



UNIVERSITÉ FRANÇOIS – RABELAIS DE TOURS



ÉCOLE DOCTORALE SST

Laboratoire d'Informatique, équipe de recherche FOVEA

THÈSE présentée par :
Karim BENZEROUAL

Soutenue le : XX Juillet 2010

Pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université François - Rabelais**

Discipline/S spécialité : Informatique

**Acquisition d'images stéréoscopiques et
calibration de caméras par algorithmes
génétiques : application dans le domaine
biomédical**

THÈSE dirigée par :

Pr. Gilles Venturini

Professeur, Université François Rabelais de Tours

RAPPORTEURS :

Pr. Djamel Zighed

Pr. Jin-Kao Hao

Professeur, Université Lumière, Lyon 2

Professeur, Université d'Angers

JURY :

Dr. Christiane Guinot

Pr. Djamel Zighed

Pr. Gilles Venturini

Pr. Jin-Kao Hao

Pr. Nicole Vincent

Docteur HDR, CE.R.I.E.S./CHANEL, Neuilly-sur-Seine

Professeur, Université Lumière, Lyon 2

Professeur, Université François Rabelais de Tours

Professeur, Université d'Angers

Professeur, Université Paris Descartes

Remerciements

Je ne remercierai jamais assez mon directeur de thèse **Pr. Gilles Venturini**, pour l'implication, le suivi et la disponibilité qu'il m'a accordé tout au long de mon parcours de doctorat ainsi que mon stage de M2R.

Je remercie tout particulièrement ma co-encadrante du côté CE.R.I.E.S., **Dr. Christiane Guinot**, pour son implication, ses conseils inestimables et son support technique sur la partie dermato-cosmétique.

Je remercie **Dr. Fabien Picarougne**, pour ces nombreuses remarques enrichissantes et son aide scientifique.

Je remercie mon ami et collègue Mohammed Haouach qui est également doctorant CIFRE et partie intégrante du projet **VirtualSkinLAB**, pour tous les échanges scientifiques et amicaux durant ma thèse ainsi que mon stage de M2R.

Je remercie l'équipe du **CE.R.I.E.S.** et plus particulièrement **Julie Latreille** qui nous ont toujours très bien accueillis et étaient disponibles pour toute l'aide qu'on avait besoin durant les évaluations réelles de notre système en cosmétique.

Je remercie l'équipe du **Pr. Alain Taïeb**, notamment **Dr. Christine Labreze** et particulièrement **Dr. Khaled Ezzedine** du service dermato-pédiatrique du CHU de Bordeaux pour leur accueil amical durant l'évaluation réelle de notre système sur les hémangiomes infantiles.

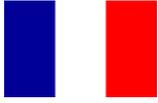
Je remercie l'Unité 930 de l'Inserm du CHU de Tours et **particulièrement Dr. Christophe Destrieux** pour leur accueil chaleureux durant l'évaluation de notre système sur les cerveaux ainsi que le test des microscopes stéréoscopiques.

Un grand merci à **Daniel Bourry** responsable du service ichnographique du CHU de Tours, qui par sa grande expérience de la photographie nous a aidé à concevoir notre système d'acquisition PENTAX ainsi que la résolution de problèmes d'éclairage et de déclenchement.

Je remercie également l'ensemble des étudiants que j'ai encadré durant ma thèse qu'ils soient en projet de fin d'étude ou pas.

Je remercie finalement l'ensemble du personnel administratif du laboratoire d'informatique ainsi que du DI de Polytech'Tours et tout particulièrement : Betty Vias, Aurélie Cloarec, Christelle Grange et Anne Galopin, pour leur bonne humeur et gentillesse.

A mes parents
A mes grands parents



Résumé

Le sujet de cette thèse consiste à définir un outil complet permettant l'acquisition du relief et de la texture d'une surface 3D dans le but l'appliquer dans le domaine de la dermatologie, et plus généralement dans le domaine biomédical.

Il s'agit d'abord d'étudier et de spécifier ou concevoir les aspects matériels tels que les appareils photographiques professionnels, les systèmes d'assemblage des appareils stéréoscopiques, le système d'éclairage et le système de déclenchement des appareils.

Ensuite, la thèse porte sur les aspects algorithmiques et logiciels qui sont liés à tous les traitements mathématiques et informatiques nécessaires pour obtenir une surface 3D la plus fiable possible. Un des problèmes majeurs traités est la calibration géométrique de caméras stéréoscopiques. L'approche développée consiste à repousser les limites des méthodes classiques dans ce domaine en proposant l'utilisation de méthodes d'optimisation plus performantes et plus faciles à mettre en œuvre.

Nous avons montré que les algorithmes d'optimisation utilisant les principes des algorithmes génétiques peuvent obtenir des résultats plus fiables que leurs concurrents et qu'ils permettent de traiter plus facilement des conditions variables d'expérimentations.

Les applications réelles de notre algorithme génétique pour le calibrage portent sur de nombreux matériels d'acquisition (caméras industrielles, appareils photo reflex « grand-public » et professionnels, microscopes stéréoscopiques, objectifs à séparation de vue, objectifs sténopés et objectifs télécentriques), chaque dispositif d'acquisition est adapté à une utilisation spécifique suivant l'étude demandée (zones microscopiques, visage, partie du corps, ...).

Cette thèse constitue la partie « acquisition/calibration » du système **VirtualSkinLAB**.



Summary

This thesis “Acquisition of stereoscopic images and camera calibration with genetic algorithms: application in the biomedical domain” consists to define a complete tool for acquiring the topography and texture of a 3D surface in order to apply it in the dermatological and more generally in the biomedical field.

First, the objective is to study and to specify or design hardware devices such as professional cameras, assembly systems for stereo equipments, lighting system and trigger system for devices.

Then, the thesis focuses on algorithmic and software aspects which relate to all mathematic and computational treatments needed to obtain a 3D surface.

One of major issues addressed is the geometric calibration of stereo cameras. The developed approach pushes the limits of conventional methods in this field by proposing the use of more efficient and easier to implement optimization methods.

We have shown that the algorithms using the principles of genetic algorithms can obtain more reliable results than their competitors and they can deal more easily the variable conditions of experiments.

The real applications of our genetic algorithms for camera calibration cover many acquisition devices (industrial cameras, SLR cameras, stereo microscopes, beam splitters, pinhole and telecentric objectives), each acquisition device is adapted to a specific use following the requested study (microscopic areas, face or body parts). This thesis "acquisition/calibration" is a part of a global system called **VirtualSkinLAB**.

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	5
Summary.....	7
Liste des équations	14
Liste des tableaux	15
Liste des figures.....	16
Liste des annexes	23
Chapitre I. Introduction	25
I.1 Problématique.....	26
I.2 Connaissance de la peau humaine saine.....	26
I.3 Vieillesse cutané et facteurs influençant l'aspect cutané	27
I.4 Contexte de la thèse.....	28
I.5 Organisation du document	30
Chapitre II. Etat de l'art des systèmes d'acquisition 3D destinés au domaine biomédical	33
II.1 Introduction	34
II.2 Techniques d'acquisition de données 3D.....	34
II.2.1 Scanners avec contact.....	35
II.2.2 Scanners sans contact	35
II.3 Dispositifs d'acquisition du relief cutané.....	41
II.3.1 Profilométrie.....	41
II.3.2 Microscopie confocale	43
II.3.3 3D Skin Analyser de Biophiderm	43
II.3.4 TiVi600 Tissue Viability Imager	44
II.3.5 µkroTOP.....	44
II.3.6 Reconstruction 3D d'empreintes digitales	45
II.3.7 Stéréo-photométrie en dermatologie	46
II.3.8 3D LifeViz™ MICRO.....	47
II.3.9 DermaTOP-blue	48
II.3.10 PRIMOS	49
II.3.11 FaceSCAN-III	50
II.3.12 3D LifeViz™ esthétique	50

II.3.13	DI3D™ de Dimensional Imaging	51
II.3.14	InSpeck Cyclops ³	52
II.3.15	InSpeck Gemini.....	52
II.3.16	Cyberware Head & Face 3D Scanner – Model PS/PX	53
II.3.17	Precision 3D Foot Scanner.....	53
II.3.18	Precision 3D FotoScan Plantar.....	54
II.3.19	Skin mapping 2.....	54
II.3.20	[TC] ² NX-16.....	55
II.3.21	InSpeck Mega Capturor II XLF	56
II.3.22	Cyberware Whole Body 3D Color Scanner – Model WBX/WB4.....	57
II.4	Comparaison des systèmes d’acquisition 3D	57
II.5	Conclusion.....	61
Chapitre III. La stéréoscopie		63
III.1	Introduction	64
III.2	Principe de la vision stéréoscopique	64
III.3	Historique.....	66
III.4	Technologies d’acquisition d’images stéréoscopiques	68
III.4.1	Acquisition stéréoscopique avec un dispositif à déclenchement décalé	69
III.4.2	Acquisition stéréoscopique avec un dispositif simultané.....	70
III.5	Conclusion.....	75
Chapitre IV. Matériel photographique, assemblage, éclairage et calibration couleur ..		77
IV.1	Introduction	78
IV.2	Contraintes liées au dispositif d’acquisition stéréo	78
IV.3	Systèmes d’acquisition.....	82
IV.3.1	Systèmes d’acquisition basés sur des Reflex numériques.....	83
IV.3.2	Caméras industrielles	88
IV.3.3	Microscope stéréoscopique	89
IV.4	Système d’éclairage.....	90
IV.5	Eclairage adapté à la stéréoscopie	93
IV.5.1	Problématique de la source lumineuse	93
IV.5.2	Problématique du déclenchement.....	94
IV.5.3	Problématique du type d’éclairage	97
IV.6	Calibrage des couleurs	99
IV.6.1	Gestion des couleurs.....	99

IV.6.2	Gamut d'un périphérique de la chaîne graphique	101
IV.6.3	Gamma	102
IV.6.4	Correction Gamma	103
IV.6.5	Balance des blancs	104
IV.6.6	Profil ICC	105
IV.6.7	Calibrage couleur	106
IV.7	Conclusion.....	109
Chapitre V. Calibrage de caméras et survol des principales techniques utilisées		111
V.1	Introduction	112
V.2	Modèle de caméra et paramètres pour la calibration.....	112
V.2.1	Modèle caméra Pinhole	112
V.2.2	Calibrage d'un système d'acquisition stéréoscopique	114
V.2.3	Principaux paramètres intrinsèques de chaque caméra	115
V.2.4	Paramètres extrinsèques du système stéréoscopique	118
V.3	Classifications des méthodes et modèles de calibrage	118
V.4	Principaux algorithmes de calibrage de caméra en vision par ordinateur.....	119
V.5	Principaux algorithmes de calibrage utilisant les AGs.....	122
V.5.1	An Evolutionary Algorithm for camera calibration (Guermeur et Louchet 2003)	123
V.5.2	Camera Calibration Using Compound Genetic-Simplex Algorithm (Savii 2004)	124
V.5.3	Calibrating a Robot Camera (Yang et Illingworth 1994).....	125
V.5.4	Combined Evolution Strategies for Dynamic Calibration of Video-Based Measurement Systems (Cerveri, Pedotti et Borghese 2001).....	126
V.5.5	Camera Calibration with Genetic Algorithms (Zhang et Ji 2001)	128
V.6	Conclusion.....	129
Chapitre VI. Algorithme génétique pour la calibration.....		131
VI.1	Introduction	132
VI.2	Apports des algorithmes génétiques.....	132
VI.3	Introduction aux algorithmes génétiques	133
VI.3.1	Opérateurs génétiques	134
VI.3.2	Algorithmes génétiques – Schéma d'exécution	136
VI.4	Calibrage des caméras stéréoscopiques avec un algorithme génétique	137
VI.4.1	Données en entrée	137

VI.4.2	Représentation génétique des individus	139
VI.4.3	Fonction d'évaluation.....	140
VI.4.4	Génération de la population initiale	143
VI.4.5	Croisement	143
VI.4.6	Mutation	144
VI.4.7	Ascension locale.....	144
VI.4.8	Algorithme global	146
VI.5	Conclusion.....	146
Chapitre VII. Paramétrage de la méthode et évaluation sur des données artificielles..		147
VII.1	Introduction	148
VII.2	Paramétrage de l'AG.....	148
VII.2.1	Probabilité de croisement et mutation	149
VII.2.2	Taille de la population et bornes initiales.....	150
VII.2.3	Fonction d'évaluation et ascension locale.....	153
VII.2.4	Robustesse de l'AG et variation des paramètres caméra	154
VII.2.5	Paramétrage de l'AG utilisant des images Canon 1Ds Mark III.....	157
VII.3	Evaluation sur des données artificielles	159
VII.4	Conclusion.....	163
Chapitre VIII. Evaluation sur des données réelles et étude comparative		165
VIII.1	Introduction	166
VIII.2	Différentes études sur données réelles	167
VIII.2.1	Choix de l'ensemble d'apprentissage et de test	167
VIII.2.2	Choix des orientations des mires d'apprentissage.....	170
VIII.2.3	Choix du nombre d'images d'apprentissage	171
VIII.2.4	Choix de la distance de prise de vue de la mire	172
VIII.2.5	Choix du nombre de distances par fichier image	176
VIII.3	Comparaison de la précision entre différents matériels	177
VIII.4	Etude comparative.....	180
VIII.5	Conclusion.....	182
Chapitre IX. Applications réelles		185
IX.1	Introduction	186
IX.2	Applications réelles	186
IX.2.1	Etude des cosmétiques	186
IX.2.2	Etude sur l'Hémangiome Infantile « Hôpital Saint André »	189

IX.2.3	Etude anatomique sur les cerveaux	192
IX.3	Conclusion.....	193
Chapitre X.	Conclusion & perspectives.....	195
X.1	Conclusion.....	196
X.2	Perspectives.....	199
	Bibliographie	205

Liste des équations

Équation IV-1 Luminance du moniteur (La correction gamma s.d.)	102
Équation IV-2 Luminosité Pixel (La correction gamma s.d.)	103
Équation V-1 Fonction de croisement, approche de (Guermeur et Louchet 2003)	124
Équation V-2 Fonction d'évaluation, approche de (Yang et Illingworth 1994)	125
Équation V-3 Fonction de mutation, approche de (Yang et Illingworth 1994)	126
Équation V-4 Fonction d'évaluation (Cerveri, Pedotti et Borghese 2001)	127
Équation V-5 Fonction d'évaluation, approche de (Zhang et Ji 2001)	128
Équation V-6 Fonction de croisement, approche de (Zhang et Ji 2001)	129
Équation V-7 Fonction de mutation, approche de (Zhang et Ji 2001)	129
Équation VI-1 bornes initiales des paramètres à estimer	139
Équation VI-2 erreur moyenne entre les distances réelles d_i et estimées d'_i	141
Équation VI-3 Fonction d'évaluation de l'AG	141
Équation VI-4 Fonction de mutation	144
Équation VII-1 Fonction d'évaluation de l'AG	153
Équation VII-2 Distance entre paramètres caméras artificielles et estimées	161

Liste des tableaux

Tableau II-1 Synopsis de l'évolution de paramètres techniques des dispositifs à base de projection de franges au cours du temps (Rohr 2009)	38
Tableau II-2 Dispositifs utilisés pour l'acquisition 3D de la surface cutanée.....	60
Tableau IV-1 Différents positionnements de deux appareils Canon Ixus Digital Wireless et écartements obtenus	80
Tableau IV-2 Boîtiers reflexes numériques utilisés et leurs caractéristiques.....	84
Tableau IV-3 Caractéristiques des objectif Nikkor AF-S DX 18-135 mm.....	85
Tableau IV-4 Caractéristiques des objectif Pentax D-FA 50mm f/2,8 Macro.....	85
Tableau IV-5 Caractéristiques des objectif Pentax DA 18-55 mm f/3,5-5,6 AL.....	86
Tableau IV-6 Caractéristiques des objectif Canon 50mm Macro	86
Tableau IV-7 Caractéristiques des objectif Canon EF 24-70mm f/2.8L USM.....	87
Tableau IV-8 Caractéristiques Beam Splitter de marque Loreo (Loreo s.d.)	88
Tableau IV-9 Caractéristiques caméra industrielle Pixelink PL-B782U	88
Tableau VII-1 Les différents intervalles pour les paramètres caméra	151
Tableau VII-2 Variation des paramètres caméra au cours de 10 exécutions de l'algorithme génétique	156
Tableau VII-3 Paramètres caméras artificielles	162
Tableau VII-4 Paramètres moyens estimés et paramètres artificiels	163
Tableau VII-5 Paramétrage de l'algorithme génétique pour les systèmes d'acquisition stéréoscopique Pentax et Canon.....	164
Tableau VIII-1 Moyennes de la précision (en mm) de l'AG en fonction des images d'apprentissage et de test.....	168
Tableau VIII-2 Écarts types de la précision (en mm) de l'algorithme génétique en fonction des images d'apprentissage et de test.....	169
Tableau VIII-3 Précision du calibrage de différents dispositifs d'acquisition stéréoscopique	179

Liste des figures

Figure I-1 Représentation schématique d'une coupe de peau	27
Figure I-2 Vue d'ensemble du système VirtualSkinLAB	29
Figure II-1 Méthodes optiques d'acquisition de données 3D	34
Figure II-2 Scanners avec contact, Sensable Phantom Premium 1.0 (Sensable Phantom Premium 1.0 s.d.)	35
Figure II-3 Scanner 3D Leica HDS3000 (Leica HDS3000 s.d.).....	36
Figure II-4 Principe de la triangulation laser	37
Figure II-5 4Ddynamics, Mephisto 3D Scanning Engine (4Ddynamics - Mephisto 3D Scanning Engine s.d.).....	37
Figure II-6 Modélisation 3D à partir de silhouettes (Abdel-Aziz et Karara 1971).....	39
Figure II-7 Configuration d'un scanner stéréo-photométrique (Wu 2002).....	40
Figure II-8 Détermination de la position spatiale d'un point en stéréoscopie, utilisant le principe de triangulation.....	41
Figure II-9 Réalisation d'une réplique siliconée (de gauche à droite sur la figure) avant de passer au profilomètre (Ettaleb, Humbert et Makki 2001).....	42
Figure II-10 A gauche, principe du Profilomètre. A droite, dispositif se basant sur la profilométrie QUANTIRIDES destiné à la dermatologie (Quantirides s.d.).....	42
Figure II-11 Utilisation d'un microscope confocal en dermatologie (Reisch 2009).....	43
Figure II-12 3D Skin Analyser de Biphiderm (3D Skin Analyzer s.d.).....	43
Figure II-13 TiVi600 de Wheels Bridge (TiVi600 s.d.)	44
Figure II-14 µkroTOP (Breuckmann µkroTOP s.d.)	45
Figure II-15 Reconstruction 3D des empreintes digitales (Paar, et al. 2008)	45
Figure II-16 Outil de stéréo photométrie pour la dermatologie (Application of photometric stereo in dermatology s.d.)	46
Figure II-17 Principe de la stéréo photométrie pour la dermatologie (Application of photometric stereo in dermatology s.d.).....	47
Figure II-18 3D LifeViz TM de QuantifiCare (3D LIFEVIZ Micro s.d.).....	47
Figure II-19 DermaTop-blue de Breuckmann (Breuckmann Dermatop Blue s.d.)	48
Figure II-20 Acquisition In-Vivo avec DermaTop-blue (Breuckmann Dermatop Blue s.d.) ..	48
Figure II-21 « PRIMOS ^{lite} » à gauche (PRIMOS lite s.d.) et « PRIMOS ^{Premium} » à droite (PRIMOS premium s.d.)	49
Figure II-22 FaceSCAN-III (Breuckmann FaceScan s.d.).....	50

Figure II-23 LifeViz™ esthétique de Quantificare (3D LIFEVIZ Esthetique s.d.).....	51
Figure II-24 DI3D™ FCS-100 est composé de quatre appareils de haute résolution et basé sur le principe de la stéréovision (di3D s.d.).....	51
Figure II-25 InSpeck Cyclops ³ (Hometrica s.d.) (Creaform s.d.).....	52
Figure II-26 InSpeck Gemini (Hometrica s.d.) (Creaform s.d.).....	52
Figure II-27 Cyberware Head & Face 3D Scanner – à gauche modèle PS, à droite PX (Whole Body Color 3D Scanner s.d.)	53
Figure II-28 Precision 3D Foot Scanner (Hometrica s.d.) (FotoScan 3D s.d.)	54
Figure II-29 Precision 3D Fotoscan Plantar (Hometrica s.d.) (FotoScan 3D s.d.).....	54
Figure II-30 Reconstruction 3D du tronc humain (Skin Mapping 2 s.d.)	55
Figure II-31 [TC] ² NX-16 (Hometrica s.d.) (tc2 s.d.)	55
Figure II-32 InSpeck Mega Capturor II XLF (Hometrica s.d.) (Creaform s.d.)	56
Figure II-33 Cyberware Whole Body 3D Scanner – à gauche model WBX, à droite WB4 (Whole Body Color 3D Scanner s.d.)	57
Figure III-1 Principe de la stéréoscopie (Vue stereo s.d.).....	64
Figure III-2 Vision stéréoscopique. La parallaxe est la différence entre la valeur de X_l et X_r , elle fait partie des indices forts de profondeur	65
Figure III-3 Stéréoscope de Wheatstone (Wheatstone s.d.).....	66
Figure III-4 Deux caméras utilisées pour la prise de vue en stéréoscopie « musée des sciences 1860 » (Musée des sciences s.d.)	67
Figure III-5 Anciens appareils photo stéréoscopiques (Musée des sciences s.d.).....	67
Figure III-6 FED Stereo 100 à gauche, et 3D RBT X4 à droite (Musée des sciences s.d.)	68
Figure III-7 FUJIFILM FinePix REAL 3D W1 (FinePix Real 3D W1 s.d.)	68
Figure III-8 Principe du décalage entre les deux prises de vue. A droite une première prise de vue T_1 (vue de droite) et à gauche une deuxième prise de vue T_2 (vue de gauche) (Digital 3-D Cameras s.d.).....	69
Figure III-9 Pocket Slidebar and Tripod (Digital 3-D Cameras s.d.).....	69
Figure III-10 EM-310M, caméra numérique de BigCatch destiné aux microscopes (USB Digital Cameras s.d.).....	70
Figure III-11 3D VuCam™ (3D VuCAM s.d.).....	71
Figure III-12 Support CSC personnalisé pour deux caméras Sony DSC-V3 (CNC Milled Aluminium Mount s.d.).....	71
Figure III-13 Principe du montage de deux appareils photos avec vitre semi-teintée	72
Figure III-14 P200 Macro (The 3D Advantage s.d.).....	73

Figure III-15 Montage de deux appareils photos sur un microscope stéréoscopique	73
Figure III-16 Microscope stéréoscopique équipé de deux appareils photo Nikon D80.....	74
Figure III-17 Loreo Beam Splitter (Loreo s.d.).....	74
Figure III-18 Principe des Beam Splitter utilisant des miroirs.....	75
Figure IV-1 Un premier support aluminium pour appareils photographiques.....	79
Figure IV-2 Position en cascade de deux appareils photographiques	79
Figure IV-3 Taille de la zone commune à une distance de travail X par rapport à l'écartement des 2 appareils. Plus l'écartement est petit A/B et plus la zone commune est grande.....	80
Figure IV-4 Distance d_i d'un sujet de taille d_i par rapport aux appareils photographiques dans le champ de vision commun.....	81
Figure IV-5 Microscope stéréoscopique	89
Figure IV-6 Modèle sténopé en bas et télécentrique en haut	90
Figure IV-7 Types d'éclairages (Denis s.d.)	92
Figure IV-8 Différentes voies optiques dans la peau (Masuda, Hirao et Takahashi 2009)	93
Figure IV-9 Taux de pénétration de la lumière dans la peau	94
Figure IV-10 Flashs connectés chacun sur un appareil différent	95
Figure IV-11 Flashs connectés sur le même appareil	96
Figure IV-12 Utilisation de cellule photoélectrique.....	96
Figure IV-13 Synchronisation de déclenchement des différents dispositifs.....	97
Figure IV-14 Système d'acquisition basé sur deux flashs	98
Figure IV-15 Système d'acquisition basé sur quatre flashs	98
Figure IV-16 Spectre de la lumière visible (www.Profil-couleur.com s.d.)	99
Figure IV-17 Echiquier d'Adelson, le carré de la case « A » a exactement la même couleur que celui de la case « B » (Echiquier Adelson s.d.).....	99
Figure IV-18 Calibrage de la chaîne graphique	100
Figure IV-19 Différence entre la couleur de référence et l'interprétation de la même couleur par différents médias	100
Figure IV-20 Gamut d'un écran Sharp Aquos LC-46D64U LCD HDTV (Baguley s.d.)	101
Figure IV-21 La déformation trop sombre par un moniteur est définie par une courbe mathématique non-linéaire (parabolique) qui porte le nom de courbe gamma (La correction gamma s.d.)	103
Figure IV-22 la correction du gamma est appliquée dès l'appareil photographique numérique ou la caméra vidéo sous forme d'une courbe de transfert qui est l'inverse de celle du gamma (La balance des blancs s.d.)	103

Figure IV-23 A droite image sans correction Gamma, à gauche, application de la courbe de transfert (correction Gamma) (Dordogne 2009)	104
Figure IV-24 Température de quelques sources lumineuses (Dordogne 2009).....	104
Figure IV-25 Espace de connexion du profil (Les profils ICC s.d.)	105
Figure IV-26 Outil de calibrage couleur i1 X-Rite multi dispositifs (X-Rite i1 s.d.)	106
Figure IV-27 Sonde évaluant l'éclairage utilisé pour une prise de vue (X-Rite i1 s.d.)	107
Figure IV-28 Sonde évaluant la chromacité de couleurs de référence affichées sur un moniteur (X-Rite i1 s.d.).....	108
Figure IV-29 Assigner un profil ICC à l'écran	108
Figure IV-30 Sonde évaluant la chromacité de couleurs de référence imprimés (X-Rite i1 s.d.)	108
Figure V-1 Géométrie de la projection perspective (Zhang et Ji 2001) (Savii 2004).....	113
Figure V-2 Calibrage stéréoscopique de deux caméras	115
Figure V-3 Distorsion optique, en haut la distorsion en barillet, au milieu la distorsion en croissant et en bas aucune distorsion obtenu grâce à l'emploi de lentilles asphériques (Wikipédia, Distorsion (optique) s.d.).....	116
Figure V-4 Variation de la distorsion radiale en fonction de la focale (Appareil Nikon D100) – Travaux de Romondino & Fraser (Remondino et Fraser 2006).....	117
Figure V-5 Variation de la distorsion de décentrement en fonction de la focale (Appareil Nikon D100) – Travaux de Romondino & Fraser (Remondino et Fraser 2006)	117
Figure VI-1 Schéma simplifié d'un algorithme génétique.....	136
Figure VI-2 Données d'entrée de l'algorithme génétique (ensemble de points et distances)	137
Figure VI-3 Détection des coins d'une mire avec un programme développé avec la librairie OpenCV (OpenCV s.d.)	138
Figure VI-4 Système de coordonnées des caméras	139
Figure VI-5 Intersection imparfaite entre deux droites 3D définissant la position d'un point P_l dans l'espace	141
Figure VI-6 Précision du calibrage en <i>mm</i> du système Pentax utilisant différentes valeurs du poids α (meilleure précision quand $\alpha = 0,1$).....	142
Figure VI-7 Graphe de la fonction d'évaluation (MathWorks s.d.).....	142
Figure VI-8 Croisement uniforme.....	143
Figure VI-9 Croisement à recombinaison linéaire	144
Figure VI-10 Amélioration de la solution avec ascension locale (cas d'une fonction de minimisation)	145

Figure VI-11 Aperçu général de l’algorithme génétique pour le calibrage	146
Figure VII-1 Moyenne (10 executions) de la précision en mm de l’ algorithme génétique (en calculant des distances aléatoires sur les images de test) en fonction de la probabilité de croisement et probabilité de mutation	149
Figure VII-2 Ecart type (10 executions) de la précision en mm de l’ algorithme génétique (en calculant des distances aléatoires sur les images de test) en fonction de la probabilité de croisement et probabilité de mutation	150
Figure VII-3 Moyenne de la précision de l’ algorithme génétique en mm, en fonction de la taille de la population et des bornes initiales.....	152
Figure VII-4 Ecart type de la précision de l’ algorithme génétique en mm, en fonction de la taille de la population et des bornes initiales.....	152
Figure VII-5 Moyenne de la précision de l’algorithme génétique en fonction du coefficient erreur point et de l’ascention locale finale	153
Figure VII-6 Ecart type de la précision de l’ algorithme génétique en fonction du coefficient erreur point et de l’ascention locale finale	154
Figure VII-7 Variation des paramètres caméra sur 10 exécutions de l’ algorithme génétique	155
Figure VII-8 Variation de la précision de l’ algorithme génétique pour dix exécutions successives	156
Figure VII-9 Paramétrage de la taille de la populations génétique pour le système d’acquisition Canon.....	158
Figure VII-10 Paramétrage de la probabilité de croisement/mutation pour les Canon 1Ds Mark III	158
Figure VII-11 Paramétrage de la fonction d’valuation et de l’ascension locale	159
Figure VII-12 Définition de deux caméras artificielles	160
Figure VII-13 Génération des points artificiels.....	160
Figure VII-14 Distance entre paramètres caméras artificielles et estimées	161
Figure VII-15 Variation de la distance entres les paramètres artificiels et estimé au cours des executions.....	163
Figure VIII-1 Détection de coins avec la librairie OpenCV (OpenCV s.d.).....	166
Figure VIII-2 Différents types de mires planes.....	167
Figure VIII-3 Moyennes de la précision (en mm) de l’ algorithme génétique en fonction des images d’apprentissage et de test	168

Figure VIII-4 Ecarts types de la précision (en mm) de l' algorithme génétique en fonction des images d'apprentissage et de test	169
Figure VIII-5 Types orientations de la mire.....	170
Figure VIII-6 Influence des orientations des mires d'apprentissage sur la précision de l' algorithme génétique	171
Figure VIII-7 Influence du nombre d'images sur la qualité des résultats de calibrage de l' algorithme génétique	172
Figure VIII-8 Différentes distance des différentes mires utilisées lors des évaluations	173
Figure VIII-9 Influence de l'éloignement des mires sur la précision de l' algorithme génétique, utilisation d'images test à distance rapprochées.....	174
Figure VIII-10 Influence de l'éloignement des mires sur la précision de l' algorithme génétique, utilisation d'images test à distance moyenne.....	174
Figure VIII-11 Influence de l'éloignement des mires sur la précision de l' algorithme génétique, utilisation d'images test à distance éloignée.....	175
Figure VIII-12 Précision de l' algorithme génétique de calibrage en fonction de l'éloignement des mires utilisées pour l'apprentissage et le test.....	175
Figure VIII-13 Précision de calibrage avec l' algorithme génétique en fonction du nombre de distances par image (3 images d'apprentissage ont été utilisées)	176
Figure VIII-14 Comparaison des précisions des systèmes d'acquisition stéréoscopiques	178
Figure VIII-15 Comparaison de notre algorithme génétique pour le calibrage avec deux méthodes conventionnelles, CCT Matlab : Camera Calibration Toolbox for Matlab (Bouguet s.d.), et Stereo Camera Calibration de OpenCV (OpenCV s.d.)	181
Figure IX-1 Protocol des prises de vue pour la cosmétologie au sein de CE.R.I.E.S./CHANEL	187
Figure IX-2 Système de prise de vue stéréoscopique Canon à gauche et Pentax à droite	188
Figure IX-3 Système de prise de vue macro Pixelink.....	188
Figure IX-4 Système de location DermaTop Blue.....	189
Figure IX-5 Hémangiome Infantile – Photo Prise au CHU de Bordeaux	190
Figure IX-6 Système d'acquisition avec appareils PENTAX K10D adapté à la prise de vue de bébés atteint d'hémangiome (Hopital Saint André de Bordeaux).....	191
Figure IX-7 Modélisation d'une partie de l'hémangiome en 3D	191
Figure IX-8 Utilisation du système d'acquisition stéréoscopique Pentax pour la modélisation anatomique d'un cerveau	192

Figure IX-9 Modélisation 3D d'un cerveau et calage d'une texture 3D à l'aide des 3 repères rouges dans l'image.....	193
Figure IX-10 Essai d'un scanner laser à bras amovible sur des pièces à relief extrême (oreille interne)	193

Liste des annexes

Annexe A : Présentation du CE.R.I.E.S./CHANEL.....	202
Annexe B : Publications Scientifiques	203

Chapitre I.

