et al., 2014). Comme un nombre de quaternions se compose d'une partie réelle et de trois parties imaginaires, un triplet de minuties est représenté par un quaternion pur où la partie réelle est mise à zéro et les trois parties imaginaires sont les trois disques centrés sur les minuties formant le triplet. Ainsi, nous extrayons localement un vecteur caractéristique permettant de fusionner les descripteurs de trois minuties de manière holistique. À notre connaissance, notre méthode est nouvelle et diffère des méthodes existantes d'appariement d'empreintes digitales basées sur les moments (Figure 3.6).



**FIGURE 3.6** Schéma détaillé de la méthode d'appariement proposée par intégration d'un processus de validation dans l'algorithme de base M3gl.

Nous présentons l'algorithme d'appariement modifié comme suit :

**(a) Appariement local des m-triplets :**

1. Soit  $Q$  et  $P$  les ensembles des minuties extraites respectivement des empreintes digitales modèle et requête.  
Soit  $R$  et  $T$  les ensembles des m-triplets extraits respectivement des empreintes digitales modèle et requête.  
Soit  $A \leftarrow \{\}$  l'ensemble qui contiendra les paires des m-triplets appariées localement.
2. Pour chaque m-triplet requête  $r_i \in R$ , effectuer une recherche binaire dans les m-triplets modèles  $\{t_1, t_2, \dots, t_u\} \subset T$  et ajouter les paires  $(r_i, t_1), (r_i, t_2), \dots, (r_i, t_u)$  dans  $A$  dont la valeur de similarité est supérieure à 0.

**(b) Validation locale des m-triplets :**

1. Soit  $V \leftarrow \{\}$  l'ensemble qui contiendra les paires des m-triplets valides.
2. Pour chaque paire de triplet  $(r_i, t_1), (r_i, t_2), \dots, (r_i, t_u)$  dans  $A$ , calculer les vecteurs descripteurs correspondants à base des moments quaternaires.
3. Pour chaque m-triplet requête  $r_i \in R$ , chercher les m-triplets du modèle  $\{t_1; t_2; \dots; t_u \subset T\}$  ayant une valeur de similarité structurelle suffisante et ajouter les paires  $\{(r_i; t_1); (r_i; t_2); \dots; (r_i; t_u)\}$  à  $V$ .

**(c) Appariement local des paires de minuties :**

1. Trier par ordre décroissant toutes les paires  $(r, t)$  dans  $V$  en fonction de la valeur de similarité.
2. Soit  $M \leftarrow \{\}$  l'ensemble qui contiendra les paires des minuties appariées localement.
3. Pour chaque  $(r, t) \in V$  faire
  - i) Soit  $B \leftarrow \{(q_1, p_1), (q_2, p_2), (q_3, p_3)\}$  les minuties appariées qui maximisent  $S_{inv}(r, t)$  où  $q_1, q_2, q_3 \in Q$  et  $p_1, p_2, p_3 \in P$  et la fonction  $S_{inv}$  est définie dans l'équation 3.1.
  - ii) Pour chaque  $(q_i, p_i) \in B$  faire :  
S'il n'y a pas de paire  $(q_j, p_j) \in M$  où  $q_j = q_i$  ou  $p_j = p_i$  alors  $M \leftarrow M \cup (q_i, p_i)$

**(d) Consolidation globale des minuties :** La procédure de consolidation globale est effectuée comme décrite dans l'algorithme de base M3gl en considérant la transformation qui maximise le nombre de minuties correspondantes.

**(e) Calcul du score de similarité :**

Le score de similarité est calculé en utilisant la formule suivante :

$$score = \frac{n^2}{|P||Q|}$$

où  $|P|$  et  $|Q|$  sont les cardinalités des minuties modèles et requêtes respectivement, et  $n$  est le nombre de paires de minuties appariées.

### 3.5.1 Extraction du voisinage d'un triplet de minuties

Nous caractérisons par une fonction à valeurs quaternioniques le voisinage de chaque m-triplet, retenu à l'issue de l'étape d'appariement local proposé par la version de base de l'algorithme

M3gl.

Soit  $T(A, B, C)$  le m-triplet extrait de l'image d'empreinte digitale, où  $A, B$  et  $C$  représentent trois points caractéristiques. Tout d'abord, nous extrayons les informations de voisinage du m-triplet en découpant trois disques de rayon  $R$  centrés sur les sommets  $A, B$  et  $C$  (Figure 3.7). Ensuite, nous rassemblons les trois disques découpés pour construire une fonction  $f$  à valeurs

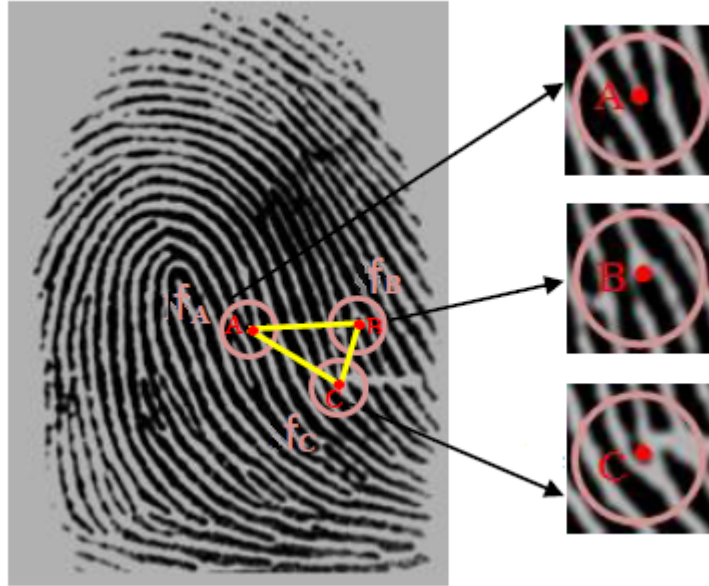


FIGURE 3.7 Extraction des caractéristiques de l'image niveaux de gris.

quaternioniques définie sur le disque unité :

$$f_{ABC}(r, \theta) = i f_A(r, \theta) + j f_B(r, \theta) + k f_C(r, \theta), \quad 0 \leq r \leq 1, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (3.30)$$

Où  $f_A, f_B$  et  $f_C$  représentent respectivement l'information de l'image en niveau de gris du disque de voisinage des minuties  $(A, B, C)$ .

L'objectif de cette étape est la modélisation des m-triplets par des fonctions quaternioniques définies sur le disque unité. Ensuite, la description et la caractérisation d'un m-triplet par un vecteur de moments quaternioniques orthogonaux est appliquée sur la fonction quaternionique  $f_{ABC}$  ainsi construite.

### 3.5.2 Caractérisation des m-triplets par les moments quaternioniques orthogonaux

Dans cette sous-section, nous présentons la formule générale pour le calcul des moments quaternaires proposés dans la littérature. Nous rappelons que dans cette thèse nous nous concentrons sur les moments quaternaires avec la fonction de base orthogonale pour la description et la caractérisation des m-triplets dans les images d'empreintes digitales. Les descripteurs à base des moments orthogonaux quaternaires possèdent l'avantage d'être invariants aux différents transformations et robustes en cas de présence du bruit. En fait, l'information de voisinage des trois minuties qui forment un m-triplet est décrite de manière holistique en utilisant les quaternions. Ainsi, la formule générale des moments de type quaternaire (Quaternion Type-Moments QTM)

est définie comme suit (CHEN et al., 2015) :

$$QTM_{n,m}^R(f) = \int_0^1 \int_0^{2\pi} \phi_{n,m}(r) f_{ABC}(r, \theta) e^{-\mu m \theta} r dr d\theta, \quad (3.31)$$

où  $\phi_{n,m}(r)$  est la valeur réelle du polynôme radiale de QTM et  $\mu$  est un paramètre quaternion unitaire pur. On prend usuellement  $\mu = (i + j + k)/\sqrt{3}$ .

Comme mentionné dans DAD et al., 2016, les QTM peuvent être calculés en utilisant les moments de type complexe (CTM) :

$$QTM_{n,m}^R(f) = Q_{n,m}^r + iQ_{n,m}^i + jQ_{n,m}^j + kQ_{n,m}^k \quad (3.32)$$

où

$$\begin{aligned} Q_{n,m}^r &= -\frac{1}{\sqrt{3}}[\Im_m(CTM_{n,m}(f_A)) + \Im_m(CTM_{n,m}(f_B)) + \Im_m(CTM_{n,m}(f_C))], \\ Q_{n,m}^i &= \Re_e(CTM_{n,m}(f_A)) + \frac{1}{\sqrt{3}}[\Im_m(CTM_{n,m}(f_B)) - \Im_m(CTM_{n,m}(f_C))], \\ Q_{n,m}^j &= \Re_e(CTM_{n,m}(f_B)) + \frac{1}{\sqrt{3}}[\Im_m(CTM_{n,m}(f_C)) - \Im_m(CTM_{n,m}(f_A))], \\ Q_{n,m}^k &= \Re_e(CTM_{n,m}(f_C)) + \frac{1}{\sqrt{3}}[\Im_m(CTM_{n,m}(f_A)) - \Im_m(CTM_{n,m}(f_B))]. \end{aligned} \quad (3.33)$$

où  $CTM_{n,m}(f_A)$ ,  $CTM_{n,m}(f_B)$  et  $CTM_{n,m}(f_C)$  sont les moments de type complexe des trois voisinages respectivement  $f_A$ ,  $f_B$ ,  $f_C$  et  $\Im_m(X)$ ,  $\Re_e(X)$  sont respectivement la partie imaginaire et la partie réelle du nombre complexe  $X$ .

Les équations (3.33) sont simples en termes de calcul et ne comportent que peu d'opérations de multiplication par rapport à Eq. (3.31).

Comme indiqué dans CHEN et al., 2015, les moments de type complexe sont calculés pour une fonction à valeurs réelles  $f_{ABC}(r, \theta)$  en utilisant l'approximation numérique suivante :

$$CTM_{n,m}(f) = \frac{1}{(2 * R - 1)^2} \sum_{r=0}^1 \sum_{\theta=0}^{2\pi} f_{ABC}(r, \theta) \phi_{n,m}(r) e^{-jm\theta}. \quad (3.34)$$

Ici  $\phi_{n,m}(r)$  est le polynôme réel. La fonction de l'image  $f$  doit être remplacé par  $f_A$ ,  $f_B$  et  $f_C$  lors du calcul de  $CTM_{n,m}(f_A)$ ,  $CTM_{n,m}(f_B)$  et  $CTM_{n,m}(f_C)$  respectivement, et  $e^{-jm\theta}$  est la partie radiale à valeur complexe.

Nous avons appliqué notre méthode sur trois moments différents : les moments de Zernike(ZM) proposés par KHOTANZAD et HONG, 1990 ; les moments de Bessel-Fourier proposés par GUO et ZHU, 2011 et les moments Disque-Harmoniques (DHM) proposés par notre équipe de recherche ENNAHNAHI et al., 2010.

Nous calculons les descripteurs quaternaires QZM, QBFM et QDHM à base des moments ZM, BFM et DHM respectivement par l'équation (3.34) en substituant  $\phi_{n,m}(r)$  par son polynôme  $\phi_{n,m}(r)$  correspondant selon le tableau 3.1.

Pour chaque descripteur, nous calculons deux variantes :

**TABLE 3.1** Polynômes radiaux  $\phi_{n,m}(r)$  nécessaires au calcul de certains moments orthogonaux.

<p><b>QZM : Quaternion des moments de Zernike</b></p> $\frac{n+1}{\pi} \sum_{k=0}^{(n- m )/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! (\frac{n+ m }{2}-k)! (\frac{n- m }{2}-k)!} r^{n-2k}$ <p>avec <math>-n \leq m \leq n</math> et <math>n -  m </math> being even</p>
<p><b>QDHM : Quaternion des moments Disque-Harmoniques</b></p> <p><math>\sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_{n,m}(r)</math>, <math>P_{n,m}(r)</math> est calculé en utilisant :</p> $(n-m)P_{n,m}(r) = r(2n-1)P_{n-1,m}(r) - (n+m-1)P_{n-2,m}(r)$ $P_{m,m}(r) = (-1)^m (2m-1)!! (1-r^2)^{\frac{m}{2}}$ <p>et <math>P_{m+1,m}(r) = r(2m+1)P_{m,m}(r)</math></p> <p>avec <math>-n \leq m \leq n</math></p>
<p><b>QBFM : Quaternion des moments de Bessel-Fourier</b></p> $\frac{1}{2\pi a_n} J_\nu(\lambda_n r)$ <p>où <math>J_\nu(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(\nu+k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{\nu+2k}</math>,</p> <p><math>\lambda_n</math> est le <math>n^{\text{ème}}</math> zéro des polynômes de Bessel du premier espèce <math>J_\nu</math> d'ordre <math>\nu</math> mis à 1,</p> <p><math>\Gamma(x)</math> est la fonction gamma,</p> <p>et <math>a_n = [J_{-n} u + 1(\lambda_n)]^2 / 2</math> est la constante de normalisation.</p>

— Une variante basée sur le module des moments quaternaires :

$$V_M = \left\{ \|Q_{n,m}\|, \quad / \quad \|Q_{n,m}\| = \sqrt{(Q_{n,m}^r)^2 + (Q_{n,m}^i)^2 + (Q_{n,m}^j)^2 + (Q_{n,m}^k)^2} \right\} \quad \text{avec } 0 \leq n \leq n_{max}, |m| \leq n \quad (3.35)$$

où  $\|Q_{n,m}\|$  est le module des moments quaternaires d'ordre  $n$  et de répétition  $m$ , et  $n_{max}$  est l'ordre maximal.

— Une variante basée sur la phase  $\phi_{n,m}$  des moments quaternaires :

$$V_P = \left\{ \phi_{n,m}, \quad / \quad \phi_{n,m} = \arctan \left( \frac{|iQ_{n,m}^i + jQ_{n,m}^j + kQ_{n,m}^k|}{Q_{n,m}^r} \right) \right\} \quad \text{avec } 0 \leq n \leq n_{max}, |m| \leq n \quad (3.36)$$

où  $\phi_{n,m}$  est la phase des moments quaternaires d'ordre  $n$  et de répétition  $m$ , et  $n_{max}$  est l'ordre maximal.

Nous effectuons une quantification sur deux bits pour chaque  $\phi_{n,m}$  comme décrit dans le Tableau 3.2 :

**TABLE 3.2** Quantification de la phase  $\phi_{n,m}$  des moments quaternaires sur deux bits.

Intervalle	$] -\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{4}]$	$] -\frac{\pi}{4}, 0]$	$] 0, \frac{\pi}{4}]$	$] \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}[$
Valeur binaire	00	01	10	11

D'après la Formule 3.35 et la Formule 3.36, on assure l'invariance rotationnelle des minuties dans le triplet. En effet, les trois composants du quaternion pur jouent le même rôle puisqu'ils sont tous incorporés dans les parties imaginaires  $i$ ,  $j$  et  $k$ .

### 3.5.3 Validation des paires de m-triplets

Dans cette étape, nous mesurons la dissimilitude entre les vecteurs caractéristiques d'une paire de triplets. Si la distance entre les vecteurs de la paire de triplets est inférieure à un seuil donné, la paire est validée.

Dans le cas de la variante basée sur les modules des moments calculés, la mesure de dissimilitude d'une paire de m-triplets  $(p, q)$  est obtenue par la distance Euclidienne entre les vecteurs caractéristiques de chacun des m-triplets de la paire  $(V_M(p), V_M(q))$  (équation 3.37). Cependant, lorsque la phase quantifiée est considérée, la distance entre ces deux vecteurs caractéristiques  $(V_{Pb}(p), V_{Pb}(q))$  est déterminée par la distance Hamming (équation 3.38).

$$Modulus\_Match(p, q) = \sqrt{\sum_{k=1}^d |(V_M(p)_k - V_M(q)_k)|^2}, \quad (3.37)$$

$$Phase\_Match(p, q) = \sum_{k=1}^d [((V_{Pb}(p)_k) \neq ((V_{Pb}(q)_k))], \quad (3.38)$$

Avec  $V(p)_k$  représente le  $K^{\text{ième}}$  coefficient du vecteur descripteur du triplet  $p$  de l'empreinte modèle  $P$ ,  $V(q)_k$  représente le  $K^{\text{ième}}$  coefficient du vecteur descripteur du triplet  $q$  de l'empreinte requête  $Q$ , et  $d$  dénote la dimension du vecteur descripteur.

Après cette étape de validation, nous appliquons l'étape de l'appariement global de l'algorithme M3gl qui se base sur les paires de triplets précédemment validées afin de sélectionner l'alignement qui maximise la quantité de minuties d'appariement global, puis nous calculons le score de similarité selon l'équation 3.9.

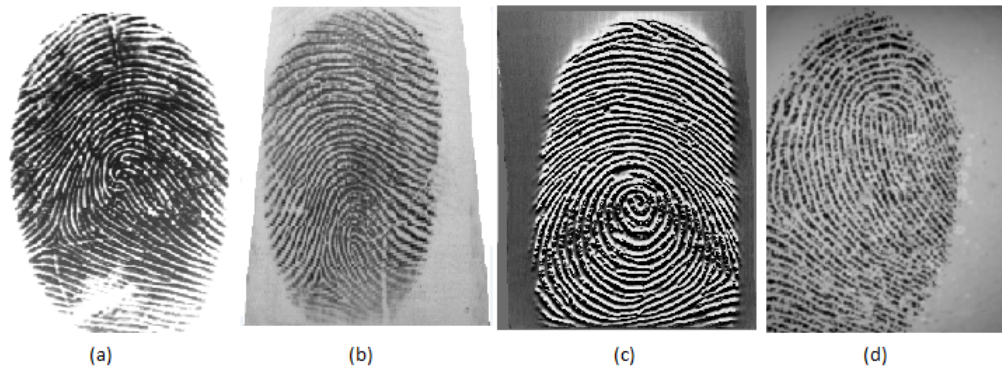
## 3.6 Résultats expérimentaux

Dans cette section nous allons évaluer les performances de la méthode proposée dans cette première contribution (HALOUI et al., 2016).

Il est à noter que nous utilisons dans cette première contribution, la méthode proposée par RATHA et al., 1995 pour extraire les minuties des images d'empreintes digitales.

### 3.6.1 Bases de tests

Nous avons mené un ensemble de tests expérimentaux sur différentes bases d'empreintes digitales standards : la partie DB1 de la base FVC2002 (MAIO et al., 2002) et les quatre parties DB1, DB2, DB3 et DB4 de la base FVC2004 (MAIO et al., 2004). Nous présentons dans la Figure 3.8 des échantillons des empreintes digitales tirés des quatre parties de la base de données FVC2004.



**FIGURE 3.8** Echantillons des empreintes digitales tirés des quatre parties de la base de données FVC2004 : (a) DB1,(b) DB2,(c) DB3 et (d) DB4.

Il convient de noter que la qualité des images collectées dans ces ensembles de données est variable car elles ont été acquises en utilisant différents appareils (Tableau 3.3).

**TABLE 3.3** Périphériques / technologies utilisés pour la collecte de la base de données FVC2004 tiré de MAIO et al., 2004

	<b>Technologie</b>	<b>Taille des images</b>	<b>Résolution</b>
DB1	Senseur Optique (CrossMatch V300)	640x480	500
DB2	Senseur Optique (Digital Persona U.are.U4000)	328x364	500
DB3	Senseur à Balayage Thermique (Atmel FingerChip)	300x480	512
DB4	Générateur synthétique (SFinGe v3.0)	288x384	500

Chacune de ces bases d'empreintes contient 880 empreintes digitales qui sont relatives à 110 doigts différents avec 8 échantillons par doigt. Elles sont divisées en deux ensembles (A et B) : un jeu d'évaluation séquestré de 800 images (set A) et un ensemble d'apprentissage comptant 80 images (set B) destiné au choix empirique des paramètres.

Pour chacune des parties de test *DB1\_A*, *DB2\_A*, *DB3\_A* et *DB4\_A*, nous avons au total 4950 scores imposteurs et 2800 scores authentiques.

### 3.6.2 Mesures de performance

La performance est mesurée en fonction de :

- La courbe réceptrice des caractéristiques de fonctionnement ROC (Receiver Operating Characteristic).
- La courbe DET (Detection Error Tradeoff).

- Les indicateurs de performances EER, FMR100 et FMR1000.
- Des échantillons des appariements authentiques et imposteurs des empreintes digitales.

### 3.6.3 Variantes proposées

Nous avons six variantes de notre algorithme, qui sont récapitulées comme suit :

- MQZM : La variante proposée à base du Module du Quaternion des Moments de Zernike.
- PQZM : La variante proposée à base de la Phase du Quaternion des Moments de Zernike.
- MQBFM : La variante proposée à base du Module du Quaternion des Moments de Bessel-Fourier.
- PQBFM : La variante proposée à base de la Phase du Quaternion des Moments de Bessel-Fourier.
- MQDHM : La variante proposée à base du Module du Quaternion des Moments Disques Harmoniques.
- PQDHM : La variante proposée à base de la phase du Quaternion des Moments Disques Harmoniques.

### 3.6.4 Choix des paramètres

Nous avons défini empiriquement les paramètres : l'ordre maximal des moments quaternioniques ( $N_{max} = 8$ ) et le rayon des disques découpés autour des minuties ( $R = 50$ ). Nous avons estimé ces paramètres à travers des expérimentations sur la partie d'apprentissage DB1\_B de la base de données FVC2002.

Afin de déterminer empiriquement les meilleurs seuils de distances utilisés pour la validation des paires de triplets, nous évaluons les deux variantes de notre méthode (module de QDHM et phase de QDHM) en utilisant la base de d'apprentissage DB1\_B de FVC2002. Le graphique présenté dans (Figure 3.9-a) illustre les résultats de la première variante de notre méthode en utilisant le module des QDHM. Nous avons établi la courbe ROC pour différents seuils de distance. Il est à noter que les meilleurs résultats sont obtenus pour le seuil  $tm = 20$ . Le graphique de (Figure 3.9-b) représente les résultats de la deuxième variante de notre méthode basée sur la phase des moments quaternaires pour les différents seuils. Nous soulignons que la meilleure performance est obtenue pour un seuil  $tp = 0, 2$ .

Nous rapportons dans le Tableau 3.4 les différentes valeurs des seuils de distances servant à la validation des paires de triplets. Nous avons estimé empiriquement ces paramètres à travers des expérimentations en utilisant les parties DB1\_B, DB2\_B, DB3\_B et DB4\_B de la base de données FVC2004.

### 3.6.5 Evaluation des performances

Nous avons testé notre première méthode proposée dans un contexte de vérification. Nous rappelons que pour chaque partie des bases de test, nous avons au total 4950 scores imposteurs et 2800 scores authentiques. Les courbes ROC (Figure 3.10) permettent la comparaison de la performance des deux variantes de la méthode proposée : la première variante utilise le module de QDHM, la deuxième variante exploite la phase de QDHM, en plus de l'algorithme basique M3gl. Nous avons retenu les seuils optimaux  $tm = 20$  et  $tp = 0.2$ .