Introduction

I.1 Problématique

Le relief est une donnée complexe, il nécessite des méthodes spécifiques afin d'une part effectuer une acquisition répondant aux critères du domaine applicatif, et d'autre part d'offrir une restitution réaliste permettant à l'expert du domaine d'extraire des connaissances.

Dans le domaine biomédical, de nombreuses méthodes ont été développées pour acquérir le relief d'une partie du corps humain afin d'en déduire des informations importantes, mais elles ne répondent pas toutes aux problèmes suivants : comment acquérir le relief d'une partie de peau avec un matériel le plus léger possible et sans contrainte pour le sujet, comment restituer aussi fidèlement que possible ce relief afin que l'expert du domaine puisse le percevoir conjointement avec les autres éléments visuels de la peau (couleur, texture, etc.), comment permettre à l'expert d'interagir avec les données acquises afin de les explorer, d'effectuer des mesures et d'ajouter des annotations sur les zones d'intérêt. Nous commençons par un rappel sur les propriétés de la peau.

I.2 Connaissance de la peau humaine saine

La peau est une enveloppe qui protège l'individu. Cet organe se compose de trois couches : l'épiderme (couche supérieure), le derme et l'hypoderme (voir Figure I-1) (Guinot 2003).

- L'épiderme est constitué de kératinocytes, de mélanocytes et de cellules de Langerhans. Les kératinocytes sont présents dans toutes les couches : de la couche basale, zone de multiplication de ces cellules, aux couches les plus superficielles.
- Le derme contient des fibres de collagène et des fibres élastiques, différentes cellules dont les fibroblastes, des vaisseaux de petit diamètre, et des nerfs « libres » et des nerfs reliés à différents corpuscules sensoriels.
- L'hypoderme est une couche grasseuse où se trouvent vaisseaux et nerfs.

La peau assure différentes fonctions (Guinot 2003):

- une fonction d'échanges en intervenant dans la régulation de la température corporelle.
- une fonction sensorielle par le biais de divers récepteurs (chaleur, froid, toucher, douleur et prurit).
- une fonction métabolique, dont la synthèse de la vitamine D2 sous l'action des UVB dans la partie profonde de l'épiderme.

- une fonction d'autoréparation (cicatrisation) et de régulation de la teneur en eau : elle limite les risques de déshydratation et constitue une barrière efficace face aux agressions externes.
- Une fonction de souplesse et d'élasticité : l'épiderme est peu élastique, son rôle étant de protéger les couches profondes. La couche basale qui sépare l'épiderme du derme est ondulée ce qui permet la transmission des déformations de la surface de la peau jusqu'au derme. Cette couche s'aplatit progressivement avec l'âge : elle devient plate vers 60-70 ans accompagnant une diminution de l'épaisseur de l'épiderme et une perte d'élasticité et de souplesse.
- Une fonction de protection contre les agressions extérieures : aux agressions mécaniques, chimiques et microbiennes, au rayonnement solaire et à la chaleur.

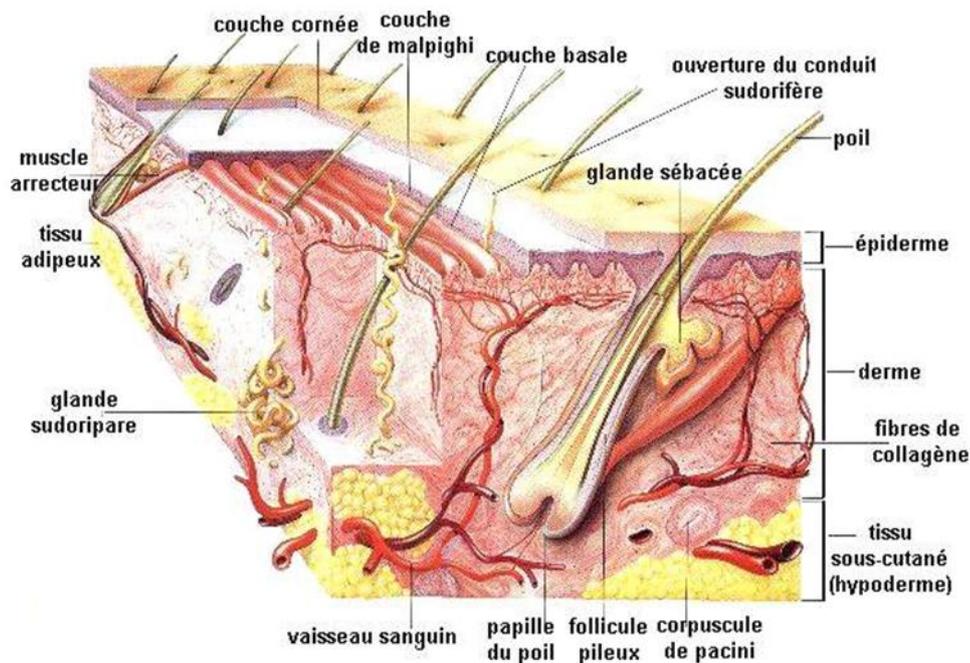


Figure I-1 Représentation schématique d'une coupe de peau

I.3 Vieillessement cutané et facteurs influençant l'aspect cutané

Le vieillissement cutané est un processus plurifactoriel complexe, qui découle de deux processus : le vieillissement chronologique encore appelé intrinsèque pouvant être considéré comme programmé génétiquement qui touche l'ensemble du revêtement cutané, et le vieillissement actinique lié à l'action néfaste des rayons ultraviolets au niveau des zones cutanées exposées. La ménopause chez la femme accentue le vieillissement en raison des modifications du statut hormonal.

Le vieillissement intrinsèque est responsable de nombreuses modifications épidermiques parmi lesquelles : une diminution de l'épaisseur de la peau liée à un aplatissement de la jonction dermoépidermique et une perte des expansions dermiques, et une diminution de la teneur en lipides, du nombre de mélanocytes et de cellules de Langerhans. Le derme s'atrophie aussi avec l'âge : le nombre et la taille des fibroblastes dermiques diminuent, les fibres élastiques sont altérées et on constate entre autres choses une diminution de la microvascularisation dermique (Guinot 2003).

Les manifestations cliniques majeures du vieillissement cutané chronologique concernent la formation de rides et la perte d'élasticité. Les manifestations cliniques du photovieillissement cutané font apparaître une peau épaissie, rugueuse, jaunâtre et hyperlaxe. On note l'apparition de ridules puis de rides profondes, des télangiectasies (atteintes vasculaires au niveau du derme), des taches pigmentaires témoins des altérations des mélanocytes, et une hyperplasie sébacée constituée de multiples papules jaunes, molles, ombiliquées en leur centre. Le vieillissement hormonal est lui aussi responsable de modifications cutanées : diminution de l'épaisseur de la peau, du contenu en collagène dermique, de la prolifération des kératinocytes et des fibroblastes, de la vascularisation cutanée, de l'hydratation cutanée et de la sécrétion sébacée. Ces modifications sont donc proches des conséquences du vieillissement chronologique et différentes de celles du photovieillissement.

Compte tenu de l'importance accordée à l'apparence de la peau et des préoccupations suscitées par l'apparition de signes de vieillissement de nombreux projets ont été menés sur ce sujet et notamment sur la quantification métrique du relief cutané. On s'intéresse tout particulièrement aux propriétés biomécaniques de la peau qui s'exprime au niveau du relief. Différentes techniques ont été employées pour décrire le relief cutané et évaluer quantitativement les déformations liées à l'âge ou à une pathologie particulière (Guinot 2003).

I.4 Contexte de la thèse

Cette thèse est réalisée dans le cadre d'un projet commun entre le Laboratoire d'Informatique de l'Université François Rabelais à Tours, et plus précisément l'équipe FOVEA sous la direction du Pr. Gilles Venturini, et le CE.R.I.E.S. (Centre de Recherches et Investigations Epidermiques et Sensorielles de CHANEL) qui est basé à Neuilly sur Seine et plus précisément l'équipe du Dr. Christiane Guinot.

Le CE.R.I.E.S focalise ses recherches sur la peau saine en utilisant l'évaluation clinique, biophysique, l'analyse statistique et la recherche fondamentale. Nous nous plaçons donc dans le domaine de la peau.

Nous avons travaillé dans le cadre d'une bourse CIFRE (2 doctorants CIFRE ont été affectés au projet global) sur la mise au point d'un système pour l'acquisition, la visualisation et la mesure du relief cutané qui ne soit pas contraignant vis-à-vis du sujet volontaire.

Il existe plusieurs méthodes pour appréhender le relief cutané, nous optons pour une technique optique dite « Photogrammétrie » qui se base sur deux ou plusieurs photographies prises selon des points de vue différents. Ce système comporte le dispositif de prise de vue ainsi qu'une application permettant le calcul de la profondeur et l'analyse des résultats.

Cette thèse concerne cette partie

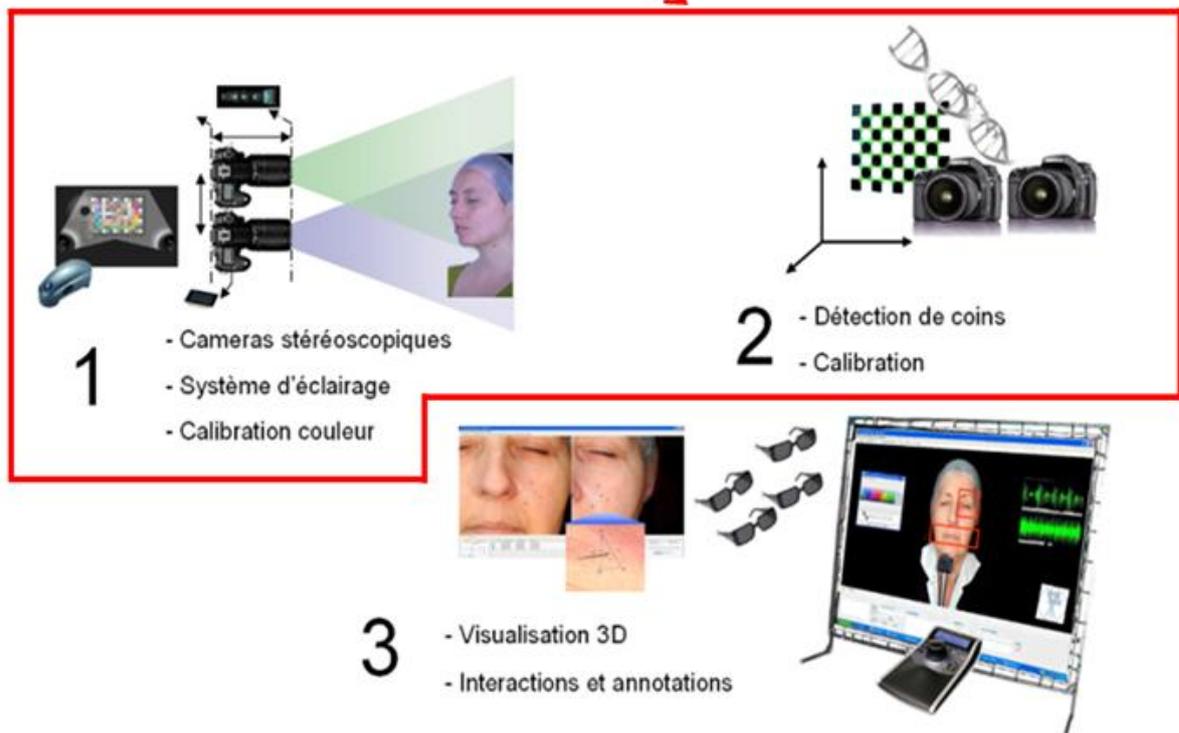


Figure I-2 Vue d'ensemble du système **VirtualSkinLAB**

Ce système implémente tous les composants matériels et logiciels nécessaires pour extraire des informations dans des images 3D de peau. Il s'agit à la fois du matériel d'éclairage et d'acquisition à base d'appareils photographiques stéréoscopiques, d'une méthode de calibration des appareils photographiques utilisant les algorithmes génétiques, de matériel de réalité virtuelle pour restituer les images en stéréoscopie et interagir avec elles et enfin d'un ensemble de fonctionnalités interactives pour annoter les images, partager ces annotations

avec d'autres experts et construire un graphe hypermédia 3D afin de mieux percevoir le liens entre les différentes annotations.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons conçu dans le cadre de deux bourses CIFRE (Haouach, M., 2010) un système complet et opérationnel appelé **VirtualSkinLAB** et dont nous donnons une vue d'ensemble dans la Figure I-2. **VirtualSkinLAB** est composé de trois modules principaux :

- Un module d'acquisition permet la prise de vue de plusieurs positions d'une mire servant au calibrage ainsi que la capture d'images stéréoscopiques en mode portrait ou macro d'une personne présentant des spécificités cutanées (partie 1, voir Figure I-2).
- Le deuxième module s'intéresse à la calibration géométrique des appareils photographiques, i.e. l'estimation des paramètres des caméras (rotation, translation, etc.) indispensables pour le calcul d'information en 3D (partie 2, voir Figure I-2).
- Le dernier module permet l'exploitation des images stéréoscopiques à l'aide d'outils d'annotation, de visualisation et d'exploration, orientés dans un but d'extraction de connaissances et de partage de ces connaissances avec d'autres experts (partie 3, voir Figure I-2).

I.5 Organisation du document

Ce rapport de thèse est constitué de huit chapitres. Nous commençons par une brève introduction décrivant une vue globale du projet de thèse,

Le deuxième chapitre offre un survol des principales techniques et dispositifs utilisées pour la modélisation 3D en dermatologie. Ensuite nous abordons dans le troisième chapitre le concept de la stéréoscopie, un bref historique et une présentation de quelques dispositifs anciens et modernes servant à la photographie en relief.

Nous décrivons ensuite, à travers le quatrième chapitre, les différents assemblages réalisés pour construire nos systèmes d'acquisitions stéréoscopiques. Nous parlons aussi de l'aspect prise de vue photographique et les contraintes liés à la stéréoscopie, ainsi que le calibrage des couleurs qui est nécessaire dans les applications de prise de vue professionnelles.

Nous présentons dans le cinquième chapitre le problème de calibrage d'appareils photographiques stéréoscopiques. Nous parcourons différentes méthodes conventionnelles de calibrage ainsi que plusieurs autres méthodes faisant intervenir des algorithmes évolutionnaires.

Le sixième chapitre est consacré à notre nouvelle méthode de calibrage d'appareils photographiques stéréoscopiques avec les algorithmes génétiques. Le chapitre décrit d'abord brièvement la notion d'algorithme génétique ainsi que ses applications. L'AG est ensuite décrit en présentant la fonction d'évaluation ainsi que les paramètres génétiques.

Le but du septième chapitre est de définir un paramétrage adéquat à l'AG en fonction de deux problématiques différentes. Différentes études ont été réalisées afin d'effectuer ce paramétrage. Des tests sur des données artificielles ont également été effectués pour démontrer la robustesse de l'AG.

Dans le huitième chapitre, une évaluation de notre AG a été effectuée sur des données réelles. Ces données sont des vraies images de mires positionnées suivant différentes orientations. Différentes tailles de mires et différentes distances ont ainsi pu être testées.

Le neuvième chapitre résume les différentes applications réelles effectuées en utilisant **VirtualSkinLAB**. Les applications concernent le domaine de la cosmétique, la dermatologie et l'anatomie. Nous terminons par une conclusion générale en donnant des perspectives au travail réalisé.



Chapitre II.

Etat de l'art des systèmes d'acquisition 3D destinés au domaine biomédical

Résumé

Nous décrivons dans ce chapitre les principales techniques d'acquisition 3D existantes, utilisées dans différents domaines nécessitant différents besoins. Ces techniques se divisent en deux grandes catégories qui sont avec ou sans contact. Les techniques sans contact se divisent en deux sous catégories qui sont, les méthodes passives et actives.

Nous survolons ensuite quelques dispositifs d'acquisition 3D spécifiques pour le relief cutané utilisés en dermatologie et cosmétologie, chaque dispositif repose sur une technique particulière. Le projet **VirtualSkinLAB** se situe au niveau des techniques passives sans contact, il est basé sur la photogrammétrie.

II.1 Introduction

L'acquisition du relief en 3D permet le positionnement d'un ensemble de points d'une scène donnée dans un système virtuel de coordonnées tridimensionnelles, de générer un modèle 3D et de le manipuler en fonction des besoins spécifiques. De nombreux domaines utilisent l'acquisition 3D du relief, parmi eux : l'industrie pour la CAO, le bâtiment pour la modélisation de bâtiments 3D ou l'art en modélisant des œuvres comme les statues du musée Rodin par exemple (Rodin Web s.d.).

Le domaine biomédical s'est intéressé rapidement à ce genre de techniques, nous les retrouvons en modélisation de prothèses dentaires (Kavo Everest s.d.) ou en modélisation 3D d'escarres (Albouy, Treuillet et Lucas 2005) par exemple.

Nous nous intéressons plus spécialement aux applications en dermatologie et cosmétologie des techniques d'acquisition 3D, et retrouvons plusieurs systèmes dédiés qui offrent des qualité et précisions variables en fonction du dispositif.

II.2 Techniques d'acquisition de données 3D

Différentes techniques sont utilisées afin d'acquérir le relief, la plupart d'entre elles sont utilisées pour la modélisation 3D. Les outils d'acquisition 3D sont utilisés dans de nombreux domaines d'application, comme le contrôle de qualité, la médecine, la réalité virtuelle, la robotique et l'archéologie. Chaque outil ou technique présente des spécificités propres en matière de précision, de temps d'acquisition et de facilité d'utilisation adaptés à chaque domaine d'application.



Figure II-1 Méthodes optiques d'acquisition de données 3D

Les techniques d'acquisition 3D du relief se divisent en deux catégories principales (voir Figure II-1). Il existe des techniques qui ont besoin d'un contact physique direct avec le sujet et d'autres sans contact ces dernières se divisent en deux sous catégories, celles appelées « active » et les autres « passives ». Ci-dessous, nous donnons des détails sur chaque méthode et ses applications (Scanner 3D s.d.).

II.2.1 Scanners avec contact

Les scanners 3D avec contact se basent sur un contact physique avec le sujet à modéliser, un palpeur qui pointe sur chaque point à numériser est placé sur un bras mécanique commandé manuellement ou automatiquement (voir Figure II-2). Cette technique a une très bonne précision mais ses inconvénients principaux sont la lenteur de l'acquisition, car chaque point doit être modélisé distinctement (adapté aux formes géométriques), et l'impossibilité de l'utiliser sur des objets fragiles, car ils risquent d'être dégradés par l'appui du palpeur (objets historiques).



Figure II-2 Scanners avec contact, Sensable Phantom Premium 1.0 (Sensable Phantom Premium 1.0 s.d.)

II.2.2 Scanners sans contact

Les techniques de modélisation 3D sans contact n'ont pas besoin de contact physique pour numériser un point de l'espace, ils se basent sur la détection d'un rayonnement spécifique réfléchi sur le sujet (méthodes actives) ou d'une acquisition optique sous éclairage classique (méthodes passives), ces deux méthodes ont des utilisations et des contraintes différentes en fonction du domaine d'utilisation.

II.2.2.1 Scanners sans contact actif

Les scanners actifs traitent un rayonnement réfléchi par le sujet d'étude, ce rayonnement pouvant être de différentes natures : lumière, ultrasons ou laser.

II.2.2.1.1 Scanners par temps de vol

Les scanners par temps de survol utilisent généralement le laser afin de modéliser en 3D le relief du sujet d'étude, il se base sur le principe du temps de parcours afin de calculer la distance. L'appareil émet une impulsion laser et détecte le temps de retour du rayonnement au capteur, puisque la vitesse de la lumière est connue, la machine peut calculer ainsi la distance entre le point de l'espace visé et le capteur.

Ainsi, pour faire l'acquisition d'un relief, le scanner modélise la surface point par point à l'aide d'un système de miroirs intégré, la précision dépendra du nombre de points modélisés.

Nous citons en exemple le scanner 3D Leica HDS3000 (voir Figure II-3). Il est utilisé dans le domaine du bâtiment et de la géologie, il bénéficie d'un large champ de vision horizontal (tête pivotante) et vertical (miroir d'orientation verticale) (Leica HDS3000 s.d.)



Figure II-3 Scanner 3D Leica HDS3000 (Leica HDS3000 s.d.)

II.2.2.1.2 Scanners par triangulation

Les scanners 3D par triangulation utilisent deux dispositifs : un émetteur laser et un appareil photo (éventuellement un appareil photographique). Ce genre de scanners est appelé « scanners par triangulation » car l'émetteur laser, l'appareil photo et le point laser projeté forment un triangle.

L'émetteur laser forme un angle avec l'axe de l'appareil photo (voir Figure II-4), la distance entre l'appareil photo et l'émetteur est connue, et l'angle entre l'axe de l'appareil

photo et le point laser projeté peut être calculé. Nous pouvons ainsi calculer la distance du point laser projeté par rapport à l'appareil photo.

Généralement l'émetteur laser émet une ligne qui balaye l'objet à scanner afin d'accélérer la numérisation.

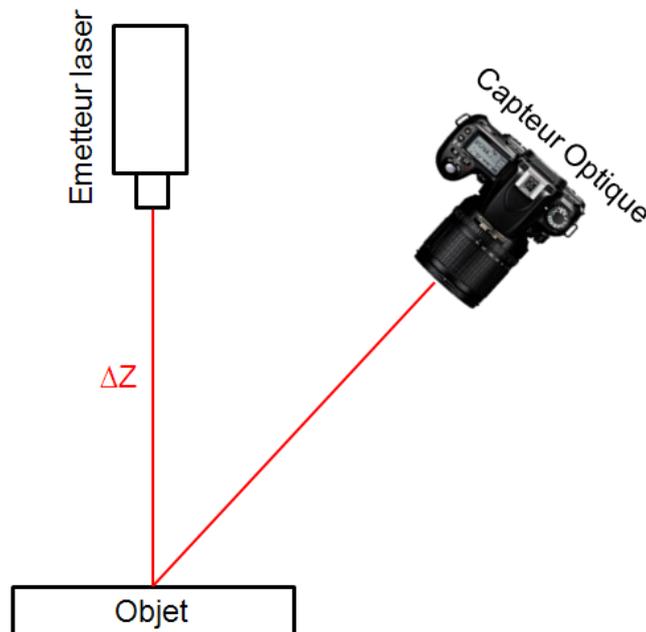


Figure II-4 Principe de la triangulation laser

II.2.2.1.3 Scanners à projection de franges

Les scanners à projection de franges projettent un motif structuré sur le sujet d'étude, généralement sous forme d'une grille ou d'un ensemble de bandes horizontales. La géométrie 3D est ainsi calculée en fonction de la déformation de ces motifs projetés succinctement à différents niveaux de précision (voir Figure II-5).

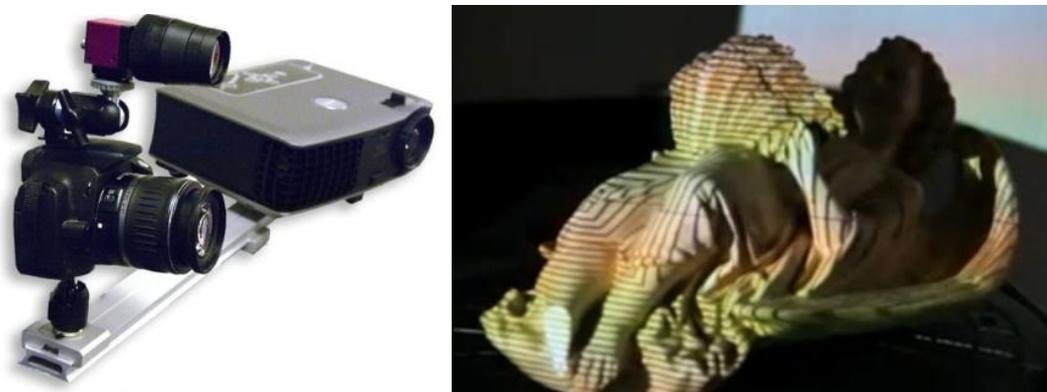


Figure II-5 4Ddynamics, Mephisto 3D Scanning Engine (4Ddynamics - Mephisto 3D Scanning Engine s.d.)