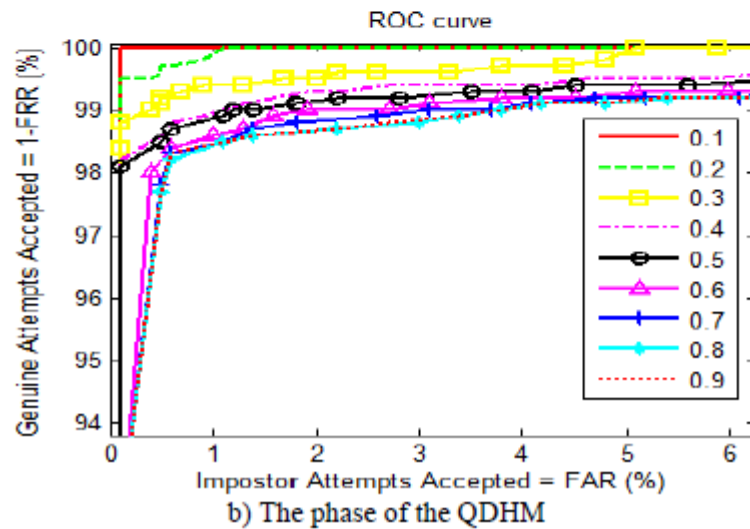
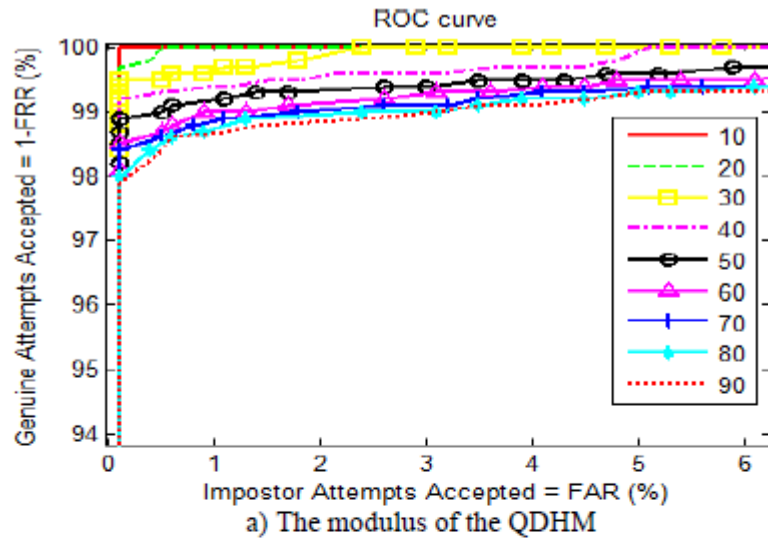
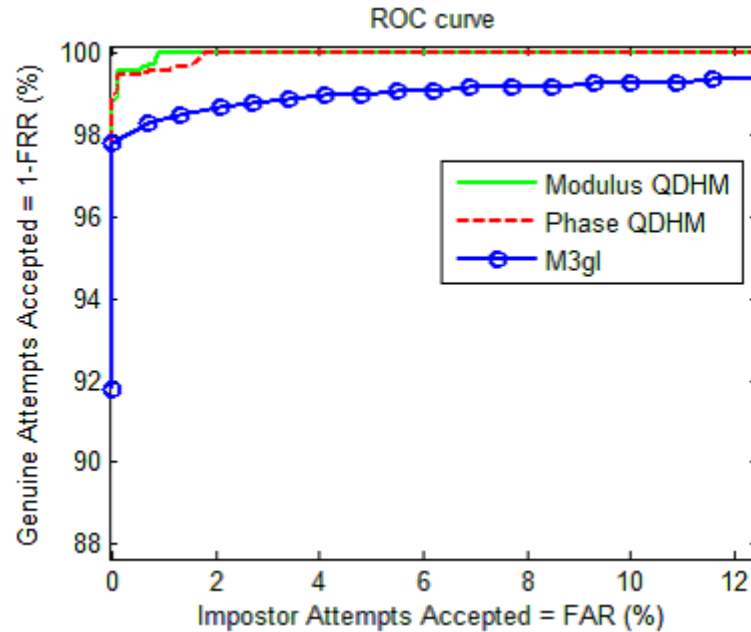


FIGURE 3.9 Courbes ROC comparant les performances de la méthode proposée en utilisant QDHM pour différents seuils dans DB1\_B de FVC2002.

TABLE 3.4 Seuils des distances de validation pour les différentes variantes de la méthode proposée.

Descripteur utilisé	Valeur de distance seuil
Descripteur à base des modules QBFM	60
Descripteur à base des phases QBFM	0.01
Descripteur à base des modules QZM	20
Descripteur à base des phases QZM	0.001
Descripteur à base des modules QDHM	40
Descripteur à base des phases QDHM	0.01



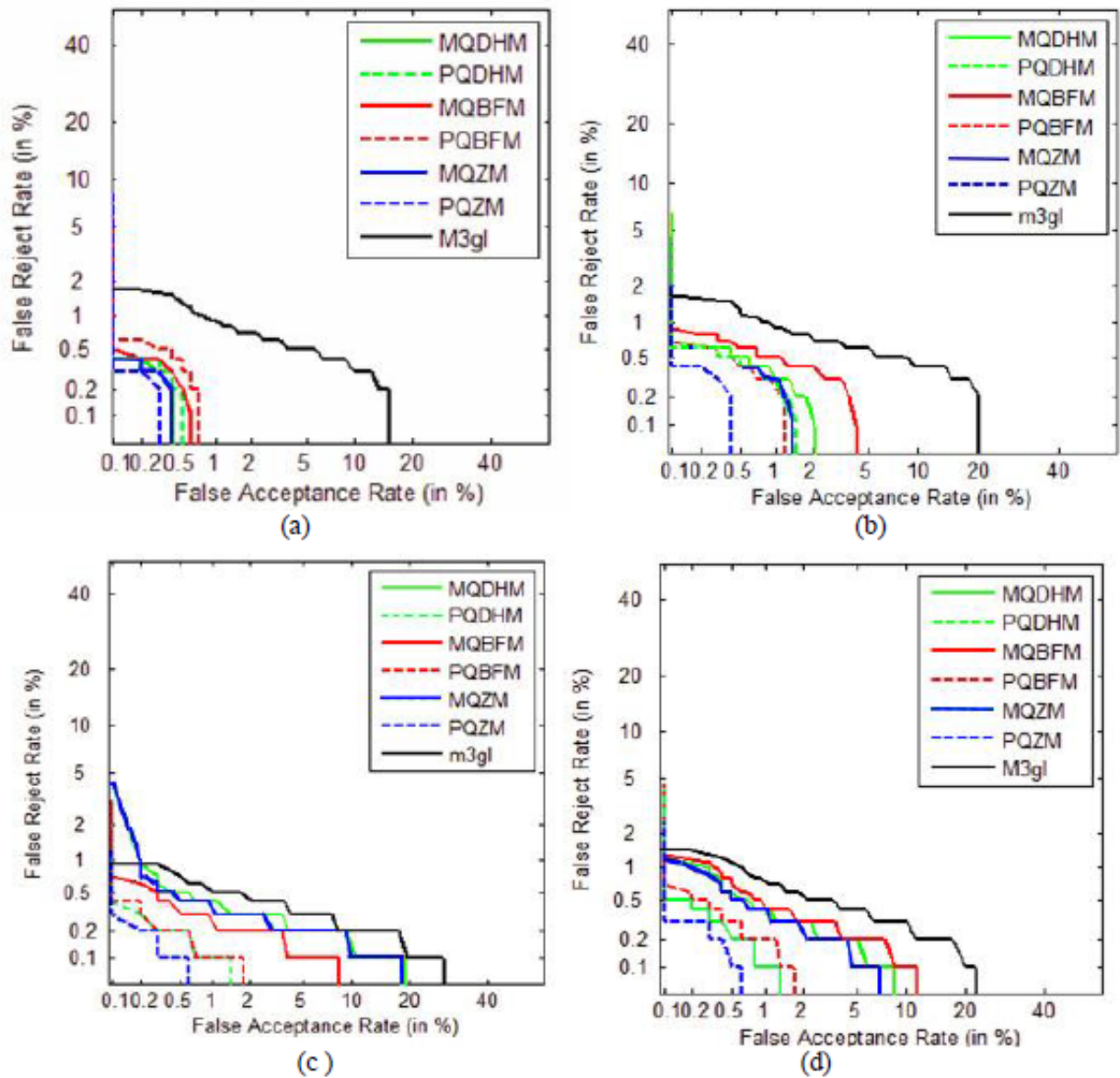
**FIGURE 3.10** Comparaison des performances de la méthode proposée à base des moments QDHM avec l'algorithme de base M3gl dans DB1\_A de la base de test FVC2002.

Nous remarquons que les performances des deux variantes de notre méthode sont bien meilleures que l'algorithme de base M3gl. L'intégration de l'information du voisinage en considérant la phase des moments QDHM dépasse en performance celle obtenue par le module des moments QDHM.

Ensuite, nous avons comparé la performance des QDHM dans la caractérisation du voisinage des minuties pour l'appariement des empreintes digitales et celle obtenue par les deux moments orthogonaux quaternioniques, QZM (Quaternion-Zernike Moments) et QBFM (Quaternion Bessel-Fourier Moments). Deux variantes de ces vecteurs caractéristiques sont calculées : Le module (MQZM, MQBFM, MQDHM) et la phase (PQZM, PQBFM, PQDHM).

Les courbes DET de la Figure 3.11 comparent les performances obtenues en utilisant les différents moments QZM, les QBFM et les QDHM en combinaison avec l'algorithme M3gl pour l'appariement des empreintes digitales.

Nous notons que la stratégie de combiner les moments de quaternion avec l'algorithme M3gl pour l'appariement des empreintes digitales offre une performance meilleure que celle de l'algorithme M3gl classique. Lorsque le taux de faux rejets (FRR) est égal à 0,1%, le taux de fausses acceptations (FAR) pour M3gl est 15% dans la partie DB1\_A tandis que le taux FAR résultant de l'utilisation des deux variantes des moments de quaternioniques (Phase et Module) est d'environ 0,5%. En général, l'intégration de l'information du voisinage des minuties à travers notre méthode basée sur les moments quaternioniques améliore le taux de reconnaissance réelle (1-FRR (taux de de Faux rejets)) pour la plupart des valeurs de FAR (taux de fausses acceptations). La meilleure précision d'appariement est obtenue par la variante basée sur la phase des moments QZM (Quaternion Zernike Moments), pour toutes les parties de la base de données FVC2004. Le taux de fausses acceptations obtenu en utilisant la phase des moments de Quaternion Zernike n'excède pas 0,6% pour toute la base de données FVC2004 tandis que ce taux FAR est supérieur à 1% pour tous les autres moments quaternioniques sauf dans la partie DB1\_A. Ces résultats intéressants reposent sur le fait que les moments orthogonaux sont



**FIGURE 3.11** Courbes DET comparant les performances des méthodes proposées dans DB1\_A (a), DB2\_A (b), DB3\_A (c), DB4\_A (d) de la base de données FVC2004.

bien connus par leur pouvoir discriminatif et leur robustesse en présence du bruit. Il faut noter que la base de données FVC2004, utilisée dans les expériences, contient un nombre important d'images d'empreintes digitales de mauvaise qualité.

Les résultats obtenus par toutes les variantes de notre méthode sur les bases de données FVC2002 et FVC2004 montrent une amélioration claire des performances. Pour confirmer les performances obtenues, nous avons rassemblé dans le Tableau 3.5 les indicateurs de performances (EER, FMR100 et FMR1000) obtenus par les différentes variantes proposées ainsi que ceux relatifs à l'algorithme M3gl. Ces indicateurs ont été obtenus sur la base de données FVC2004. En analysant le Tableau 3.5, on peut conclure que l'application du processus de validation des triplets de minuties fournit systématiquement de meilleurs résultats que l'algorithme de base M3gl. En plus, nous pouvons remarquer que la méthode proposée

en utilisant le quaternion des moments de Zernike pour la validation des paires de triplets réalise de meilleurs résultats bien que les écarts avec les autres variantes proposées demeurent négligeables.

**TABLE 3.5** Comparaison des indicateurs de performances des variantes proposées

		<b>EER</b>	<b>FMR100</b>	<b>FMR1000</b>
DB1_A	M3gl	0.89	0.89	1.69
	MQZM	0.29	0	0.39
	PQZM	0.24	0	0.29
	MQBFM	0.34	0	0.49
	PQBFM	0.39	0	0.59
	MQDHM	0.29	0	0.39
	PQDHM	0.29	0	0.39
DB2_A	M3gl	0.94	0.99	1.69
	MQZM	0.49	0.29	0.59
	PQZM	0.29	0	0.39
	MQBFM	0.59	0.49	0.89
	PQBFM	0.44	0.19	0.69
	MQDHM	0.49	0.29	0.69
	PQDHM	0.49	0.19	0.59
DB3_A	M3gl	0.59	0.49	1.09
	MQZM	0.44	0.29	3.96
	PQZM	0.19	0	0.29
	MQBFM	0.39	0.19	0.69
	PQBFM	0.24	0.09	0.39
	MQDHM	0.49	0.39	2.5
	PQDHM	0.24	0.09	0.39
DB4_A	M3gl	0.79	0.69	1.39
	MQZM	0.49	0.39	1.19
	PQZM	0.29	0	0.29
	MQBFM	0.59	0.39	1.29
	PQBFM	0.39	0.19	0.69
	MQDHM	0.54	0.39	1.19
	PQDHM	0.29	0.09	0.49

Pour illustrer et expliquer l'amélioration obtenue en intégrant l'étape de validation dans le processus d'appariement, nous présentons dans le Figure 3.12, les mêmes exemples que ceux décrits dans le Figure 3.3 dans la section 3.3. Nous rappelons que ces échantillons sont tirés des quatre parties DB1\_A, DB2\_A, DB3\_A et DB4\_A de la base de test FVC2004. Nous considérons deux images d'empreintes digitales appartenant à deux doigts différents.

Dans le Tableau 3.13, nous présentons des exemples tirés également des quatre parties de la base de données FVC2004 et qui présentent des comparaisons authentiques.

Nous marquons les paires de minuties appariées par l'algorithme de base M3gl et les variantes proposés en utilisant le Module du Quaternion des Moments Disques Harmoniques MQDHM, et le Module du Quaternion des Moments de Zernike MQZM. Dans ces exemples, nous notons

le nombre de minuties appariées. On peut remarquer que dans le cas des comparaisons imposteurs (Figure 3.3), les nombres des paires de minuties appariées par notre méthode proposée en utilisant MQDHM ou MQZM sont réduits par rapport à ceux obtenus par l'algorithme M3gl. On peut remarquer également que dans le cas des comparaisons authentiques (Tableau 3.13), les nombres des paires de minuties appariées par l'algorithme M3gl restent presque les mêmes dans la plupart des appariements authentiques effectués par notre méthode proposée en utilisant MQDHM ou MQZM. Ceci paraît normal car après avoir extrait les paires de triplets, nous essayons d'ajouter l'information locale de l'image de niveau de gris pour affiner le résultat final et obtenir un ensemble fiable de paires de triplets. En effet, les paires de minuties appariées ne sont pas nécessairement toutes vraies et surtout dans le cas des comparaisons imposteurs. Cela est dû aux éventuelles erreurs qui pourraient survenir lors de l'extraction des minuties ou lors du processus d'appariement.

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre première contribution qui consiste en une nouvelle stratégie permettant d'intégrer des informations locales supplémentaires dans le processus d'appariement local des minuties.




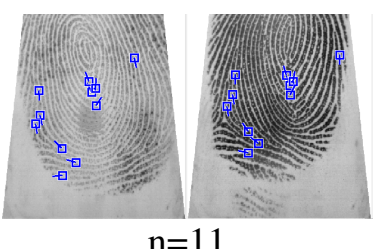
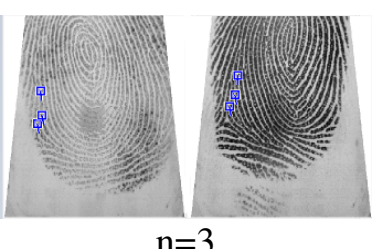
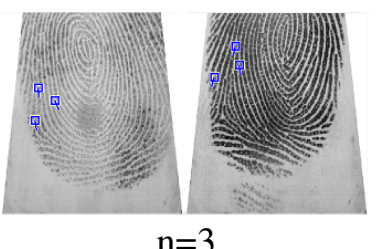
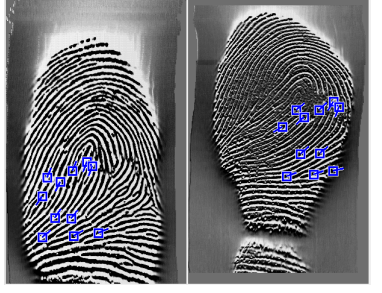
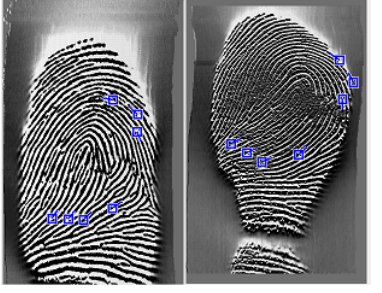
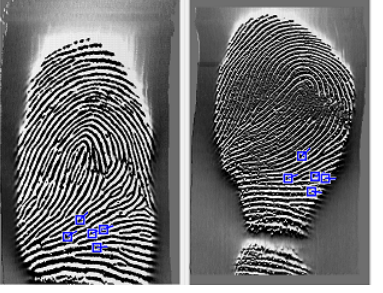
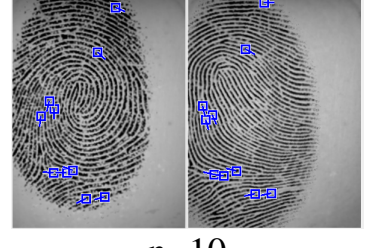

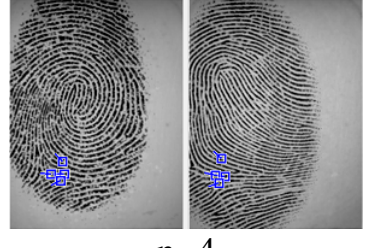
Étant donné que les informations géométriques utilisées pour l'appariement local des minuties sont insuffisantes pour obtenir des résultats précis, nous avons intégré une étape de validation dans le processus d'appariement juste avant l'étape de consolidation globale. Cette validation repose sur la caractérisation des régions du voisinage des m-triplets par un ensemble de moments quaternioniques orthogonaux.

Trois descripteurs ont été proposés : le descripteur à base du Quaternion des Moments de Zernike, le descripteur à base du Quaternion des Moments Disque-Harmoniques et le troisième descripteur à base du Quaternion des Moments de Bessel-Fourier. Pour chaque descripteur, nous avons proposé deux variantes.




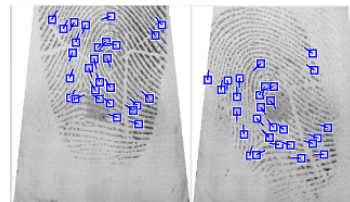
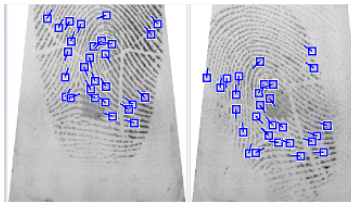
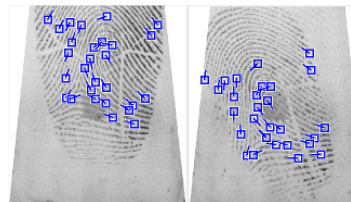
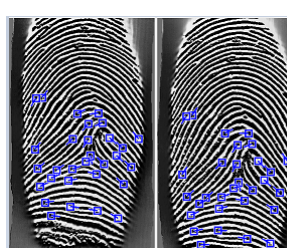


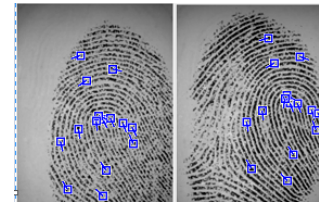
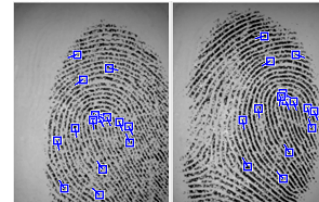
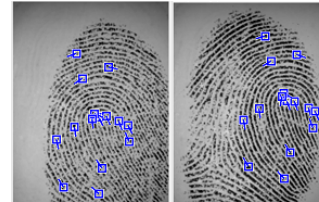
Nous avons mesuré la dissimilitude entre les vecteurs caractéristiques des paires de m-triplets. Nous avons considéré la distance Euclidienne pour la variante module et la distance de Hamming pour la variante phase.

Nous avons mené plusieurs expérimentations afin d'évaluer les performances de la méthode proposée. Pour ce faire, nous avons considéré les bases de données FVC2002 et FVC2004 qui proposent un nombre important d'images d'empreintes digitales de mauvaise qualité. D'abord, nous avons étudié l'impact de la validation sur les performances de l'appariement des empreintes digitales et spécialement dans le cas des comparaisons imposteurs. Il a été démontré que toutes les variantes de notre méthode proposée apportent des améliorations significatives à l'algorithme d'appariement de base. Ensuite, nous avons comparé les pouvoirs discriminants de différents descripteurs quaternaires. Les résultats montrent que les QZM ont un meilleur pouvoir discriminant par rapport aux autres descripteurs quaternaires.

Le chapitre suivant sera consacré à présenter notre seconde contribution qui consiste en une nouvelle méthode d'appariement purement local des minuties, permettant d'éviter le passage par une phase de consolidation globale.

	L'algorithme M3gl	MQDHM	MQZM
DB1	 <p>n=10</p>	 <p>n=3</p>	 <p>n=3</p>
DB2	 <p>n=11</p>	 <p>n=3</p>	 <p>n=3</p>
DB3	 <p>n=11</p>	 <p>n=7</p>	 <p>n=5</p>
DB4	 <p>n=10</p>	 <p>n=4</p>	 <p>n=4</p>

**FIGURE 3.12** Marquage des emplacements des paires de minuties appariées dans une comparaison de deux empreintes de personnes différentes ;  $n$  est le nombre de minuties appariées.

	l'algorithme M3gl	MQDHM	MQZM
DB1	 n=25	 n=25	 n=23
DB2	 n=28	 n=28	 n=28
DB3	 n=30	 n=29	 n=29
DB4	 n=15	 n=15	 n=15

**FIGURE 3.13** Résultats des paires de minuties correspondantes entre deux impressions d'une même empreinte;  $n$  est le nombre de minuties appariées.

## Chapitre 4

# Méthode d'appariement local des m-triplets sans consolidation globale

### 4.1 Introduction

D'une manière générale, on distingue dans la littérature trois grandes familles d'algorithmes d'appariement des empreintes digitales basés sur les minuties :

La première approche repose sur un processus d'alignement qui opère un appariement global de l'ensemble des minuties. Il faut noter que cet alignement requiert des ressources de calcul considérables et peut faire recours à l'extraction d'autres caractéristiques telles que les points singuliers et les cartes d'orientation.

Pour réduire la complexité des calculs et améliorer la tolérance aux distorsions, une seconde famille d'algorithmes a été proposée. Elle effectue un appariement local des minuties suivi d'une étape de consolidation. La première étape détermine les paires de minuties qui correspondent localement et extrait un sous-ensemble d'alignements candidats des deux empreintes en cours de comparaison. D'autre part, l'étape de consolidation cherche à mesurer le degré de similitude optimale superposant un nombre maximal de paires de correspondances locales.

Récemment, la plupart des propositions d'appariement des minuties qui sont conçues pour être mises en œuvre dans des systèmes temps-réel, ont renoncé à l'idée d'une correspondance globale en faveur d'une correspondance locale. Elles consistent à comparer les empreintes suivant les structures locales des minuties. Ces structures sont formées en considérant différentes relations liant les minuties voisines.

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé l'intégration d'une étape de validation des paires des m-triplets dans le processus d'appariement des empreintes digitales. Cette nouvelle stratégie d'appariement bien qu'elle permette d'apporter une amélioration nette en termes de précision, elle implique une charge supplémentaire de traitement puisqu'elle maintient aussi la phase de consolidation globale.

Dans le présent chapitre, la méthode que nous proposons comme seconde contribution suit elle aussi la tendance des méthodes récentes d'appariement local des minuties et démontre qu'il est possible d'atteindre des taux de performances très satisfaisants tout en évitant le passage par la phase de consolidation globale.

Cette seconde contribution vise à apporter une double amélioration au processus d'appariement des empreintes digitales, la réduction des taux d'erreurs et l'optimisation des étapes d'appariement. En plus, notre méthode de comparaison doit être insensible à d'éventuelles translations, rotations et déformations qui affectent systématiquement les empreintes digitales afin de déterminer d'une manière efficace si deux empreintes correspondent au même doigt ou non.

Dans ce chapitre, nous exposons d'abord une analyse des méthodes d'appariement des empreintes digitales basées sur les m-triplets. Puis nous détaillons notre méthode proposée ainsi que ses différentes variantes conçues pour l'appariement local des paires des m-triplets. A la fin, nous présentons les résultats expérimentaux des tests mis en œuvre pour évaluer la pertinence de la méthode proposée.

## 4.2 Vue d'ensemble des algorithmes d'appariement basés m-triplets

Avant d'entamer une description détaillée de notre seconde contribution qui concerne l'appariement des empreintes digitales, nous proposons dans cette section un aperçu des principales méthodes de comparaison des empreintes digitales basées sur les structures non-centrées telles que décrite par MEDINA-PÉREZ et al., 2012 et par PARZIALE et NIEL, 2004. Nous rapportons dans ce qui suit l'algorithme PN comme proposé dans PARZIALE et NIEL, 2004. Nous rappelons qu'un aperçu détaillé de l'algorithme M3gl (MEDINA-PÉREZ et al., 2012) a été décrit dans la section 3.2 du chapitre 3.

### 4.2.1 Algorithme PN

PARZIALE et NIEL, 2004 ont proposé un algorithme d'appariement des empreintes digitales basé sur des structures non-centrées (l'algorithme PN). Ils ont introduit l'information relative à la position et l'orientation de chaque minutie par rapport à ses voisines. A cet effet, la dépendance entre les minuties est obtenue en appliquant sur l'ensemble des points une triangulation de Delaunay où chaque minutie est utilisée comme un sommet de triangle. La triangulation de Delaunay a été choisie car elle présente une stabilité structurelle dans le cas des perturbations des positions aléatoires. Les auteurs ont mentionné que les triangles résultants, peuvent subir un certain degré de déformation, dû à l'élasticité de la peau. Et par conséquent, la longueur des côtés et les angles internes d'un triangle peuvent changer entre deux impressions du même doigt. D'autre part, les auteurs suggèrent que chaque minutie aura toujours les mêmes voisins, même en présence de la rotation, de la translation ou de faibles changements d'échelle.

L'algorithme PN comprend trois étapes majeures : (a) comparaison des paires de minuties, (b) comparaison des triplets de minuties, (c) consolidation globale et calcul du score de similarité.

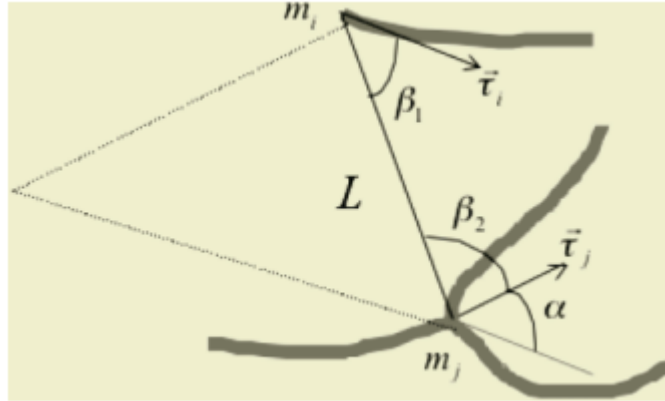
#### (a) Comparaison des paires de minuties

Dans cette étape, pour chaque paire de minuties les quantités suivantes sont extraites (Figure 4.1) :

- La distance  $L$  entre deux minuties ;
- L'angle  $\alpha$  entre les orientations des deux minuties (différence angulaire entre  $\tau_i$  et  $\tau_j$ ) ;
- Les angles  $\beta_1$  et  $\beta_2$  entre l'orientation de chaque minutie et les segments les reliant.

Ensuite, chaque paire de minuties de l'ensemble requête  $Q$  est comparée à toutes les paires de minuties de l'ensemble modèle  $T$ , selon les relations suivantes :

$$D_L = \frac{|L^Q - L^T|}{\min(L^Q, L^T)} < Th_L \quad (4.1)$$



**FIGURE 4.1** Caractéristiques géométriques extraites d'une paire de minuties, connectées par un triangle tirées de PARZIALE et NIEL, 2004.

$$D_\alpha = |\alpha^Q - \alpha^T| < Th_\alpha \quad (4.2)$$

$$D_\beta = \left| \begin{pmatrix} \beta_1^Q \\ \beta_2^Q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \beta_1^T \\ \beta_2^T \end{pmatrix} \right| < Th_\beta \quad (4.3)$$

avec  $Th_L$ ,  $Th_\alpha$  et  $Th_\beta$  sont des seuils réglés à base des caractéristiques de l'image.  $L^Q$  et  $L^T$  représentent deux distances génériques de l'ensemble requête et modèle respectivement, et  $\alpha^Q$ ,  $\beta_1^Q$ ,  $\beta_2^Q$ ,  $\alpha^T$ ,  $\beta_1^T$ ,  $\beta_2^T$  sont les angles relatifs.

Deux minuties sont définies comparables si et seulement si les conditions suivantes sont remplies :

- La première condition consiste à vérifier les longueurs des côtés. Pour cela, une  $L^Q$  de l'ensemble requête est choisie et vérifiée contre toutes les  $L^T$  de l'ensemble modèle selon l'équation 4.1.
- La deuxième condition retient les paires de minuties avec des  $L^Q$  qui ont vérifiées le premier test, pour une deuxième vérification à base des angles  $\alpha^Q$  relatifs à  $L^Q$  et  $\alpha^T$  relatifs à  $L^T$  selon l'équation 4.2.
- La troisième condition examine les angles  $\beta$  pour les  $L^T$  qui ont réussies aux deux tests précédents. Ici, l'équation 4.3 est considérée et les angles  $\beta_1^Q$ ,  $\beta_2^Q$  relatifs à  $L^Q$  sont vérifiés avec les  $\beta_1^T$ ,  $\beta_2^T$  relatifs à  $L^T$ .

Si l'un des tests précédents échoue pour toutes les longueurs  $L^T$ , alors la  $L^Q$  considérée est rejetée et la suivante est prise en compte. Comme résultat, une liste de candidats possibles  $L^T$  pour chaque  $L^Q$  est obtenue. Cela signifie que pour chaque paire de minuties (connectée par un  $L^Q$ ) dans l'ensemble requête, il peut y avoir plusieurs paires de minuties dans l'ensemble modèle qui présentent la même structure locale.

#### (b) Comparaison des triplets de minuties

À ce stade, les triangles auxquels appartient le segment sont utilisés. Chaque segment  $L$  appartient à un ou deux triangles. Si, au moins, l'un des deux triangles est similaire à son homologue, les paires de minuties sont supposées mises en correspondance.

La similarité entre les triangles est mesurée en utilisant l'équation 4.1 pour tous les côtés du triangle. Si les côtés des deux triangles respectent cette relation, les triangles sont dits

similaires et stockés pour l'étape de traitement suivante. Une liste de triangles de  $Q$  et de ses candidats relatifs de  $T$  est obtenue par cette procédure. Soit  $p$  le nombre de ces paires de triangles.

**(c) Consolidation globale et calcul du score de similarité**

En utilisant les coordonnées du triangle mis en correspondance, la transformation  $Tr$  (équation 4.4) est calculée  $p$  fois, en obtenant un ensemble de  $p$  triplets. Ces paramètres sont appliqués à l'ensemble des minuties requêtes en utilisant l'équation 4.4, ainsi obtenant  $p$  ensembles de points.

Soit  $Q = m_1^Q, m_2^Q, \dots, m_M^Q \subset R^2$  et  $T = m_1^T, m_2^T, \dots, m_M^T \subset R^2$  représentent les ensembles des minuties extraites des images requête et modèle respectivement. La transformation  $Tr : Q' \rightarrow T'$  qui mappe chaque point d'un sous-ensemble  $Q' \subseteq Q$  avec chaque point d'un sous-ensemble  $T' \subseteq T$  est calculée comme suit :

$$Tr \begin{pmatrix} x_j^{Q'} \\ y_j^{Q'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i^{T'} \\ y_i^{T'} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

où  $\vartheta \in [0, 2\pi[$  est l'angle de rotation,  $t_x$  et  $t_y$  sont les translations le long des axes  $x$  et  $y$  respectivement.

A ce niveau, le nombre de minuties appariées est obtenu. Ensuite, pour chaque ensemble de transformation, le nombre de minuties voisines d'une minutie modèle est calculé selon l'équation 4.5.

$$ED(m_j^{Q'}, m_i^{T'}) = \left| Tr \begin{pmatrix} x_j^{Q'} \\ y_j^{Q'} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_i^{T'} \\ y_i^{T'} \end{pmatrix} \right| \leq d_0 \quad (4.5)$$

où  $ED$  est la distance Euclidienne,  $m_i = \{x_i, y_i, \theta_i\}$  et  $m_j = \{x_j, y_j, \theta_j\}$  deux minuties représentées par leurs positions et leurs orientations, et  $d_0$  un seuil donné.

Dans les régions d'empreinte digitale contenant de nombreuses minuties, plus qu'une minutie peut être présente dans le voisinage. Pour cela, seulement la minutie la plus proche est considérée, c'est à dire une minutie n'est comptée qu'une seule fois.

Le score de correspondance entre les empreintes digitales requête et modèle est défini par :

$$S = 100 * \sqrt{\frac{n^2}{M.N}} \quad (4.6)$$

où  $M$  et  $N$  sont les nombres des minuties dans les empreintes digitales requête et modèle respectivement et  $n = \max(n_1, n_2, \dots, n_p)$ , avec  $n_1, n_2, \dots, n_p$  représentent les nombre de minuties appariées pour chaque ensemble de transformation.

## 4.2.2 Architecture générale des algorithmes étudiés

Bien que les deux algorithmes M3gl et PN utilisent différentes stratégies d'appariement à base des structures locales m-triplets, ils sont constitués par les même étapes : l'appariement local des minuties, la consolidation globale des minuties, et le calcul du score de similitude final (Figure 4.2).

Soient  $Q$  et  $T$  les ensembles de minuties extraites de l'image requête et modèle, respectivement. Dans l'algorithme PN, après une triangulation Delaunay de paires de  $Q$  et  $T$ , une liste de paires de triangles est obtenue par correspondance de leur structure triangulaire locale. Dans l'étape de

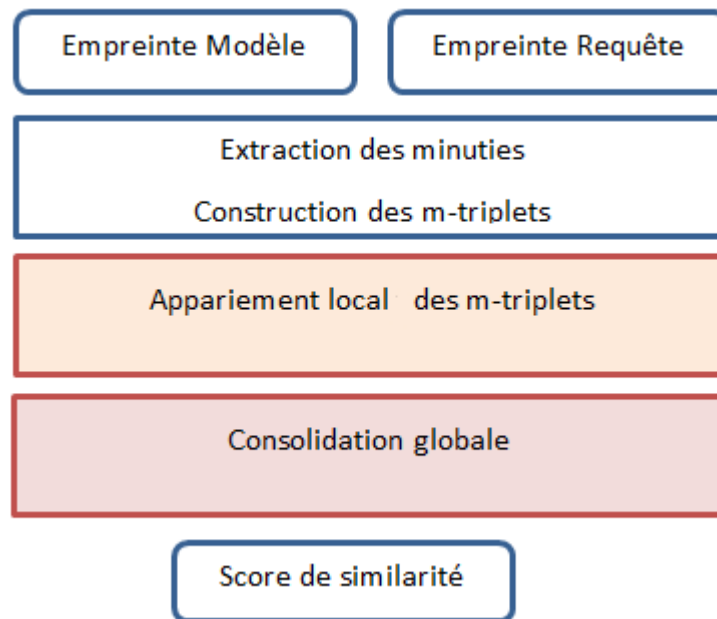


FIGURE 4.2 Schéma général commun des méthodes basiques M3gl et PN.

consolidation, l'algorithme applique sur l'ensemble  $Q$  de la requête toutes les transformations géométriques d'alignement possible en considérant à chaque fois une paire de minuties issues de l'appariement local. Ensuite, pour chaque ensemble transformé  $Q'$ , on compte  $n_i$  le nombre de minuties qui se situent dans le voisinage des minuties du modèle  $T$ . Le score final est calculé à base du nombre  $n_i$  maximal obtenu suivant la formule 4.6.

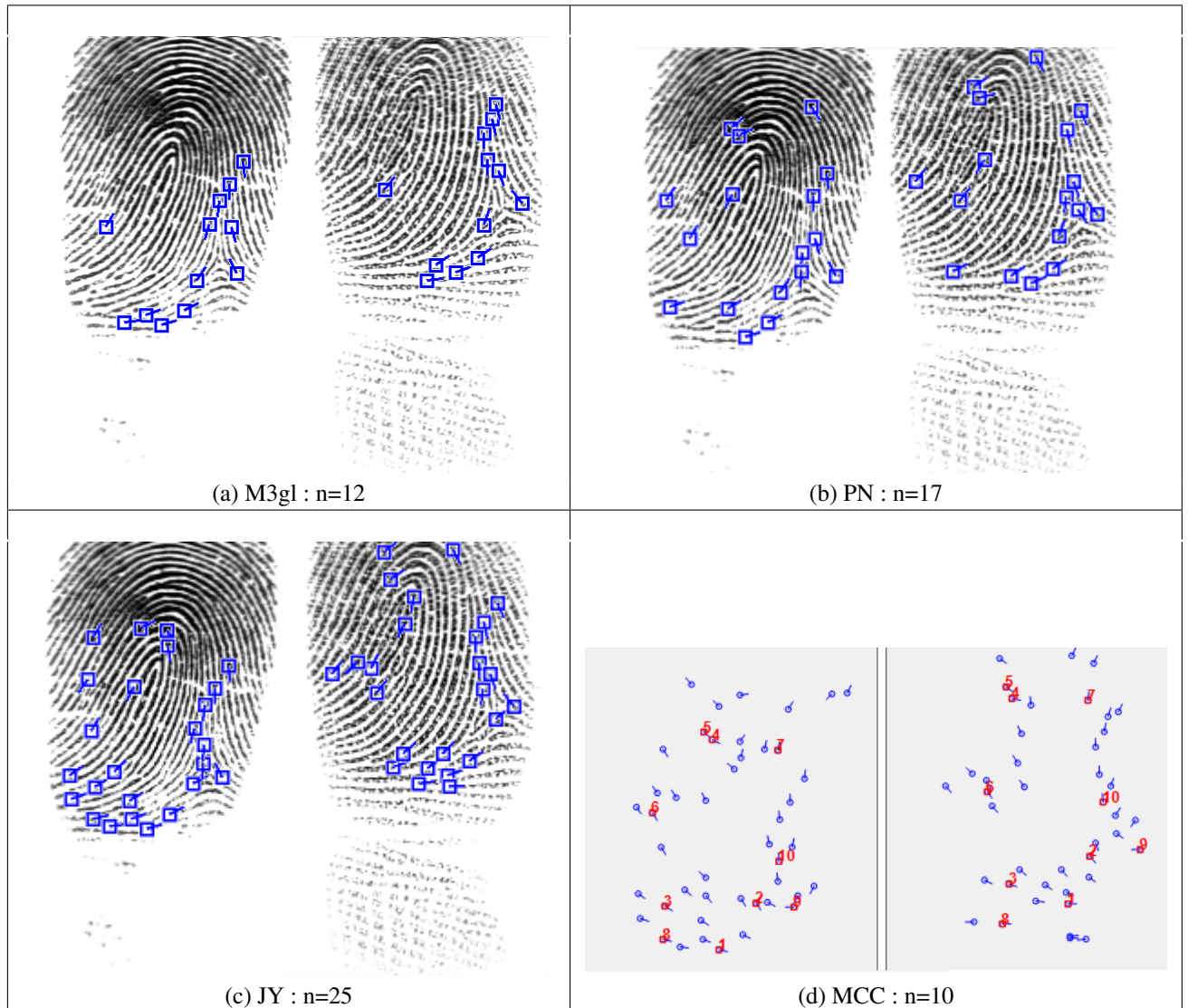
Par contre, l'algorithme M3gl cherche d'abord les m-triplets similaires dans l'empreinte modèle en utilisant une recherche binaire. Ensuite, il ordonne toutes les paires correspondantes suivant la valeur de similarité et filtre les paires de minuties appariées localement. L'étape finale de consolidation considère chaque paire de minuties comme une paire de référence pour la rotation de l'image de l'empreinte digitale requête et effectue une transformation de minuties de requête suivant chaque paire de référence. Puis, il sélectionne la transformation qui maximise le nombre de minuties correspondantes et calcule la valeur de similarité en utilisant la formule 3.9.

### 4.2.3 Limitations des algorithmes de base

Rappelons que le résultat attendu de l'appariement est le degré de similarité des empreintes digitales comparées. Dans le cas où les empreintes proviennent de deux doigts différents, on s'attend un score très faible, alors que dans le cas où les empreintes sont du même doigt, on s'attend à observer un nombre assez important de minuties appariées. Cependant, si la qualité d'une des deux images est mauvaise, la fiabilité des algorithmes de comparaison peut être dégradée.

Les appariements authentiques entre deux impressions du même doigt ne représentent pas nécessairement ou systématiquement un score élevé, alors que des appariements imposteurs entre deux empreintes de doigts différents peuvent parfois produire un degré de similarité suffisamment important pour décider une fausse acceptation. Il s'agit là d'un échec de l'algorithme utilisé.

Nous présentons dans la Figure 4.3 un échantillon d'un appariement imposteur présentant un degré de similarité assez élevé et ceci par différents algorithmes proposés dans la littérature : M3gl (MEDINA-PÉREZ et al., 2012), PN (PARZIALE et NIEL, 2004), MCC (CAPPELLI et al., 2010), JY (JIANG et YAU, 2000). Il faut noter que les deux empreintes comparées appartiennent à deux individus différents et sont tirées de la partie DB1 de la base de données FVC2004.



**FIGURE 4.3** Marquage des emplacements des paires de minuties appariées ( $n$ ) dans une comparaison de deux empreintes de personnes différentes par les algorithmes de l'état de l'art : (a) M3gl, (b) PN, (c) JY, (d) MCC.

Etant basés sur des structures topologiques m-triplets, les méthodes d'appariement M3gl et PN assurent une bonne performance. Cependant, leur performance peut être dégradée en présence des distorsions locales non linéaires. En outre, le petit rayon de ces structures de m-triplets impose un défi important car ils ne sont pas en mesure d'évaluer ou de vérifier la qualité de la correspondance des m-triplets puisqu'il est possible de combiner faussement des couples de m-triplets qui ne représentent pas des ensembles de minuties similaires. En outre, les erreurs d'extraction de minuties entraînent souvent un nombre plus ou moins considérable de minuties

manquantes ou fausses. Pour remédier à ces problèmes, nous avons proposé une nouvelle méthode d'appariement qui a un caractère purement local et dont le processus permet aussi d'éviter le passage par une phase de consolidation.

### 4.3 Méthode Proposée

Le bruit d'acquisition s'avère être la cause essentielle des faux rejets des empreintes digitales : déplacement de minuties, erreur dans le calcul de l'orientation, ou simplement occultation totale ou partielle. Ces faux rejets dans le cas des méthodes basées sur les triplets de minuties sont compensés par le grand nombre de m-triplets mis en jeux, permettant ainsi de consolider une information peu fiable localisée dans une partie bruitée, par une information issue d'une autre région de l'image.

A cet effet, nous nous focalisons sur la réduction du taux de fausses acceptations dans les méthodes basées triplets tout en respectant un bon compromis avec le taux des faux rejets.

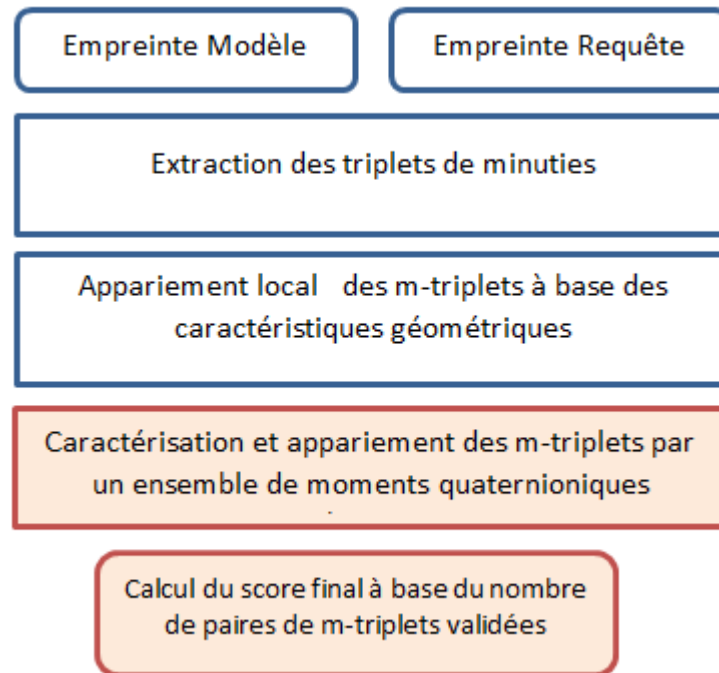
Ce problème peut être résolu par la fusion de descripteurs locaux puisqu'il est peu probable qu'un couple d'empreintes imposteurs présentant une forte similarité pour un descripteur (fausse acceptation), présente aussi une forte similarité pour le deuxième. Ainsi, la combinaison des méthodes de similarités peut permettre de réduire le taux des fausses acceptations.

Dans cette seconde contribution, nous suggérons que l'information niveau de gris de voisinage des m-triplets peut être suffisante pour enrichir l'étape de l'appariement local afin d'établir un calcul de score de similarité directement à partir des triplets. De plus, la génération de la totalité de transformations géométriques d'alignement possibles lors de la phase de consolidation globale est généralement complexe et coûteuse en temps de calcul. A cet effet, pour réduire le coût calculatoire, la méthode proposée dans ce chapitre est purement locale et ne fait pas recours à une étape de consolidation globale.

#### 4.3.1 Algorithme d'appariement local proposé

Notre seconde contribution consiste en la proposition d'un algorithme d'appariement local des minuties. L'objectif de notre approche est d'éviter le passage par la phase globale de consolidation (HALOUI et al., 2017). Toutefois, nous exploitons les moments quaternioniques pour la validation des paires de m-triplets issus de l'étape d'appariement local. Nous avons constaté que cette étape de validation s'avère suffisante pour obtenir une liste de paires de m-triplets correctement appariées. Ceci est logiquement vraisemblable puisque l'appariement se fait entre des structures riches en informations locales, les m-triplets, en combinaison avec des caractéristiques additionnelles à pouvoir discriminatoire remarquable, les moments quaternioniques des m-triplets. En effet, nous avons pu éviter complètement le stade de consolidation et calculer le score de correspondance final après une étape simple consistant à trier et à rejeter les m-triplets redondants.

La Figure 4.4 récapitule les différentes étapes de la méthode proposée. Il convient de noter que la phase de consolidation qui succédait l'étape de l'appariement à base des m-triplets, dans notre première contribution, est complètement ignorée. En effet l'étape de validation des paires de m-triplets conduit directement à une mesure de similarité à base du nombre de ces paires. Cette modification de l'algorithme d'appariement constitue une amélioration considérable puisqu'elle permet d'éviter des alignements globaux répétés afin de trouver celui qui maximise le nombre de paires de minuties appariées.