Le point fort de cette technique est la vitesse à laquelle elle peut numériser la totalité de son champ de vision. Elle peut atteindre une précision de quelques micromètres et fait partie des technologies répandues dans plusieurs domaines d'application.

Projection de franges	1995	1998	2003	2006
Technique	Projection de franges uni-couleurs déphasées Sans contact et mesure directe sur la peau In-Vivo			
	Lumière halogène		Lumière bleue à base de LED	
Superposition des motifs de franges	Procédure manuelle		Procédure manuelle assistée par laser	Control logiciel complet
Zones de mesure	Face interne de l'avant bras		Patte d'oie, poche sous les yeux, joues, glabelle, lèvres, nez, décolleté, avant bras, jambe	
Surface de mesure	850 mm ² (25 mm x 35 mm)		1200 mm ² (30 mm x 40 mm)	
Surface analysée	20 mm x 20 mm		20 mm x 20 mm (ou adapté au besoin)	
Résolution :				
en X	~40 µm		~30 µm	
en Y	~40 µm		~30 µm	
en Z	4 µm		4 µm	
Temps d'acquisition	~320 ms		~260 ms	

Tableau II-1 Synopsis de l'évolution de paramètres techniques des dispositifs à base de projection de franges au cours du temps (Rohr 2009)

L'évolution chronologique des caractéristiques des systèmes de modélisation 3D à base de projection de franges est résumé ci-dessus (voir Tableau II-1).

II.2.2.1.4 Scanners à lumière modulée

Ce type de scanners est plus rare. Ils se basent sur le principe de la modulation de la lumière afin d'en déduire la distance. L'appareil projette un rayonnement lumineux sur le

point à numériser avec une certaine phase et longueur d'onde, un capteur détecte le rayonnement réfléchi et déduit la variation. C'est cette variation qui indique la distance parcourue.

II.2.2.2 Scanners sans contact passif

Aucun rayonnement n'est émis par ce genre de scanners. Ils se basent sur la lumière réfléchie par un éclairage classique ambiant. Ils utilisent généralement des capteurs optiques classiques, tels que les caméras et les appareils photos, ces techniques se basent plus sur le traitement d'images que les précédentes.

II.2.2.2.1 Silhouette

Ce type de scanners utilise un capteur optique classique tel qu'un appareil photo. Les images sont prises en rotation autour de l'objet, généralement l'objet est mis sur un plateau tournant pendant que l'appareil photo prend des photos à une fréquence donnée (Abdel-Aziz et Karara 1971).



Figure II-6 Modélisation 3D à partir de silhouettes (Abdel-Aziz et Karara 1971)

Les différents clichés de contours ainsi pris sont assemblés pour former le relief superficiel de l'objet (voir Figure II-6). Cette technique ne permet pas de modéliser les concavités profondes.

II.2.2.2.2 Scanners stéréo-photométriques

Cette technique utilise différentes configurations de système d'éclairage (voir Figure II-7) afin de déduire le relief de l'objet, en prenant en compte le degré de réflexion de chaque partie de l'objet suivant une configuration d'éclairage donnée (Basri, Jacobs et Kemelmacher 2006) (Wu 2002).

Chaque image est prise en utilisant une seule source de lumière (voir *Fig. II.7*). De chaque image est produite une carte de réflexion lumineuse, qui, à l'aide de la loi de Lambert, modélise la surface dans l'espace 3D (Wu 2002).

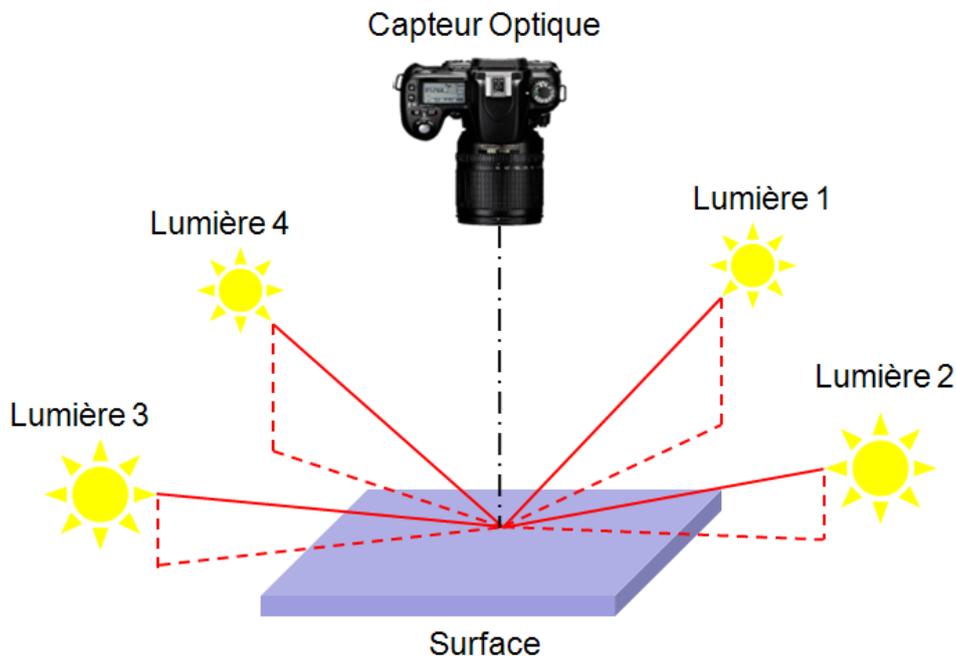


Figure II-7 Configuration d'un scanner stéréo-photométrique (Wu 2002)

II.2.2.2.3 Stéréoscopie

Le principe de la stéréoscopie prend son origine de la vision humaine naturelle, le fait d'avoir deux yeux écartés d'une distance d'environ 6cm, permet de percevoir le relief. Appliqué à la vision par ordinateur, deux appareils photos sont utilisés pour faire l'acquisition de photographies 3D. Afin d'obtenir la position spatiale d'un point particulier, nous utilisons le principe de la triangulation (voir Figure II-8).

Les scanners utilisant la stéréoscopie sont assez légers et ne présentent pas de contraintes majeures pour le sujet de l'étude. Nous pouvons les utiliser dans la modélisation de visage ou en ophtalmologie.

Le projet **VirtualSkinLAB** sur lequel porte cette thèse, utilise cette technique afin d'une part permettre l'acquisition de données 3D et de visualiser en stéréoscopie la zone d'étude. Des détails sur le système **VirtualSkinLAB** ainsi que sur les techniques et les algorithmes utilisés seront donnés dans les chapitres suivants.

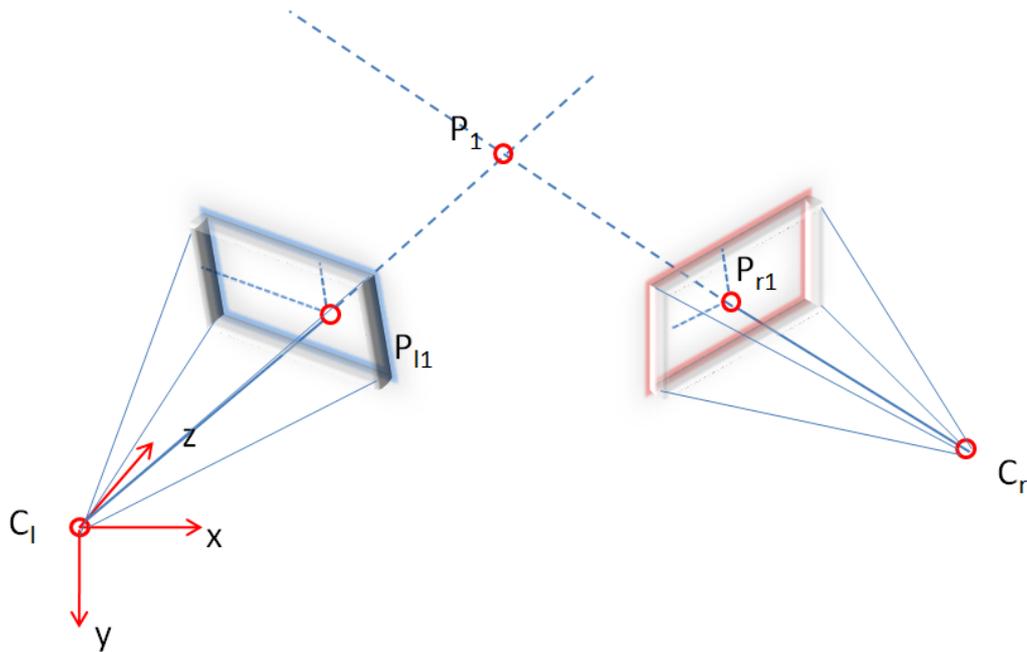


Figure II-8 Détermination de la position spatiale d'un point en stéréoscopie, utilisant le principe de triangulation

II.3 Dispositifs d'acquisition du relief cutané

Le relief cutané est une donnée importante dans le domaine de la dermatologie et la cosmétologie. Il représente la face visible de la peau qui est soumise à des facteurs endogènes et exogènes pouvant modifier son aspect esthétique ou ses spécificités physiologiques (Ettaleb, Humbert et Makki 2001).

II.3.1 Profilométrie

Une des méthodes les plus répandues pour mesurer le relief cutané est l'utilisation d'un élastomère siliconé (Silflo[®]) (voir Figure II-9) permettant d'obtenir une réplique négative du relief cutané (Ettaleb, Humbert et Makki 2001). Cette réplique en silicone peut être analysée à l'aide d'un profilomètre laser (voir Fig. II.8), par contre, si nous voulons utiliser un profilomètre mécanique, l'empreinte devra être créée avec de l'époxy résine, plus dure que le silicone afin de résister au palpeur de l'appareil.

Le principal désavantage de la réplique siliconée est le contact direct avec la zone cutanée de l'étude. Dans certain cas, ce contact peut déformer la surface cutanée et ainsi ne pas donner des résultats fideles lors du passage au profilomètre. Cette technique ne permet pas l'acquisition de la couleur de la peau, qui se révèle être une information très importante.

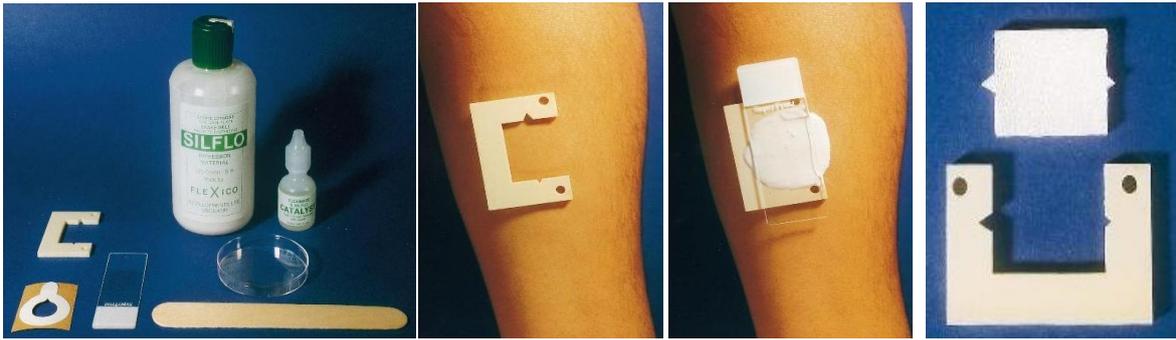


Figure II-9 Réalisation d'une réplique siliconée (de gauche à droite sur la figure) avant de passer au profilomètre (Ettaleb, Humbert et Makki 2001)

Le profilomètre projette une lumière rasante à 35° sur la réplique négative de la peau, des ombres vont ainsi se former dus à la topographie de l'empreinte (voir Figure II-10), un appareil photographique numérique haute résolution capture une image verticalement avant de le transférer vers un logiciel spécifique qui produira un modèle 3D du relief.

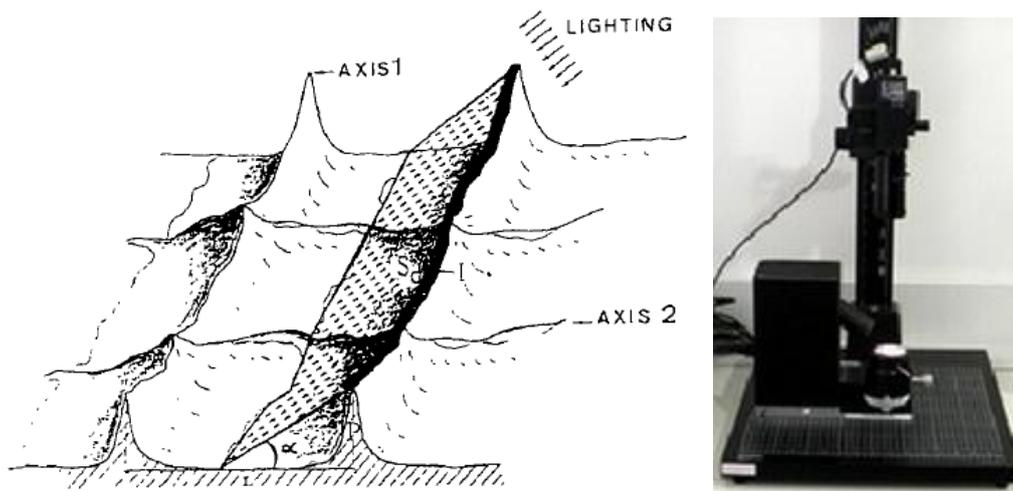


Figure II-10 A gauche, principe du Profilomètre. A droite, dispositif se basant sur la profilométrie QUANTIRIDES destiné à la dermatologie (Quantirides s.d.)

D'autres dispositifs sont utilisés en dermato-cosmétologie qui ne nécessitent pas de contact direct avec la zone d'étude, chaque dispositif utilise une technique d'acquisition 3D différente comme décrites dans la partie précédente « Techniques d'acquisition de données 3D ». Ci-dessous, quelques dispositifs d'acquisition 3D de la peau, sans contact, actuellement utilisés en dermatologie et cosmétologie (Zahouani et Humbert 2002).

II.3.2 Microscopie confocale



Figure II-11 Utilisation d'un microscope confocal en dermatologie (Reisch 2009)

Un microscope confocale (voir Figure II-11) a pour principe de réaliser des images de profondeurs successives de très petites profondeurs de champ (400 nm) appelées sections optiques (Wikipédia s.d.). Cela est permis grâce au déplacement du plan focal de l'objectif optique sur plusieurs niveaux de profondeur.

Par rapport à la microscopie optique conventionnelle, la confocalité permet de reconstituer le volume d'un échantillon en 3D.

Ce dispositif commence à être largement utilisé dans le milieu de la dermatologie et la cosmétologie afin de visualiser les couches les plus superficielles de la peau (couche cornée).

II.3.3 3D Skin Analyser de Biophiderm



Figure II-12 3D Skin Analyser de Biophiderm (3D Skin Analyzer s.d.)

Le 3D Skin Analyser (3D Skin Analyzer s.d.) est un outil de modélisation 3D destiné aux applications dermatologiques et cosmétiques. Il ressemble un peu au dispositif PRIMOS qui sera présenté ultérieurement. Il se base sur la technologie de projection de franges et reconstitue le relief en 3D à partir de quatre images prises de la zone à étudier (4 images pour 4 projections de franges d'interférences) (voir Figure II-12).

II.3.4 TiVi600 Tissue Viability Imager

Le TiVi600 de Wheels Bridge (TiVi600 s.d.) est un dispositif basé sur la spectroscopie polarisée qui est capable de faire des acquisitions de couches internes de la peau (voir Figure II-13).

Le principe de ce dispositif repose sur la structure même de la peau qui reflète différemment la lumière polarisée suivant la profondeur de la couche cutanée.



Figure II-13 TiVi600 de Wheels Bridge (TiVi600 s.d.)

II.3.5 μ ikroTOP

Un autre dispositif de Breuckmann, le μ ikroTOP (Breuckmann μ ikroTOP s.d.) (Voir Figure II-14) est un scanner 3D à base de projection de franges de lumière blanche destiné en premier lieu à l'analyse des composants électroniques et des objets comportant du micro relief.

Le dispositif présente une précision inférieure à $2\mu\text{m}$ pour une résolution de 1380×1036 pixels de résolution. Le temps d'acquisition est moins d'une seconde ce qui permet éventuellement d'utiliser ce matériel pour une modélisation d'une surface cutanée ex-vivo (non in-vivo) de $33 \times 24 \text{mm}$ de surface maximum.

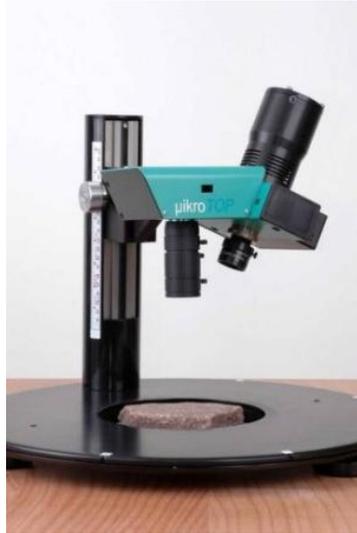


Figure II-14 µkroTOP (Breuckmann µkroTOP s.d.)

Une application In-Vivo de ce dispositif n'est pas possible car elle offre un très grand grossissement pour une vitesse d'acquisition équivalente au *DermaTop*-blue (300-400ms), cela ayant pour effet une grande sensibilité aux micro-vibrations du corps provoquant une capture optique floue.

II.3.6 Reconstruction 3D d'empreintes digitales

L'analyse des empreintes digitales est largement utilisée dans le domaine de la sécurité. L'utilisation d'un système d'acquisition des empreintes digitales sans contact utilisant la stéréoscopie présente des avantages par rapport aux lecteurs d'empreintes digitales classiques : il n'y a pas de déformation de la surface du doigt, toute la surface utilisée pour une utilisation biométrique est couverte, des aspects techniques comme la maintenance et le nettoyage est facilité et l'accès à une reconstruction 3D de la zone couverte est possible (voir Figure II-15).

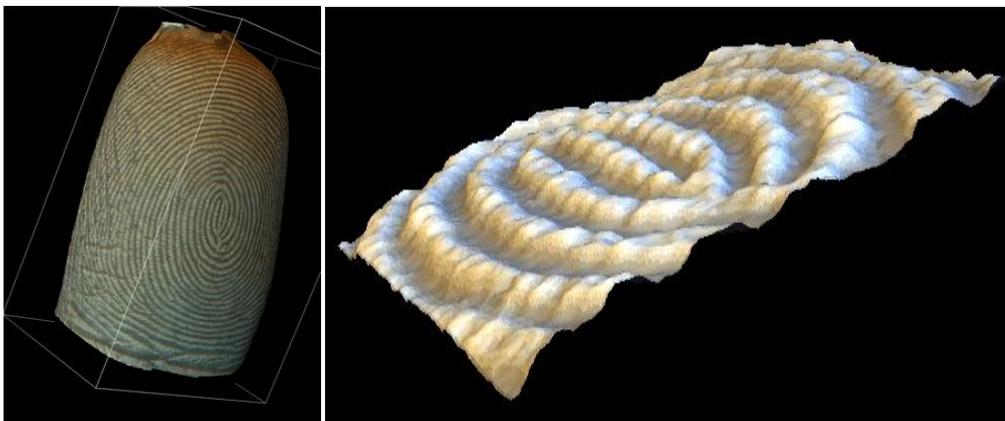


Figure II-15 Reconstruction 3D des empreintes digitales (Paar, et al. 2008)

L'institut de traitement des images numériques autrichien du « Joanneum Research » a développé un système spécialisé dans la modélisation 3D des empreintes digitales utilisant la stéréoscopie (Paar, et al. 2008). Il est constitué d'un système d'acquisition calibré utilisant cinq caméras et un éclairage adapté.

Utilisant la technique "Silhouette" (voir section II.2.2.2.1), un modèle cylindrique du doigt est généré. Après les prétraitements classiques (correction d'ombrage, suppression de bruit, correction de la distorsion), les textures acquises par chaque appareil photographique sont projetées sur le modèle 3D. Une mise en correspondance image à image et une reconstruction 3D dense permet d'obtenir un modèle de surface cylindrique texturé avec une grille de précision allant de 25 à 50 μm .

II.3.7 Stéréo-photométrie en dermatologie

Développé par le laboratoire de vision par ordinateur de l'Institut de Technologie DuPont Bristol de l'université West of England (Application of photometric stereo in dermatology s.d.), cet outil (voir Figure II-16) est destiné en premier lieu à des applications en dermatologie. Il est capable de capturer des images de la peau et de générer un modèle 3D de la zone d'étude utilisant le principe de la stéréo photométrie précédemment présentée (section II.2.2.2.2).



Figure II-16 Outil de stéréo photométrie pour la dermatologie (Application of photometric stereo in dermatology s.d.)

La motivation principale pour la conception de cet outil était de détecter la présence d'un cancer de la peau, et plus particulièrement les mélanomes. L'outil permet aux dermatologues de différencier les mélanomes des tumeurs bénignes de la peau.

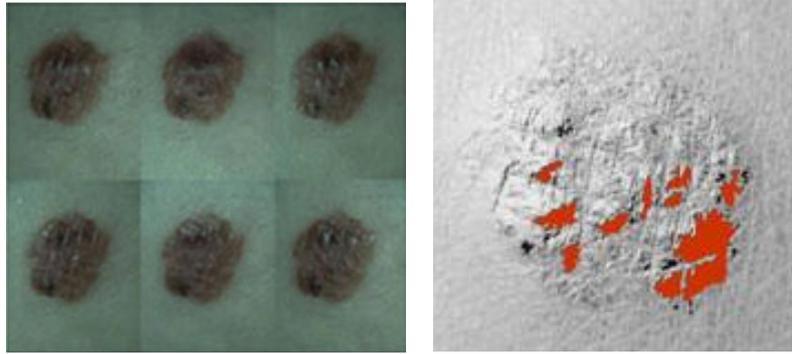


Figure II-17 Principe de la stéréo photométrie pour la dermatologie (Application of photometric stereo in dermatology s.d.)

La coque de l'outil (Voir Figure II-16) contient un appareil photographique et six sources lumineuses à LED. Six images sont prises utilisant chaque LED illuminée indépendamment (voir Figure II-17). Un logiciel, fourni avec ce dispositif et développé au sein de la même équipe, permet de classer les tumeurs ainsi modélisées en malins ou bénins, en utilisant des règles de classification combinées (algorithme de Boosting).

II.3.8 3D LifeViz™ MICRO

Le 3D LifeViz™ Micro de QuantifiCare (3D LIFEVIZ Micro s.d.) (Voir Figure II-18), est un système d'acquisition 3D basé sur un appareil photo numérique utilisant le principe de la vision stéréoscopique. Un objectif de type Beamsplitter est utilisé permettant de fournir deux vues, gauche et droite, en une seule image.

Ce système est spécialement destiné à l'acquisition 3D rapprochée du relief cutané, il est utilisé pour la visualisation de rides fines, lésions, cicatrices, cancers de la peau et d'affections cutanées de type psoriasis, ainsi que pour les mesures quantitatives de cicatrices.



Figure II-18 3D LifeViz™ de QuantifiCare (3D LIFEVIZ Micro s.d.)

L'avantage de ce système est sa portabilité et sa facilité d'utilisation. Il peut ainsi être utilisé par des dermatologues ne nécessitant pas une formation spécifique à un mode d'emploi

contraignant. La limite principale de cet appareil est que la résolution de chaque vue, gauche ou droite, est limitée à la moitié de la résolution globale de l'appareil photo, mais cet inconvénient est compensé par la faible distance de travail proposée.

II.3.9 DermaTOP-blue



Figure II-19 DermaTop-blue de Breuckmann (Breuckmann Dermatop Blue s.d.)

Le scanner *DermaTop*-blue de Breuckmann (Breuckmann Dermatop Blue s.d.) (Voir Figure II-19) est conçu spécialement pour une utilisation en dermatologie/cosmétologie. Il se base sur le principe de projection de franges à une très petite échelle permettant d'avoir théoriquement des détails de l'ordre de quelques micromètres (en pratique, la précision est nettement plus faible).

L'utilisation de LED bleue pour la projection de franges (voir Figure II-20) procure une modélisation optimale de la topographie cutanée. En effet la lumière bleue est la seule à ne pas pénétrer profondément dans la peau et elle est bien réfléchiée sur la surface cutanée.

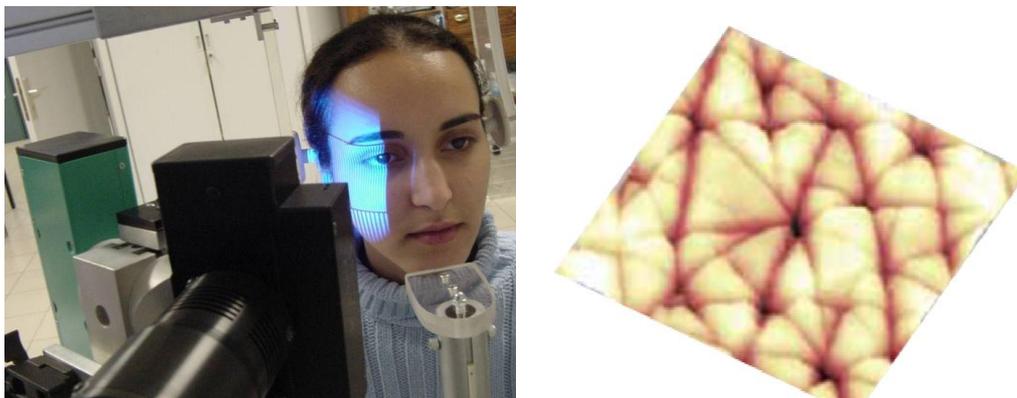


Figure II-20 Acquisition In-Vivo avec DermaTop-blue (Breuckmann Dermatop Blue s.d.)

Le temps d'acquisition moyen de ce dispositif est d'environ 200 millisecondes pour des surfaces allant de 20x15mm à 80x60mm selon l'objectif de l'appareil photographique,

permettant ainsi une utilisation In-Vivo. L'appareil photographique numérique fourni avec ce système, procure des images de 1384x1036 pixels, cette résolution est suffisante car l'appareil photographique étant proche du sujet, le champ de vision est très restreint. La précision du *DermaTop-blue* varie en fonction de l'objectif utilisé (surface scannée), elle varie de 2 à 8 μm sur l'axe de profondeur.

Selon les concepteurs, le *dermaTop-blue* peut évaluer les phénomènes suivants:

- Evaluation du vieillissement cutané.
- Réduction de la taille des pores.
- Evaluation de la cellulite.
- Evaluation de la taille de poches sous les yeux.
- Appréciation du volume des lèvres.

II.3.10 PRIMOS

La firme GFMesstechnik (GFM) est spécialisée dans la métrologie 3D. Elle a conçu une gamme de produit appelé PRIMOS destiné à la dermatologie. Comme son concurrent le système *DermaTop-blue*, les systèmes PRIMOS utilisent la technique de projection de franges afin de générer le modèle 3D de la zone d'étude.

Deux systèmes PRIMOS sont directement destinés à la dermato-cosmétologie :

- PRIMOS Lite : (voir Figure II-21 à gauche) (PRIMOS lite s.d.) Ce système offre la possibilité de se rapprocher au plus près du relief cutané. Il utilise une projection de franges à lumière blanche, sa vitesse de 70ms d'acquisition lui permettant une utilisation In-Vivo.



Figure II-21 « PRIMOS^{lite} » à gauche (PRIMOS lite s.d.) et « PRIMOS^{Premium} » à droite (PRIMOS premium s.d.)

- PRIMOS Premium : (voir Figure II-21 à droite) (PRIMOS premium s.d.) Ce système offre la possibilité d'acquérir en entier ou une partie du visage en 3D, en

utilisant la projection de franges. Sa vitesse d'acquisition de 70ms lui permet d'être adapté aux applications In-Vivo.

II.3.11 FaceSCAN-III

Le scanner FaceSCAN-III de Breuckmann (Breuckmann FaceScan s.d.) (Voir Figure II-22) est, comme son nom l'indique, spécialement conçu pour la modélisation en 3D de visages humain. Il utilise un système de projection de franges de lumière blanche comme technique d'acquisition 3D.



Figure II-22 FaceSCAN-III (Breuckmann FaceScan s.d.)