**FIGURE 4.4** Schéma de la méthode d'appariement local proposée.

Nous présentons l'algorithme d'appariement local des minuties comme suit :

### Algorithme d'appariement local

#### ENTREES :

- $Q$  et  $P$  : les ensembles des minuties extraites respectivement des empreintes digitales Modèle et Requête.
- $R$  et  $T$  : les ensembles des m-triplets extraits respectivement des empreintes digitales Modèle et Requête.

#### SORTIE :

- $S$  : le score final de similarité entre les deux empreintes digitales Modèle et Requête.

#### ALGORITHME :

1. Soit  $A \leftarrow \{\}$  l'ensemble qui va contenir les paires de m-triplets issus de l'appariement préliminaire à base des caractéristiques géométriques des minuties.
2. Pour chaque m-triplet requête  $r_i \in R$ , chercher les m-triplets du modèle  $\{t_1; t_2; \dots; t_u \subset T\}$  ayant une valeur de similarité structurelle suffisante et ajouter les paires  $\{(r_i; t_1); (r_i; t_2); \dots; (r_i; t_u)\}$  à  $A$ .
3. Filtrer la liste préliminaire  $A$  en rejetant toutes les paires de triplets  $\in A$  ayant une dissimilitude basée sur les moments quaternioniques (basée-QTM) qui est supérieure à un seuil  $TH$  (Figure 4.5).
4. Trier par ordre croissant toutes les paires correspondantes  $(r_i; t_u) \in A$  selon la valeur de dissimilitude basée-QTM.
5. Soit  $M \leftarrow \{\}$  l'ensemble qui va contenir les paires de triplets validées.
6. Pour chaque  $(r, t) \in A$  faire
  - a. Si aucune paire de m-triplet  $(x, y) \in M$  ne vérifie  $x = r$  ou  $y = t$  alors  $M \leftarrow M \cup \{(r, t)\}$
7. Calculer le score global de correspondance :

$$S = \frac{|M|^2}{|R| \cdot |T|}$$

Où  $|M|$  est la cardinalité de l'ensemble  $M$  représentant la liste finale des m-triplets appariés,  $|R|$  et  $|T|$  sont le nombre de m-triplets dans les ensembles m-triplets de requête et de modèle, respectivement.

L'algorithme d'appariement proposé constitue une amélioration majeure des algorithmes de base M3gl et PN :

- Les paires de m-triplets jugées similaires en regard de leurs propriétés géométriques et structurelles doivent passer par un filtre qui ne retient que les paires ayant une dissimilitude suffisamment faible en termes de leurs vecteurs caractéristiques basés-QTM. Les entrées de l'algorithme de validation consistent en la totalité des paires de m-triplets issues de l'étape précédente, à savoir les m-triplets correspondants. Le choix d'un seuil de distance de validation est primordial pour garantir le bon fonctionnement du filtre ;

- La phase de consolidation est ignorée et le score final est calculé à base du nombre de paires de m-triplets retenues à l'issue de l'étape de validation.

### 4.3.2 Filtrage des paires de m-triplets

Le filtrage des paires de m-triplets, étape 3 de l'algorithme, consiste en une validation à base d'un descripteur local discriminant, suivie d'une suppression des m-triplets redondants.

#### — Validation des m-triplets

Dans la première contribution, nous avons interposé une étape de validation entre l'étape de mise en correspondance des paires de m-triplets et l'étape de consolidation globale. Nous avons vu que cette étape de validation permet de garder les paires de m-triplets effectivement similaires et de nettoyer des paires invalides qui ont pu être faussement mises en correspondance par l'algorithme d'appariement de base. A cet effet, nous proposons dans cette seconde contribution d'exploiter les résultats de cette étape de validation pour calculer un score de similarité sans passer par une dernière étape de consolidation.

Nous résumons l'étape de validation proposée dans la Figure 4.5.

1. Pour chaque m-triplet, nous caractérisons les informations d'image niveaux de gris situées autour de ses trois sommets à l'aide d'un ensemble de moments orthogonaux à valeurs quaternioniques pour obtenir un vecteur caractéristique.
2. Pour chaque couple de m-triplets, nous calculons une mesure de dissimilitude entre leurs vecteurs de caractéristiques respectifs. Cette mesure de similarité est obtenue par la distance euclidienne entre ces vecteurs caractéristiques.
3. Si leur mesure de dissimilitude ne dépasse pas un seuil défini, la paire de triplets est considérée comme validée ; Sinon, nous l'écartons de la liste des m-triplets valide.

Les sorties de l'étape de validation / raffinement consistent en les paires de m-triplets conservées qui sont suffisamment similaires en regard, à la fois, de leurs structures géométriques et leurs descripteurs caractéristiques basés sur les moments quaternioniques.

#### — Suppression des m-triplets redondants

A ce niveau, chaque paire de m-triplets dispose d'une valeur de dissimilitude obtenue par le calcul de la distance entre ses descripteurs basés sur les moments quaternaires. Nous ordonnons toutes les paires des m-triplets dans le sens croissant de cette distance. Dans cet ordre, les paires de m-triplets sont ajoutées progressivement tout en vérifiant qu'un triplet de l'empreinte requête ne soit mis en relation qu'avec un seul triplet de l'empreinte modèle. Le score final de correspondance est déduit à partir du nombre final de paires de m-triplets retenues.

## 4.4 Résultats expérimentaux

Notre objectif est de mettre en valeur le gain en termes de performance apporté par notre méthode d'appariement local des m-triplets.

Nous rappelons que cette seconde contribution vise à améliorer les algorithmes d'appariement d'empreintes digitales qui reposent sur les techniques basées sur les m-triplets. Cette amélioration devrait être considérée comme une extension majeure de nos travaux réalisés dans la première contribution. L'objectif principal de cette extension consiste à booster l'étape de mise

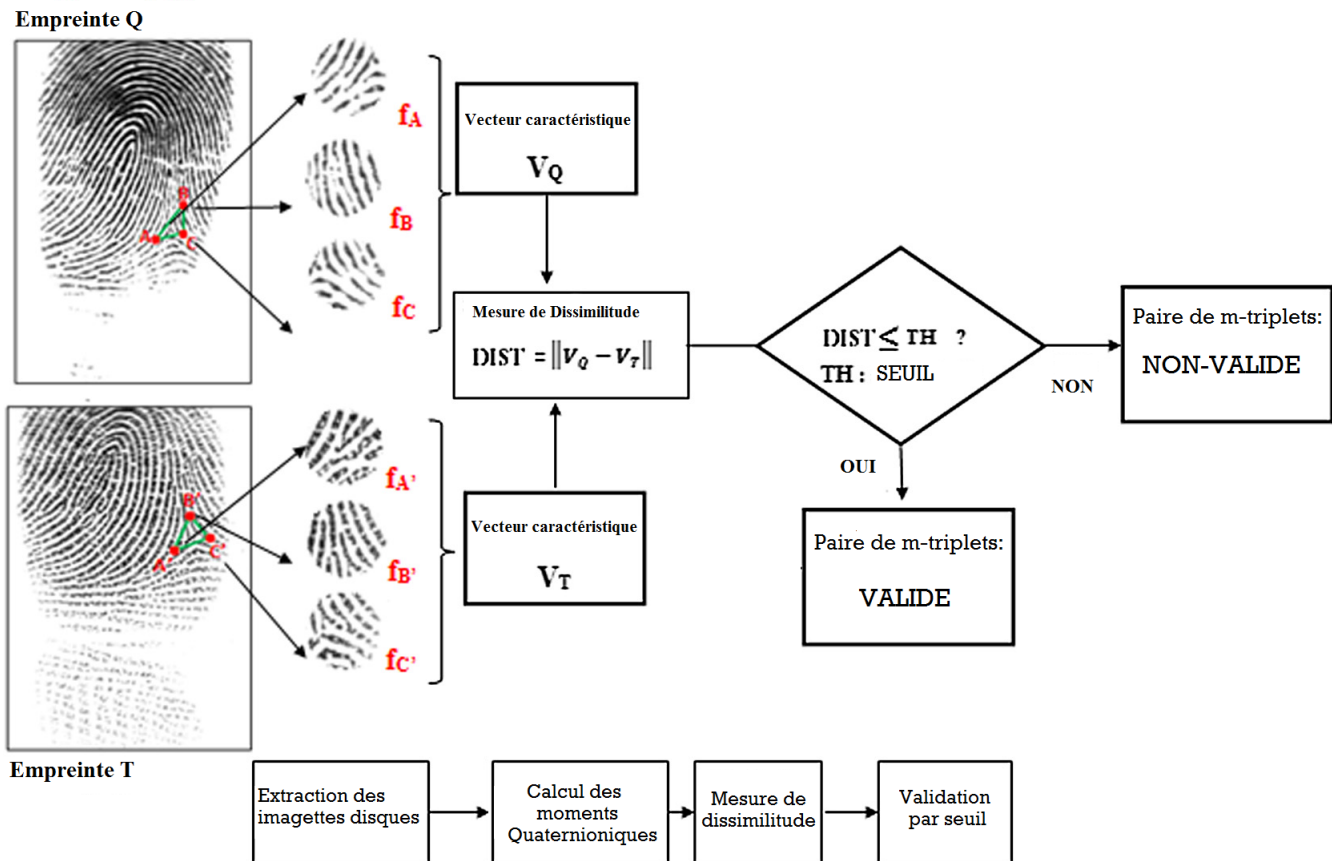


FIGURE 4.5 Schéma détaillant l'étape de validation proposée.

en correspondance locale des minuties pour éviter le passage coûteux par la phase de consolidation globale.

Dans cette section, nous allons d'abord présenter la base de données utilisée lors des tests expérimentaux. Ensuite, nous exposons les variantes proposées et les paramètres recommandés pour un meilleur appariement des empreintes digitales. A la fin, une évaluation des performances du système en fonction de chacune des différentes variantes proposées sera détaillée.

#### 4.4.1 Bases de tests

Nous utilisons les quatre parties ( $DB1$ ,  $DB2$ ,  $DB3$  et  $DB4$ ) de la base de données standard FVC2004. Chaque partie est divisée en deux ensembles : l'ensemble A, comptant 8 impressions pour 100 individus, est destiné pour le test et l'ensemble B, comptant 8 impressions pour 10 individus, est dédié à l'apprentissage.

Nos expériences de test sont mises en œuvre à des fins de vérification d'identité biométrique. Pour toutes les parties de la base de données, chaque impression d'empreinte digitale est comparée aux autres impressions du même doigt pour calculer le taux de fausse non-correspondance (FNMR) [Taux de faux rejets (FRR)]. Le nombre total de comparaisons authentiques, en utilisant l'ensemble de test A, est 2800. D'autre part, les empreintes de différents doigts sont comparées pour calculer le taux de fausse correspondance (FMR) [taux de fausse acceptation (FAR)]. Au total 4950 scores imposteurs sont évalués.

### 4.4.2 Variantes proposées

Nous étudions dans ce qui suit, différentes combinaisons (Méthode de base/ Moments quaternioniques). La méthode de base est destinée pour l'appariement des m-triplets à base des caractéristiques géométriques. Nous retenons deux méthode : la méthode M3gl proposée dans (MEDINA-PÉREZ et al., 2012) et la méthode PN présentée dans (PARZIALE et NIEL, 2004). D'autre part, les moments quaternioniques sont dédiés à la caractérisation et l'appariement à base de l'information niveau de gris de voisinage des m-triplets. Nous choisissons les moments Disques-Harmoniques quaternaires QDHM et les moments de Zernike quaternaires QZM.

Au total, nous avons quatre variantes de notre algorithme, qui sont récapitulées comme suit :

- MQZ : M3gl/QZM.
- MQD : M3gl/QDHM.
- PQZ : PN/QZM.
- PQD : PN/QDHM.

### 4.4.3 Choix des paramètres

Pour l'appariement géométrique des triplets en choisissant PN comme méthode de base, nous retenons les paramètres proposés par PARZIALE et NIEL, 2004. Ces paramètres impliquent notamment des seuils  $TH_L = 0, 1$ ,  $TH_\alpha = \pi/12$  et  $TH_\beta = \pi/9$ .

De même pour l'appariement géométrique des triplets en choisissant M3gl comme méthode de base, nous utilisons les paramètres proposés par MEDINA-PÉREZ et al., 2012. Les paramètres sélectionnés sont :  $t_l = 12$ ,  $t_g = 12$  et  $t_\alpha = 6$ .

Les paramètres utilisés pour la caractérisation et l'appariement des m-triplets à base de l'information niveau de gris ont été estimés empiriquement à travers les ensembles B de chaque partie de la base  $DB1_B$ ,  $DB2_B$ ,  $DB3_B$  et  $DB4_B$ . Les différentes valeurs de ces seuils sont rapportées dans le (Tableau 4.3).

TABLE 4.1 Distances de validation pour les quatre variantes de notre méthode proposée.

Variantes	Distances Seuil
PQZ et PQD	60
MQZ et MQD	40

Nous avons configuré empiriquement l'ordre des moments  $N_{max}$  à 8 pour les QDHM et les QZM, ce qui correspond à neuf composants.

### 4.4.4 Mesures de performances

Dans ces expérimentations, nous mesurons la performance des algorithmes en termes de :

- Les courbes DET,
- Le taux d'égale erreur (EER),
- Les indicateurs de performance FMR100 et FMR1000,
- Les moyennes des triplets filtrés,

- Les moyennes des minuties filtrées,
- Les taux des triplets filtrés par l'étape de validation,
- Les taux des minuties filtrées par l'étape de validation,
- Le temps de calcul.

Nous nous intéressons à mettre en valeur l'impact des caractéristiques géométriques des triplets, l'effet du type des moments quaternaires utilisés, ainsi que les performances de l'algorithme d'appariement proposé en termes de précision et de temps de calcul.

#### 4.4.5 Impact des caractéristiques géométriques des m-triplets

Nous évaluons l'impact de la triangulation et des caractéristiques géométriques utilisés lors de l'appariement des m-triplets. Pour ce faire, nous choisissons l'un des descripteurs QDHM ou QZM pour la caractérisation et l'appariement des m-triplets à base de l'information niveau de gris. Ensuite, nous comparons les performances des processus d'appariement des m-triplets à partir des caractéristiques géométriques comme proposés dans les algorithmes de base PN et M3gl.

Les Figures 4.6 et 4.7 représentent les courbes de performances DET illustrant l'impact du choix des caractéristiques géométriques des m-triplets en fixant les descripteurs de validation aux moments QDHM et QZM respectivement.

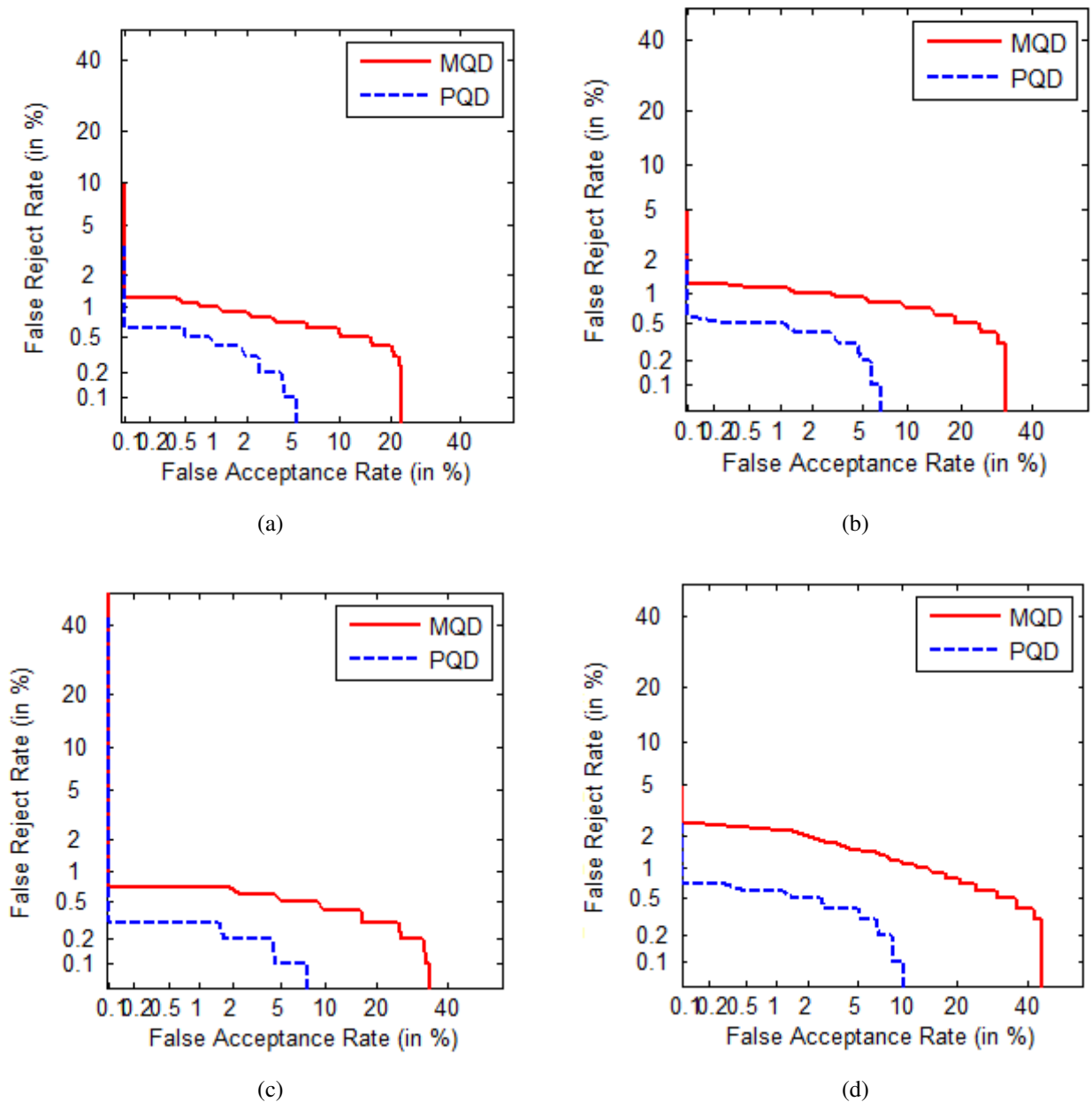
En analysant les différents graphiques illustrés dans les Figures 4.6 et 4.7, on constate que les variantes faisant recours à la combinaison des caractéristiques géométriques des m-triplets proposées dans l'algorithme PN avec les différents descripteurs à base des moments, permettent d'obtenir des résultats plus précis en comparaison à l'utilisation des caractéristiques géométriques proposées dans l'algorithme M3gl.

#### 4.4.6 Effet du type des moments quaternaires

Nous nous concentrons à ce niveau sur l'étude de l'impact du choix de type de moments quaternaires utilisés comme descripteur de validation.

Dans la Figure 4.8, nous présentons un exemple d'appariement imposteur dans le but d'illustrer et d'expliquer l'amélioration obtenue en intégrant l'étape de validation dans le processus d'appariement. Nous reprenons le même échantillon de la Figure 4.3 présenté dans la section 4.2.3. Nous considérons deux images d'empreintes digitales appartenant à deux doigts différents. Nous marquons les minuties correspondantes en utilisant les algorithmes basiques, PN (PARZIALE et NIEL, 2004), M3gl (MEDINA-PÉREZ et al., 2012), MCC (CAPPELLI et al., 2010) et JY (JIANG et YAU, 2000) ainsi que les variantes PQD, PQZ, MQZ et MQD que nous proposons (HALOUI et al., 2017).

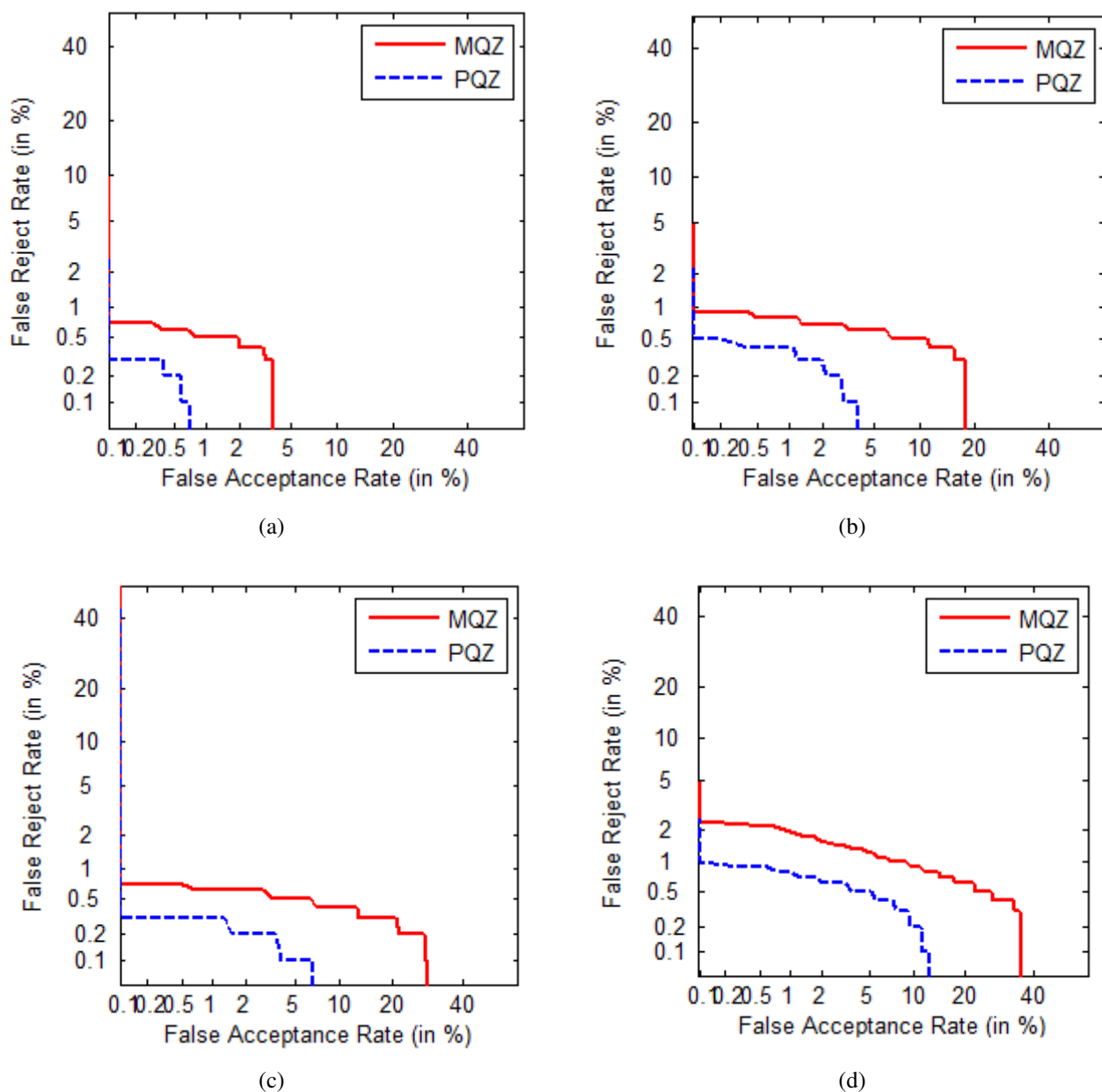
Dans cet exemple, nous notons que le nombre de paires de minuties retenues est réduit considérablement de 19 paires en utilisant l'algorithme de base PN à seulement 3 paires seulement après validation en considérant les variantes PQD et PQZ faisant recours aux descripteurs QDHM et QZM respectivement. En d'autres termes, dans le cas d'un appariement imposteur, l'étape de validation proposée permet d'écarter un nombre important de fausses paires de minuties et réduit effectivement les scores de similarité.



**FIGURE 4.6** Courbes DET illustrant l'impact du choix des caractéristiques géométriques des m-triplets en fixant les descripteurs de validation aux moments QDHM sur (a) DB1\_A, (b) DB2\_A, (c) DB3\_A et (d) DB4\_A de la base FVC2004.

On considère à présent un échantillon d'appariement authentique tiré de la partie DB1 de la base de données FVC2004. La Figure 4.9 reporte les minuties appariées par différents algorithmes comparés.

D'après la Figure 4.9, on constate dans les résultats des variantes MQD(e), MQZ(f), PQD(j) et PQZ(h), une faible réduction du nombre des paires de minuties en comparaison aux résultats relatifs aux algorithmes de l'état de l'art, M3gl(a), PN(b), JY(c) et MCC(d). On peut remarquer que dans le cas d'un appariement authentique, les différentes variantes de la méthode proposée réussissent à nettoyer quelques fausses paires de minuties tout en conservant les paires de

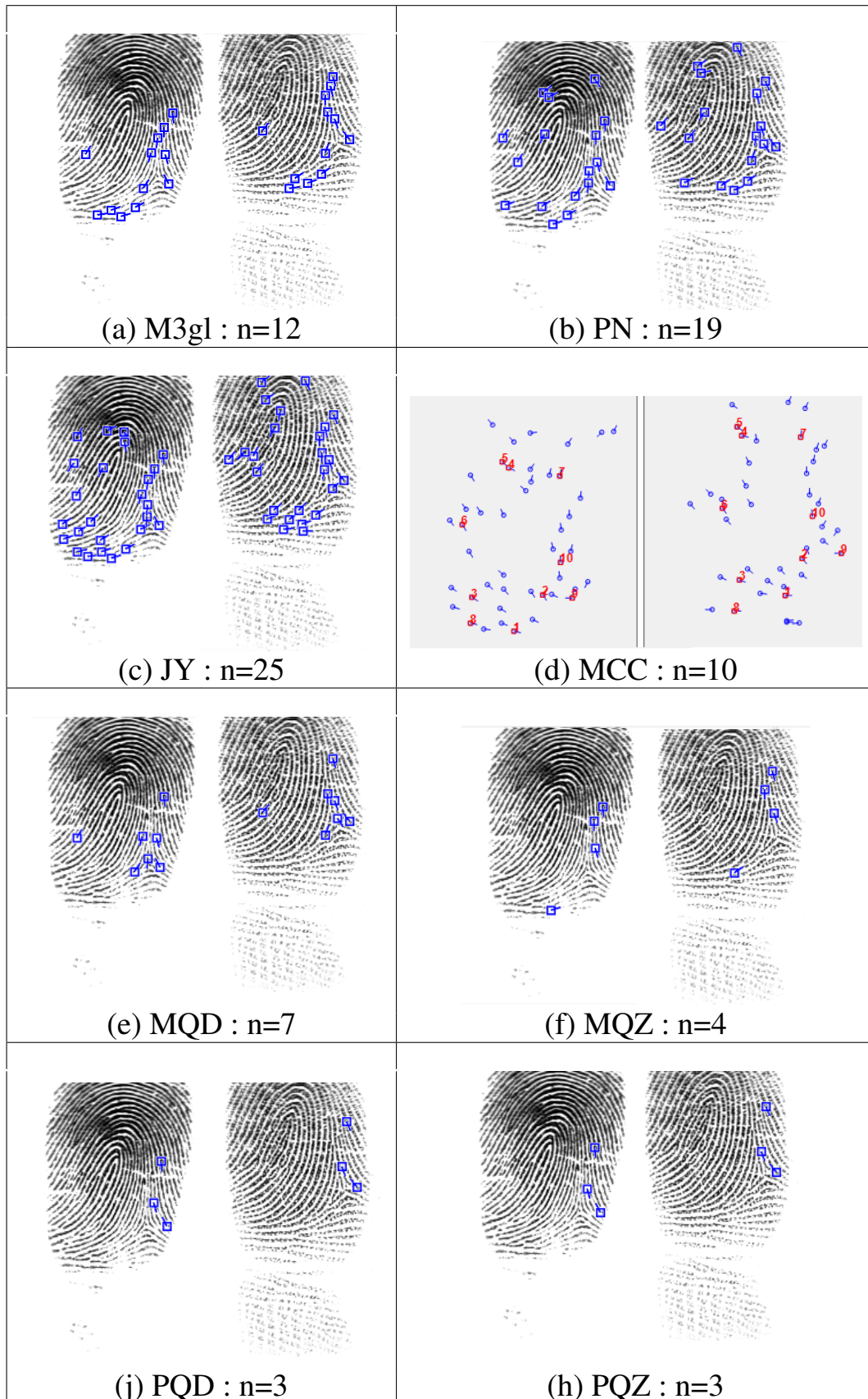


**FIGURE 4.7** Courbes DET illustrant l'impact du choix des caractéristiques géométriques des m-triplets en fixant les descripteurs de validation aux moments QZM sur (a) DB1\_A, (b) DB2\_A, (c) DB3\_A et (d) DB4\_A de la base FVC2004.

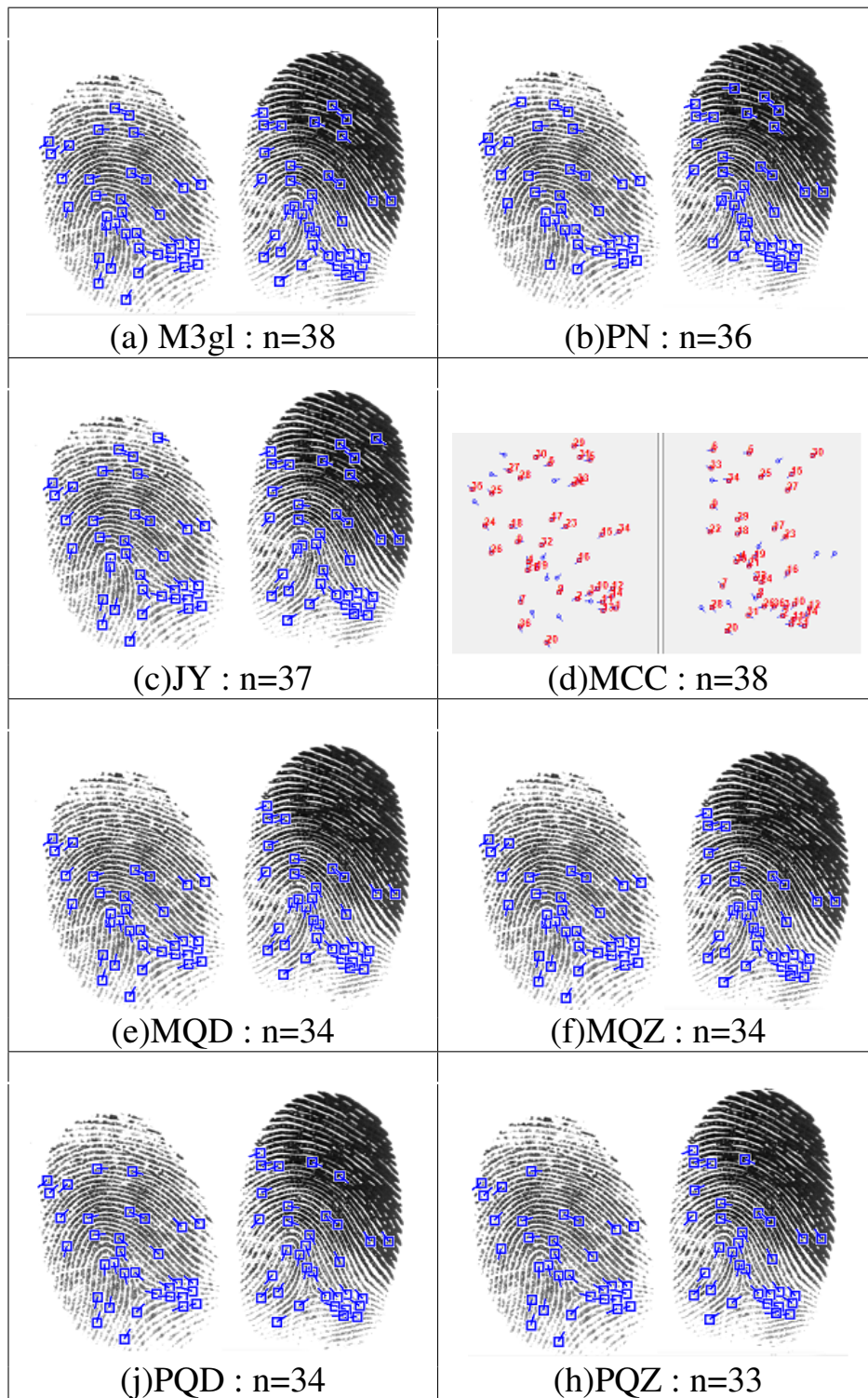
minuties correctes.

Il en découle que notre nouvelle méthode d'appariement à base des caractéristiques locales des m-triplets peut apporter une amélioration en termes des taux de fausses acceptations sans induire un accroissement du taux des faux rejets.

Afin d'avoir une analyse plus détaillée de notre contribution, nous résumons dans le Tableau 4.2 les moyennes des nombres des paires de m-triplets retenues avant et après l'application de l'étape de validation dans les algorithmes de base M3gl et PN. Quatre seuils de validation (20, 40, 60 et 80) sont étudiés, et les expérimentations sont effectuées dans deux cas : une comparaison authentique de deux impressions du même doigt et une autre comparaison imposteur de



**FIGURE 4.8** Marquage des emplacements des minuties appariées dans une comparaison imposteur de la première impression de l'empreinte "44-1" contre la première impression de l'empreinte "63-1" de la base DB1\_A de FVC2004 après l'application de différentes méthodes d'appariement : (a) M3gl, (b) PN, (c) JY, (d) MCC, (e) MQD, (f) MQZ, (j) PQD, et (h) PQZ.



**FIGURE 4.9** Marquage des emplacements des minuties appariées dans une comparaison authentique de l'impression "77-5" et l'impression "77-8" de la même empreinte "77" par différentes méthodes d'appariement : (a) M3gl, (b) PN, (c) JY, (d) MCC, (e) MQD, (f) MQZ, (j) PQD, et (h) PQZ.

deux empreintes différentes.

**TABLE 4.2** Moyenne des triplets appariés en utilisant : PN, M3gl, PQD, PQZ, MQD, MQZ en utilisant les seuils de distances (20, 40, 60, 80).

		DB1		DB2		DB3		DB4	
		<i>test authentique</i>	<i>test imposteur</i>	<i>test authentique</i>	<i>test imposteur</i>	<i>test authentique</i>	<i>test imposteur</i>	<i>test authentique</i>	<i>test imposteur</i>
Paires de m-triplets appariés	PN	81.76	6.73	67.36	5.75	91.01	11.69	84.52	7.42
	PQD 20	29.60	2.33	36.13	2.83	76.03	7.60	29.60	2.33
	PQD 40	50.98	4.26	54.91	4.44	80.40	9.02	50.98	4.26
	PQD 60	63.82	5.29	60.66	5.03	84.32	9.65	63.82	5.29
	PQD 80	71.24	5.78	62.45	5.16	89.35	10.31	71.24	5.78
	PQZ 20	9.86	0.44	18.08	1.12	52.30	3.75	35.93	1.66
	PQZ 40	32.96	2.47	41.86	3.09	75.40	1.39	67.58	4.78
	PQZ 60	48.51	4.01	54.08	4.32	79.69	1.55	73.56	6.03
	PQZ 80	59.11	4.95	59.33	4.92	81.40	1.59	74.51	6.35
	M3gl	65.81	9.75	48.62	8.74	71.86	13.27	80.21	14.04
	MQD 20	15.88	2.15	17.39	2.78	39.85	6.29	30.44	3.96
	MQD 40	27.84	3.76	26.75	4.26	44.21	7.59	37.93	5.70
	MQD 60	36.11	4.60	30.36	4.83	53.62	9.29	39.37	6.09
	MQD 80	42.22	5.10	33.14	5.12	66.39	11.71	43.84	6.77
	MQZ 20	4.32	0.33	7.81	1.00	24.49	2.84	13.52	1.22
	MQZ 40	16.78	2.18	19.62	3.01	39.25	6.05	31.32	4.13
MQZ 60	25.93	3.54	26.15	4.15	43.02	7.23	37.07	5.52	
MQZ 80	32.49	4.30	29.25	4.68	46.78	7.95	38.73	5.95	

On peut souligner que les nombres moyens des paires de triplets retenues en utilisant les variantes proposées dépend absolument de la valeur du seuil de validation. Plus la valeur de seuil est petite, plus le filtrage des triplets devient rigoureux et plus le nombre des triplets jugés valides est réduit. Par conséquent, le nombre de paires de minuties appariées diminue comme illustré dans le Tableau 4.3.

En addition, nous calculons dans le Tableau 4.3 les nombres moyens des paires des minuties appariées par les algorithmes de base M3gl et PN ainsi que les quatre variantes proposées pour différents seuils de validation. Ces moyennes sont calculées en effectuant des comparaisons authentiques et imposteurs sur toutes les parties de la base FVC2004.

D'après le tableau 4.3, on peut remarquer que l'application de notre stratégie de fusion et de validation permet de retenir moins de paires de minuties que celles appariées par les algorithmes de base PN et M3gl.

Suite à ces résultats et dans l'objectif de confirmer quantitativement la pertinence obtenue, on procède à la visualisation et à l'analyse d'une part des taux moyens des paires de triplets qui ont échoués lors du processus de validation et d'autre part des taux moyens des paires de minuties qui ont échouées lors du processus de validation.

TABLE 4.3 Moyenne des minuties appariées en utilisant : PN, M3gl, PQD, PQZ, MQD, MQZ en utilisant les seuils de distances (20, 40, 60, 80).

		DB1		DB2		DB3		DB4	
		<i>test authentique</i>	<i>test imposteur</i>	<i>test authentique</i>	<i>test imposteur</i>	<i>test authentique</i>	<i>test imposteur</i>	<i>test authentique</i>	<i>test imposteur</i>
Paires de minuties appariées	PN	<b>20,63</b>	2,54	18,67	2,11	21,47	2,97	22,09	2,74
	PQD 20	<b>6,37</b>	0,65	7,96	0,73	13,56	1,39	12,93	1,06
	PQD 40	10,15	1,04	11,22	1,07	14,00	1,58	14,30	1,34
	PQD 60	12,31	1,23	11,22	1,16	14,03	1,61	14,34	1,38
	PQD 80	13,40	1,31	12,30	1,18	14,06	1,63	14,39	1,40
	PQZ 20	2,55	0,15	4,44	0,34	10,52	0,76	8,30	0,49
	PQZ 40	6,97	0,69	8,99	0,81	13,60	1,39	13,51	1,12
	PQZ 60	9,71	1,01	11,12	1,05	13,99	1,55	14,26	1,32
	PQZ 80	11,55	1,75	11,96	1,15	14,01	1,59	14,34	1,37
	M3gl	20,01	2,99	17,43	3,02	20,07	3,22	20,67	3,25
	MQD 20	9,40	1,75	11,06	2,03	18,35	2,77	17,23	2,38
	MQD 40	14,33	2,30	15,09	2,52	19,13	2,92	19,23	2,74
	MQD 60	17,22	2,50	16,34	2,65	19,37	2,97	19,35	2,79
	MQD 80	18,77	2,59	16,64	2,69	19,49	3,01	19,63	2,83
	MQZ 20	3,85	0,49	6,21	1,09	14,19	1,77	10,85	1,25
	MQZ 40	9,99	1,74	12,18	2,12	18,44	2,75	17,87	2,43
MQZ 60	13,68	2,24	14,91	2,48	19,07	2,89	19,14	2,72	
MQZ 80	16,12	2,43	16,02	2,63	19,23	2,95	19,32	2,78	

Nous évaluons le nombre de paires de triplets et de minuties que notre système peut éliminer dans le cas de la correspondance authentique ainsi que dans le cas des accès imposteurs.

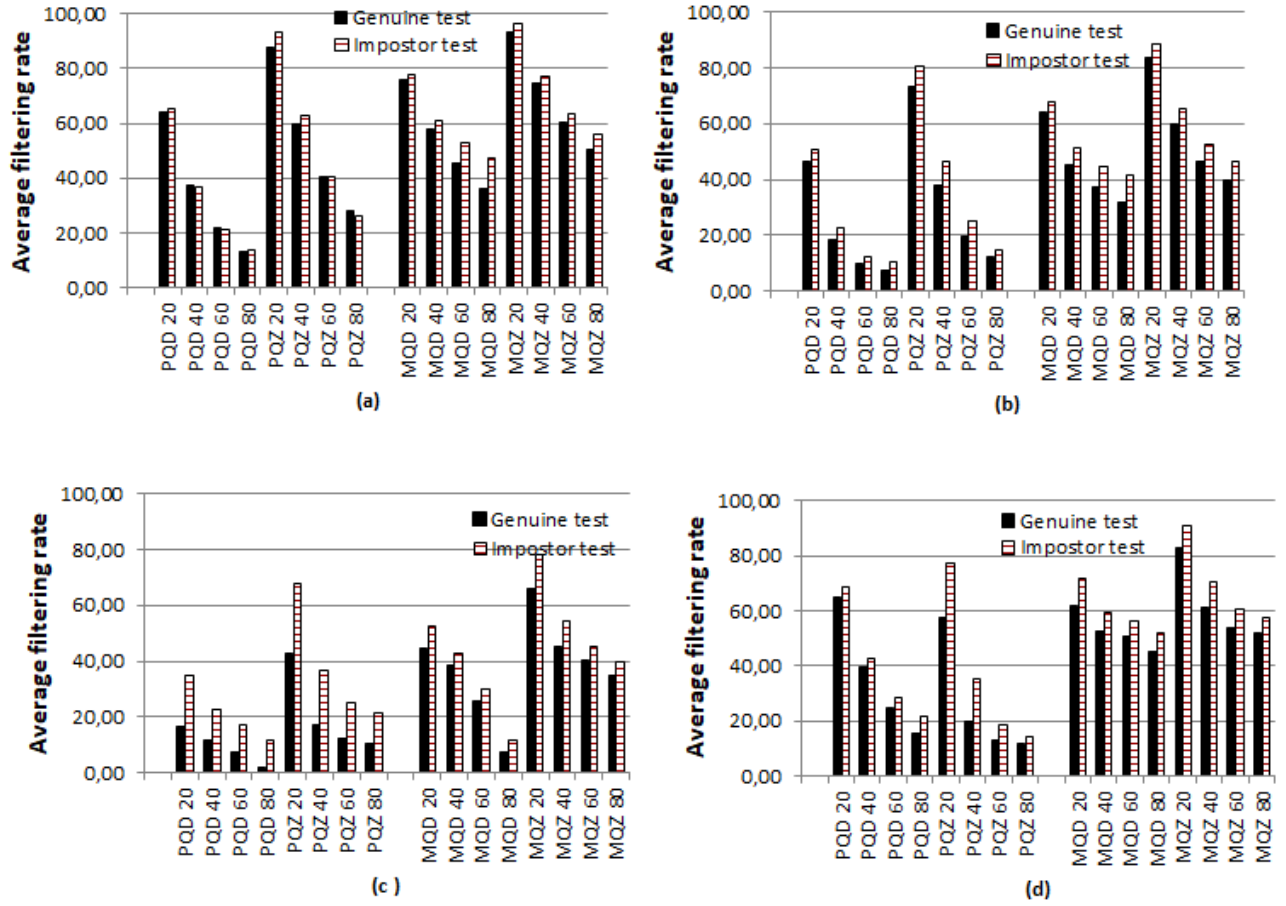
Nous calculons le taux moyen des paires de triplets qui ont échoué au cours du processus de validation en utilisant la formule suivante :

$$T_T = 100 * \left( \frac{N_{T1} - N_{T2}}{N_{T1}} \right) \quad (4.7)$$

Où  $N_{T1}$  est le nombre moyen de paires de triplets appariés par l'algorithme de base PN ou M3gl, et  $N_{T2}$  est le nombre moyen de paires de triplets validées par notre méthode.

La Figure 4.10 illustre les taux de filtrage des triplets pour différentes valeurs de seuil et pour les quatre variantes proposées.

Nous remarquons que le taux de triplets filtrés est significativement plus élevé dans le cas des comparaisons imposteurs par rapport aux comparaisons authentiques. Cela signifie clairement, que les variantes proposées arrivent à éliminer de manière efficace les fausses paires de triplets. Nous calculons le taux moyen des paires de minuties qui ont été éliminées lors du processus de validation par la formule 4.8. Par exemple, afin de calculer le taux moyen de paires de minuties qui ont échoués lors de la validation en utilisant la variante PQD avec un seuil fixé à 20 et en



**FIGURE 4.10** Taux moyen de paires de triplets qui sont éliminées à l'issue du processus de validation. Cette étude porte sur les quatre ensembles de données : (a) DB1\_A, (b) DB2\_A, (c) DB3\_A, et (d) DB4\_A de FVC2004.

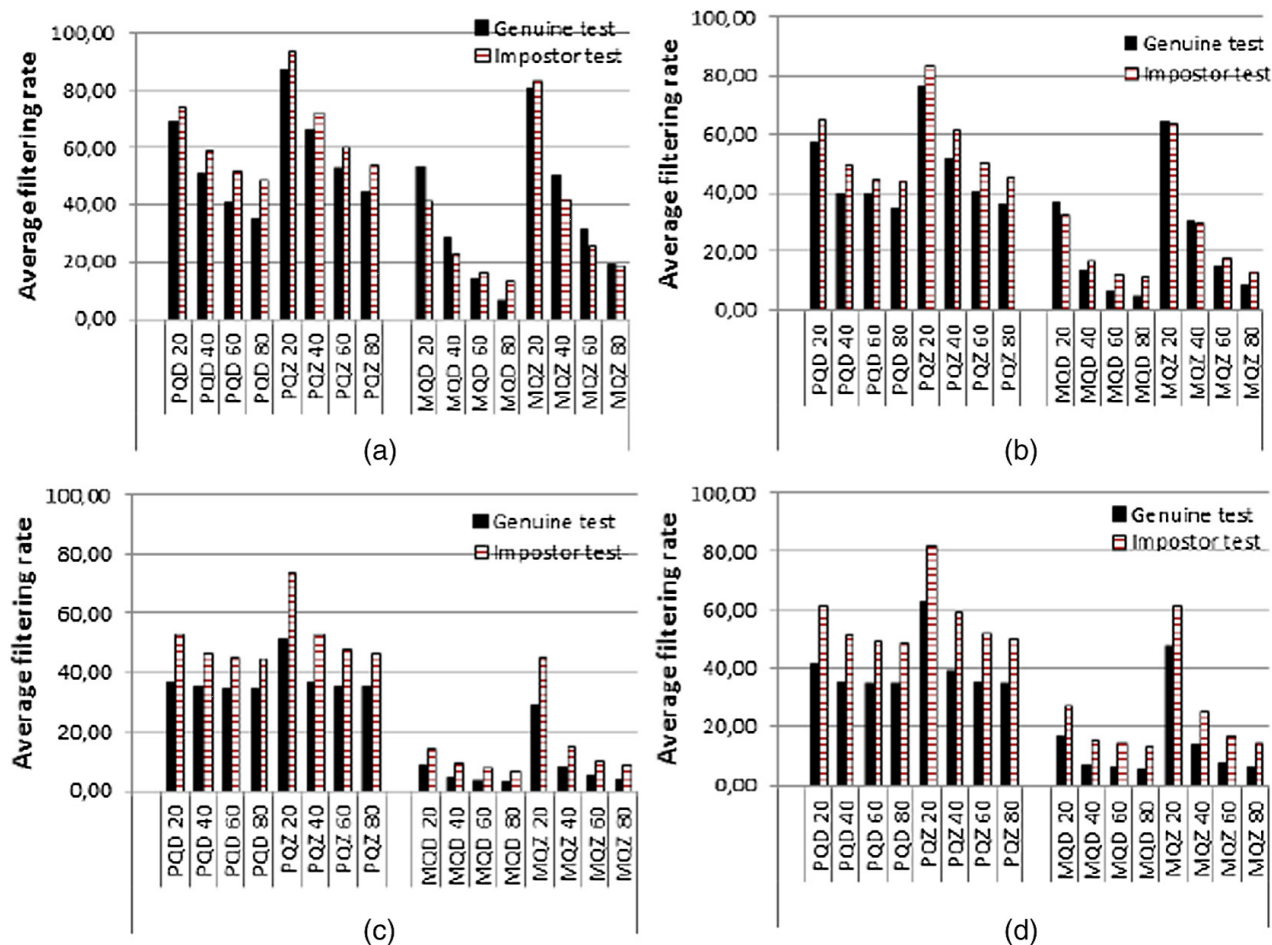
considérant un appariement authentique sur la base DB1 de FVC2004, nous retenons les valeurs 20, 63 et 6, 37 pour  $N_{T1}$  et  $N_{T2}$  respectivement. Notons que  $N_{T1}$  et  $N_{T2}$  sont mises en évidence en gras dans le Tableau 4.3. Dans cet exemple, le taux moyen des minutes filtrées est égal à 69,12%.

$$T_M = 100 * \left( \frac{N_{M1} - N_{M2}}{N_{M1}} \right) \quad (4.8)$$

Où  $N_{M1}$  est le nombre moyen de paires de minutes appariées par l'algorithme de base PN ou M3gl, et  $N_{M2}$  est le nombre moyen de paires de minutes validées par notre système.