Le système FaceSCAN-III est généralement utilisé en couple afin de faire l'acquisition des deux cotés du visage. Il permet de faire une capture en moins de 0,8 sec en 1384 x 1036 pixels de résolution couvrant une surface totale de 600x460 mm.

A l'opposé du *DermaTop-blue* (Breuckmann Dermatop Blue s.d.) précédemment présenté, le FaceSCAN-III (Breuckmann FaceScan s.d.) ne peut numériser les détails de la peau en dessous de 200 μm . Son utilisation se limite donc à l'analyse des modifications de surface faciale telle que les cernes, les poches ou le volume des lèvres.

II.3.12 3D LifeVizTM esthétique

Similaire au LIFEVIZTM Micro (3D LIFEVIZ Micro s.d.), le système LifeVizTM Esthétique de Quantificare (3D LIFEVIZ Esthetique s.d.) (Voir Figure II-23) est un système optique basé sur la vision stéréoscopique pour l'acquisition 3D du relief cutané. Il inclut un appareil photo numérique et un objectif permettant d'acquérir en un instant les deux vues gauche et droite (3D LIFEVIZ Esthetique s.d.).



Figure II-23 LifeViz™ esthétique de Quantificare (3D LIFEVIZ Esthetique s.d.)

II.3.13 DI3D™ de Dimensional Imaging

Le DI3D™ FCS-100 (di3D s.d.) est un outil qui permet la génération d'un modèle 3D du visage (voir Figure II-24). Il est composé de quatre appareils photographiques de haute résolution, qui peuvent aller de 10 méga pixels pour le modèle de base à 21 méga pixels pour le plus précis. Il se base sur le principe de la stéréovision, tel que nous le développons dans cette thèse. L'utilisation de quatre appareils photos est justifiée car cela permet d'éliminer les zones d'occlusion générées par l'orientation des caméras.



Figure II-24 DI3D™ FCS-100 est composé de quatre appareils de haute résolution et basé sur le principe de la stéréovision (di3D s.d.)

Ce matériel est fourni avec un outil logiciel DI3D™ Analysis qui permet d'effectuer principalement des calculs de volume et de surface.

Cet outil a pour but principal la mesure des déformations et des expressions du visage, sa précision ne permet donc pas l'étude de la peau et le microrelief. Cependant les avantages

qu'il offre en utilisant la stéréovision font de lui le meilleur outil de modélisation 3D adapté aux applications In-Vivo.

II.3.14 InSpeck Cyclops³

Le système Cyclope³ de chez InSpeck (Hometrica s.d.) (Creaform s.d.) est un appareil portable destiné à une acquisition 3D du visage (voir Figure II-25). Il est basé sur la projection de franges blanches et nécessite un temps d'acquisition d'environ quelques secondes. Il peut faire l'acquisition de deux visages en même temps et est capable de combiner plusieurs acquisitions afin de générer une vue 3D à 360°. Il pèse quelques kilogrammes et peut être installé sur un trépied standard.



Figure II-25 InSpeck Cyclops³ (Hometrica s.d.) (Creaform s.d.)

II.3.15 InSpeck Gemini

Deux versions du système InSpeck Gemini (Hometrica s.d.) (Creaform s.d.) sont disponibles. Le Gemini SF et le Gemini MF. Le Gemini SF désigne en anglais « Small Field » permet de faire l'acquisition 3D de petites surfaces de la taille d'un visage, d'une main ou d'un pied (voir Figure II-26). Le MF quand à lui désigne en anglais « Medium Field », il permet de faire l'acquisition 3D de surfaces moyennes comme le buste ou la poitrine.



Figure II-26 InSpeck Gemini (Hometrica s.d.) (Creaform s.d.)

Ce système repose sur la technologie de projection de franges blanches, et nécessite 600ms pour faire une acquisition. Comme son équivalent le InSpeck Cyclops³ précédemment décrit, il peut combiner de manière logicielle plusieurs vues afin de générer un modèle 3D à 360°, et peut être installé sur un trépied standard.

II.3.16 Cyberware Head & Face 3D Scanner – Model PS/PX



Figure II-27 Cyberware Head & Face 3D Scanner – à gauche modèle PS, à droite PX (Whole Body Color 3D Scanner s.d.)

Le système Cyberware 3D Scanner Model PS ou PX (Whole Body Color 3D Scanner s.d.) est spécialement dédié à la modélisation en 3D de visage in vivo utilisant la technologie de triangulation laser (voir Figure II-27).

Chaque unité d'acquisition est composée de deux capteurs optiques et d'un émetteur laser de basse puissance sans danger pour les yeux. Le premier capteur sert à acquérir le profil 3D du visage en fonction de la projection laser, et le deuxième capteur sert à capturer la texture afin de la projeter sur le modèle 3D.

II.3.17 Precision 3D Foot Scanner

Le système Precision 3D Foot Scanner (Hometrica s.d.) (FotoScan 3D s.d.) est un outil spécialement dédié à la modélisation 3D du pied et la cheville (voir Figure II-28). Ce dispositif est basé sur la stéréophotogrammétrie, le processus complet prend quelques secondes afin de présenter un modèle 3D, sur lequel nous pouvons effectuer des mesures en 3D de l'ordre du 0,5mm.



Figure II-28 Precision 3D Foot Scanner (Hometrica s.d.) (FotoScan 3D s.d.)

Le Precision 3D Foot Scanner est un dispositif fixe, qui opère dans des conditions d'éclairage standard, il permet entre autre de modéliser la base du pied grâce à un support transparent.

II.3.18 Precision 3D FotoScan Plantar

Le système Precision 3D FotoScan Plantar (Hometrica s.d.) (FotoScan 3D s.d.) est une version limitée du 3D Foot Scanner. Il ne permet en effet que la modélisation 3D de la base du pied. Ce dispositif peut être utilisé dans le domaine médical ou industriel (voir Figure II-29).

Il est basé sur la stéréophotogrammétrie et nécessite moins d'une seconde pour l'acquisition d'un pied.

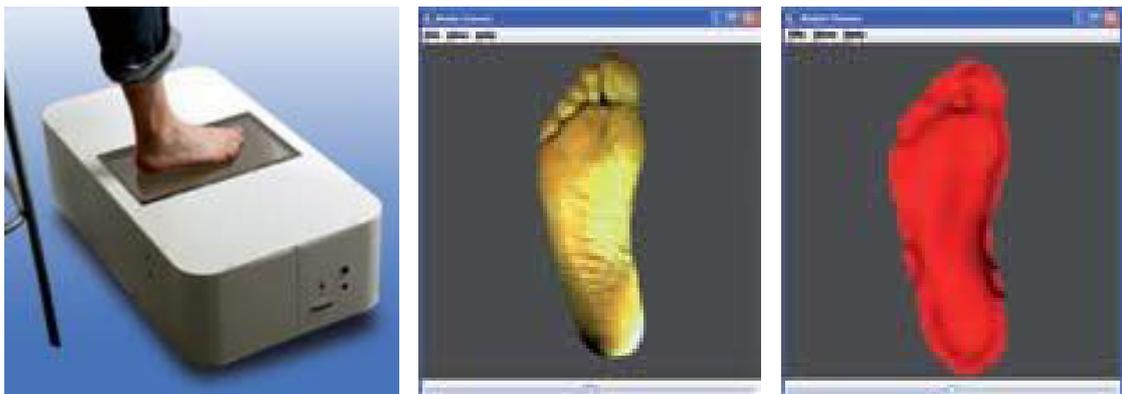


Figure II-29 Precision 3D Fotoscan Plantar (Hometrica s.d.) (FotoScan 3D s.d.)

II.3.19 Skin mapping 2

L'institut de traitement des images numériques autrichien de Joanneum Research a développé un prototype (voir Figure II-30) basé sur la vision stéréoscopique, utilisant deux caméras ou plus afin de modéliser la surface cutanée en 3D (Skin Mapping 2 s.d.).

L'originalité de ce système est la projection d'une lumière structurée représentant un motif aléatoire sur la surface à modéliser afin de faciliter la mise en correspondance pour la reconstruction 3D.



Figure II-30 Reconstruction 3D du tronc humain (Skin Mapping 2 s.d.)

Le patient est positionné sur tabouret rotatif, permettant ainsi la couverture de la totalité du tronc du corps. La mise en correspondance dense de différents clichés fournit un nuage de points plaqués d'une texture de la peau. Après fusion des résultats de plusieurs vues, une reconstruction texturée du tronc du patient est disponible sous forme d'un modèle de surface numérique (DSM) visualisé en 3D utilisant le langage VRML 2.0.

II.3.20 [TC]² NX-16



Figure II-31 [TC]² NX-16 (Hometrica s.d.) (tc2 s.d.)

Le système NX-16 de chez [TC]² (Hometrica s.d.) (tc2 s.d.) est un scanner 3D destiné à une application médicale sur la totalité du corps humain (voir Figure II-31). Basé sur la technologie de projection de franges blanches et équipé de 16 capteurs indépendants, il fait l'acquisition du corps humain en 360° en moins de six secondes, et permet d'effectuer des mesures 3D sur le modèle ainsi généré.

Sa taille ne dépasse pas la taille d'une cabine d'essayage, une pièce dédiée est nécessaire pour son installation.

II.3.21 InSpeck Mega Capturor II XLF



Figure II-32 InSpeck Mega Capturor II XLF (Hometrica s.d.) (Creaform s.d.)

Le système InSpeck Mega Capturor II XLF (Hometrica s.d.) (Creaform s.d.) est destiné à faire une acquisition 3D de l'ensemble du corps humain à 180° en une seule prise, ou à 360° en combinant 2 ou 4 positions. Il fait l'acquisition de 2 millions de points et une texture de 7,7 Méga pixels en moins d'une seconde (voir Figure II-32).

La particularité de ce système d'après le constructeur est la possibilité d'acquérir en 3D les cheveux, une petite résolution d'acquisition peut être à l'origine de cette innovation.

Cet appareil est basé sur la projection de franges blanches afin de permettre la numérisation 3D.

II.3.22 Cyberware Whole Body 3D Color Scanner – Model WBX/WB4

Le système Cyberware Whole Body 3D Scanner Model WBX/WB4 se base sur une technologie similaire au Head & Face 3D Scanner de la même compagnie. Il est destiné à modéliser en 3D le corps humain en entier pour des applications dites médicales, de jeux ou cinématographiques (voir Figure II-33). Un temps d'acquisition de 17 sec est nécessaire afin d'effectuer une modélisation complète.



Figure II-33 Cyberware Whole Body 3D Scanner – à gauche model WBX, à droite WB4 (Whole Body Color 3D Scanner s.d.)

II.4 Comparaison des systèmes d'acquisition 3D

Ci-dessous nous présentons un tableau comparatif (voir Tableau II-2) de différents critères des dispositifs d'acquisition 3D précédemment cités. Certains dispositifs font l'objet d'un travail de recherche actuel et aucune information d'ordre technique n'étant disponibles, ces dispositifs ne sont pas décrits dans le tableau.

	Technologie	Résolution capteur (Pixels)	Distance de travail (mm)	Temps acquisition (msec)	Dimension zone étudiée (mm)	Profondeur de champ (mm)	Résolution 3D (μm)
3D SKIN ANALYSER [®]	Projection de franges	728 x 512	Contact direct	<70	31,3 x 23,5	Non spécifié	Latéral : 4-8 en Z : 10
$\mu\text{kroTOP-zoom}$	Projection de franges	1380 x 1036	200	300 – 400 (en fonction du mode)	36 x 24	Non spécifié	Latéral : 12-24 en Z : <2
Quantificare LifeViz [™]	Séréoscopie	Non spécifié (résolution pixel: 20 μm x 20 μm)	Non spécifié	Instantané, égale à la vitesse d'obturation	52,5 x 37,5	Non spécifié (dépend de l'ouverture du diaphragme)	Latéral : 10 en Z : 8
Derma TOP-blue Objectif Macro	Projection de franges	1384 x 1036	210	300 – 400 (en fonction du mode)	20 x 15	6	Latéral : 8 en Z : 2
Derma TOP-blue Objectif Moyen	Projection de franges	1384 x 1036	210	300 – 400 (en fonction du mode)	40 x 30	20	Latéral : 15 en Z : 4
Derma TOP-blue Objectif Large	Projection de franges	1384 x 1036	210	300 – 400 (en fonction du mode)	80 x 60	40	Latéral : 30 en Z : 8
PRIMOS compact portable	Projection de franges	Non spécifié	Non spécifié	70	40 x 30	Non spécifié	Latéral : 63 en Z : ≥ 4

Tableau II-2 (suite) Dispositifs utilisés pour l'acquisition 3D de la surface cutanée.

	Technologie	Résolution capteur (Pixels)	Distance de travail (mm)	Temps acquisition (msec)	Dimension zone étudiée (mm)	Profondeur de champ (mm)	Résolution 3D (µm)
PRIMOS compact large field 90x70mm ²	Projection de franges	640 x 680	Non spécifié	70	90 x 70	Non spécifié	Latéral : 140 en Z : ≥9
PRIMOS compact high résolution	Projection de franges	1000 x 800	Non spécifié	70	24 x 15	Non spécifié	Latéral : 24 en Z : ≥2
PRIMOS compact large field 160x120mm ²	Projection de franges	640 x 680	Non spécifié	70	160 x 120	Non spécifié	Latéral : 250 en Z : ≥12
Primos body	Projection de franges	1200 x 1000	Non spécifié	140	300 x 300	Non spécifié	Latéral : 500 en Z : ≥30
faceSCAN III	Projection de franges	1384 x 1036	1000	800 – 3200 (en fonction du mode)	600 x 460	400	Latéral : 430 En Z : 200
faceSCAN II	Projection de franges	640 x 480	1000	900	600 x 460	340	Latéral : 300 en Z : 200
InSpeck Cyclops ³	Projection de franges	3,2 Mp	980 - 1100	600	680 x 510	400	Latéral : 700 en Z : 1100
InSpeck Gemini SF	Projection de franges	3,2 Mp	950 - 1100	600	460 x 340	450	Latéral : 400 en Z : 400

Tableau II-2 (suite) Dispositifs utilisés pour l'acquisition 3D de la surface cutanée.

	Technologie	Résolution capteur (Pixels)	Distance de travail (mm)	Temps acquisition (msec)	Dimension zone étudiée (mm)	Profondeur de champ (mm)	Résolution 3D (µm)
InSpeck Gemini MF	Projection de franges	3,2 Mp	900 - 1100	600	690 x 520	650	Latéral : 650 en Z : 600
	Technologie	Résolution capteur (Pixels)	Distance de travail (mm)	Temps acquisition (msec)	Dimension zone étudiée (mm)	Profondeur de champ (mm)	Résolution 3D (µm)
Cyberware Head & Face 3D Scanner – Model PX	Triangulation Laser	Non spécifié	350	17000	Visage entier	440	Latéral : 400 en Z : 50
Precision 3D Foto Scan 3D Foot Scanner	Stéréoscopie	Non spécifié	Contact direct avec la base du pied, la cheville est à une distance de 500mm du capteur latéral	4000	350 x 170	170	Latéral : 500 en Z : 500
Precision 3D Foto Scan Plantar	Stéréoscopie	Non spécifié	Contact direct avec la base du pied	1000	350 x 170	Non spécifié	Latéral : 500 en Z : 500
[TC] ² 3D Body Scanner	Projection de franges	Non spécifié (présence de 16 capteur à 4 niveaux)	Non spécifié	6000	1200 x 2100	600	Point : <1000 Circonférence : <3000
InSpeck Meaga Capturor II XLF	Projection de franges	7,7 Mp	1100 - 1500	600 - 1100	1700 x 1290	1000	Latéral : 1100 en Z : 1200

Tableau II-2 Dispositifs utilisés pour l'acquisition 3D de la surface cutanée.

II.5 Conclusion

Le relief cutané et sa texture constituent des données importantes en dermatologie et cosmétologie. Ils permettent de définir une pathologie donnée, de la suivre au cours de son évolution et de tester l'efficacité des produits cosmétiques actifs ayant une influence sur les propriétés physiques de la peau. Nous parlons de propriétés physiques car la plupart des produits cosmétiques n'ont qu'un effet optique (réflexion de la lumière et couleur) qui ne font que masquer ou de mettre en valeur une zone souhaitée. Nous nous intéressons dans ce travail de thèse qu'aux produits ayant des propriétés modificatrices du relief cutané.

Différentes techniques de modélisation 3D existent depuis longtemps, mais leur application en dermatologie et cosmétologie reste récente, car dans ces domaines, des contraintes méthodologiques et techniques comme l'absence de contact direct (mécanique ou à rayonnement de type laser) avec la peau et le temps d'acquisition In-Vivo sont importants. La précision du dispositif d'acquisition est une contrainte tout aussi importante car l'objectif est de modéliser des zones réduites de l'ordre d'un visage au sens large, et d'une ridule pour les systèmes les plus sophistiqués.

Nous avons présenté différents dispositifs qui se basent sur différentes techniques de modélisation 3D. Nous nous positionnons avec le projet **VirtualSkinLAB** dans la catégorie d'acquisitions 3D passive sans contact utilisant la stéréoscopie, qui est la méthode la mieux adaptée pour une application en dermato-cosmétologie. En effet, l'acquisition stéréoscopique présente différents avantages, tant du côté du temps d'acquisition, nécessaire dans les applications In-Vivo, que du côté de non invasif, indispensable dans des applications faisant appel à des volontaires sensibles, tant pour des raisons de sécurité (risque pour les yeux en cas d'utilisation d'un scanner laser) que d'efficacité (éviter de déformer la surface cutanée durant la phase d'acquisition).



Chapitre III.

La stéréoscopie

Résumé

Dans ce chapitre, nous présentons le principe de la vision stéréoscopique, puis un bref historique des appareils d'acquisition photographiques stéréoscopiques qui sont apparus quasiment à la même époque que la photographie. Nous présentons à la fin de ce chapitre les principales configurations d'assemblage de deux appareils photos pour la prise de vue stéréoscopique, ainsi que d'autres procédés utilisés pour le même but en utilisant qu'un seul appareil. Chaque configuration donnée étant adaptée à une application donnée. Le choix pour **VirtualSkinLAB** est documenté.

III.1 Introduction

La stéréoscopie regroupe toutes les techniques à but d'extraction d'informations relatives au relief à partir de deux images classiques ou plus. Elle se base initialement sur la perception cérébrale du relief à partir d'images fournies par les deux yeux (voir Figure III-1). En effet, le fait d'avoir deux angles de vues différents d'un même objet permet à notre cerveau d'estimer la profondeur.

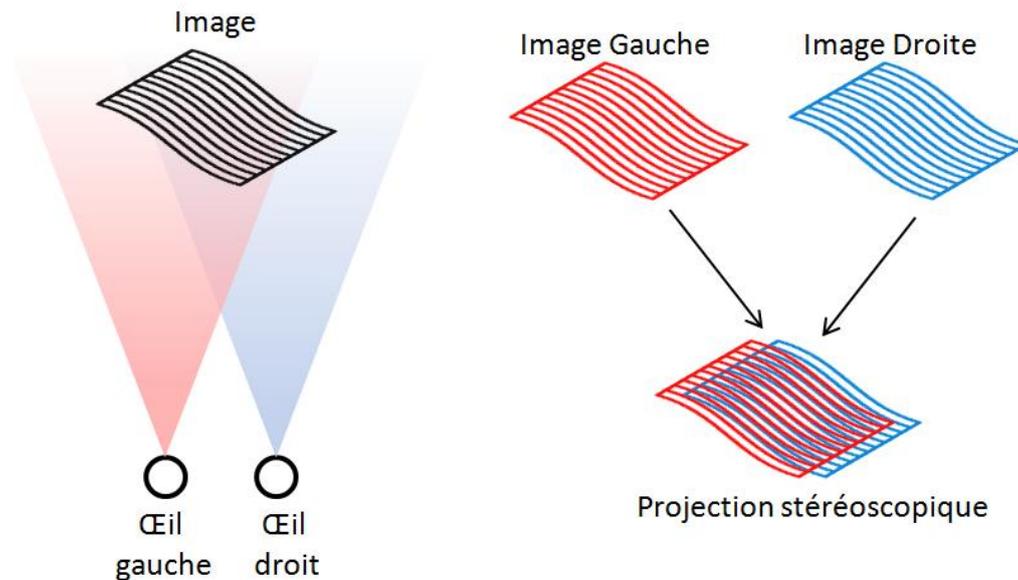


Figure III-1 Principe de la stéréoscopie (Vue stereo s.d.)

La stéréoscopie s'est considérablement développée dans le domaine de la robotique où une reconnaissance spatiale de l'environnement entourant le robot est nécessaire au déplacement. Les techniques et algorithmes développés pour la stéréoscopie, ont été repris dans différents systèmes (comme ceux présentés dans le chapitre précédent « Etat de l'art ») de modélisation 3D dans des domaines nécessitant la mesure du relief.

Nous présentons dans ce chapitre le principe de la vision stéréoscopique, un historique de quelques systèmes d'acquisition anciens ainsi que le principe du montage d'un système basé sur deux appareils photographiques.

III.2 Principe de la vision stéréoscopique

La stéréovision par ordinateur est la reproduction artificielle de la perception du relief naturellement présente chez l'homme. Elle permet d'ajouter une dimension supplémentaire à la vision classique, cette dimension est le relief. L'être humain utilise ses deux yeux pour apercevoir le relief, ce phénomène est dû à la présence de deux points de vue différents

représentés par les yeux, écartés par une distance donnée (4-6 cm en moyenne chez l'espèce humaine).

Les deux images ainsi fournies sont acquises avec des angles différents, le cerveau ensuite prend le relais en analysant les deux vues gauche et droite afin d'en synthétiser la perception spatiale. La projection rétinienne d'un point ou d'une forme ainsi observée a une position horizontale différente sur les deux images, cette différence sur l'axe des abscisses est appelée « Parallaxe » (voir Figure III-2). La vision stéréoscopique concerne que le champ de vision commun aux deux yeux.

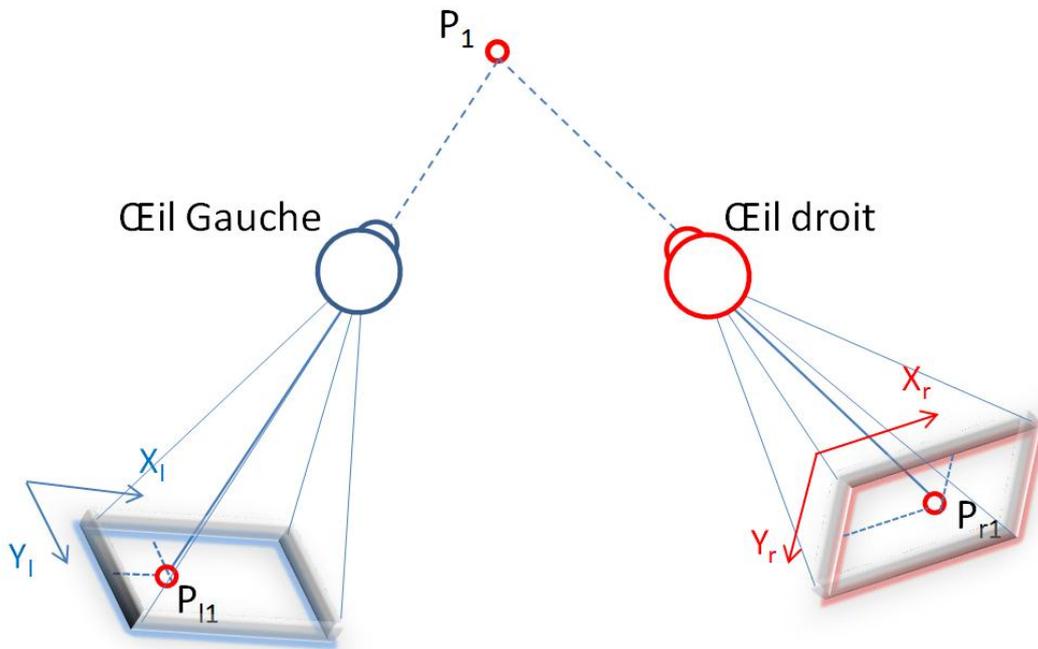


Figure III-2 Vision stéréoscopique. La parallaxe est la différence entre la valeur de X_l et X_r , elle fait partie des indices forts de profondeur

La parallaxe diminue en éloignant l'objet des yeux. Ceci donne au cerveau une distance approximative mais l'équation reliant la distance par rapport à la parallaxe n'est pas linéaire (pour une parallaxe P_1 et une distance D_1 par rapport aux caméras d'un point donné, une règle de trois est insuffisante afin de retrouver la distance D_2 d'un deuxième point ayant une parallaxe P_2). Ceci oblige à utiliser une méthode plus complexe afin de trouver la profondeur exacte d'un point dans l'espace. Le même phénomène est reproduit artificiellement en remplaçant les deux yeux par des caméras qui sont placées suivant une configuration adaptée à chaque utilisation. Une prise de vue très rapprochée nécessite une diminution de l'écartement entre les deux caméras et vice versa.

La visualisation des images stéréoscopiques nécessite la projection des deux images des deux différents points de vues chacune séparément sur l'œil correspondant, le but est de présenter à chacun de nos yeux un point de vue différents, l'image gauche pour l'œil gauche et l'image de droite pour l'œil droit.

III.3 Historique

Dans l'antiquité, les grecs se sont aperçus que la vision monoculaire pouvait être handicapante par rapport à la vision binoculaire. En effet, Galenus (129-179), et d'autres scientifiques grecs de l'antiquité, ont associé la perception du relief avec la vision binoculaire, mais ils n'ont jamais mentionné le fait que c'était difficile de passer un fil dans l'aiguille en fermant un œil (Fauster 2007). Léonard de Vinci quand à lui, dessinait déjà en 1484 des couples d'images stéréoscopiques demandant une certaine gymnastique oculaire afin de parvenir à une vision en relief.

La photographie classique (2D) a été officiellement inventée en 1839. Chose surprenante, l'image en relief est plus ancienne. En 1838, Wheatstone, membre de la société royale de Londres, met en place un dispositif basé sur des miroirs qui permet de restituer le relief. Ce dispositif est alors appelé «Stéréoscope» (voir Figure III-3).

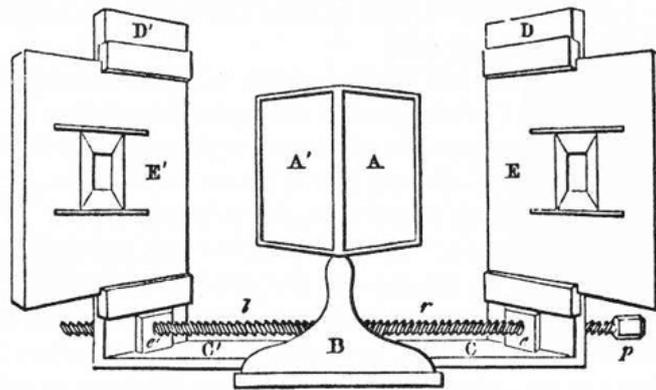


Figure III-3 Stéréoscope de Wheatstone (Wheatstone s.d.)

Les premières photographies stéréoscopiques ont été faites en utilisant un seul appareil photographique. Deux vues séparées étaient prises avec un petit écartement horizontal représentant la distance entre les yeux. Plus tard, deux caméras identiques ont été utilisées simultanément (voir Figure III-4) avant de voir apparaître des caméras stéréo et d'autres procédés de visualisation en relief plus modernes.



Figure III-4 Deux caméras utilisées pour la prise de vue en stéréoscopie « musée des sciences 1860 » (Musée des sciences s.d.)

La stéréoscopie se développe ensuite et atteint son âge d'or entre 1851 et 1880. Elle suit de près les évolutions de la photographie classique. A la fin du 19ème siècle, la photographie stéréoscopique se propage rapidement dans les milieux amateurs et professionnels. De grands spécialistes industriels comme Jules Richard, marqueront une période de plus de cinquante ans.

De nombreux modèles d'appareils stéréoscopiques voient le jour au début du 20ème siècle (Voir Figure III-5). La tendance se poursuit jusqu'aux années 50 où le succès de la photographie en relief diminue considérablement pour des raisons encore non connues.



Figure III-5 Anciens appareils photo stéréoscopiques (Musée des sciences s.d.)

Dans les années 80 et 90, des modèles utilisant les films argentiques était disponibles dans les magasins spécialisés (voir Figure III-6).



Figure III-6 FED Stereo 100 à gauche, et 3D RBT X4 à droite (Musée des sciences s.d.)