Nous présentons dans la Figure 4.11 les graphes des taux de filtrage des paires de minutes, pour différentes valeurs de seuil et pour toutes les variantes de la méthode proposée. Les résultats montrent clairement que toutes les variantes éliminent plus de fausses paires de minutes dans les cas imposteurs que dans les cas authentiques. Cela explique l'amélioration significative apportée par notre stratégie de validation, puisqu'il est clair que les scores des imposteurs subissent une réduction importante et ceux relatifs aux cas authentiques subissent généralement une rectification modérée. En outre, nous pouvons remarquer dans la Figure 4.11 que les variantes basées sur les moments QZM assurent le meilleur taux de filtrage des minutes.

Les performances de l'étape de validation représentées par les courbes DET sont illustrées sur la Figure 4.12. Nous comparons les performances de l'algorithme de base M3gl avec les deux



**FIGURE 4.11** Taux moyen de paires de minuties qui sont éliminées à l’issue du processus de validation. Cette étude porte sur les quatre ensembles de données : (a) DB1\_A, (b) DB2\_A, (c) DB3\_A, et (d) DB4\_A de FVC2004.

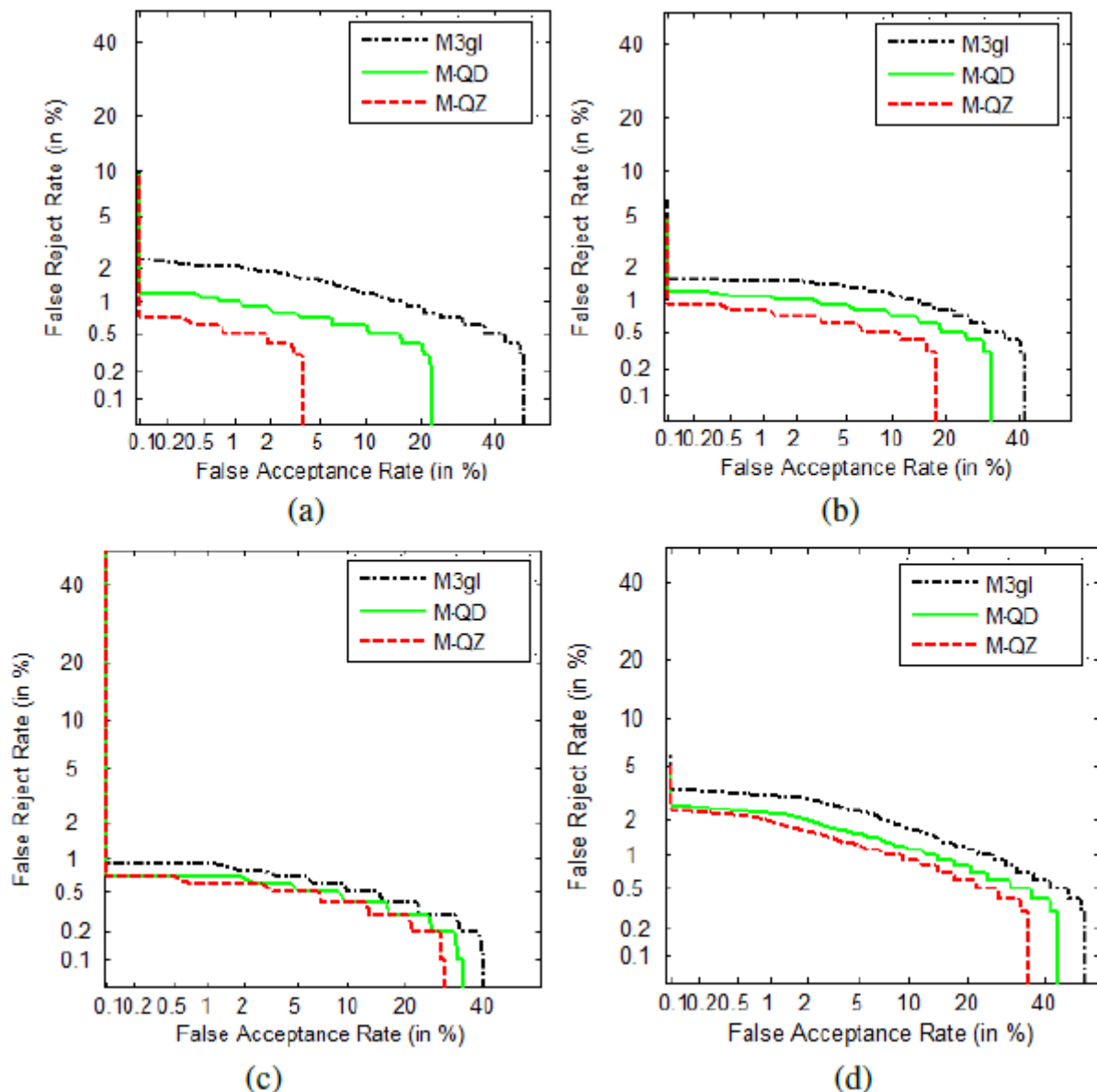
variantes MQD et MQZ. A partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la méthode proposée en intégrant les informations locales d’image de niveau de gris présente le meilleur pouvoir discriminant par rapport à l’algorithme de base M3gl.

D’autre part, nous avons entrepris la même expérience sur la Figure 4.13 en comparant l’algorithme PN de base avec les variantes proposé PQD et PQZ. Les tests montrent des résultats similaires à ceux de la Figure 4.12. En conclusion, l’appariement des empreintes digitales à l’aide des caractéristiques géométriques des m-triplets en fusion avec les informations locales de niveaux de gris affecte absolument les performances d’une manière positive. De plus, cette amélioration est beaucoup plus importante en adoptant les moments quaternaires QZM pour la phase de validation.

#### 4.4.7 Comparaison des performances

Pour une meilleure lisibilité, nous présentons dans la Figure 4.14, les courbes de performances DET relatives aux variantes PQZ et MQZ en comparaison avec les algorithmes MCC, M3gl et PN.

En plus, le Tableau 4.4 rapporte les indicateurs de performances EER, FMR100 et FMR1000 de tous les algorithmes comparés sur les quatre parties de la base d’empreintes digitales FVC2004.

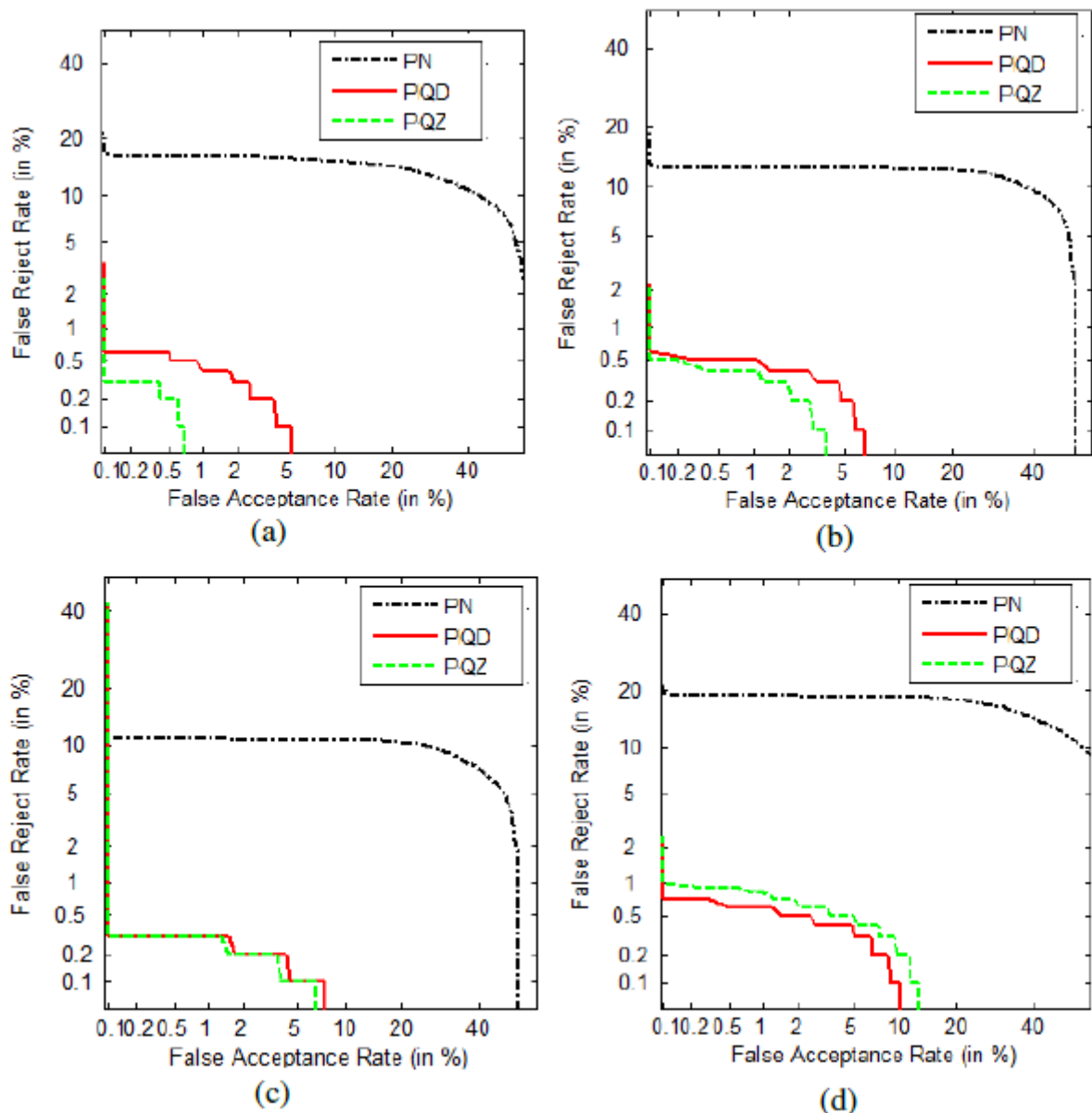


**FIGURE 4.12** Courbes DET présentant les performances de l'intégration de l'étape de validation des m-triplets dans le processus d'appariement en utilisant la variante de notre algorithme basée sur les caractéristiques géométriques de l'algorithme M3gl dans DB1A (a), DB2A (b), DB3A (c) et DB4A (d) de FVC2004.

Pour chaque partie, le meilleur EER est mis en surbrillance en gras.

Il est clair que les résultats expérimentaux ne montrent pas une différence significative entre les différentes variantes de notre méthode, mais il est évident que les performances de toutes les méthodes proposées sont meilleures que celles obtenues par les algorithmes M3gl, PN et MCC basiques. En effet, l'idée de base de notre méthode, basée sur les moments quaternioniques, est de réduire le nombre de cas imposteurs qui pourraient être incorrectement acceptés (le taux FAR) pour la plupart des valeurs du taux FRR.

Bien que les performances de l'algorithme basique M3gl dépassent largement celles réalisées par la version de base de l'algorithme PN, on constate une amélioration considérable de ce dernier après sa fusion avec notre méthode de validation intégrant l'information de voisinage caractérisée par les moments quaternaires. En effet, les performances de PN combiné avec QDHM



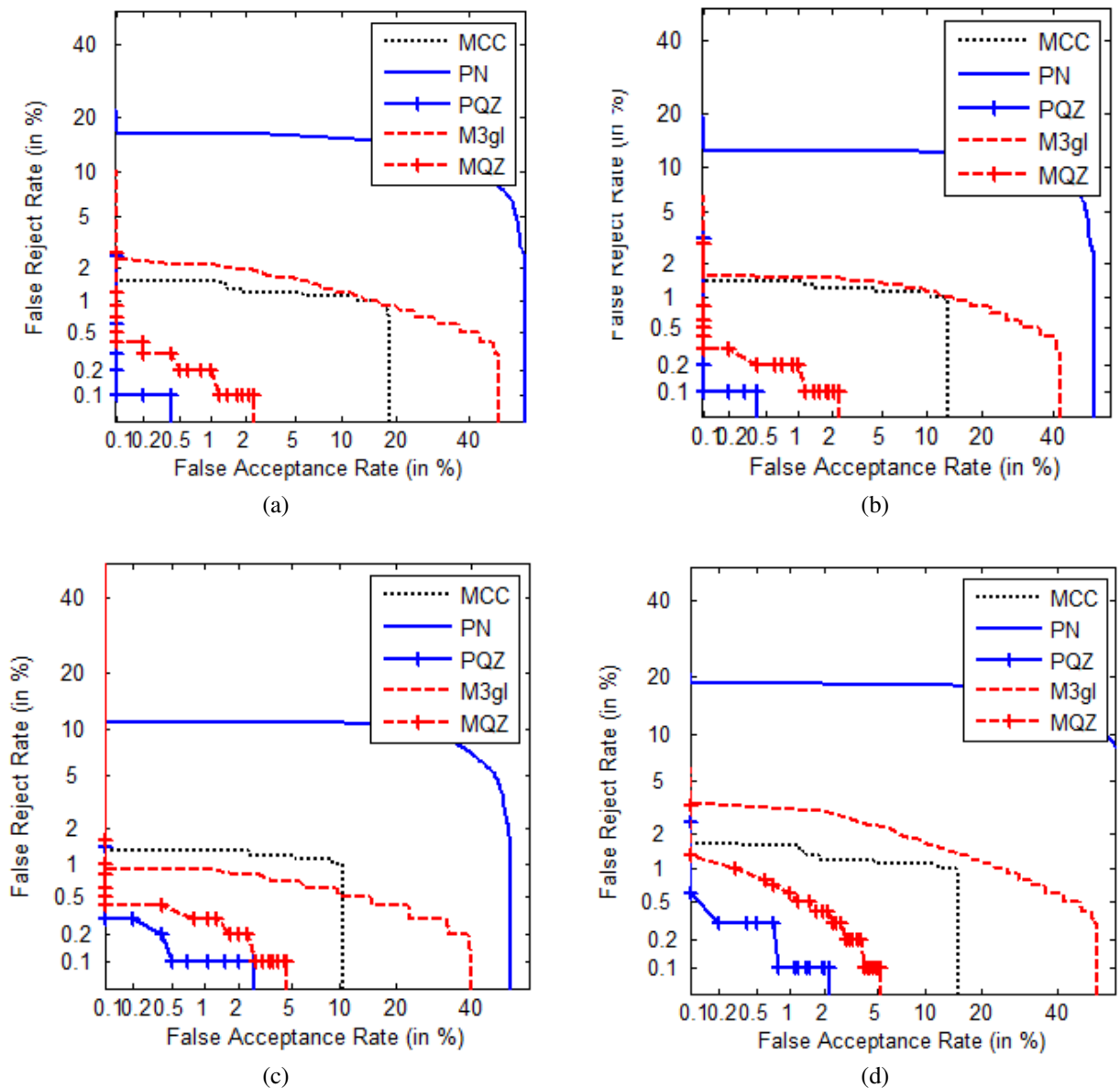
**FIGURE 4.13** Courbes DET présentant les performances de l'intégration de l'étape validation des m-triplets dans le processus d'appariement en utilisant l'algorithme PN dans DB1A (a), DB2A (b), DB3A (c) et DB4A (d) de FVC2004.

ou QZM dépassent celles de M3gl modifié. On peut expliquer ce constat par le fait que la plupart des fausses paires de m-triplets, retenues par ces algorithmes de base, sont efficacement éliminées lors de l'étape de validation proposée.

En général, le meilleur résultat est obtenu par la variante PQZ (Figure 4.14 (d)). L'indicateur EER de PQZ ne dépasse pas 0,29% pour toutes les parties de la base FVC2004, ce qui le place largement en dessus des algorithmes de l'état de l'art PN, M3gl et MCC.

#### 4.4.8 Temps de calcul

Il est à signaler que notre implémentation est divisée en deux modules : un extracteur de caractéristiques et un comparateur. Comme notre principal objectif dans le cadre de ce travail est



**FIGURE 4.14** Courbes DET comparant les performances en termes de précision des méthodes : M3gl, PN, MCC, MQZ et PQZ. Chaque sous-figure concerne un ensemble de données de FVC2004 : (a) DB1\_A, (b) DB2\_A, (c) DB3\_A, et (d) DB4\_A.

d'améliorer les performances en matière de précision, nous ne nous concentrons pas sur l'optimisation du module extracteur de caractéristiques en termes du temps d'exécution. Cependant, le temps de calcul obtenu par notre module de comparaison ne dépasse pas en moyenne **3,4 ms** pour les versions M3gl-modifiées et **10,4 ms** pour les versions PN-modifiées. En se basant sur le temps moyen obtenu par les méthodes de base (voir Tableau 4.5), nous pouvons remarquer que tous les variantes présentées dans ce travail assurent un temps de calcul plus réduit. Nous notons que les performances en temps de calcul ont été évaluées sur des implémentations en C++, sur un processeur Intel Core i7 à 2 GHz.

D'une manière générale, le système proposé exploite le pouvoir discriminatif des moments

**TABLE 4.4** Indicateurs de performance, EER, FMR100 et FMR1000, des algorithmes comparés sur les quatre ensembles de données FVC2004.

	<b>Méthode</b>	<b>EER</b>	<b>FMR100</b>	<b>FMR1000</b>
DB1_A	MQD	0.59	0.59	0.69
	MQZ	0.29	0.39	0.39
	PQD	<b>0.09</b>	0.09	0.19
	PQZ	<b>0.09</b>	0.09	0.09
	M3gl	1.89	2.09	2.19
	PN	15.13	16.28	16.28
	MCC	1.39	1.49	1.49
	DB2_A	MQD	0.29	0.39
MQZ		0.29	0.29	0.29
PQD		<b>0.09</b>	0.09	0.09
PQZ		<b>0.09</b>	0.09	0.09
M3gl		1.49	1.49	1.59
PN		12.68	12.69	12.79
MCC		1.29	1.39	1.39
DB3_A		MQD	0.49	0.49
	MQZ	0.39	0.39	0.39
	PQD	<b>0.29</b>	0.29	0.29
	PQZ	<b>0.29</b>	0.29	0.29
	M3gl	0.89	0.89	0.89
	PN	10.83	11.19	11.19
	MCC	1.29	1.29	1.29
	DB4_A	MQD	1.19	1.99
MQZ		0.69	1.09	1.29
PQD		<b>0.29</b>	0.59	0.59
PQZ		<b>0.29</b>	0.59	0.59
M3gl		2.74	3.29	3.49
PN		18.23	19.08	19.08
MCC		1.39	1.59	1.59

**TABLE 4.5** Temps d'appariement moyen par rapport à tous les ensembles de données de test exprimés en (ms).

<b>Méthode</b>	<b>temps de calcul</b>
M3gl basique	3.6 ms
MQD/MQZ	3.4 ms
PN basique	23 ms
PQZ/PQD	10.4 ms

quaternioniques orthogonaux ainsi que la robustesse des méthodes d'appariement basées sur les caractéristiques géométriques des m-triplets. Nous résumons les résultats comme suit :

- Il est possible de construire des descripteurs locaux pour empreinte digitale dotés d'un fort pouvoir discriminant à l'échelle locale. La fusion des caractéristiques géométriques des m-triplets et des informations de l'image niveau de gris au voisinage des minuties est efficace. En renforçant la mise en correspondance locale, nous avons pu éviter la phase de consolidation.
- La stratégie de validation proposée peut être facilement intégrée dans toute méthode d'appariement d'empreintes digitales qui se base la structure m-triplets.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode d'appariement local des minuties. Nous avons boosté le processus d'appariement local des minuties afin de pouvoir éviter le passage par la phase de consolidation en vue de réduire le temps de calcul.

Nous avons combiné les propriétés des structures m-triplets et des informations de l'image niveau de gris au voisinage des minuties dotés d'un fort pouvoir discriminant à l'échelle locale. En effet, les paires de m-triplets jugées similaires en regard de leurs propriétés géométriques et structurelles doivent passer par un filtre qui ne retient que les paires ayant une dissimilitude suffisamment faible en termes de leurs vecteurs caractéristiques basés sur les moments orthogonaux quaternaires. Le score de similarité est calculé en tenant compte du nombre des paires des m-triplets obtenues à l'issue de l'étape d'appariement local.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que notre stratégie fournit des améliorations significatives en performance par rapport aux méthodes d'appariement de l'état de l'art les plus connues. Nous avons pu minimiser les taux des fausses acceptations tout en respectant un bon compromis avec le taux des faux rejets. En plus, ces expérimentations montrent un gain significatif en termes du temps de comparaison des empreintes digitales. Cette amélioration de performances est essentiellement obtenue en éliminant le calcul d'un grand nombre d'alignements possibles effectués lors de la phase de consolidation globale.

## Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés à l'étude et l'amélioration des méthodes de vérification biométrique d'identité à base des empreintes digitales. Nous nous sommes focalisés essentiellement sur les méthodes d'appariement à base des structures triangulaires des minuties.

Les techniques d'authentification biométriques à base des empreintes digitales représentent une solution prometteuse du fait qu'elle est efficace et moins coûteuse. L'étude que nous avons menée sur la reconnaissance biométrique à base des empreintes digitales a montré que ces méthodes ne constituent pas toujours le meilleur compromis entre précision et robustesse lorsque la qualité des images d'empreintes digitales est mauvaise. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons apporté deux contributions pour l'amélioration des méthodes d'appariement des empreintes digitales. Le principe de base consiste en la combinaison de l'information locale de l'image de niveau de gris au voisinage des m-triplets avec les caractéristiques géométriques de ces derniers.