Le boum du numérique est arrivé vers le début des années 2000, les appareils photos argentiques n'était plus utilisés que rarement par des amateurs avertis. Malgré cela, la photographie stéréoscopique n'a pas suivi cette tendance, peu d'appareils stéréoscopiques numériques sont actuellement disponibles sur le marché. Le tout nouveau venu est le « FUJIFILM FinePix REAL 3D W1 » (voir Figure III-7) qui présente des caractéristiques assez intéressantes, en offrant une résolution de 10Mp en 3D.



Figure III-7 FUJIFILM FinePix REAL 3D W1 (FinePix Real 3D W1 s.d.)

III.4 Technologies d'acquisition d'images stéréoscopiques

Il existe différentes manières d'effectuer une acquisition photographique stéréo, le but final était d'avoir deux images d'un sujet à deux angles de vues différents, et en ayant comme modèle le positionnement des yeux afin d'avoir une visualisation en 3D confortable.

Chaque technique a ses propres avantages et inconvénients. Tout dépend des spécifications du domaine d'application, comme par exemple le temps d'acquisition pour des applications In-Vivo, la taille Macro ou Microscopique sur le sujet de l'étude.

Nous décrivons ci-dessous les principales possibilités permettant d'effectuer une acquisition photographique en couleur d'une image stéréoscopique. Elles sont divisées en deux catégories selon le type de déclenchement (simultané ou décalé).

III.4.1 Acquisition stéréoscopique avec un dispositif à déclenchement décalé

Cette catégorie regroupe tous les dispositifs requérant deux instants décalés d'un laps de temps pour faire l'acquisition des deux photographies. Ces techniques ne sont pas adaptées pour des mesures 3D in vivo, car le sujet photographié aura bougé entre les deux prises.

III.4.1.1 Translation/Rotation horizontale de l'appareil photographique

Le principe de cette technique est de déplacer l'appareil photographique après avoir fait une première prise de vue de quelques centimètres afin d'en prendre une deuxième (voir Figure III-8). Elle nécessite un support stable permettant d'avoir juste une translation horizontale stabilisée afin d'éviter un traitement logiciel de recalage par la suite.



Figure III-8 Principe du décalage entre les deux prises de vue. A droite une première prise de vue T_1 (vue de droite) et à gauche une deuxième prise de vue T_2 (vue de gauche) (Digital 3-D Cameras s.d.)



Figure III-9 Pocket Slidebar and Tripod (Digital 3-D Cameras s.d.)

Différents dispositifs existent sur le marché comme le « Pocket Slidebar and Tripod » (Digital 3-D Cameras s.d.) (Voir Figure III-9). Ces dispositifs sont principalement destinés aux photographes amateurs ou destinés à une utilisation sur des objets immobiles.

III.4.1.2 Translation du sujet (Microscope classique non in vivo)

Le principe de cette technique est quasiment identique au précédent mais au lieu de translater le dispositif d'acquisition, nous translatoons l'objet photographié. Elle est utilisée lorsque le dispositif d'acquisition n'est pas mobile ou difficile à translater en ligne droite. C'est le cas lors d'une prise de vue avec un microscope monoscopique avec une sortie adaptée pour le montage d'une caméra. Le microscope étant fixe, nous déplaçons alors la lamelle de l'échantillon en translation en deux temps afin de faire les deux prises de vue (voir Figure III-10).

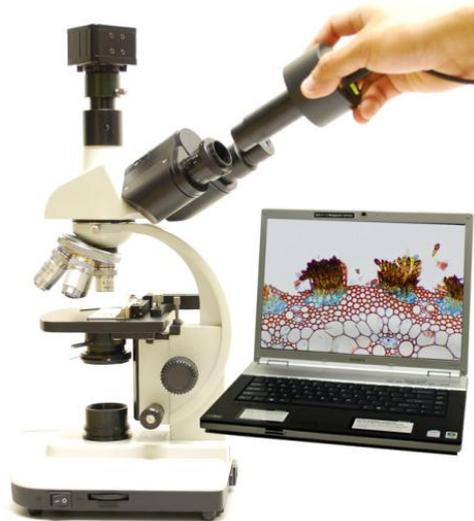


Figure III-10 EM-310M, caméra numérique de BigCatch destiné aux microscopes (USB Digital Cameras s.d.)

III.4.2 Acquisition stéréoscopique avec un dispositif simultané

Cette catégorie de dispositifs se base sur l'acquisition des vues gauche et droite simultanément. Nous pouvons utiliser un ou deux appareils photos, tout dépend du dispositif adopté.

III.4.2.1 Appareil photographique stéréoscopique dédié

De nombreux appareils photographiques dits « dédiés à la stéréoscopie » ont vu le jour peu après l'invention de la photographie (voir historique). A ce jour, peu d'appareils photographiques stéréo numériques existent, mais la tendance s'inverse et nous assistons à un boom de la stéréo numérique. Ci-dessous, le système 3D VuCamTM (3D VuCAM s.d.) de

« Stereovision Imaging, Inc » (voir Figure III-11) qui est un des pionniers à la course au numérique stéréo à côté du Fujifilm FinePix REAL 3D W1 (FinePix Real 3D W1 s.d.) précédemment cité.



Figure III-11 3D VuCam™ (3D VuCAM s.d.)

III.4.2.2 Montage de deux appareils photos côte à côte

Ce type de montage est particulièrement utilisé dans les applications dites de précision et professionnelles. Dans cette configuration, l'avantage essentiel est de pouvoir utiliser les meilleurs appareils photos existant sur le marché, sans forcément attendre la fabrication de dispositifs dédiés lesquels ne fourniront probablement pas une bonne qualité d'image avec une grande résolution optique dû au coût élevé de leur fabrication.



Figure III-12 Support CSC personnalisé pour deux caméras Sony DSC-V3 (CNC Milled Aluminium Mount s.d.)

Deux appareils de même type sont utilisés. Ils sont positionnés côte à côte horizontalement ou verticalement à l'aide d'un support (voir Figure III-12), selon leur forme, dans le but d'avoir un écartement minimal entre les objectifs des caméras.

Différents montages et supports sont disponibles sur le marché. Ils peuvent inclure ou non des appareils photos. Ci-dessous, le support CSC (CNC Milled Aluminium Mount s.d.) personnalisé pour deux caméras Sony DSC-V3 qui permet de fixer verticalement les deux caméras et en synchronisant leur déclenchement à l'aide d'un boîtier dédié.

III.4.2.3 Montage de deux appareils avec vitre semi-teintée

Cette configuration permet de réduire considérablement l'écartement entre les deux appareils photos, afin de prendre des photographies stéréoscopiques macro en pleine résolution (voir Figure III-13).

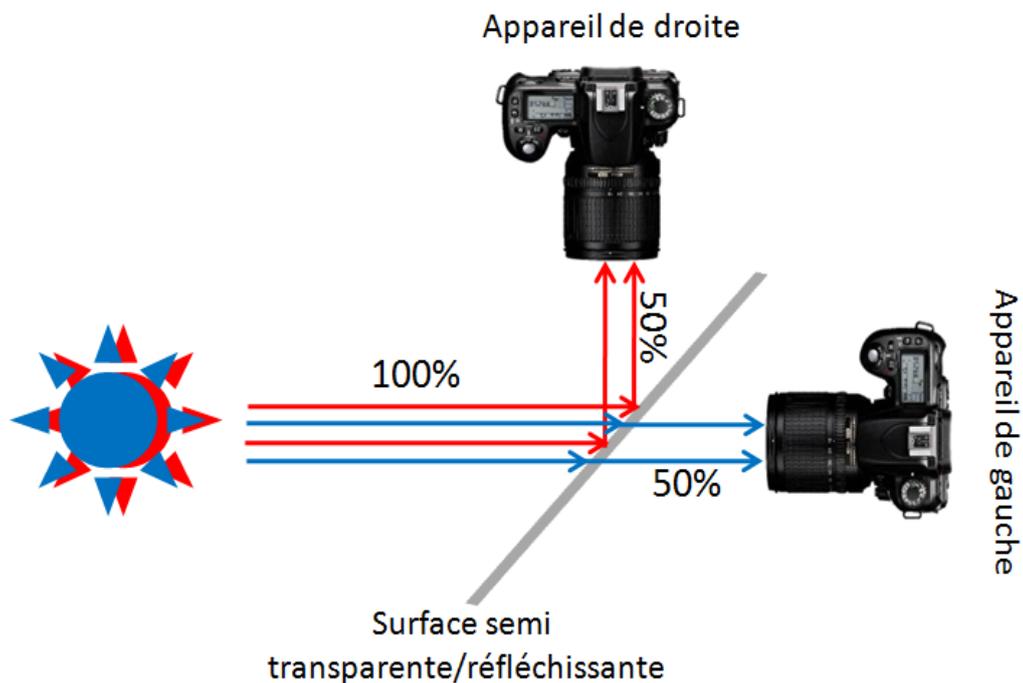


Figure III-13 Principe du montage de deux appareils photos avec vitre semi-teintée

Le principe, est de mettre une vitre semi-réfléchissante en diagonale entre les deux appareils de manière à laisser passer 50% de la lumière vers l'appareil de face, et 50% vers l'appareil supérieur en lumière réfléchiée (voir Figure III-14).



Figure III-14 P200 Macro (The 3D Advantage s.d.)

Cette méthode simule un rapprochement allant jusqu'à la superposition des objectifs de chaque appareil. La superposition est, bien sûr, un cas extrême qui n'est d'aucune utilité car dans ce cas les deux images seront identiques.

III.4.2.4 Montage de deux appareils photos sur un microscope stéréoscopique

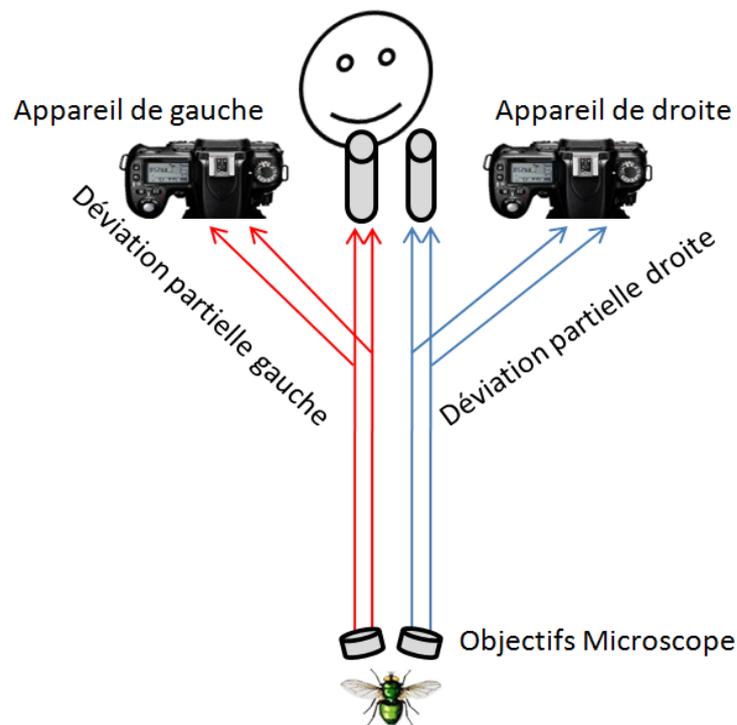


Figure III-15 Montage de deux appareils photos sur un microscope stéréoscopique

La configuration originale que nous avons testée est l'utilisation d'un microscope stéréoscopique, qui nous épargne toutes les contraintes liées aux objectifs photographiques et à l'écartement inter-caméras.



Figure III-16 Microscope stéréoscopique équipé de deux appareils photo Nikon D80 (dispositif testé dans la thèse en collaboration avec l'U930 de l'Inserm)

Nous utilisons dans ce cas le principe même d'un microscope stéréoscopique qui donne deux vues avec deux angles différents pour des surfaces de petites tailles (voir Figure III-15).

Les appareils photos dans ce cas jouent le rôle de capteurs photographiques. Ils sont fixés sur le microscope à l'aide de deux déviations optiques à monture adaptée (voir Figure III-16).

III.4.2.5 Les BeamSplitter



Figure III-17 Loreo Beam Splitter (Loreo s.d.)

Un « Beamsplitter » implique un système de miroir qui remplace l'objectif classique sur les appareils photos reflexes (voir Figure III-17). Le principe est le suivant, au lieu d'utiliser deux appareils photographiques positionnés côte à côte, nous utiliserons un seul appareil photographique qui recevra deux vues grâce au Beamsplitter.

La résolution est ainsi divisée par deux et au lieu d'avoir deux photographies séparées, gauche et droite, nous obtenons une seule photo contenant les deux vues (voir Figure III-8).

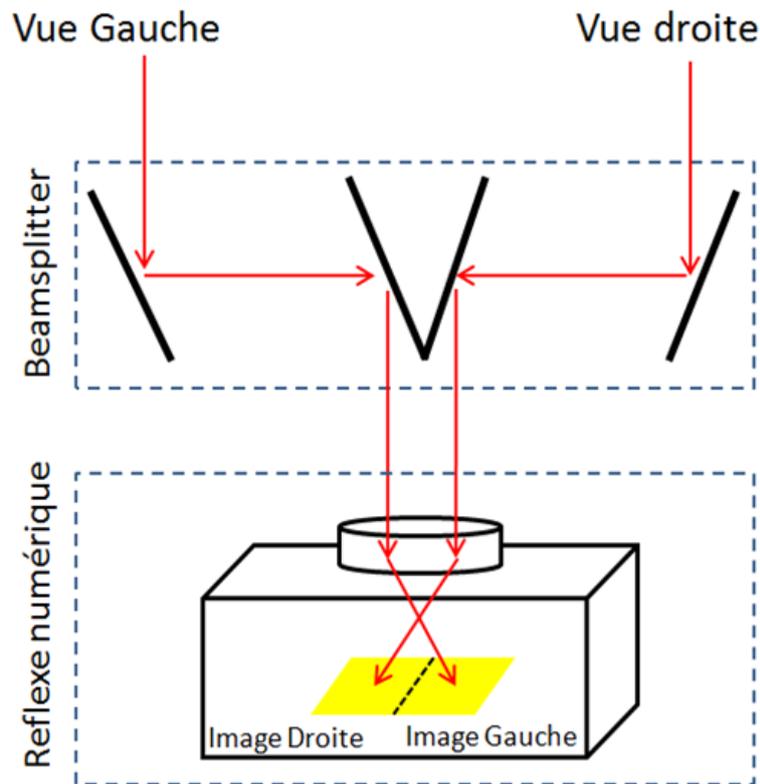


Figure III-18 Principe des Beam Splitter utilisant des miroirs

III.5 Conclusion

La photographie stéréoscopique est une technologie qui est apparue quasiment avec l'invention de la photographie. Les possibilités offertes actuellement en stéréophotogrammétrie se sont améliorées de façon considérable. En effet, le développement d'algorithmes de mise en correspondance, de triangulation et d'interface homme-machine ont fait de la stéréoscopie un outil de mesure et d'exploration 3D très efficace.

Nombreux sont les domaines qui ont adopté cette technique afin de réaliser des modélisations ou des calculs 3D. Parmi eux, le bâtiment, l'architecture, la robotique, la géographie, le spatial et bien d'autres domaines où la profondeur est une donnée essentielle.

Nous nous intéressons dans cette thèse au domaine biomédical, et en particulier à la dermatologie, qui nécessite un dispositif d'acquisition stéréoscopique adapté aux différentes contraintes liées à l'acquisition in-vivo.

De nombreux dispositifs d'acquisition stéréoscopiques existent sur le marché, mais ils restent généralement en phase de prototype ou de gadget de mauvaise qualité à cause du manque d'intérêt du grand public. Cependant, ces derniers temps, nous assistons au

commencement d'une nouvelle ère, car la stéréoscopie entre peu à peu dans nos habitudes, que ce soit grâce aux écrans 3D, aux jeux vidéo ou au cinéma avec comme exemple le très populaire « Avatar » de James Cameron, qui par sa lancée contribue à faire de la stéréoscopie une norme internationale du grand écran.

Chapitre IV.

Matériel photographique, assemblage, éclairage et calibration couleur

Résumé

Dans ce chapitre nous présentons le matériel photographique réalisé pour l'acquisition stéréoscopique. Les différents assemblages des systèmes d'acquisition réalisés seront décrits, ainsi que les contraintes et spécificités propres à chacun d'eux. Une partie de ce chapitre est consacrée à l'éclairage, car c'est un élément important en photographie et sur lequel nous nous basons afin d'analyser le relief cutané. La dernière partie de ce chapitre évoque la procédure de calibrage des couleurs afin de restituer au mieux les couleurs réelles, indépendamment de l'éclairage ou du matériel utilisé.

IV.1 Introduction

L'une des étapes les plus importantes pour l'analyse du relief cutané en utilisant des images stéréoscopiques de haute résolution, est l'acquisition photographique. La précision des calculs 3D et la mise en valeur des caractéristiques cutanées sur un écran permettant la visualisation stéréoscopique dépendent directement de la qualité des images acquises.

Notre contrainte principale durant cette phase est d'acquérir des images qui reflètent le plus fidèlement possible la réalité. En effet, deux appareils photos identiques sont utilisés, sur lesquels nous montrons deux objectifs identiques aussi, afin de garantir une qualité photographique homogène. Vient ensuite la partie calibrage des couleurs qui fidélise les couleurs tout au long de la chaîne graphique.

Une contrainte particulièrement cruciale est développée dans ce chapitre, qui concerne la synchronisation de déclenchement des deux appareils photographiques. Le but premier de l'utilisation des deux appareils photos est d'acquérir des photos stéréoscopiques instantanées. La synchronisation est d'autant plus importante lors de l'utilisation de flashes, qui sont des lumières instantanées. Nous expliquons la manière dont le problème de la synchronisation a été résolu en couplant notre système d'acquisition stéréo à des flashes.

IV.2 Contraintes liées au dispositif d'acquisition stéréo

Afin de permettre l'acquisition 3D du relief cutané, nous avons besoin de concevoir un dispositif d'acquisition adapté aux applications In-Vivo. Cela implique un temps d'acquisition très court, tout en évitant tout risque pour des zones sensibles (comme l'emploi de laser sur l'œil).

Nous avons opté pour une approche basée sur la stéréoscopie qui permet de satisfaire les contraintes précédemment évoquées. Nous nous sommes basés pour la conception de notre système d'acquisition sur le modèle de deux appareils photographiques montés parallèlement sur un support métallique (voir Figure IV-1). Différents types d'appareils photos avec différentes configurations géométriques (positionnement des appareils photos en rotation et translation) ont été testés.

Le support permet de maintenir les caméras fixes par rapport à une configuration de prise de vue définie. Grâce à ce système nous pouvons garder les appareils parallèles par rapport à leur axe de projection optique, et nous pouvons aussi prendre des photos croisées en mettant un angle vers l'axe passant entre les deux caméras.



Figure IV-1 Un premier support aluminium pour appareils photographiques

Le support permet aussi de garder une distance minimale entre les deux caméras suivant le modèle des appareils photos utilisé, l'écartement étant proportionnel à la distance de travail entre le sujet à photographier et les appareils photos (des photographies macros nécessitent un écartement minimal).

Afin de diminuer l'écartement entre les deux appareils photo nous pouvons jouer sur leur rotation et les mettre dos à dos de manière verticale (voir Figure IV-2). Si cela ne suffit pas, une position horizontale en cascade réduit considérablement l'écartement mais cela nécessite l'utilisation de distances focales différentes pour chaque appareil, l'appareil de gauche devrait avoir une distance focale supérieure à celui de droite.



Figure IV-2 Position en cascade de deux appareils photographiques

Le tableau suivant (voir Tableau IV-1) montre plusieurs configurations possibles testées sur un système d'acquisition basé sur des appareils photographiques de type Canon. Ces configurations sont applicables sur des boîtiers de type Reflex, Bridge ou Compact.

Configuration				
Ecartement	99mm	78mm	54,4mm	53,4mm

Tableau IV-1 Différents positionnements de deux appareils Canon Ixus Digital Wireless et écartements obtenus

Nous avons deux contraintes principales qui sont l'écartement et la distance de travail : nous cherchons à minimiser à la fois l'écartement entre les appareils photos et la distance de travail entre les appareils et le sujet à photographier. L'intérêt de diminuer au maximum l'écartement entre les deux axes verticaux des appareils photo est de maximiser le champ de vision commun entre eux (voir Figure IV-3), puisque nous nous basons sur une configuration parallèle de prise de vue. Plus les appareils sont écartés et plus la partie commune est étroite.

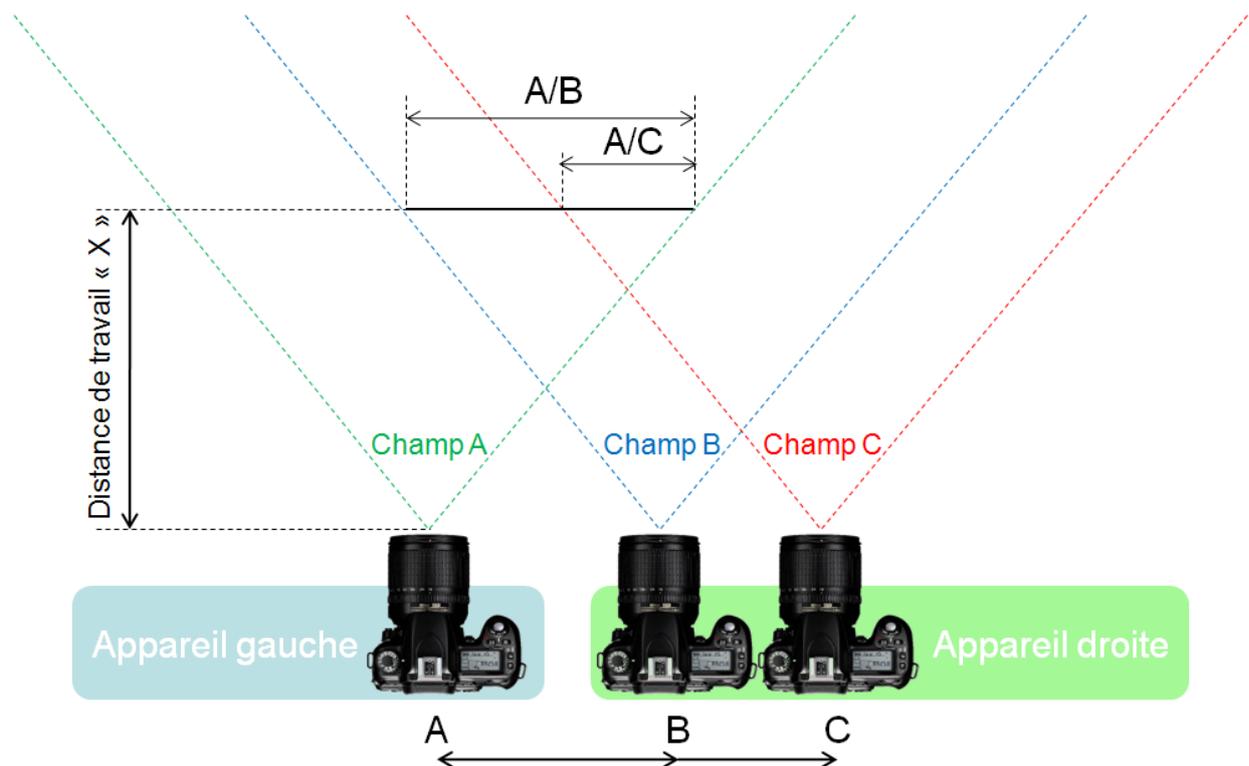


Figure IV-3 Taille de la zone commune à une distance de travail X par rapport à l'écartement des 2 appareils. Plus l'écartement est petit A/B et plus la zone commune est grande

La distance de travail (voir Figure IV-4), quand à elle dépend de la taille de la zone d'intérêt et du champ de vision commun entre les deux appareils. C'est à dire que plus la

zone d'intérêt est petite, plus nous pouvons nous permettre de se rapprocher d'elle car elle apparaîtra dans les champs de vision communs.

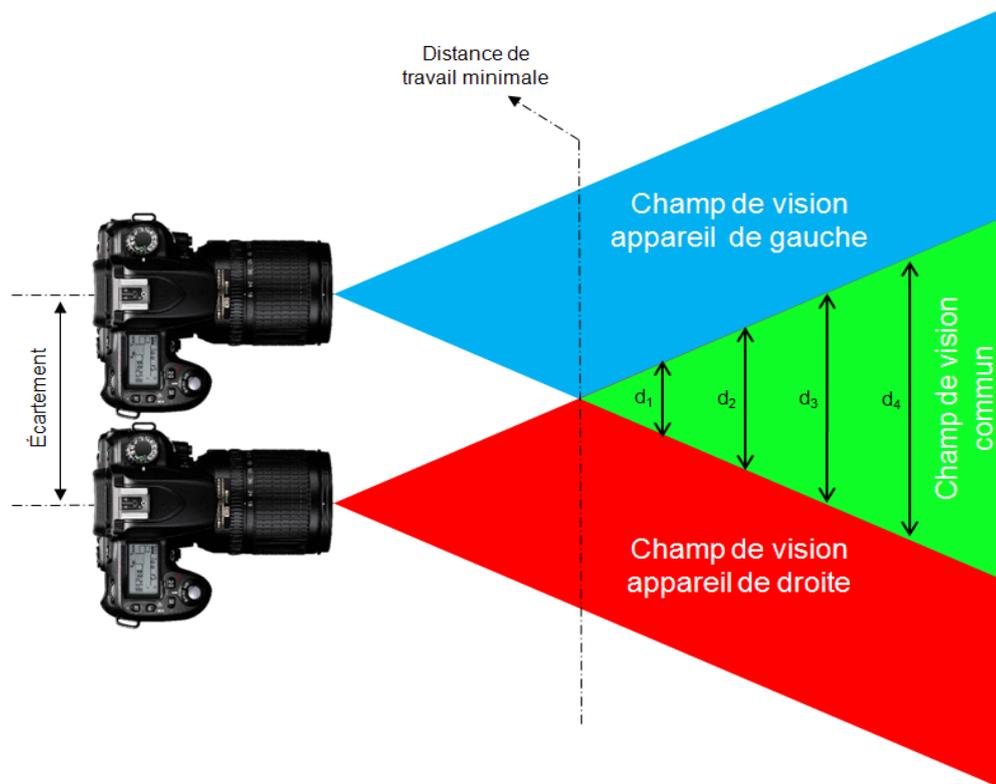


Figure IV-4 Distance d'un sujet de taille d_i par rapport aux appareils photographiques dans le champ de vision commun

La prise de vue étant optique, elle dépend complètement de la qualité d'éclairage. C'est pour cela que nous avons adapté pour chaque configuration d'un système d'éclairage propre qui permet de maximiser la netteté et la qualité de la photo prise. Certaines prises de vue comme celles d'un visage de face nécessitent d'avoir plusieurs sources d'éclairage synchronisées positionnées de manière symétrique afin d'éliminer les ombres causées par le nez.

La fidélité des couleurs d'une photographie dépend du matériel d'acquisition et de restitution. En effet, les écrans, les vidéo projecteurs et les appareils photos n'interprètent pas les couleurs de la même manière. Une couleur pourra donc varier d'un écran à un autre dans l'espace colorimétrique propre à chaque dispositif. C'est pour cela que nous avons défini un protocole de calibrage couleur pour toute la chaîne graphique, des appareils photo à l'imprimante en passant par les écrans et les vidéo projecteurs afin de conserver le plus possible les couleurs d'origine.

Afin d'extraire des données sur le relief à partir de nos photographies stéréoscopiques, il faut d'abord mettre en correspondance les pixels présents sur les 2 images. Cela revient en

quelque sorte à retrouver les correspondants des pixels de l'image gauche dans celle de droite. Nous utilisons pour cela des algorithmes de mise en correspondance qui compare le facteur de corrélation entre le voisinage du pixel d'origine (x_1, y_1) de l'image gauche et les voisinages des candidats de l'image de droite positionnés sur une droite $f(x)=y_1$.

Nous pouvons calculer la position des points réels dans l'espace à partir de leur projection sur les deux photographies, gauche et droite. Après avoir mis en correspondance la projection du point sur l'image gauche et droite, nous traçons deux droites passant par les points focaux respectifs des deux caméras en passant par la position des pixels projetés sur les deux images respectives. L'intersection de ces deux droites donne la position dans l'espace du point d'origine.