Nous avons montré que les performances de la plupart des systèmes de reconnaissance se dégradent lorsque la qualité des images est mauvaise. Les caractéristiques géométriques des m-triplets peuvent être fortement similaires même dans le cas des comparaisons imposteurs entre deux empreintes de doigts différents. L'idée de base de notre première contribution est d'introduire un processus de validation des paires de m-triplets effectivement similaires et le nettoyage des paires invalides qui ont pu être faussement appariées à base des caractéristiques géométriques des m-triplets. A partir des images en niveau de gris, nous décrivons l'information locale au voisinage de deux m-triplets par un ensemble de moments orthogonaux quaternaires. Puis, nous procédons à la validation d'une paire de m-triplets en calculant le degré de similarité entre leurs vecteurs caractéristiques correspondants. Le score final d'appariement est obtenu à l'issue de l'étape de consolidation globale. Les résultats obtenus ont permis de mettre en valeur les avantages des moments quaternaires pour la caractérisation et la description de l'information du voisinage des minuties.

Dans la deuxième contribution, nous avons proposé une méthode d'appariement local des minuties. L'objectif est d'améliorer la complexité du processus d'appariement d'empreintes digitales. Notre méthode d'appariement local des m-triplets consiste à booster l'étape de mise en correspondance locale des minuties pour éviter le passage coûteux par la phase de consolidation globale. En effet, après avoir filtré correctement les paires de m-triplets en fonction de leur similarité locale, nous générons un score de correspondance final tenant compte du nombre des paires des m-triplets validées. Les résultats obtenus montrent que notre méthode de fusion des caractéristiques locales permet d'atteindre de bonnes performances en termes de précision et de temps de calcul.

L'ensemble des résultats prometteurs établis dans ce travail de thèse soulève plusieurs perspectives à explorer :

- Une extension possible de notre travail consiste en l'amélioration de notre technique pour l'appliquer dans le contexte de l'identification à base des empreintes digitales. En fait, les

structures géométriques des triplets et l'information locale de niveaux de gris au voisinage des minuties peuvent être fusionnées pour développer un algorithme efficace d'indexation et de recherche dans des bases d'empreintes digitales. En effet, de nombreux chercheurs ont proposé la fusion de plusieurs caractéristiques pour l'identification des empreintes digitales. Nous citons à titre d'exemple les travaux de KAVATI et al., 2018 ; SANG et al., 2018 ; et ILOANUSI, 2014.

- L'identification biométrique à base des empreintes digitales latentes ou partielles reste un défi important jusqu'à présent, malgré les progrès réalisés dans les systèmes d'identification des empreintes digitales. Dans ce contexte, nous avons l'intention d'étendre notre descripteur proposé afin d'améliorer davantage les performances de l'appariement des empreintes digitales latentes ou partielles. En effet, les minuties ont été largement utilisées pour la comparaison des empreintes latentes (SANKARAN et al., 2014 ; PAULINO et al., 2013 ; SI et al., 2017). Récemment, CAO et JAIN, 2018 suggère l'exploitation des caractéristiques supplémentaires comme le nombre de crêtes et les points singuliers.
- L'appariement des empreintes digitales a été réalisé sur des images 2D d'empreintes. Bien que ce procédé soit très efficace, mais aussi très pertinent pour la problématique de l'interopérabilité entre capteurs, l'information 3D liée à la courbure des doigts et à la coordonnée en profondeur des minuties, n'est pas exploitée. Selon KUMAR et KWONG, 2013 et HUANG et al., 2014, cette information 3D présente à la surface de l'empreinte pourrait pourtant s'avérer discriminante. Une meilleure précision pourrait être obtenue si des méthodes efficaces d'extraction et d'appariement de caractéristiques 3D sont adoptées. Nous envisageons d'adapter les méthodes proposées au traitement des empreintes digitales acquises à l'aide de scanners 3D.
- Bien que la multi-modalité peut entraîner une amélioration des performances des systèmes biométriques uni-modaux, la robustesse d'un système multimodal dépend de celle des systèmes uni-modaux qui le construisent. Nous projetons inclure d'autres caractéristiques extraites à partir de l'iris, de la forme de la main, du visage, etc. en plus des empreintes digitales pour construire un système biométrique multimodal. La fusion des modalités biométriques peut se faire à différents niveaux (ALESSANDRA et LORIS, 2017), tels que le capteur, la caractéristique, le score et la décision. La plupart des travaux récents se basent sur la combinaison des modalités au niveau des scores issus des systèmes monomodaux, à la fois pour la fusion globale ou séquentielle (VISHI et JØSANG, 2017 ; GUPTA et GUPTA, 2018). Cependant, les scores ne fournissent qu'une quantité d'information limitée. Il serait intéressant de se placer dans un espace contenant plus d'information, comme par exemple la fusion globale au niveau des caractéristiques. Dans un espace de dimension plus grande, les méthodes plus complexes par exemple un classificateur de type SVM ou la modélisation multidimensionnelle ont plus de chance d'être plus efficaces que les méthodes simples, par exemple la somme pondérée.
- Nous envisageons également d'étudier les techniques de cryptage des données biométriques. Ceci renforcerait la sécurité du système biométrique et constituerait une barrière contre toute tentative d'intrusion par d'éventuels imposteurs qui cherchent à s'introduire dans le système pour des fins frauduleuses. Pour concevoir une solution biométrique irrévocable, il serait intéressant d'explorer les techniques de tatouage (watermarking) des données qui peuvent être utilisées dans le domaine de la sécurité des données biométrique (VASHISTHA et JOSHI, 2016).

# Publications de l'Auteur

## Journal Internationale(#1)

1. Lamyae Haloui, Nouredine En-Nahnahi, Said El Alaoui Ouatik, "Combining minutiae triplets and quaternion orthogonal moments for fingerprint verification", *Journal of Electronic Imaging* 26(3), 033012, DOI : <http://dx.doi.org/10.1117/1.JEI.26.3.033012>, (22 May 2017).

## Conférences Internationales(#2)

1. Lamyae Haloui, Nisrine Dad, Nouredine En-Nahnahi, Said El Alaoui Ouatik and Mohammed Oumsis, "Improvement of fingerprint matching by describing the minutiae neighborhood using a set of Quaternion Disc-Harmonic Moments", 2014 IEEE/ACS 11th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA), Doha, 2014, pp. 273-279. DOI : 10.1109/AICCSA.2014.7073209.
2. Lamyae Haloui, Nisrine Dad, Nouredine En-Nahnahi, Said El Alaoui Ouatik and Mohammed Oumsis, "Minutiae neighborhood validation by Quaternion Zernike Moments for fingerprint matching", 2016 International Symposium on Signal, Image, Video and Communications (ISIVC), Tunis, 2016, pp. 202-206. doi : 10.1109/ISIVC.2016.7893987.

## Conférences Nationales (#3)

1. Lamyae Haloui, Nouredine En-Nahnahi, Said El Alaoui Ouatik, Mohammed Oumsis. "Appariement des empreintes digitales basé sur la fusion des minuties et leur texture voisine", JDTIC'13, Kenitra, Maroc.
2. Lamyae Haloui, Nouredine En-Nahnahi, Said El Alaoui Ouatik, Mohammed Oumsis. "Combinaison des caractéristiques des minuties et l'orientation de leurs voisinages pour l'appariement d'empreintes digitales", WOTIC'13, Fès, Maroc.
3. Lamyae Haloui, Nouredine En-Nahnahi, Said El Alaoui Ouatik, "Amélioration de l'appariement des empreintes digitales par les moments de Zernike", SIGMA'2016, Fès, Maroc, 2016.

## Références bibliographiques

- ABDEL QADER, Hasan, Abdul RAMLI et Syed Abdul Rahman AL-HADDAD (jan. 2007). « Fingerprint Recognition Using Zernike Moments ». In : 4, p. 372-376.
- ALESSANDRA, Lumini et Nanni LORIS (2017). « Overview of the combination of biometric matchers ». In : *Information Fusion* 33, p. 71 -85. ISSN : 1566-2535. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.05.003>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253516300446>.
- ALONSO-FERNANDEZ, Fernando, Josef BIGUN, Julian FIERREZ, Hartwig FRONTHALER, Klaus KOLLREIDER et Javier ORTEGA-GARCIA (2009). « Fingerprint Recognition ». In : *Guide to Biometric Reference Systems and Performance Evaluation*. Sous la dir. de Dijana PETROVSKA-DELACRÉTAZ, Bernadette DORIZZI et Gérard CHOLLET. London : Springer London, p. 51-88. ISBN : 978-1-84800-292-0. DOI : 10.1007/978-1-84800-292-0\_4. URL : [https://doi.org/10.1007/978-1-84800-292-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-84800-292-0_4).
- ASHBAUGH, David R et CRC PRESS (1999). *Quantitative-qualitative friction ridge analysis : an introduction to basic and advanced ridgeology*.
- BAZEN, Asker, Gerben T B VERWAAIJEN, Sabih GEREZ, Leo P J VEELANTURF et Berend Jan van der ZWAAG (déc. 2000). « A correlation-based fingerprint verification system ». In :
- BHOWMICK, Partha, Arijit BISHNU, Bhargab B. BHATTACHARYA, Malay Kumar KUNDU, C. A. MURTHY et Tinku ACHARYA (2002). « Determination of Minutiae Scores for Fingerprint Image Applications ». In : *Int. J. Image Graphics* 5, p. 537-572.
- BOLLE, Ruud, Jonathan CONNELL, Sharanthchandra PANKANTI, Nalini RATHA et Andrew SENIOR (2003). *Guide to Biometrics*. SpringerVerlag. ISBN : 0387400893.
- CAO, K. et A. K. JAIN (2018). « Automated Latent Fingerprint Recognition ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, p. 1-1. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/TPAMI.2018.2818162.
- CAO, K., Eryun LIU, LiaoJun PANG, J. LIANG et J. TIAN (2011). « Fingerprint matching by incorporating minutiae discriminability ». In : *2011 International Joint Conference on Biometrics (IJCB)*, p. 1-6. DOI : 10.1109/IJCB.2011.6117537.
- CAPPELLI, R., M. FERRARA et D. MALTONI (2010). « Minutia Cylinder-Code : A New Representation and Matching Technique for Fingerprint Recognition ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32.12, p. 2128-2141. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/TPAMI.2010.52.
- CH, Kalyani (2017). « Various Biometric Authentication Techniques : A Review. » In : *J Biom Biostat, an open access journal* 8. ISSN : 2155-6180. DOI : 10.4172/2155-6180.1000371.
- CHAMPOD, Christophe, Christopher J. LENNARD, Pierre MARGOT et Milutin STOILOVIC (jan. 2004). *Fingerprints and Other Ridge Skin Impressions*.
- CHARLES L. WILSON Craig I. Watson, Eung Gi Paek (1997). *Combined optical and neural network fingerprint matching*. DOI : 10.1117/12.270385. URL : <https://doi.org/10.1117/12.270385>.

- CHEN, Beijing, Huazhong SHU, Gouenou COATRIEUX, Gang CHEN, Xingming SUN et Jean Louis COATRIEUX (jan. 2015). « Color Image Analysis by Quaternion-Type Moments ». In : *Journal of Mathematical Imaging and Vision* 51.1, p. 124-144. DOI : 10 . 1007 / s10851-014-0511-6. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01119218>.
- CHEN, B.J., H.Z. SHU, H. ZHANG, G. CHEN, C. TOUMOULIN, J.L. DILLENSEGER et L.M. LUO (2012). « Quaternion Zernike moments and their invariants for color image analysis and object recognition ». In : *Signal Processing* 92.2, p. 308-318. ISSN : 0165-1684. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2011.07.018>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168411002520>.
- CHEN, Franglin et Ming LI (2016). *A Multiple Feature Fusion System for Fingerprint Recognition*. DOI : <http://dx.doi.org/10.15379/2410-2938.2015.02.02.04>.
- CHEN, J. et Y. S. MOON (2007). « A Minutiae-based Fingerprint Individuality Model ». In : *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, p. 1-7. DOI : 10 . 1109/CVPR.2007.383283.
- CHEN, Jiansheng, Fai CHAN et Yiu-Sang MOON (2007). « Fingerprint Matching with Minutiae Quality Score ». In : *Advances in Biometrics*. Sous la dir. de Seong-Whan LEE et Stan Z. LI. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 663-672. ISBN : 978-3-540-74549-5.
- CHEN, Xinjian, Jie TIAN, Xin YANG et Yangyang ZHANG (2006). « An algorithm for distorted fingerprint matching based on local triangle feature set ». In : *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 1.2, p. 169-177. ISSN : 1556-6013. DOI : 10 . 1109/TIFS . 2006.873605.
- CHIKKERUR, S. et N. RATHA (2005). « Impact of singular point detection on fingerprint matching performance ». In : *Fourth IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies (AutoID'05)*, p. 207-212. DOI : 10 . 1109/AUTOID.2005.34.
- CHIKKERUR, Sharat, Alexander N. CARTWRIGHT et Venu GOVINDARAJU (2005). « K-plet and Coupled BFS : A Graph Based Fingerprint Representation and Matching Algorithm ». In : *Advances in Biometrics*. Sous la dir. de David ZHANG et Anil K. JAIN. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 309-315. ISBN : 978-3-540-31621-3.
- CHOI, H., K. CHOI et J. KIM (2011). « Fingerprint Matching Incorporating Ridge Features With Minutiae ». In : *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 6.2, p. 338-345. ISSN : 1556-6013. DOI : 10 . 1109/TIFS.2010.2103940.
- CHONG, C.-W., P. RAVEENDRAN et R. MUKUNDAN (2003a). « The scale invariants of pseudo-Zernike moments ». In : *Pattern Analysis & Applications* 6.3, p. 176-184. ISSN : 1433-755X. DOI : 10 . 1007 / s10044-002-0183-5. URL : <https://doi.org/10.1007/s10044-002-0183-5>.
- CHONG, Chee-Way, P. RAVEENDRAN et R. MUKUNDAN (2003b). « A comparative analysis of algorithms for fast computation of Zernike moments ». In : *Pattern Recognition* 36.3, p. 731-742. ISSN : 0031-3203. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00091-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00091-2). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320302000912>.
- DAD, N., N. ENNAHNAHI, S. E. A. OUATIK et M. OUMSIS (2014). « 2D color shapes description by quaternion Disc-Harmonic moments ». In : *2014 IEEE/ACS 11th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, p. 266-272. DOI : 10 . 1109 / AICCSA.2014.7073208.

- DAD, Nisrine, Nouredine EN-NAHNAHI, Said El Alaoui OUATIK et Mohammed OUMSIS (2016). « Adaptation of spherical harmonic transform for color shape reconstruction and retrieval using quaternion algebra ». In : *Journal of Electronic Imaging* 25.5, p. 053026. DOI : 10.1117/1.JEI.25.5.053026. URL : <http://dx.doi.org/10.1117/1.JEI.25.5.053026>.
- DARLOW, L. N. et B. ROSMAN (2017). « Fingerprint minutiae extraction using deep learning ». In : *2017 IEEE International Joint Conference on Biometrics (IJCB)*, p. 22-30. DOI : 10.1109/BTAS.2017.8272678.
- DEEPIKA, C. Lakshmi, Dr. A KANDASWAMY, C. VIMAL et B. SATHISH (2010). « Invariant Feature Extraction from Fingerprint Biometric Using Pseudo Zernike Moments ». In :
- DENG, Huimin et Qiang HUO (2005). « Minutiae Matching Based Fingerprint Verification Using Delaunay Triangulation and Aligned-Edge-Guided Triangle Matching ». In : *Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication*. Sous la dir. de Takeo KANADE, Anil JAIN et Nalini K. RATHA. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 270-278. ISBN : 978-3-540-31638-1.
- DINGRUI, Wan et Zhou JIE (2006). « Fingerprint recognition using model-based density map ». In : *IEEE Transactions on Image Processing* 15.6, p. 1690-1696. ISSN : 1057-7149. DOI : 10.1109/TIP.2006.873442.
- DOMENICONI, C., S. TARI et Ping LIANG (1998). « Direct gray scale ridge reconstruction in fingerprint images ». In : *Acoustics, Speech and Signal Processing, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on*. T. 5, 2941-2944 vol.5. DOI : 10.1109/ICASSP.1998.678142.
- DUDA, Richard O. et Peter E. HART (jan. 1972). « Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures ». In : *Commun. ACM* 15.1, p. 11-15. ISSN : 0001-0782. DOI : 10.1145/361237.361242. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/361237.361242>.
- ED., Sir William Rowan Hamilton LL.D. P.R.I.A. F.R.A.S. Hon. M. R. Soc. et Dub. Hon. or CORR. M. (1844). « II. On quaternions; or on a new system of imaginaries in algebra ». In : *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 25.163, p. 10-13. DOI : 10.1080/14786444408644923. eprint : <https://doi.org/10.1080/14786444408644923>. URL : <https://doi.org/10.1080/14786444408644923>.
- ENNAHNAHI, Nouredine, Mohammed OUMSIS et Mohammed MEKNASSI (2010). « Improvement of the Disc Harmonic Moments Descriptor by an Exponentially Decaying Distance Transform ». In : *Structural, Syntactic, and Statistical Pattern Recognition*. Sous la dir. d'Edwin R. HANCOCK, Richard C. WILSON, Terry WINDEATT, Ilkay ULUSOY et Francisco ESCOLANO. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 503-511. ISBN : 978-3-642-14980-1.
- FAN, Kuo Chin, Cheng Wen LIU et Yuan Kai WANG (2000). « A randomized approach with geometric constraints to fingerprint verification ». In : *Pattern Recognition* 33.11, p. 1793-1803. ISSN : 0031-3203. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(99\)00182-X](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00182-X). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003132039900182X>.
- FARINA, Alessandro, Zsolt M. KOVÁCS-VAJNA et Alberto LEONE (1999). « Fingerprint minutiae extraction from skeletonized binary images ». In : *Pattern Recognition* 32.5, p. 877-889. ISSN : 0031-3203. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(98\)](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(98))

- 00107-1. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320398001071>.
- FLUSSER, Jan, Tomas SUK et Barbara ZITOVA. *Moments and moment invariants in pattern recognition*. Chichester, U.K. John Wiley & Sons, 2009. ISBN : 9780470699874. URL : <http://opac.inria.fr/record=b1131161>.
- GABRIEL TAUBIN, David B. Cooper (1991). *Recognition and positioning of rigid objects using algebraic moment invariants*. DOI : 10.1117/12.48423. URL : <https://doi.org/10.1117/12.48423>.
- GALTON, Francis (1892). *Fingerprint*. McMillan, London.
- GERMAIN, R. S., A. CALIFANO et S. COLVILLE (1997). « Fingerprint matching using transformation parameter clustering ». In : *IEEE Computational Science and Engineering* 4.4, p. 42-49. ISSN : 1070-9924. DOI : 10.1109/99.641608.
- GOLFARELLI, M., D. MAIO et D. MALTON (1997). « On the error-reject trade-off in biometric verification systems ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 19.7, p. 786-796. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/34.598237.
- GUO, Li-Qiang et Ming ZHU (2011). « Quaternion Fourier–Mellin moments for color images ». In : *Pattern Recognition* 44.2, p. 187 -195. ISSN : 0031-3203. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.08.017>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320310004036>.
- GUO, Liqiang, Ming DAI et Ming ZHU (2014). « Quaternion moment and its invariants for color object classification ». In : *Information Sciences* 273, p. 132 -143. ISSN : 0020-0255. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.03.037>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025514003211>.
- GUPTA, P. et P. GUPTA (2018). « Multi-biometric Authentication System using Slap Fingerprints, Palm Dorsal Vein and Hand Geometry ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, p. 1-1. ISSN : 0278-0046. DOI : 10.1109/TIE.2018.2823686.
- HALOUI, L., N. DAD, N. EN-NAHNAHI, S. E. OUATIK et M. OUMSIS (2014). « Improvement of fingerprint matching by describing the minutiae neighborhood using a set of Quaternion Disc-Harmonic Moments ». In : *2014 IEEE/ACS 11th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, p. 273-279. DOI : 10.1109/AICCSA.2014.7073209.
- HALOUI, L., N. DAD, N. EN-NAHNAHI, S. El Alaoui OUATIK et M. OUMSIS (2016). « Minutiae neighborhood validation by Quaternion Zernike Moments for fingerprint matching ». In : *2016 International Symposium on Signal, Image, Video and Communications (ISIVC)*, p. 202-206. DOI : 10.1109/ISIVC.2016.7893987.
- HALOUI, Lamyae, Nouredine EN-NAHNAHI et Said El Alaoui OUATIK (2017). « Combining minutiae triplets and quaternion orthogonal moments for fingerprint verification ». In : *Journal of Electronic Imaging* 26, p. 26 -26 -12. DOI : 10.1117/1.JEI.26.3.033012. URL : <https://doi.org/10.1117/1.JEI.26.3.033012>.
- HENRY, E.R. (1900). *Classification and Uses of Finger Prints*. Making of modern law. George Routledge et Sons. URL : <https://books.google.co.ma/books?id=P709AAAAIAAJ>.
- HONG, Lin, Yifei WAN et A. JAIN (1998). « Fingerprint image enhancement : algorithm and performance evaluation ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20.8, p. 777-789. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/34.709565.
- HU, Ming-Kuei (1962). « Visual pattern recognition by moment invariants, computer methods in image analysis ». In : *IRE Transactions on Information Theory* 8.

- HUANG, Shujun, Zonghua ZHANG, Yan ZHAO, Jie DAI, Chao CHEN, Yongjia XU, E. ZHANG et Lili XIE (2014). « 3D fingerprint imaging system based on full-field fringe projection profilometry ». In : *Optics and Lasers in Engineering* 52, p. 123 -130. ISSN : 0143-8166. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.07.001>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816613002091>.
- HUNG, D.C Douglas (1993). « Enhancement and feature purification of fingerprint images ». In : *Pattern Recognition* 26.11, p. 1661 -1671. ISSN : 0031-3203. DOI : [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(93\)90021-N](https://doi.org/10.1016/0031-3203(93)90021-N). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003132039390021N>.
- ILOANUSI, Ogechukwu N. (2014). « Fusion of finger types for fingerprint indexing using minutiae quadruplets ». In : *Pattern Recognition Letters* 38, p. 8 -14. ISSN : 0167-8655. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2013.10.019>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016786551300411X>.
- JAIN, A., A. ROSS et S. PRABHAKAR (2001). « Fingerprint matching using minutiae and texture features ». In : *Proceedings 2001 International Conference on Image Processing (Cat. No.01CH37205)*. T. 3, 282-285 vol.3. DOI : 10.1109/ICIP.2001.958106.
- JAIN, A. K., S. PRABHAKAR, L. HONG et S. PANKANTI (2000). « Filterbank-based fingerprint matching ». In : *IEEE Transactions on Image Processing* 9.5, p. 846-859. ISSN : 1057-7149. DOI : 10.1109/83.841531.
- JAIN, A. K., Y. CHEN et M. DEMIRKUS (2007). « Pores and Ridges : High-Resolution Fingerprint Matching Using Level 3 Features ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 29.1, p. 15-27. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/TPAMI.2007.250596.
- JAIN, Anil, Lin HONG et Ruud BOLLE (avr. 1997). « On-Line Fingerprint Verification ». In : *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 19.4, p. 302-314. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/34.587996. URL : <http://dx.doi.org/10.1109/34.587996>.
- JAIN, Anil K. et David MALTONI (2003). *Handbook of Fingerprint Recognition*. Secaucus, NJ, USA : Springer-Verlag New York, Inc. ISBN : 0387954317.
- JEA, Tsai-Yang et Venu GOVINDARAJU (2005). « A minutia-based partial fingerprint recognition system ». In : *Pattern Recognition* 38.10, p. 1672 -1684. ISSN : 0031-3203. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2005.03.016>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320305001445>.
- JIANG, X., M. LIU et A. C. KOT (2006). « Fingerprint Retrieval for Identification ». In : *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 1.4, p. 532-542. ISSN : 1556-6013. DOI : 10.1109/TIFS.2006.885021.
- JIANG, Xudong et Wei-Yun YAU (2000). « Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures ». In : *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000*. T. 2, 1038-1041 vol.2. DOI : 10.1109/ICPR.2000.906252.
- JIN, Andrew Teoh Beng, David Ngo Chek LING et Ong Thian SONG (2004). « An efficient fingerprint verification system using integrated wavelet and Fourier-Mellin invariant transform ». In : *Image and Vision Computing* 22.6, p. 503 -513. ISSN : 0262-8856. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2003.12.002>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262885603002452>.
- JOLLIFFE, I.T. (1986). *Principal component analysis*. Springer series in statistics. Springer-Verlag. ISBN : 9780387962696. URL : <https://books.google.co.ma/books?id=cN5UAAAAYAAJ>.

- JONATHAN D. STOSZ, Lisa A. Alyea (1994). *Automated system for fingerprint authentication using pores and ridge structure*. DOI : 10.1117/12.191885. URL : <https://doi.org/10.1117/12.191885>.
- KAHYAEI, S. et M. S. MOIN (2016). « Robust matching of fingerprints using pseudo-Zernike moments ». In : *2016 4th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA)*, p. 116-120. DOI : 10.1109/ICCIAutom.2016.7483146.
- KAVATI, Ilaiah, G. KIRAN KUMAR et Koppula SRINIVAS RAO (2018). « Fast Fingerprint Retrieval Using Minutiae Neighbor Structure ». In : *Advances in Machine Learning and Data Science*. Sous la dir. de Damodar REDDY EDLA, Pawan LINGRAS et Venkatanareshbabu K. Singapore : Springer Singapore, p. 187-194. ISBN : 978-981-10-8569-7.
- KÉGL, Balázs (jan. 1999). « Principal Curves : Learning, Design, And Applications ». In : KHOTANZAD, A. et Y.H. HONG (mai 1990). « Invariant image recognition by Zernike moments ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 12.5, p. 489-497. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/34.55109.
- KIM, Hyun-Jung (1995). « Biometrics, is it a viable proposition for identity authentication and access control? » In : *Computers & Security* 14.3, p. 205 -214. ISSN : 0167-4048. DOI : [https://doi.org/10.1016/0167-4048\(95\)97054-E](https://doi.org/10.1016/0167-4048(95)97054-E). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016740489597054E>.
- KIM, Seonjoo, Dongjae LEE et Jaihie KIM (2001). « Algorithm for Detection and Elimination of False Minutiae in Fingerprint Images ». In : *Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication*. Sous la dir. de Josef BIGUN et Fabrizio SMERALDI. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 235-240. ISBN : 978-3-540-45344-4.
- KOHONEN, Teuvo, Jari KANGAS, Jorma LAAKSONEN et Kari TORKKOLA (1992). « LVQ PAK : A program package for the correct application of Learning Vector Quantization algorithms ». In : *IEEE*, p. 725-730.
- KOVACS-VAJNA, Z. M. (2000). « A fingerprint verification system based on triangular matching and dynamic time warping ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22.11, p. 1266-1276. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/34.888711.
- KUMAR, A. et C. KWONG (2013). « Towards Contactless, Low-Cost and Accurate 3D Fingerprint Identification ». In : *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, p. 3438-3443. DOI : 10.1109/CVPR.2013.441.
- KUNDU, S. et B. RAY (2015). « New hamming score based correlation method for fingerprint identification ». In : *2015 6th International Conference on Computers and Devices for Communication (CODEC)*, p. 1-4. DOI : 10.1109/CODEC.2015.7893049.
- LEUNG, M. T., W. E. ENGELER et P. FRANK (1990). « Fingerprint image processing using neural networks ». In : *Computer and Communication Systems, 1990. IEEE TENCON'90., 1990 IEEE Region 10 Conference on*, 582-586 vol.2. DOI : 10.1109/TENCON.1990.152677.
- LI, Chaorong, Jianping Kelvin LI et Dapeng GAO (2012). « Fingerprint Verification Using Weighted Zernike Moments and Fast Computation Based on Multi-disc ROI ». In : LINDOSO, Almudena, Luis ENTRENA, Judith LIU-JIMENEZ et Enrique SAN MILLAN (2007). « Correlation-Based Fingerprint Matching with Orientation Field Alignment ». In : *Advances in Biometrics*. Sous la dir. de Seong-Whan LEE et Stan Z. LI. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 713-721. ISBN : 978-3-540-74549-5.
- MAEVA, A. et F. SEVERIN (2009). « High resolution ultrasonic method for 3D fingerprint recognizable characteristics in biometrics identification ». In : *2009 IEEE International Ultrasonics Symposium*, p. 2260-2263. DOI : 10.1109/ULTSYM.2009.5441399.

- MAIO, D. et D. MALTONI (1997). « Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 19.1, p. 27-40. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/34.566808.
- MAIO, D. et D. MALTONI (1998). « Neural network based minutiae filtering in fingerprints ». In : *Proceedings. Fourteenth International Conference on Pattern Recognition (Cat. No.98EX170)*. T. 2, 1654-1658 vol.2. DOI : 10.1109/ICPR.1998.712036.
- MAIO, D., D. MALTONI, R. CAPPELLI, J. L. WAYMAN et A. K. JAIN (2002). « FVC2002 : Second Fingerprint Verification Competition ». In : *Object recognition supported by user interaction for service robots*. T. 3, 811-814 vol.3. DOI : 10.1109/ICPR.2002.1048144.
- MAIO, Dario, Davide MALTONI, Raffaele CAPPELLI, Jim L. WAYMAN et Anil K. JAIN (2004). « FVC2004 : Third Fingerprint Verification Competition ». In : *Biometric Authentication*. Sous la dir. de David ZHANG et Anil K. JAIN. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 1-7. ISBN : 978-3-540-25948-0.
- MALTONI, Davide, Dario MAIO, Anil K. JAIN et Salil PRABHAKAR (2009). *Handbook of Fingerprint Recognition*. 2nd. Springer Publishing Company, Incorporated. ISBN : 1848822537.
- MEDINA-PÉREZ, Miguel Angel, Milton GARCÍA-BORROTO, Andrés Eduardo GUTIÉRREZ-RODRÍGUEZ et Leopoldo Altamirano ROBLES (2012). « Improving Fingerprint Verification Using Minutiae Triplets ». In : *Sensors*.
- MEDINA-PÉREZ, Miguel, Octavio LOYOLA-GONZÁLEZ, Andrés GUTIÉRREZ-RODRÍGUEZ, Milton GARCÍA-BORROTO et Leopoldo ALTAMIRANO ROBLES (juin 2014). *Introducing an Experimental Framework in C# for Fingerprint Recognition*.
- MIAO, Duoqian, Qingshi TANG et Wenjie FU (2007). « Fingerprint minutiae extraction based on principal curves ». In : *Pattern Recognition Letters* 28.16, p. 2184 -2189. ISSN : 0167-8655. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2007.07.001>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167865507002243>.
- MOAYER, B. et K. S. FU (1976). « A Tree System Approach for Fingerprint Pattern Recognition ». In : *IEEE Transactions on Computers* C-25.3, p. 262-274. ISSN : 0018-9340. DOI : 10.1109/TC.1976.5009253.
- MUKUNDAN, R., S. H. ONG et P. A. LEE (2001). « Image analysis by Tchebichef moments ». In : *IEEE Transactions on Image Processing* 10.9, p. 1357-1364. ISSN : 1057-7149. DOI : 10.1109/83.941859.
- NILSSON, Kenneth et Josef BIGUN (sept. 2003). « Localization of Corresponding Points in Fingerprints by Complex Filtering ». In : *Pattern Recogn. Lett.* 24.13, p. 2135-2144. ISSN : 0167-8655. DOI : 10.1016/S0167-8655(03)00083-7. URL : [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8655\(03\)00083-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8655(03)00083-7).
- OUYANG, Zhengyu, Jianjiang FENG, Fei SU et Anni CAI (2006). « Fingerprint Matching With Rotation-Descriptor Texture Features ». In : *18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*. T. 4, p. 417-420. DOI : 10.1109/ICPR.2006.572.
- PAREKH, Ranjan, M SAHA et Jyotismita CHAKI (déc. 2013). « Fingerprint Recognition using Texture Features ». In : 2, p. 265-270.
- PARZIALE, Giuseppe et Albert NIEL (2004). « A Fingerprint Matching Using Minutiae Triangulation ». In : *Biometric Authentication*. Sous la dir. de David ZHANG et Anil K. JAIN. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 241-248. ISBN : 978-3-540-25948-0.
- PAULINO, A. A., J. FENG et A. K. JAIN (2013). « Latent Fingerprint Matching Using Descriptor-Based Hough Transform ». In : *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 8.1, p. 31-45. ISSN : 1556-6013. DOI : 10.1109/TIFS.2012.2223678.

- PING, ZiLiang, RiGeng WU et YunLong SHENG (2002). « Image description with Chebyshev–Fourier moments ». In : *J. Opt. Soc. Am. A* 19.9, p. 1748-1754. DOI : 10.1364/JOSAA.19.001748. URL : <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-19-9-1748>.
- POKHRIYAL, Avinash et Sushma LEHRI (2010). « A New Method of Fingerprint Authentication Using 2d Wavelets ». In :
- PRABHAKAR, Salil, Anil K. JAIN et Sharath PANKANTI (2003). « Learning fingerprint minutiae location and type ». In : *Pattern Recognition* 36.8, p. 1847 -1857. ISSN : 0031-3203. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00322-9](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00322-9). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320302003229>.
- RATHA, N. K., K. KARU, Shaoyun CHEN et A. K. JAIN (1996). « A real-time matching system for large fingerprint databases ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18.8, p. 799-813. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/34.531800.
- RATHA, Nalini, Ruud M. BOLLE, Vinayaka PANDIT et Vaibhav VAISH (fév. 2000). *Robust fingerprint authentication using local structural similarity*.
- RATHA, Nalini K. et Ruud BOLLE (2003). *Automatic Fingerprint Recognition Systems*. SpringerVerlag. ISBN : 0387955933.
- RATHA, Nalini K. et Venu GOVINDARAJU (2007). *Advances in Biometrics : Sensors, Algorithms and Systems*. Secaucus, NJ, USA : Springer-Verlag New York, Inc. ISBN : 1846289203.
- RATHA, Nalini K., Shaoyun CHEN et Anil K. JAIN (1995). « Adaptive flow orientation-based feature extraction in fingerprint images ». In : *Pattern Recognition* 28.11, p. 1657 -1672. ISSN : 0031-3203. DOI : [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(95\)00039-3](https://doi.org/10.1016/0031-3203(95)00039-3). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320395000393>.
- RAVI, J, Raja K B et Venugopal K R (jan. 2010). « Fingerprint Recognition Using Minutia Score Matching ». In : abs/1001.4186.
- SANG, Jing, Hongxia WANG, Qing QIAN, Hanzhou WU et Yi CHEN (2018). « An efficient fingerprint identification algorithm based on minutiae and invariant moment ». In : *Personal and Ubiquitous Computing* 22.1, p. 71-80. ISSN : 1617-4917. DOI : 10.1007/s00779-017-1094-1. URL : <https://doi.org/10.1007/s00779-017-1094-1>.
- SANKARAN, A., M. VATSA et R. SINGH (2014). « Latent Fingerprint Matching : A Survey ». In : *IEEE Access* 2, p. 982-1004. DOI : 10.1109/ACCESS.2014.2349879.
- SEIN, Myint et Zin WIN (jan. 2012). *Robust Fingerprint Recognition System using Orientation and Texture features*.
- SHENG, W., G. HOWELLS, M. FAIRHURST et F. DERAVID (2007). « A Memetic Fingerprint Matching Algorithm ». In : *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 2.3, p. 402-412. ISSN : 1556-6013. DOI : 10.1109/TIFS.2007.902681.
- SHENG, W., G. HOWELLS, M.C. FAIRHURST, F. DERAVID et K. HARMER (2009). « Consensus fingerprint matching with genetically optimised approach ». In : *Pattern Recognition* 42.7, p. 1399 -1407. ISSN : 0031-3203. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2008.11.038>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320308005128>.
- SHENG, Yunlong et Lixin SHEN (1994). « Orthogonal Fourier–Mellin moments for invariant pattern recognition ». In : *J. Opt. Soc. Am. A* 11.6, p. 1748-1757. DOI : 10.1364/JOSAA.11.001748. URL : <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-11-6-1748>.

- SHU, Huazhong, Limin LUO et J.-L. COATRIEUX (2007). « Moment-Based Approaches in Imaging. 1. Basic Features ». In : *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE* 26.5, p. 70-74. ISSN : 0739-5175. DOI : 10.1109/EMB.2007.906026.
- SI, Xuanbin, Jianjiang FENG, Bo YUAN et Jie ZHOU (2017). « Dense registration of fingerprints ». In : *Pattern Recognition* 63, p. 87 -101. ISSN : 0031-3203. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.09.012>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320316302722>.
- TAN, Xuejun et Bir BHANU (2006). « Fingerprint matching by genetic algorithms ». In : *Pattern Recognition* 39.3, p. 465 -477. ISSN : 0031-3203. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2005.09.005>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320305003444>.
- TATEPAMULWAR, C.B. et V. P. PAWAR (mar. 2014). « Comparison of Biometric Trends Based on Different Criteria. » In : *Asian Journal of Management Sciences* 3, p. 159-165. ISSN : 2348-0351.
- TEAGUE, Michael Reed (1980). « Image analysis via the general theory of moments\* ». In : *J. Opt. Soc. Am.* 70.8, p. 920-930. DOI : 10.1364/JOSA.70.000920. URL : <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josa-70-8-920>.
- TEH, C. H. et R. T. CHIN (1988). « On image analysis by the methods of moments ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 10.4, p. 496-513. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/34.3913.
- TICO, M. et P. KUOSMANEN (1999). « A topographic method for fingerprint segmentation ». In : *Proceedings 1999 International Conference on Image Processing (Cat. 99CH36348)*. T. 1, 36-40 vol.1. DOI : 10.1109/ICIP.1999.821560.
- VASHISTHA, A. et A. M. JOSHI (2016). « Fingerprint based biometric watermarking architecture using integer DCT ». In : *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, p. 2818-2821. DOI : 10.1109/TENCON.2016.7848556.
- VERMA, M.R., A.K. MAJUMDAR et B. CHATTERJEE (1987). « Edge Detection in fingerprints ». In : *Pattern Recognition* 20.5, p. 513 -523. ISSN : 0031-3203. DOI : [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(87\)90078-1](https://doi.org/10.1016/0031-3203(87)90078-1). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031320387900781>.
- VIBERT, Benoît, jean-marie LE BARS, Christophe CHARRIER et Christophe ROSENBERGER (mai 2016). *Analyse d'empreintes digitales à partir de paramètres structurels calculés sur une référence réduite de l'image*.
- VISHI, Kamer et Audun JØSANG (2017). « A New Approach for Multi-biometric Fusion Based on Subjective Logic ». In : *Proceedings of the 1st International Conference on Internet of Things and Machine Learning. IML '17*. Liverpool, United Kingdom : ACM, 68 :1-68 :9. ISBN : 978-1-4503-5243-7. DOI : 10.1145/3109761.3158409. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3109761.3158409>.
- WABLE, Supriya et Chaitali LAULKAR (2013). « Fingerprint Recognition Scheme using Assembling Invariant Moments and SVM ». In :
- WEN, W., Z. QI, Z. LI, J. ZHANG, Y. GONG et P. CAO (2013). « A Robust and Efficient Minutia-Based Fingerprint Matching Algorithm ». In : *2013 2nd IAPR Asian Conference on Pattern Recognition*, p. 201-205. DOI : 10.1109/ACPR.2013.43.
- XIA, Xiongwu et Lawrence O'GORMAN (2003). « Innovations in fingerprint capture devices ». In : *Pattern Recognition* 36.2. Biometrics, p. 361 -369. ISSN : 0031-3203. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00036-5). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320302000365>.

- XIAO, Bin, Jian-Feng MA et Xuan WANG (2010). « Image analysis by Bessel–Fourier moments ». In : *Pattern Recognition* 43.8, p. 2620 -2629. ISSN : 0031-3203. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.03.013>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320310001330>.
- XIAO, Bin, Guo yin WANG et Wei sheng LI (2014). « Radial shifted Legendre moments for image analysis and invariant image recognition ». In : *Image and Vision Computing* 32.12, p. 994 -1006. ISSN : 0262-8856. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2014.09.002>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262885614001371>.
- XIAO, Qinghan et Hazem RAAFAT (1991). « Fingerprint image postprocessing : A combined statistical and structural approach ». In : *Pattern Recognition* 24.10, p. 985 -992. ISSN : 0031-3203. DOI : [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(91\)90095-M](https://doi.org/10.1016/0031-3203(91)90095-M). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003132039190095M>.
- YANG, Bo, Jan FLUSSER et Tomáš SUK (2015). « 3D rotation invariants of Gaussian–Hermite moments ». In : *Pattern Recognition Letters* 54, p. 18 -26. ISSN : 0167-8655. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2014.11.014>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016786551400364X>.
- YANG, Wencheng, J. HU et M. STOJMENOVIC (2012). « NDTC : A novel topology-based fingerprint matching algorithm using N-layer Delaunay triangulation net check ». In : *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, p. 866-870. DOI : 10.1109/ICIEA.2012.6360846.
- YAP, P. T., R. PARAMESRAN et Seng-Huat ONG (2003). « Image analysis by Krawtchouk moments ». In : *IEEE Transactions on Image Processing* 12.11, p. 1367-1377. ISSN : 1057-7149. DOI : 10.1109/TIP.2003.818019.
- YAP, P. T., R. PARAMESRAN et S. H. ONG (2007). « Image Analysis Using Hahn Moments ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 29.11, p. 2057-2062. ISSN : 0162-8828. DOI : 10.1109/TPAMI.2007.70709.
- YILONG YIN Hongwei Zhang, XiuKun Yang (2005). *A method based on Delaunay triangulation for fingerprint matching*. DOI : 10.1117/12.603208. URL : <https://doi.org/10.1117/12.603208>.
- ZHANG, Dengsheng et Guojun LU (2001). « A Comparison of Shape Retrieval Using Fourier Descriptors and Short-Time Fourier Descriptors ». In : *Advances in Multimedia Information Processing — PCM 2001*. Sous la dir. d’Heung-Yeung SHUM, Mark LIAO et Shih-Fu CHANG. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 855-860. ISBN : 978-3-540-45453-3.
- ZHANG, Dengsheng et Guojun LU (2002). « A comparative Study of Fourier Descriptors for Shape Representation and Retrieval ». In : *Proc. of 5th Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*. Springer, p. 646-651.
- ZHAO, Feng et Xiaou TANG (2007). « Preprocessing and postprocessing for skeleton-based fingerprint minutiae extraction ». In : *Pattern Recognition* 40.4, p. 1270 -1281. ISSN : 0031-3203. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2006.09.008>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320306003797>.
- ZHENG, Xiaolong, Yangsheng WANG, Xuying ZHAO et Zheng WEI (2008). « A scheme for minutiae scoring and its application to fingerprint matching ». In : *2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, p. 5917-5921. DOI : 10.1109/WCICA.2008.4592837.

- ZHU, En, Jianping YIN et Guomin ZHANG (oct. 2005). « Fingerprint Matching Based on Global Alignment of Multiple Reference Minutiae ». In : *Pattern Recogn.* 38.10, p. 1685-1694. ISSN : 0031-3203. DOI : 10.1016/j.patcog.2005.02.016. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2005.02.016>.
- ZHU, Hongqing, Huazhong SHU, Jun LIANG, Limin LUO et Jean-Louis COATRIEUX (2007). « Image analysis by discrete orthogonal Racah moments ». In : *Signal Processing* 87.4, p. 687-708. ISSN : 0165-1684. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2006.07.007>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016516840600257X>.
- ZHU, Hongqing, Yan YANG, Zhiguo GUI, Yu ZHU et Zhihua CHEN (2016). « Image analysis by generalized Chebyshev–Fourier and generalized pseudo-Jacobi–Fourier moments ». In : *Pattern Recognition* 51, p. 1 -11. ISSN : 0031-3203. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.09.018>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320315003490>.

## Contributions à l'amélioration des systèmes de reconnaissance biométrique à base des empreintes digitales

**Résumé :** Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de la reconnaissance biométrique en se focalisant sur le processus d'appariement des empreintes digitales. Nous nous intéressons particulièrement aux méthodes basées sur les structures triangulaires des minuties, appelées les m-triplets. En effet, nous exploitons l'information locale issue des images en niveaux de gris des deux empreintes à comparer pour valider les vraies paires des m-triplets et rejeter celles ayant été faussement appariées à base des caractéristiques géométriques des minuties. Dans un premier temps, nous décrivons l'état de l'art concernant les méthodes de vérification des empreintes digitales en se penchant sur celles basées sur les structures triangulaires des minuties. Ensuite, nous présentons deux contributions concernant la combinaison de l'information locale contenue dans les images en niveau de gris et extraite au voisinage des m-triplets, avec les caractéristiques géométriques de ces m-triplets. Dans la première contribution, nous proposons un processus supplémentaire de mesure de similarité permettant la validation de l'étape d'appariement local. Nous introduisons ce processus de validation juste avant l'étape de consolidation globale. A partir des images en niveaux de gris des deux empreintes à comparer, nous décrivons l'information locale au voisinage de chaque m-triplet par un ensemble de moments orthogonaux quaternaires. Puis, nous procédons à la validation des paires de m-triplets en calculant le degré de similarité entre leurs vecteurs caractéristiques correspondants. Dans la deuxième contribution, nous suggérons une méthode d'appariement purement locale. Le principe est de booster l'étape de mise en correspondance locale des minuties en évitant la phase coûteuse de consolidation globale. En effet, après avoir filtré correctement les paires de m-triplets en fonction de leur similarité locale, nous calculons un score de correspondance tenant compte du nombre des paires des m-triplets validées. Les deux méthodes proposées sont évaluées expérimentalement à la fois en termes de la précision de reconnaissance et du temps de calcul. Les résultats obtenus montrent que les deux méthodes proposées sont plus performantes que les principales techniques existantes.

**Mots clés:** Vérification biométrique, Empreintes digitales, Appariement des Minuties, M-triplets, Moments orthogonaux, Algèbre des quaternions.

## Contributions to the improvement of fingerprint-based biometric recognition systems

**Abstract :** This thesis work concerns the biometric recognition by focusing on the fingerprint matching process. We are particularly interested in the methods that are based on triangular minutiae structures, namely the m-triplets. Indeed, we exploit the local information from the gray-scale images of the two fingerprints to be compared. The purpose is to validate the true m-triplets pairs while discarding those that were falsely matched by the geometric features of minutiae. We first present an extensive state-of-the-art regarding fingerprint verification particularly the methods based on minutiae triangular structures. Then, we provide our two contributions in which we combine the local information, extracted from the neighborhood of the triplets, in the gray-scale images with the geometric features of these triplets. In the first contribution, we propose a further similarity measure process to validate the local matching step. We introduce this validation process just before the global minutiae matching step. Giving two gray-level images of the fingerprints to be compared, we describe the local neighborhood information of each m-triplet via feature vectors constructed from a set of quaternion orthogonal moments. Then, we proceed to the validation of the m-triplets pairs by computing the degree of similarity between their corresponding feature vectors. In the second contribution, we introduce a fingerprint matching method that is based only on local features. The objective is to boost the local minutiae matching step while avoiding the costly global matching step. Indeed, after having correctly filtered the m-triplets pairs according to their local similarity, we calculate a matching score that takes account of the number of the validated m-triplets pairs. All the proposed methods are experimentally evaluated in terms of recognition accuracy as well as computational time. The obtained results show that the two proposed methods are more efficient than well-known existing techniques.

**Keywords:** Biometric verification, Fingerprints, Minutiae matching, M-triplets, Orthogonal Moments, Quaternion algebra.