IV.3 Systèmes d'acquisition

Nous avons utilisé au cours de notre projet différents types de matériels d'acquisition photographique. Chaque appareil utilisé présentant des caractéristiques différentes adaptées aux différentes applications. Ces caractéristiques sont les suivantes :

Dimensions de l'appareil : Les dimensions d'un appareil permettent de définir la configuration adéquate à laquelle il pourra être positionné sur le support. Le but principal est de minimiser l'écartement entre les centres des deux appareils utilisés (voir Tab.1)

Résolution du capteur : La résolution du capteur définit le nombre de pixels total que contiendra la photo prise. Elle est exprimée généralement sous forme d'une multiplication du nombre de pixels horizontaux fois le nombre de pixels verticaux (ex. une image de résolution 5616x3744 est prise avec un appareil de 21,5Mp)

Taille du capteur : La taille du capteur est souvent négligée face à sa résolution. La technologie actuelle permet de réduire au maximum la taille d'un capteur photographique. Il existe des capteurs de 10Mp au format 23,5 x15,7 mm comme pour le reflexe numérique Pentax k-m, et d'autre ayant la même résolution au format 6,16 x 4,62 mm, comme pour le compact numérique Olympus X-20. Cette différence de taille se démarque par une meilleure qualité de photo et d'un bruit numérique réduit par rapport au capteur compact.

Déclenchement à distance : L'une des problématiques les plus importantes de notre système d'acquisition est le déclenchement simultané des appareils photos. Nous pouvons nous permettre un léger décalage en utilisant de la lumière continue mais quand il s'agit de flash la simultanéité devient primordiale. Différents moyens de déclenchement existent. Nous pouvons utiliser une télécommande sans fil fournie par certains constructeurs, combiner deux

télécommandes filaires ou bien utiliser une connexion USB en commandant les appareils photos grâce à une application dédiée.

IV.3.1 Systèmes d'acquisition basés sur des Reflex numériques

Les appareils reflexe numériques se distinguent des compacts et des bridges par les points suivants. Ils fournissent des images de qualité grâce à leur capteur de grande dimension, un bruit numérique réduit et une vitesse de déclenchement nettement plus rapide. Ils ont la particularité d'avoir un objectif interchangeable offrant ainsi la possibilité de choisir l'objectif le plus adapté parmi la multitude d'objectifs présents sur le marché.

IV.3.1.1 Boîtiers photographiques

Nous avons utilisé trois marques de reflexes combinés avec différents objectifs (voir Tableau IV-2). Chaque boîtier présente des caractéristiques différentes lui permettant d'être plus ou moins adapté à une application donnée.

Boîtier Reflexe	Caractéristiques du boîtier	Assemblage stéréo
<p data-bbox="288 1099 424 1128">Nikon D80</p> 	<p data-bbox="603 1099 844 1128">Type capteur : CCD</p> <p data-bbox="564 1160 882 1227">Taille capteur : 23,6 x 15,8 mm (10.2 Mp)</p> <p data-bbox="552 1252 895 1319">Résolution Max : 3872x2592 pixels</p> <p data-bbox="557 1346 890 1375">Obturbateur : 30 à 1/4000 sec</p> <p data-bbox="632 1402 815 1431">ISO : 100/3200</p> <p data-bbox="568 1464 879 1532">Dimensions : 103x132x77 mm</p> <p data-bbox="592 1559 855 1626">Contrôle Caméra : via télécommande</p>	 <p data-bbox="967 1603 1402 1686">Montage : Appareils parallèles posés verticalement</p> <p data-bbox="970 1736 1399 1818">Objectifs utilisés : Nikkor AF-S DX 18-135 mm</p>

Tableau IV-2 (suite) Boîtiers reflexes numériques utilisés et leurs caractéristiques

<p>Pentax K10D</p> 	<p>Type capteur : CCD</p> <p>Taille capteur : 23,5 x 15,7 mm (10,2 Mp)</p> <p>Résolution Max : 3872x2592 pixels</p> <p>Obturbateur : 30 à 1/4000 sec</p> <p>ISO : 100/1600</p> <p>Dimensions : 142 x 101 x 70 mm</p> <p>Contrôle Caméra : via logiciel « Pentax Remote Assistant »</p>	 <p>Montage : Appareils parallèles posés verticalement</p> <p>Objectifs utilisés : Pentax D-FA 50mm f/2,8 Macro</p>
<p>Canon EOS 1Ds Mark III</p> 	<p>Type capteur : CMOS</p> <p>Taille capteur : 24 x 36 mm (21,1Mp)</p> <p>Résolution Max : 5 616 x 3 744 pixels</p> <p>Obturbateur : 30 à 1/8000 sec</p> <p>ISO : 100/1600</p> <p>Dimensions : 156 x 159,6 x 79,9 mm</p> <p>Contrôle Caméra : via logiciel développé sur la base du SDK Canon</p>	 <p>Montage : Appareils parallèles posés horizontalement</p> <p>Objectifs utilisés : Canon EF 24-70mm f/2,8L USM</p>

Tableau IV-2 Boîtiers reflexes numériques utilisés et leurs caractéristiques

IV.3.1.2 Objectifs photographiques

Pour chaque type de boîtier Reflex toute une panoplie d'objectifs photographiques est proposée par les constructeurs. Chaque objectif présente des caractéristiques spécifiques, comme le champ de vision, la distance de travail ou la plage focale. Le choix de l'objectif le plus adapté pour une utilisation spécifique doit obligatoirement prendre en considération ces caractéristiques. Nous définissons ci-dessous les différents objectifs qui ont été utilisés et leurs applications.

▪ Nikkor AF-S DX 18-135 mm

Montés sur les appareils Nikon D80, ils ont fait l'objet des premiers tests de prise de vue de photographies stéréoscopiques (voir Tableau IV-3). Ils ont été rapidement écartés car les distorsions sont importantes sur les objectifs à très grands angles et à grande plage focale.

Objectif	Caractéristiques
<p>Nikkor AF-S DX 18-135 mm</p> 	<p>Plage focale : 18-135 mm Ouverture minimale : f/22-38 Construction optique : 15 lentilles en 13 groupes Angle de champ : 76° - 12° Distance Minimale de mise au point : 45 cm</p>

Tableau IV-3 Caractéristiques des objectif Nikkor AF-S DX 18-135 mm

▪ Pentax D-FA 50mm f/2,8 Macro

Montés sur les appareils Pentax K10D, ces objectifs sont idéaux pour le système basé sur les appareils Pentax (voir Tableau IV-4). En effet, ils fournissent une excellente qualité d'image en minimisant les distorsions optiques. Ce sont des objectifs à focale fixe macro, adaptés aux prises de portrait.

Objectif	Caractéristiques
<p>Pentax D-FA 50mm f/2,8 Macro</p> 	<p>Plage focale : 50 mm Ouverture minimale : f/32 Construction optique : 8 lentilles en 7 groupes Angle de champ : 47° Distance Minimale de mise au point : 19,5 cm</p>

Tableau IV-4 Caractéristiques des objectif Pentax D-FA 50mm f/2,8 Macro

▪ Pentax DA 18-55 mm f/3,5-5,6 AL

Montés sur les appareils Pentax K10D, ils ont été eux aussi rapidement écartés car les distorsions sont importantes sur les objectifs très grands angles et à grande plage focale (voir Tableau IV-5).

Objectif	Caractéristiques
<p>Pentax DA 18-55 mm f/3,5-5,6 AL</p> 	<p>Plage focale : 18 - 55 mm Ouverture minimale : f/22-32 Construction optique : 12 lentilles en 9 groupes Angle de champ : 76° - 29° Distance Minimale de mise au point : 25 cm</p>

Tableau IV-5 Caractéristiques des objectif Pentax DA 18-55 mm f/3,5-5,6 AL

▪ Canon 50mm Macro

Montés sur les appareils Canon EOS 1Ds Mark III, ils présentent une excellente solution pour la prise de portrait de grande qualité (voir Tableau IV-6). A cause de dimensions imposantes des boîtiers Canon EOS 1Ds Mark III, la seule configuration de prise de vue stéréoscopique possible doit être en cascade, ce qui oblige à utiliser des objectifs à Zoom afin de compenser le retrait de l'un des appareils.

Objectif	Caractéristiques
<p>Canon 50mm Macro</p> 	<p>Plage focale : 50 mm Ouverture minimale : f/32 Construction optique : 9 lentilles en 8 groupes Angle de champ : 40° Distance Minimale de mise au point : 23cm</p>

Tableau IV-6 Caractéristiques des objectif Canon 50mm Macro

▪ Canon EF 24-70mm f/2.8L USM

Objectif	Caractéristiques
<p>Canon EF 24-70mm f/2.8L USM</p> 	<p>Plage focale : 24-70 mm Ouverture minimale : f/22 Construction optique : 16 lentilles en 13 groupes Angle de champ : 84°-34° Distance Minimale de mise au point : 38 cm</p>

Tableau IV-7 Caractéristiques des objectif Canon EF 24-70mm f/2.8L USM

Montés sur les appareils Canon EOS 1Ds Mark III, ces objectifs sont idéaux pour ce système de prise de vue (voir Tableau IV-7). Ce sont les objectifs qui ont des plages focales faibles (27-70 mm) et qui sont équipés de lentilles externes asphériques leur permettant de diminuer au maximum les distorsions optiques. La plage focale réduite permet de compenser le retrait d'un des appareils par rapport à l'autre car ils sont montés en cascade.

▪ Beamsplitter

Ces objectifs sont très pratiques et très faciles à mettre en place. Il suffit d'être équipé d'un appareil photo reflexe et d'un objectif spécial comme ceux de chez Loreo (Loreo s.d.) (Voir Tableau IV-8). Cet objectif offre une certaine liberté de mouvement et une flexibilité de prise de vue qui manque aux autres systèmes de prise de vue stéréoscopiques.

Model Beamsplitter	Caractéristiques
<p>Loreo 3D Lens in a Cap Digital (Loreo s.d.)</p> 	<p>Plage focale : 38 mm (équivalent 60mm) Diaphragme : f/11 et f/22 Construction optique : miroirs, vue parallèle Mise au point : 105, 300, ∞ cm par levier Base (écartement): 65 mm Modèles pour reflexes : Canon, Pentax et Nikon</p>

Tableau IV-8 (suite)Caractéristiques Beam Splitter de marque Loreo (Loreo s.d.)

<p>Loreo 3D Macro Lens in a Cap Digital (Loreo s.d.)</p> 	<p>Plage focale : 38 mm (équivalent 60mm)</p> <p>Diaphragme : f/11, f/16 et f/22</p> <p>Construction optique : miroirs, vue parallèle</p> <p>Distance Minimale de mise au point : 23 à 85 cm par bague</p> <p>Base (écartement): 20 mm</p> <p>Modèles pour reflexes : Canon, Pentax et Nikon</p>
--	--

Tableau IV-8 Caractéristiques Beam Splitter de marque Loreo (Loreo s.d.)

La qualité des photos obtenues est cependant médiocre, et nous espérons que ce genre d'objectifs s'améliorera et aboutira à une version professionnelle.

IV.3.2 Caméras industrielles

IV.3.2.1 Boîtier

Les caméras destinées à la vision industrielle sont généralement utilisées pour le contrôle de la production à haute cadence. Elles sont aussi utilisées pour gérer des flux d'objets comme le tri de pomme de terre ou la lecture d'adresses postale. Une autre application des caméras industrielles est le guidage pour des systèmes mobiles comme les robots.

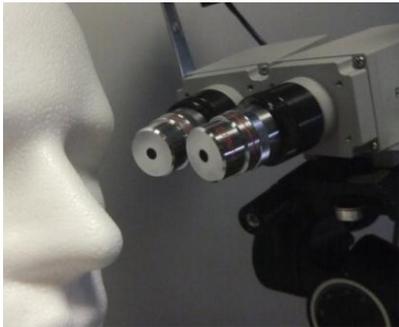
Caméra Industrielle	Caractéristiques	Assemblage stéréo
<p>Pixelink PL-B782U</p> 	<p>Type capteur : CMOS</p> <p>Taille capteur : 10,5x7,73mm (6,6Mp)</p> <p>Résolution Max : 3000 x 2208 pixels</p> <p>Obturbateur : 2 à 1/15873 sec</p> <p>Dimensions : 50x41x102 mm</p> <p>Contrôle Caméra : via logiciel « Pixelink Capture OEM »</p> <p>Monture Objectif : Monture-C</p>	 <p>Montage : Appareils parallèles posés horizontalement</p> <p>Objectifs utilisés : Objectif microscopiques DIN x4</p>

Tableau IV-9 Caractéristiques caméra industrielle Pixelink PL-B782U

Nous avons utilisé deux caméras Pixelink PL-B782U (voir Tableau IV-9) couleur à 6,6 Mp de résolution, qui présentent l'avantage d'avoir des dimensions leur permettant de se coller littéralement l'un à l'autre et diminuer considérablement l'écartement entre les deux appareils.

IV.3.3 Microscope stéréoscopique

L'objectif initial de notre projet est d'utiliser le principe de la stéréovision dans le domaine de la cosmétique et de la dermatologie. Certaines mesures de pathologies ou de ridules sont très difficiles en utilisant des systèmes de prises de vue classiques, car le grossissement de l'image n'est pas assez grand pour les distinguer.



Figure IV-5 Microscope stéréoscopique

La solution idéale pour cette problématique est d'utiliser un microscope stéréoscopique couplé avec un système d'acquisition de type appareil photographique Reflexe numérique compatible avec la monture du microscope. Chaque boîtier d'appareil photographique est fixé sur un bras optique qui dévie une partie de la lumière de la vue gauche ou droite (voir Figure IV-5), le microscope joue ainsi le rôle de l'objectif optique.

Certains microscopes stéréoscopiques ont une particularité par rapport aux objectifs classiques. Les objectifs classiques se basent généralement sur le modèle Sténopé (Pinhole en anglais), tous les rayons de lumière captés convergent vers un seul point qui est le point focal (voir en bas de la Figure IV-6). Dans la littérature, nous représentons le point focal derrière le CCD afin d'en simplifier le principe, mais dans la réalité il se trouve sur la lentille supérieure de l'objectif comme représentée dans la figure ci-dessus. Dans les deux représentations la définition de la distance focale reste la même, c'est la distance entre le capteur et le point focal.

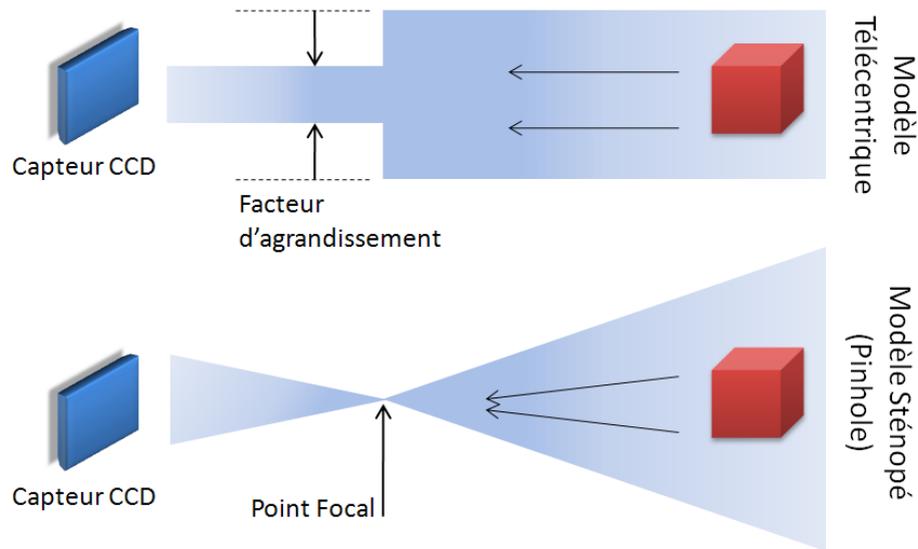


Figure IV-6 Modèle sténopé en bas et télécentrique en haut

Les optiques se basant sur le modèle télécentrique, comme certains microscopes stéréoscopiques ou des objectifs spécifiques destinés à la mesure 2D dans l'industrie, ne possèdent pas de point focal. La lumière pour ainsi dire ne converge pas vers un point, mais reste parallèle en appliquant un facteur d'agrandissement (voir en haut de la Figure IV-6). Ce facteur d'agrandissement remplace la distance focale durant le processus de calibration géométrique du système d'acquisition. La particularité optique du modèle télécentrique est la disparition de l'effet de perspective, puisque la lumière reste parallèle, un objet garde la même taille en dépit de son éloignement de l'objectif ou du microscope.

IV.4 Système d'éclairage

L'éclairage est un élément important lors d'une prise de vue, que ce soit une prise de vue classique ou stéréoscopique. Plus l'éclairage est adapté à la scène ou au sujet à photographier et plus le traitement et l'analyse seront simples. En effet, un mauvais éclairage entraîne des reflets et des ombres qui dégradent considérablement l'image.

Les spécificités des sources lumineuses composant un système d'éclairage (longueur d'onde, direction, distribution spatiale) sont déterminées en fonction de la surface à photographier (structure, transparence, couleur ...) ainsi que les spécificités du système d'acquisition (qualité de l'objectif, diaphragme, sensibilité du capteur photographique (ISO), obturateur ...).

L'éclairage d'une scène donnée doit avoir les spécificités suivantes :

- **luminance stable** : intensité de la source lumineuse non variante (la variation de l'intensité lumineuse peut être provoquée soit par la variation de l'intensité du courant électrique soit par la qualité du matériel d'éclairage) ;
- **chrominance stable** : couleur de la source lumineuse non variante (dans le cas des éclairages tungstènes, la variation de la couleur de la source lumineuse peut être provoquée par la température de la lampe. Plus nous laissons une lampe tungstène allumée, plus elle chauffe, cela induit une légère variation de la chrominance, du rouge en jaune clair selon la température.) ;
- **homogène** sur la partie à l'étude.

Il existe plusieurs types de sources lumineuses (Denis s.d.) :

- *éclairage incandescent* : économique, c'est une lumière chaude dont la température de couleur change en fonction de la tension électrique.
- *éclairage fluorescent* : généralement utilisé comme éclairage diffus, c'est une lumière froide.
- *éclairage halogène* : ces lampes sont généralement utilisées comme sources lumineuses pour les fibres optiques.
- *lampes à arc* : utilisant un arc électrique, elles sont disponibles en plusieurs couleurs.
- *lampes à décharge* : utilisant l'un des différents gaz suivants (néon, mercure, sodium, xénon,...) la chrominance dépend directement du gaz utilisé.
- *diodes électroluminescentes* : lumière monochromatique, généralement utilisées pour des éclairages stroboscopiques. Elles sont souvent arrangées en matrices ou en anneaux ou associées à des fibres optiques.
- *éclairage laser* : lumière monochromatique, elle doit être associée à un système de balayage car ne pouvant que projeter des lignes ou points. elle sert surtout à l'acquisition 3D.
- *éclairage stroboscopique* : utilisé pour les scènes à mouvements rapides. Il lâche une lumière importante pendant un temps très bref (5 à 500 μ s).
- *éclairage par flash* : permet d'obtenir une profondeur de champ importante, car sa puissance permet de diminuer l'ouverture du diaphragme (plus l'ouverture de diaphragme est grande, plus elle laisse passer de la lumière mais la profondeur de champ est petite et vice versa).

Plusieurs configurations d'éclairage existent (voir Figure IV-7). Chaque situation impliquant l'adaptation de l'une ou l'association de plusieurs des configurations de base suivantes (Denis s.d.).

- éclairage direct : utilisé pour capturer la surface de l'objet à photographier ;
- éclairage en transmission (ombres chinoises) : utilisé pour capturer la silhouette sans donner d'importance à la surface ;
- incidence normale (champ clair) : réalisée à l'aide d'un miroir semi-transparent. La fraction de la lumière réfléchiée directement vers la caméra va former l'image. Ainsi, les surfaces perpendiculaires à l'axe optique sont claires, les autres sombres. Les objets sont donc généralement sombres sur un fond clair;

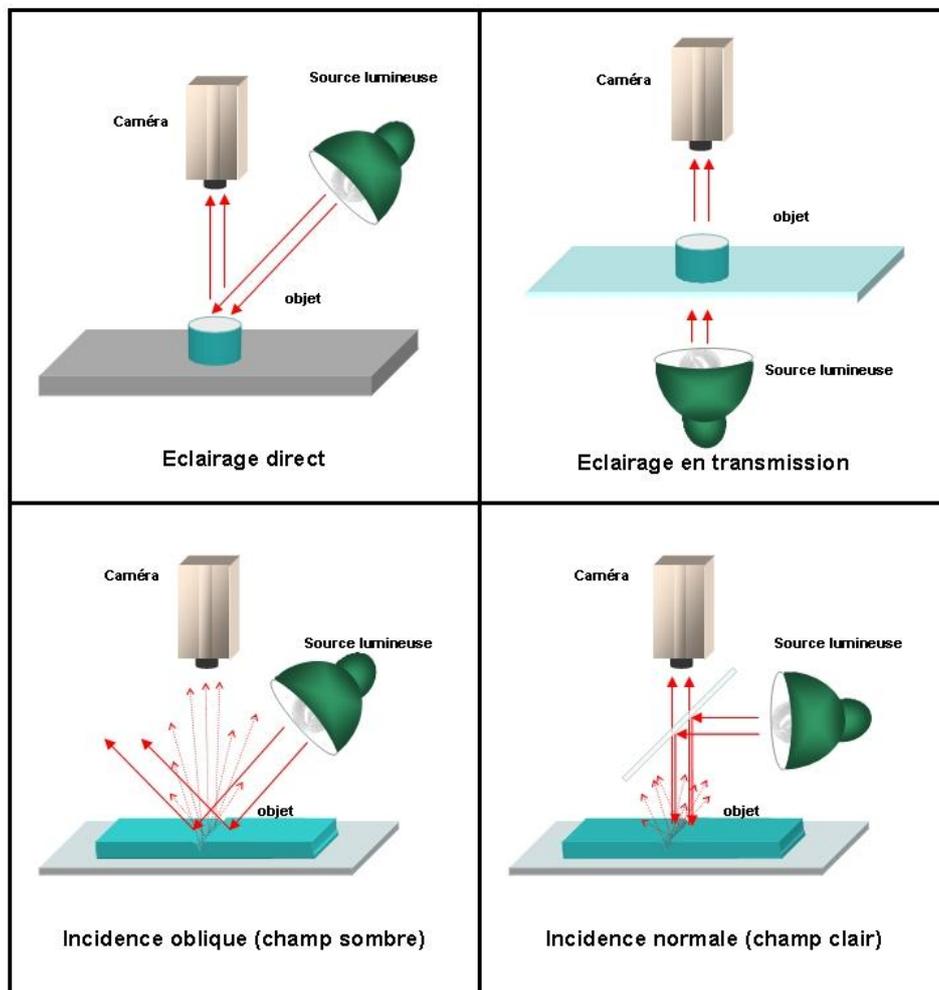


Figure IV-7 Types d'éclairages (Denis s.d.)

- incidence oblique ou rasante (champ sombre) : seule la lumière diffusée est captée par la caméra : Les objets apparaissent clairs sur un fond sombre. L'inconvénient est la présence de reflets et d'ombres. Cet éclairage est utile pour

visualiser des rayures ou pour observer les objets translucides et donne un contraste important pour les structures internes et les reliefs de surface.

IV.5 Eclairage adapté à la stéréoscopie

IV.5.1 Problématique de la source lumineuse

Comme vue précédemment plusieurs, types de sources lumineuses existent. Avant d'aboutir à notre système final basé sur des flashes, nous avons testé plusieurs types d'éclairages. D'abord nous avons utilisé de la lumière continue chaude qui s'est révélé efficace mais pas assez pénétrante et trop diffuse pour notre application qui est liée à la peau (voir Figure VI-8).

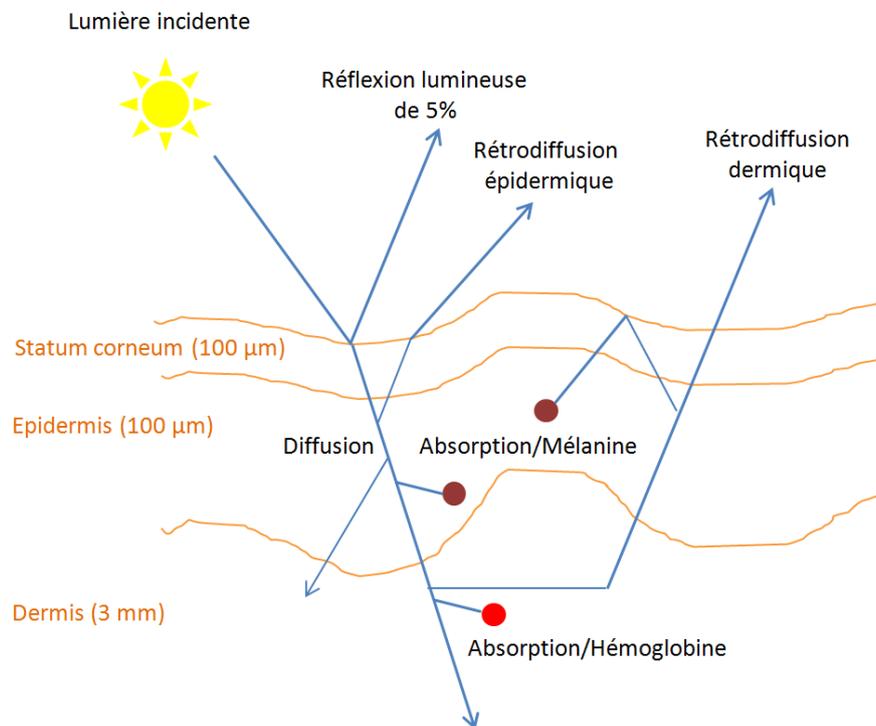


Figure IV-8 Différentes voies optiques dans la peau (Masuda, Hirao et Takahashi 2009)

Nous avons essayé ensuite de combiner cette source lumineuse qui est la lumière continue chaude avec des flashes. Cette configuration était intéressante car la lumière des flashes est très pénétrante par rapport à la lumière continue, elle sert à marquer le relief en mettant un angle de projection afin de donner une proportion rasante à la lumière. Les torches de lumière continue servent plutôt à éliminer les ombres en émettant de la lumière diffuse.

Mais cette solution s'est avéré perturbante lors du calibrage des couleurs, le mélange de la lumière chaude et froide n'étant pas conseillé pour ce genre d'application.

Pour le système de prise de vue basé sur les appareils reflex numériques Canon ou Pentax une solution d'éclairage basée sur des flashes a été finalement adoptée. Cette solution présente l'avantage de fournir une lumière puissante et pénétrante permettant d'avoir un niveau de détail très important sur des photographies de haute résolution.

L'autre avantage des flashes est que cette lumière a une tendance à virer vers le bleu à la différence des lumières chaudes qui ont une tendance vers le rouge. La lumière bleue est l'une des trois couleurs de base qui sont le Rouge, le Vert et le Bleu, cette lumière est superficielle car son degré de réflectivité sur la peau humaine est grand à la différence de la lumière rouge qui est une lumière qui pénètre en profondeur dans la peau et qui donne une image floue (voir Figure IV-9), la lumière verte quand à elle n'a aucune application intéressante en traitement d'images jusque là.

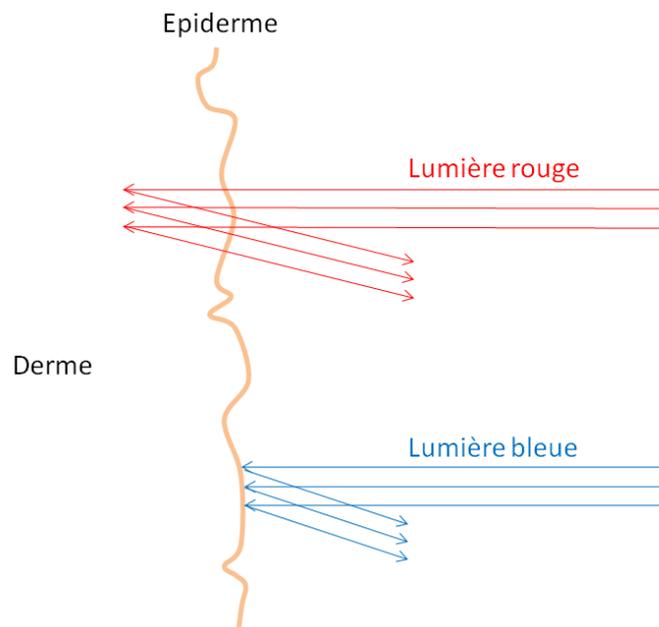


Figure IV-9 Taux de pénétration de la lumière dans la peau

C'est pour cela que dans certains cas, il est très intéressant d'effectuer l'analyse de la surface cutanée sur le canal bleu d'images de peau, cela permet de mieux visualiser le relief cutané.

IV.5.2 Problématique du déclenchement

Les systèmes de prise de vue sont constitués de deux caméras identiques montées sur un support minimisant l'écartement entre les centres de leurs objectifs. La méthode de déclenchement pour laquelle nous avons opté afin de contrôler la prise de vue finaux est le

déclenchement via logiciel. Pour cela une connexion USB entre les deux caméras et un ordinateur est nécessaire.

En ayant choisi les flashes comme source lumineuse principale de notre système, se joue obligatoirement le problème de synchronisation. Ce problème survient lorsque les deux caméras ont un temps de latence entre le déclenchement du premier et du deuxième appareil. Ce temps de latence est lié directement au niveau de parallélisation des signaux de déclenchement USB. Cette parallélisation est gérée en premier temps par logiciel en utilisant les techniques de programmation connues pour ce genre de problématique, mais cela se limite au niveau du système d'exploitation car c'est lui qui gère l'accès à ses connecteurs.

En négligeant le temps de latence entre le déclenchement des deux appareils, nous tombons sur les deux cas de figure possible suivants :

- **Chaque appareil est connecté à son propre flash** (voir Figure IV-10) : nous obtiendrons une image droite et une image gauche différentes du point de vue éclairage, puisque l'appareil photographique de gauche ne va capter que la scène éclairée par le flash à laquelle elle est connectée, l'appareil photographique de droite ayant un temps de latence se déclenche après le premier et fait l'acquisition de la scène éclairée juste par le flash au quel elle est connectée. Les flashes ayant différentes positions, nous obtenons alors deux scènes avec deux éclairages différents.



Figure IV-10 Flashes connectés chacun sur un appareil différent

Les deux flashes sont connectés à un seul appareil (voir Figure IV-11) : puisqu'il y a un temps de latence entre les deux appareils photos, l'appareil photographique connecté au flash fournira des images claires et l'autre des images sombres.



Figure IV-11 Flashes connectés sur le même appareil

Afin de faire face à cette problématique, nous avons opté pour la solution suivante (voir Figure IV-12). Nous avons défini « Camera1 » celle qui se déclenche la première et l'autre sera « Camera2 ». L'un des flashes sera connecté à la « Camera1 », nous l'appellerons « Flash Maître », l'autre flash quand à lui sera connecté à un déclencheur de flash esclave par cellule photosensible, nous l'appellerons « Flash Esclave » (voir Figure IV-12).



Figure IV-12 Utilisation de cellule photoélectrique

Nous réduisons les vitesses d'obturation à 1/25 sec des deux appareils car au delà de 1/30 sec le temps de latence sera plus important que la vitesse d'obturation, ce qui veut dire que nous n'aurons pas de temps d'exposition commun (temps où les deux obturateurs seront ouverts en même temps).

La cellule photoélectrique permet de créer un temps de latence entre le déclenchement des deux flashes équivalent à celui des appareils photos. Comme cela est montré dans la figure ci-

dessous (voir Figure IV-13), cela permet de créer un laps de temps Δ ou les obturateurs des deux caméras sont ouverts et les deux flashes en fonctionnement.

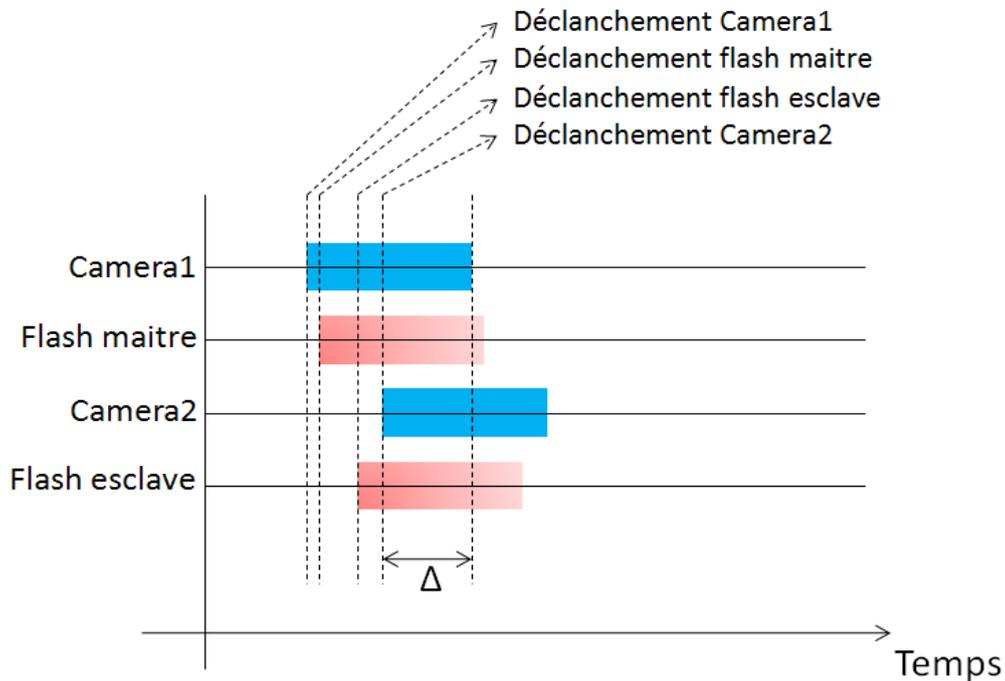


Figure IV-13 Synchronisation de déclenchement des différents dispositifs.
 Δ est le laps de temps ou les obturateurs des deux caméras sont ouverts et les deux flashes en fonctionnement

IV.5.3 Problématique du type d'éclairage

Après avoir choisi les flashes comme source lumineuse principale pour notre application, et après avoir défini la configuration de déclenchement permettant d'avoir une lumière homogène dans le champ de vision des deux caméras, il reste à définir le type d'éclairage approprié, c.-à-d. le positionnement des sources lumineuses de façon à mettre en valeur au maximum le relief cutané en minimisant l'effet d'ombre sur la zone d'étude.

Deux configurations différentes de l'éclairage ont été adoptées pour deux systèmes différents. La première destinée au système PENTAX utilisant deux flashes synchronisés de manière optique par une cellule photo électrique (voir Figure IV-14). La deuxième destinée au système Canon utilisant quatre flashes synchronisés par onde radio par un transmetteur Canon.

La prise de vue stéréoscopique nécessite l'utilisation de deux flashes surtout quand la zone d'étude comprend un relief accentué, comme le nez si la zone d'étude est le visage dans son entier. Les deux flashes permettent d'obtenir un éclairage homogène minimisant les ombres dans le champ de vision commun des deux caméras.

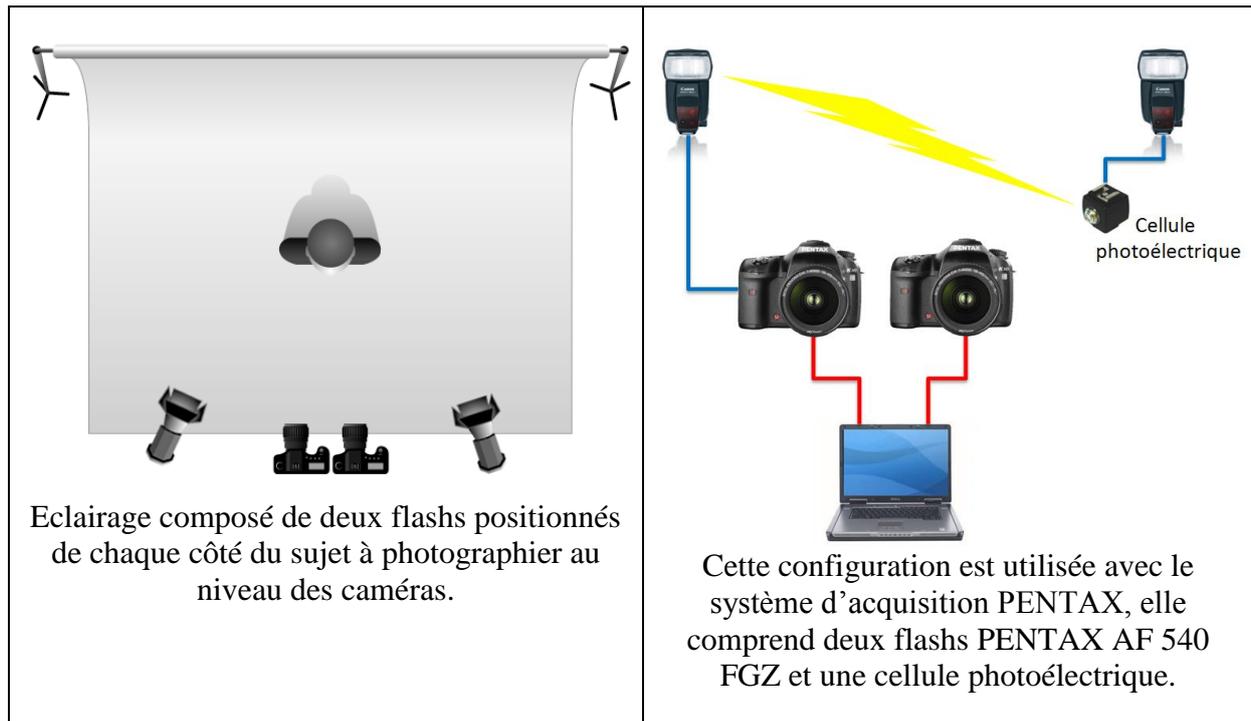


Figure IV-14 Système d'acquisition basé sur deux flashes

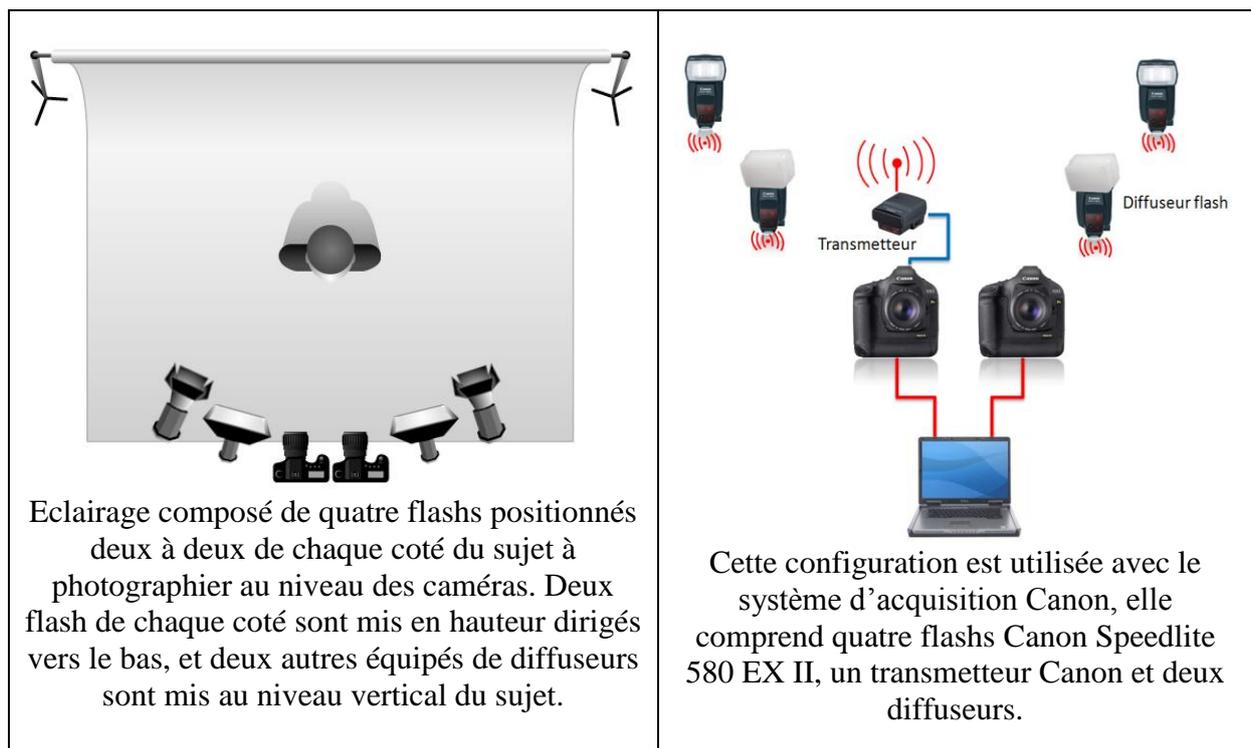


Figure IV-15 Système d'acquisition basé sur quatre flashes

L'utilisation de deux flashes supplémentaires (voir Figure IV-15) aide à mettre le relief cutané en valeur. En effet, nous avons adapté pour le système d'acquisition Canon un système d'éclairage basé sur quatre flashes, deux rasants en hauteur et deux diffus au niveau du sujet.

IV.6 Calibrage des couleurs

La couleur correspond à la perception que nous avons à travers nos yeux de la fréquence de différentes ondes lumineuses, à différentes amplitudes (ampleur de l'oscillation d'une onde). Ces ondes lumineuses forment le spectre de la lumière visible (voir Figure IV-16) qui couvre une plage de 400nm à 700nm de longueur d'onde.

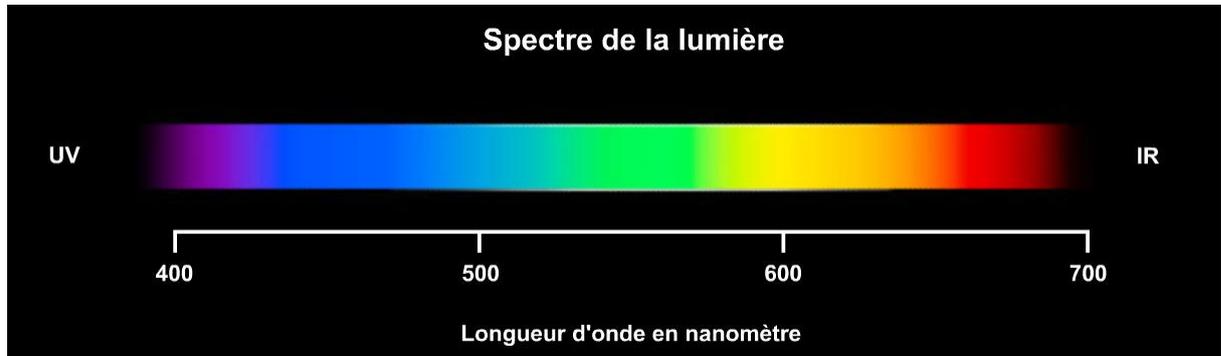


Figure IV-16 Spectre de la lumière visible (www.Profil-couleur.com s.d.)

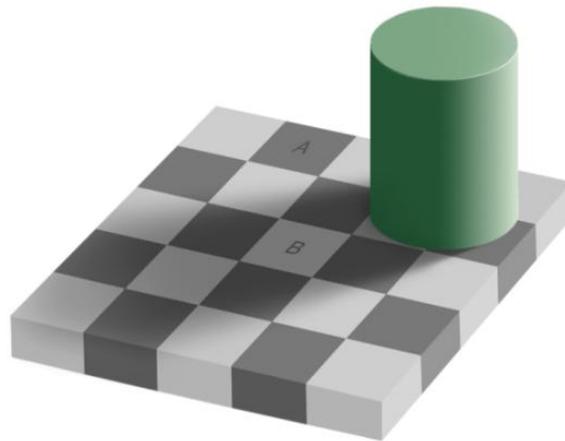


Figure IV-17 Echiquier d'Adelson, le carré de la case « A » a exactement la même couleur que celui de la case « B » (Echiquier Adelson s.d.)

La perception humaine de la couleur nous joue des fois des tours, comme pour l'échiquier d'Adelson (voir Figure IV-17) ou les cases A et B ont exactement la même couleur. C'est pour cela que nous ne pouvons pas prendre la vision humaine comme référence de jugement sur le fait qu'une couleur sur une image soit réelle ou pas.

IV.6.1 Gestion des couleurs

Le processus d'acquisition, de traitement et de restitution des images stéréoscopiques passe par plusieurs médias qui forment la chaîne graphique (voir Figure IV-18).

Les médias qui composent la chaîne graphique peuvent être répartis en trois catégories.

- Périphériques d'acquisition : appareils photo, scanners;
- Périphériques d'affichage : écrans, vidéo projecteurs;
- Périphériques d'impression : imprimantes.

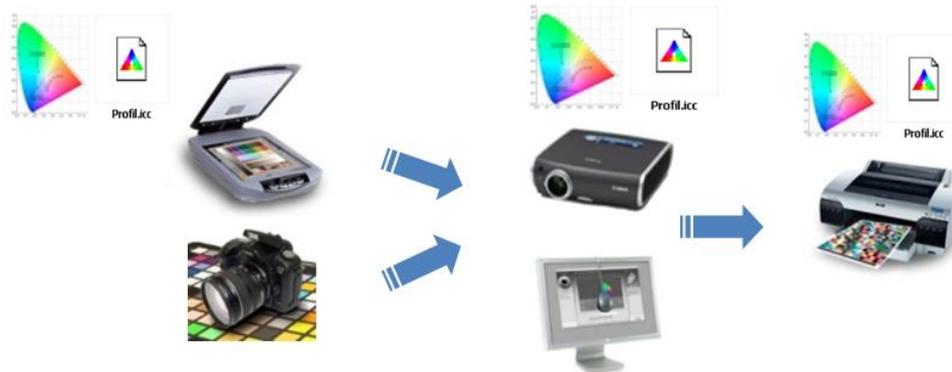


Figure IV-18 Calibrage de la chaîne graphique

Dans notre domaine d'application la couleur joue un rôle déterminant, car elle fournit des informations clés aux dermatologues afin de déterminer la nature d'une pathologie donnée et permet aux cosmétologues de voir les effets de leur produits maquillant sur différentes teintes cutanées.

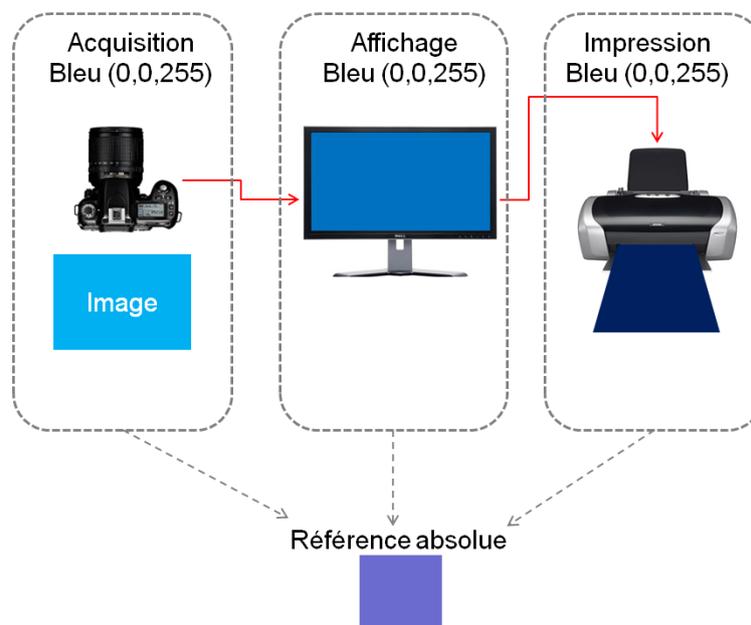


Figure IV-19 Différence entre la couleur de référence et l'interprétation de la même couleur par différents médias

Il est très important de garder les couleurs réelles fidèles à travers les différents médias qui composent la chaîne graphique. Cela ne s'effectue pas automatiquement, chaque média a sa propre interprétation de la couleur, par exemple si nous photographions un carré bleu avec un

appareil photo « X », que nous l'affichons sur un écran « Y » et que nous l'imprimons sur une imprimante « Z » avec du papier « W », nous obtiendrons un bleu différent sur chaque média par rapport au vrai carré bleu photographié qui est la référence absolue (voir Figure IV-19).

Le problème n'est pas la composition RGB de la couleur à afficher, tous les médias essayent d'afficher la même couleur bleue (0, 0, 255). Le souci c'est que la couleur doit être transcrite physiquement comme projeter de l'ancre sur du papier pour les imprimantes par exemple, si le papier a une légère teinte la couleur de sortie ne sera pas fidèle.

Le calibrage colorimétrique permet de corriger la couleur affichée par rapport à la couleur de référence. Il s'effectue régulièrement sur les dispositifs composants la chaîne graphique, car leurs propriétés physiques changent au cours du temps.

IV.6.2 Gamut d'un périphérique de la chaîne graphique

Le « Gamut » est un sous ensemble du diagramme de chromacité qu'un périphérique donné est capable de reproduire, autrement dit, c'est l'ensemble des couleurs qu'un appareil peut afficher ou imprimer. Dans le cas d'appareils RGB comme les écrans cathodiques, le Gamut est représenté sur le diagramme de chromacité par un triangle formé par trois points représentant chacun une couleur primaire, toutes les couleurs composant ce triangle sont formées par les trois couleurs primaire que l'appareil est capable d'interpréter (voir Figure IV-20).

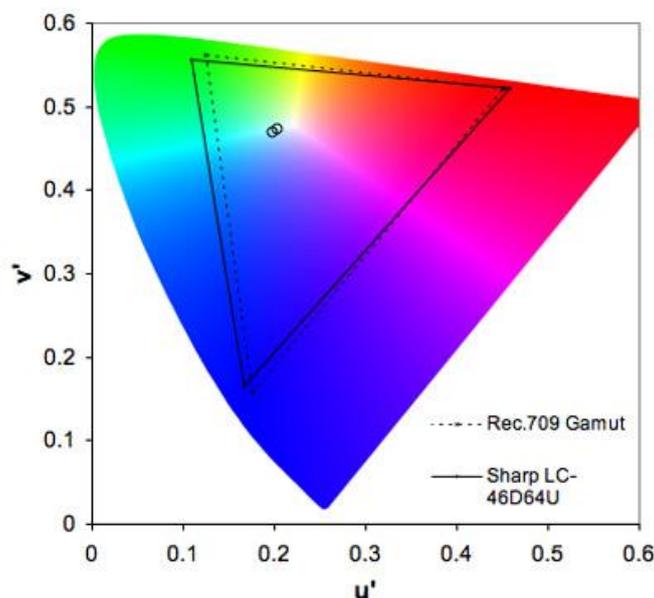


Figure IV-20 Gamut d'un écran Sharp Aquos LC-46D64U LCD HDTV (Baguley s.d.)

Sur la Gamut d'un écran Sharp Aquos LC-46D64U LCD HDTV Figure IV-20, en pointillé, le Gamut corrigé, se rapprochant le plus du blanc de référence, cela permet de modifier la plage dynamique de l'appareil, la température du rendu pourra ainsi être froide virant vers le bleu ou chaude virant vers le rouge.

Le nombre des couleurs primaires de certains périphériques, comme les imprimantes par exemple, est supérieur à trois. Il peut être supérieur à six sur certaines imprimantes, c'est pour cela que le Gamut des imprimantes est représenté sous forme de polygone.

IV.6.3 Gamma

Le Gamma est la proportion de luminosité du pixel de l'image par rapport à sa luminance sur le périphérique de sortie (écran par exemple). La figure ci-dessous (voir Figure IV-21), met le lien entre le degré de luminosité des pixels de l'image (entrée) axe X et le degré de luminance de ces pixels sur l'écran (sortie) en Y. Le lien n'est pas linéaire, ça veut dire que si un pixel a une luminosité de 100% sur l'image d'origine et une luminance de 100% sur l'écran, un pixel de 50% de luminosité sur l'image n'aura pas une luminance de 50% sur l'écran car les deux axes ne sont pas proportionnels. Ce phénomène est dû à la disproportion entre la tension électrique appliquée à la composante d'affichage et sa luminance.

$$\text{Luminance sur moniteur} = (\text{luminosité pixel})^{\text{Gamma}}$$

Équation IV-1 Luminance du moniteur (La correction gamma s.d.)

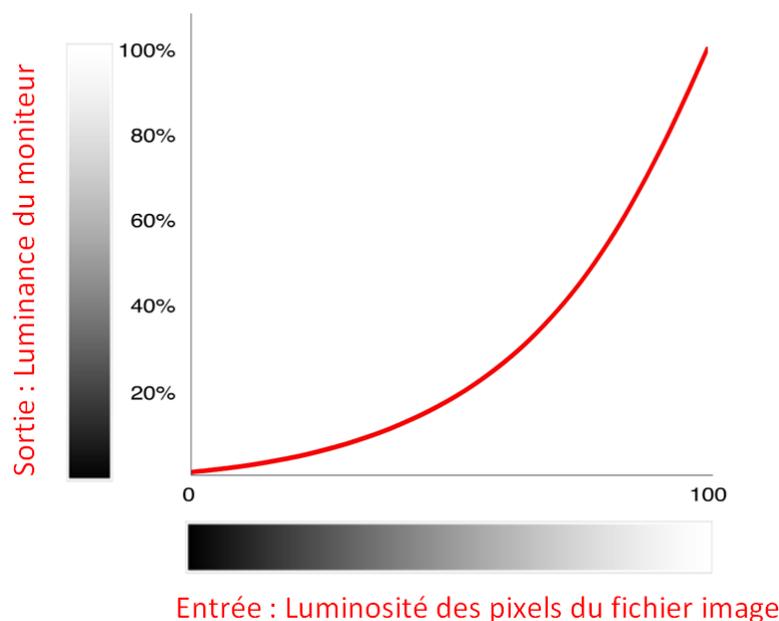


Figure IV-21 La déformation trop sombre par un moniteur est définie par une courbe mathématique non-linéaire (parabolique) qui porte le nom de courbe gamma (La correction gamma s.d.)

IV.6.4 Correction Gamma

La solution naturelle pour corriger l'effet Gamma serait de traiter directement périphérique de sortie, mais à cause de son coût, une autre solution a été mise en place. La correction Gamma se fait à la source (appareil photographique ou caméra numérique) en appliquant une sur-amplification sur les niveaux de gris des pixels acquis. Nous appliquons alors sur les pixels du capteur photographique une courbe de transfert qui est l'inverse de la courbe Gamma (voir Figure IV-22) avant enregistrement dans un fichier image. La correction Gamma peut aussi être appliquée à l'image directement.

$$\text{Luminosité du pixel} = (\text{Luminance fournie par le capteur})^{1/\text{Gamma}}$$

Équation IV-2 Luminosité Pixel (La correction gamma s.d.)

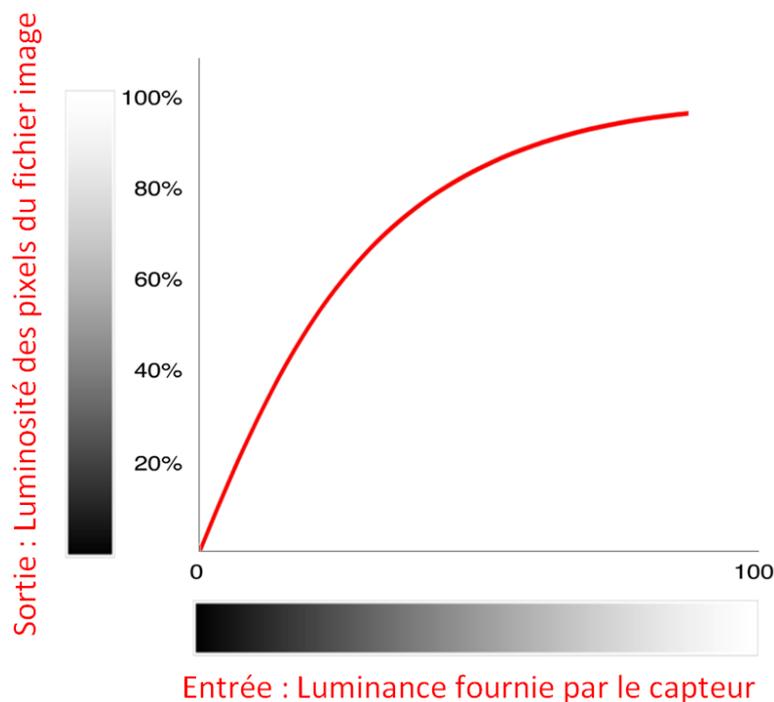


Figure IV-22 la correction du gamma est appliquée dès l'appareil photographique numérique ou la caméra vidéo sous forme d'une courbe de transfert qui est l'inverse de celle du gamma (La balance des blancs s.d.)

La Figure IV-23 montre un exemple d'une photographie projetée sur un moniteur, à gauche de la figure une correction Gamma a été appliquée par utilisant la fonction de

transition, et à gauche l'image brute sans aucune correction. Cela montre à quel point le facteur Gamma peut influencer l'affichage d'une scène donnée.

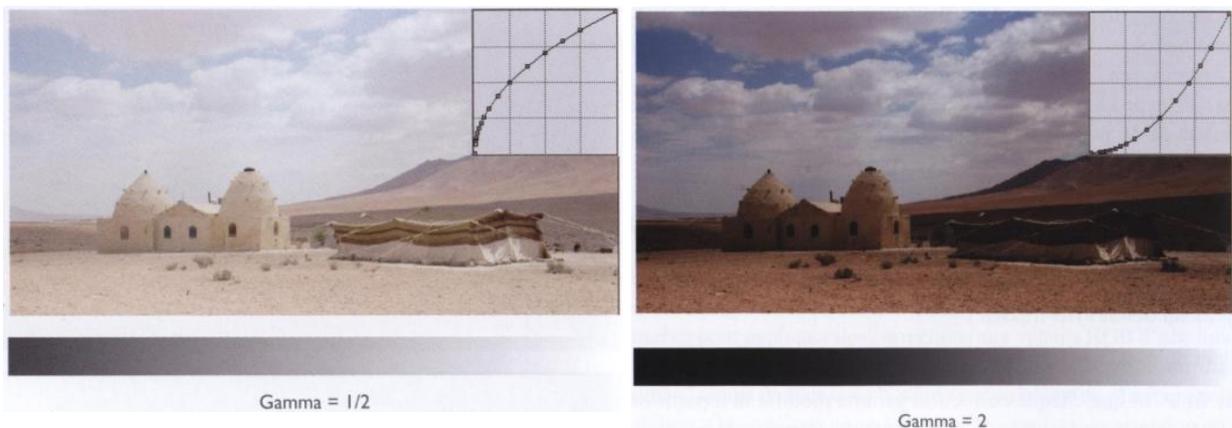


Figure IV-23 A droite image sans correction Gamma, à gauche, application de la courbe de transfert (correction Gamma) (Dordogne 2009)

IV.6.5 Balance des blancs

La lumière est la base de la photographie, elle varie entre lumière naturelle (le soleil par exemple) ou artificielle (flash par exemple). La lumière peut être définie par sa température (en degrés Kelvin), elle part du rouge (20000°K) au bleu (1000°K). La Figure IV-24 classifie quelques sources de lumières en fonction de leur température en °Kelvin.

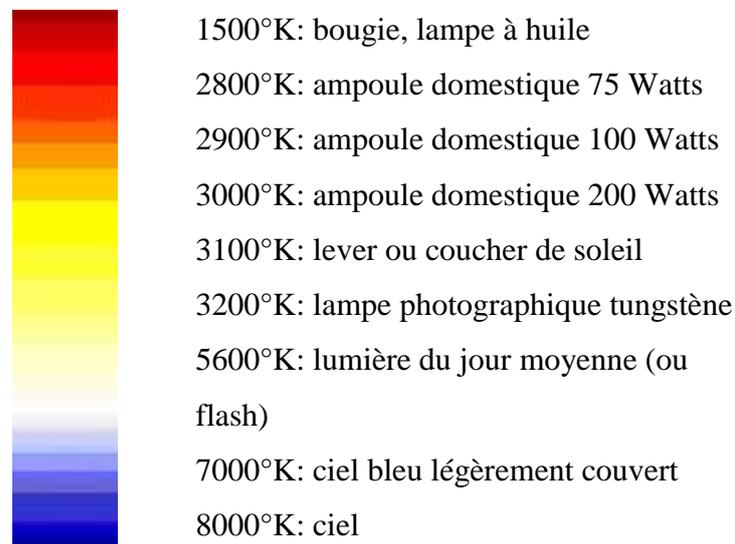


Figure IV-24 Température de quelques sources lumineuses (Dordogne 2009)

Sur les appareils photo numériques (APN) grand public, la balance des blancs peut être automatique en mode auto ou bien prédéfinie en fonction de l'environnement (paysage de nuit, neige, intérieur,...). Sur les appareils reflex numériques, la balance des blancs s'effectue

plutôt en fonction du type de la source lumineuse utilisée, en d'autres termes la balance des blancs dépend de la température de l'éclairage utilisé. Ces appareils permettent de régler la balance des blancs sur différents éclairages (flash, tungstène ou autres), mais cela ne suffit pas toujours car même pour des sources lumineuses proches comme différentes ampoules tungstène, la température change en fonction de leur puissance.

Pour y remédier, un mode personnalisé a été intégré aux appareils photo reflexe, qui permet de prendre en photo un repère de couleur blanc ou plus fréquemment de couleur grise (une mire représentant une référence est utilisée) et de définir le blanc de référence. Cette étape est indispensable car si nous utilisons une lumière chaude qui vire vers le rouge et que nous prenons en photo une feuille de papier blanc, il apparaîtra sur la photo en étant rouge/orangé.

La balance de blanc doit être réglée en fonction d'un type d'éclairage donné, et si nous changeons la position des sources lumineuses, ou leur température, la balance des blancs devra être refaite.

IV.6.6 Profil ICC

Un profil ICC d'un périphérique donné est un fichier au format (.icc ou .icm) qui permet de faire la correspondance entre les couleurs réelles de l'espace de couleur absolue et les couleurs restituées. Les fichiers ICC ont été créés par l'International Color Consortium (ICC) afin de permettre la maîtrise des couleurs tout au long de la chaîne graphique.

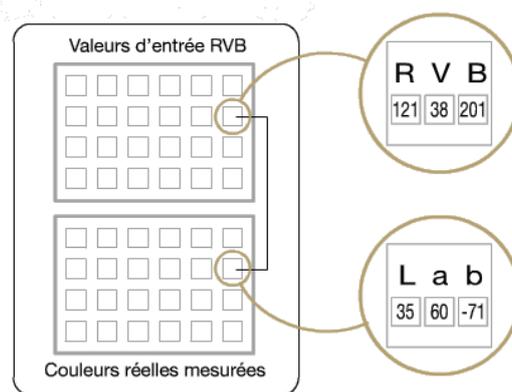


Figure IV-25 Espace de connexion du profil (Les profils ICC s.d.)

Un fichier ICC contient principalement une table de correspondance (Les profils ICC s.d.), cette table est constituée de deux tableaux, le premier énumère les couleurs de l'espace colorimétrique du périphérique et le deuxième la correspondance de ces couleurs avec les véritables couleurs (distance colorimétrique). Ce tableau des références porte le nom de

« Espace de connexion du profil » (voir Figure IV-25), il se base sur le modèle CIE XYZ ou CIE LAB. Ces deux modèles colorimétriques de la CIE représentent les valeurs absolues des couleurs visibles par l'œil humain.

IV.6.7 Calibrage couleur

Le but du calibrage (étalonnage) est de générer un profil ICC pour chaque dispositif entrant dans la chaîne graphique. Dans notre cas, la chaîne graphique se compose d'un appareil photo, d'un écran, d'un vidéo projecteur et d'une imprimante. Chaque profil ICC permet de définir l'écartement entre la couleur interprétée et celle d'origine par rapport à une référence (mire de couleurs).



Figure IV-26 Outil de calibrage couleur i1 X-Rite multi dispositifs (X-Rite i1 s.d.)

Pour calibrer un dispositif d'affichage ou d'impression nous avons besoin d'une sonde qui capte la longueur d'onde de couleurs de référence affichés ou imprimés par le dispositif en question. Les valeurs captées permettront de les comparer aux valeurs des couleurs réelles afin de générer les profils ICC qui mettent en évidence l'atténuation de la couleur due au matériel et ainsi de la corriger.

Il existe deux types de sondes :

- Colorimètre : manque de précision;
- Spectrophotomètre : précision et polyvalence.

Afin de calibrer notre système, nous utilisons une sonde i1 X-Rite appartenant à la famille des Spectrophotomètres, fournie dans un kit incluant des accessoires pour calibrer chaque élément de la chaîne graphique (voir Figure IV-26). Nous utilisons aussi des mires couleurs de référence Colorchecker SG® contenant 140 nuances différentes.

IV.6.7.1 Calibrage couleur d'un appareil photo

Le calibrage couleur d'un appareil photo consiste à générer un profil ICC prenant en compte la différence colorimétrique entre l'image capturée d'une mire couleur (Colorchecker SG dans notre cas) et les couleurs d'origine de cette même mire.

Le processus de calibrage prend en considération dans le cas des appareils photo le type d'éclairage utilisé, c'est pour cela que nous utilisons le spectrophotomètre (X-Rite i1 s.d.) afin de déterminer le degré d'éclairage appliqué de chaque côté de la mire couleur positionnée au niveau du sujet à photographier (voir Figure IV-27). La puissance de l'éclairage doit être proportionnelle aux paramètres de l'appareil photographique. Un éclairage puissant va avec une plus grande vitesse d'obturation et une petite ouverture du diaphragme, à l'opposé d'un éclairage faible qui nécessite une diminution de la vitesse d'obturation et une plus grande ouverture du diaphragme de l'appareil.

Le profil ICC ainsi généré devra être associé à l'image capturée en utilisant un logiciel de traitement d'images comme Photoshop® par exemple.

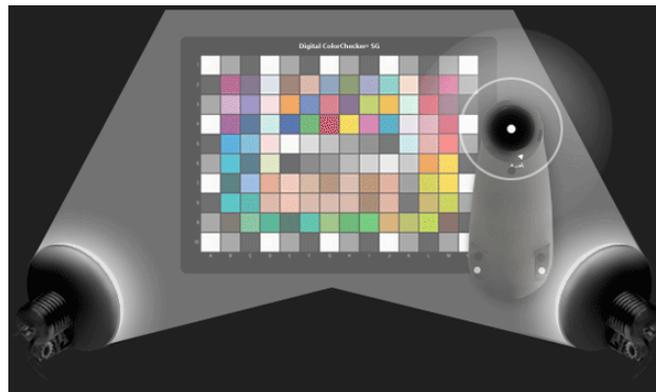


Figure IV-27 Sonde évaluant l'éclairage utilisé pour une prise de vue (X-Rite i1 s.d.)

IV.6.7.2 Calibrage couleur d'un écran

Le calibrage couleur d'un moniteur consiste à générer un profil ICC prenant en compte la différence colorimétrique entre des couleurs de référence et les couleurs affichés sur le moniteur. Les couleurs de référence sont toujours fixes tandis que les couleurs en sortie du moniteur sont captées à l'aide d'un spectrophotomètre (sonde i1) positionné sur l'écran (voir Figure IV-28).

Un calibrage avancé du moniteur prend en compte la lumière ambiante de la salle où se trouve le moniteur, la mesure de la lumière ambiante s'effectue avec la même sonde utilisée pour la mesure des couleurs en sortie du moniteur.



Figure IV-28 Sonde évaluant la chromacité de couleurs de référence affichées sur un moniteur (X-Rite i1 s.d.)

Le profil ICC généré est placé au niveau de la carte graphique afin d'adapter le flux sortant au moniteur utilisé. Cela s'effectue dans l'onglet Gestion des couleurs dans les propriétés d'affichage de Windows (voir Figure IV-29).

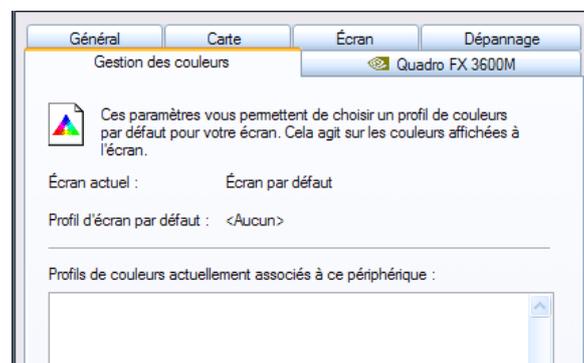


Figure IV-29 Assigner un profil ICC à l'écran

IV.6.7.3 Calibrage couleur d'une imprimante

La procédure de calibrage couleur d'une imprimante est assez similaire à celle des moniteurs, sauf que la sonde est placée au dessus du papier sur lequel une mire de référence est imprimée (voir Figure IV-30). Le calibrage d'une imprimante dépend de trois facteurs clés : l'imprimante, l'encre et le papier. En effet, chaque papier a une teinte légèrement différente (différentes teintes du blanc).



Figure IV-30 Sonde évaluant la chromacité de couleurs de référence imprimés (X-Rite i1 s.d.)

IV.7 Conclusion

Notre dispositif d'acquisition 3D se compose essentiellement de deux appareils photos de haute résolution fixé suivant une configuration donnée sur un support en aluminium permettant de réduire au maximum l'écartement entre eux, nous optons pour une configuration parallèle des appareils photo afin de faciliter les opération de calcul et de rectification. Les deux appareils photos sont entièrement contrôlés à distance via une connexion USB avec une application complète permettant d'ajuster tout les paramètres liés aux appareils photos (vitesse d'obturation, ouverture du diaphragme ...).

L'éclairage est un élément essentiel en photographie, car les appareils photo ne font que capturer la lumière reflétée par le sujet à photographier en salle sombre. Notre problématique est donc d'obtenir des photographies de qualité en ayant un éclairage homogène et en minimisant au maximum l'apparition d'ombres qui gênent considérablement le processus de mise en correspondance. Pour cela, nous combinons un éclairage rasant mettant en évidence le relief cutané et un éclairage plus diffus permettant d'atténuer l'effet d'ombre engendré par l'éclairage rasant. Notre problématique est d'autant plus complexe que l'on utilise deux appareils photos qui doivent être synchronisés avec le déclenchement des flashes, car le déclenchement des appareils photos n'est plus simultané au delà du 1/30 sec (parallélisation USB).

Les images prises par le système d'acquisition 3D passent par des dispositifs d'affichage divers tel que les écrans, les vidéo projecteurs, les écrans 3D. Elles passent aussi par d'autres dispositifs tels que les imprimantes. Afin de garder fidèles les couleurs tout au long de la chaîne graphique, chaque dispositifs entrant dans le processus de visualisation ou acquisition doit être calibré.

Afin d'y parvenir nous utilisons un capteur Eye-One (i1) de X-Rite et une mire couleur de Type Colorchecker SG, contenant 140 plages choisies spécifiquement pour leur localisation dans l'espace colorimétrique qui étendent le Gamut et vous permet de créer des profils ICC pour différents dispositifs sont utilisés. Les profils ICC permettent d'harmoniser la couleur réelle du pixel et le pixel de sortie.



Chapitre V.

Calibrage de caméras et survol des principales techniques utilisées

Résumé

Nous présentons dans ce chapitre le problème du calibrage des caméras stéréoscopiques qui est un problème complexe non linéaire. Nous parcourons ensuite différentes techniques de calibrage dites conventionnelles, et puis nous parlons des différentes applications des AGs dans le domaine de la vision par ordinateur. Une panoplie de techniques de calibrage de caméras basées sur les AGs seront analysées en définissant les principaux opérateurs génétiques utilisés.

V.1 Introduction

La modélisation tridimensionnelle est un concept indispensable à l'analyse de la surface cutanée. Afin de permettre le calcul de profondeurs et distances en 3D sur la peau utilisant un système d'acquisition basé sur le principe de la stéréoscopie, un calibrage géométrique s'impose.

Le calibrage des caméras est une étape essentielle pour l'extraction d'informations géométriques (distances, surfaces, volumes) précises à partir d'images stéréoscopiques. Un système de prise de vue stéréoscopique est dit calibré si nous disposons d'informations concernant le positionnement géométrique des deux caméras le composant, ainsi que les paramètres internes à chacune d'elles. Pour cela, il faut définir un modèle de caméra prenant en considération des paramètres intrinsèques.

V.2 Modèle de caméra et paramètres pour la calibration

Nous commençons par détailler précisément le modèle de caméra et les paramètres qui font l'objet de la calibration.

V.2.1 Modèle caméra Pinhole

Afin d'obtenir le modèle de caméra Pinhole, le système de coordonnées doit être spécifié. Tous les systèmes de coordonnées sont Cartésiens (Savii 2004). Le plan image est devant le centre optique C (voir Figure V-1), qui est l'origine du système de coordonnées caméra (SCC). En réalité, le plan image se trouve derrière le centre optique qui se trouve au niveau de l'objectif optique, ce changement a pour but de simplifier la compréhension de ce système, aucun calcul géométrique n'est influencé par ce changement. L'origine du système de coordonnées image (SCI) est le point représentant le centre de la surface du capteur optique (CCD), dans certains algorithmes nous supposons qu'il est à l'extrémité haute gauche.

Dans le plan image, les coordonnées sont exprimées en pixel, tandis que dans les autres systèmes l'unité principale est le millimètre.

Etant donné un point P_w (voir Figure V-1), ses coordonnées dans le système de coordonnées de la scène (SCS) sont écrites sous forme : $P_w = [X_w \ Y_w \ Z_w]^T$. Cela correspond au point : $P_C = [X_C \ Y_C \ Z_C]^T$ dans le Système de Coordonnées Caméra (SCC), et il est projeté autant que $P_1 = [X_1 \ Y_1]^T$ dans le Système de Coordonnée Image (SCI) (voir Figure V-1).

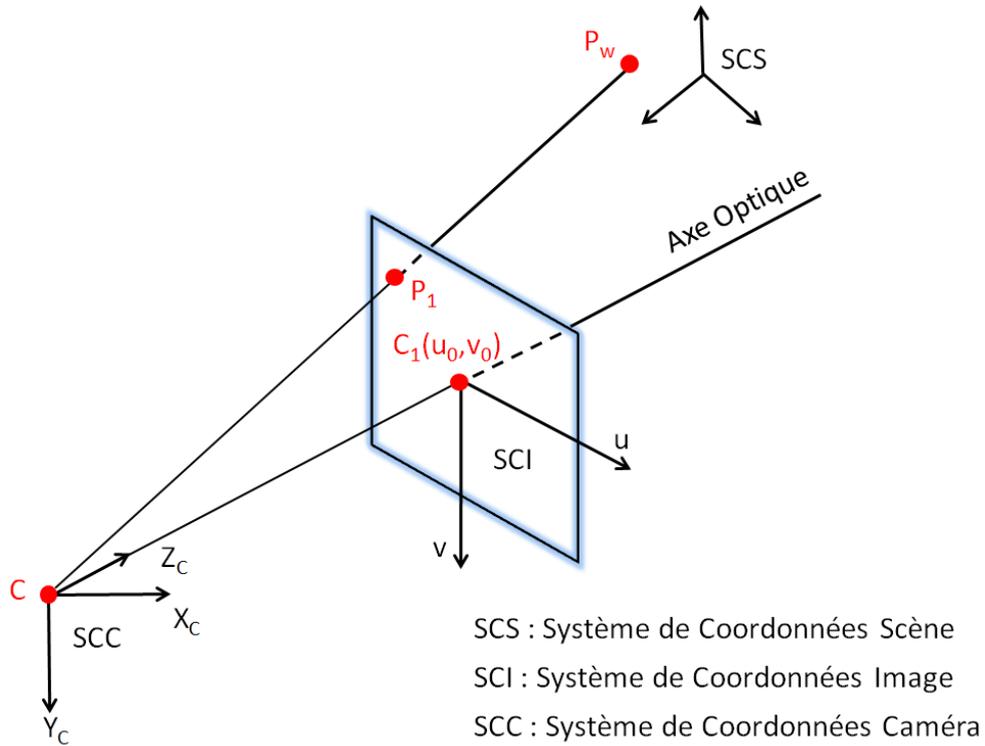


Figure V-1 Géométrie de la projection perspective (Zhang et Ji 2001) (Savii 2004)

La matrice de transformation entre le SCS et le SCC peut être définie comme suit (Savii 2004):

$$H_C^W = \begin{bmatrix} R_C^W & T_C^W \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Où $T_C^W = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ est le vecteur de translation, et R_C^W est la matrice de rotation 3x3 déterminée les trois angles de rotations d'Euler (ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z), sur les trois axes respectifs (x, y, z) (Savii 2004) :

$$R_C^W = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x c_y & s_x c_z + c_x s_y s_z & s_x s_z - c_x s_y c_z \\ -s_x c_y & c_x c_z - s_x s_y s_z & c_x s_z + s_x s_y c_z \\ s_y & -c_y s_z & c_y c_z \end{bmatrix}$$

où $s_x = \sin \phi_x$, $c_x = \cos \phi_x$, ...etc. (en suivant la loi d'Euler)

Le point sur le plan image est obtenu par une projection perspective du point 3D dans le SCS à un point 2D utilisant la matrice de transformation combinée (Savii 2004) :

$$H_F^C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 1 \end{bmatrix}$$

où f est la distance focale (distance entre le centre optique et le plan image).

Les coordonnées dans le plan image sont obtenues par (Savii 2004) :

$$H_i^F = \begin{bmatrix} du & 0 & u_0 \\ 0 & dv & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Où du et dv sont les résolutions horizontale et verticale du capteur optique, u_0 et v_0 sont les coordonnées du centre de l'image (intersection entre l'axe optique et le plan image) dans le SCI (en pixels).

- Les paramètres intrinsèques sont : f, du, dv, u_0, v_0
- Les paramètres extrinsèques sont : $\phi_x, \phi_y, \phi_z, t_x, t_y, t_z$

Offrant un total de 11 paramètres pour ce modèle de caméra.

Effectuer le calibrage de la caméra exige une équation mathématique mettant en relation les coordonnées de la scène avec celle de l'image. Pour un point donné P, la relation peut être écrite comme suit (Savii 2004):

$$P_1 = H_i^F \cdot H_F^C \cdot H_C^W \cdot P_W$$

V.2.2 Calibrage d'un système d'acquisition stéréoscopique

L'objectif du calibrage de caméras stéréoscopiques est de modéliser géométriquement le système de prise de vue optique (voir Figure V-2) afin de permettre le calcul des coordonnées spatiales de plusieurs points de l'espace en utilisant la triangulation. L'application du principe de triangulation se fait par le calcul de l'intersection des deux droites qui passent respectivement par les centres focaux gauche et droite et les projections d'un point de l'espace sur les deux CCD des deux caméras.

Dans les méthodes conventionnelles utilisées dans la vision par ordinateur et spécialement en robotique, le calibrage d'un système d'acquisition stéréoscopique est un cas particulier des méthodes de calibrage géométrique mono caméra. En effet, dans le cas d'un système stéréoscopique, chaque caméra est calibrée distinctement en utilisant une méthode de calibrage mono caméra, le résultat de cette opération est l'obtention de paramètres intrinsèques propres à chacune des caméras qui globalement resteront stables durant le reste

du processus, et des paramètres extrinsèques propres à chaque caméra par rapport au même repère qui est le point « P_1 » (voir Figure V-2).

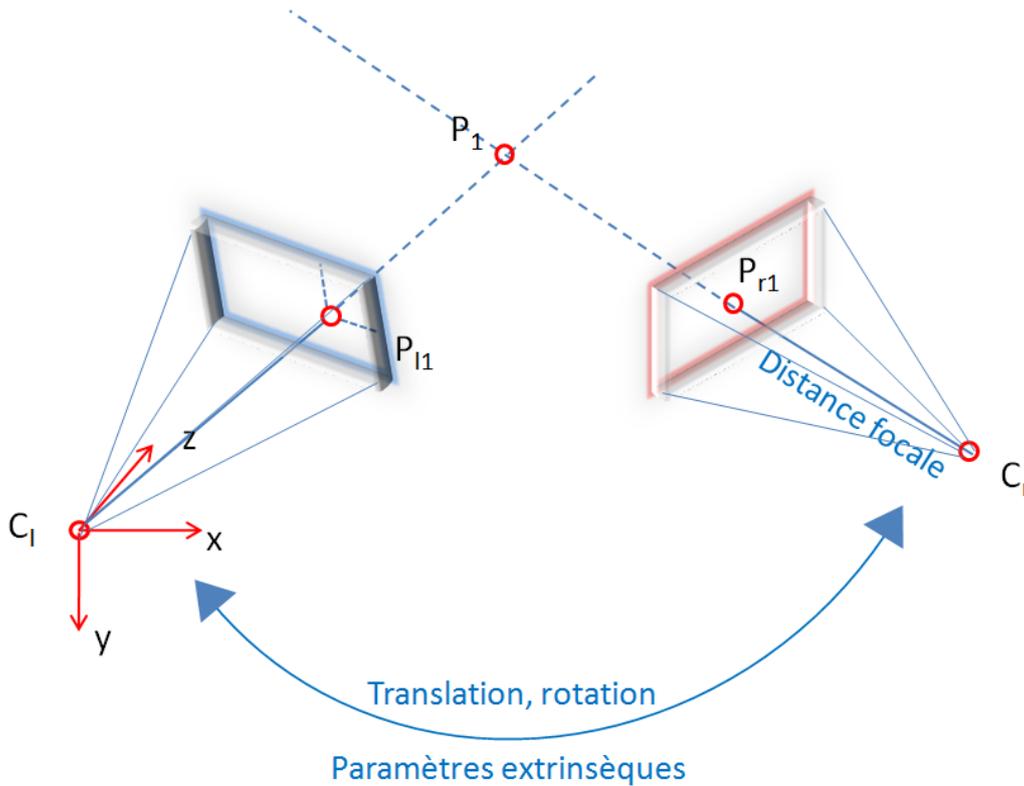


Figure V-2 Calibrage stéréoscopique de deux caméras

Afin de calculer la position d'une caméra par rapport à l'autre, une simple opération matricielle est effectuée entre la matrice de translation/rotation de la première caméra par rapport au point « P_1 » avec l'inverse de celle de la deuxième caméra.

Nous obtenons ainsi la translation/rotation de la caméra de droite par rapport à celle de gauche ainsi que les paramètres internes aux deux caméras (distance focale, distorsion optique et le point principal). Ces paramètres permettent de calculer la position spatiale de tout point dans l'espace visible par les deux caméras, en maintenant leurs positions respectives.

V.2.3 Principaux paramètres intrinsèques de chaque caméra

Les paramètres intrinsèques représentent les paramètres internes de chaque caméra comme la distance focale qui est la distance en millimètres entre le point focal et le capteur photographique (CCD), l'emplacement du point principal qui est l'écartement de la projection du point focal par rapport au centre du CCD et la distorsion optique en fonction de l'objectif utilisé qui peut être en barillet ou en coussinet (appelée aussi en croissant) (voir Figure V-3).

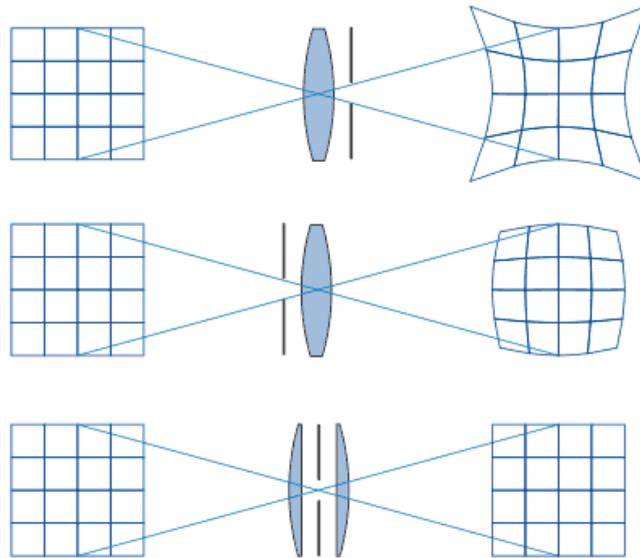


Figure V-3 Distorsion optique, en haut la distorsion en barillet, au milieu la distorsion en croissant et en bas aucune distorsion obtenu grâce à l'emploi de lentilles asphériques (Wikipédia, Distorsion (optique) s.d.)

Ce modèle peut être étendu à deux autres paramètres, afin de tenir compte de l'affinité et de l'intersection avec le plan image, mais ces paramètres sont rarement utilisés car insignifiant dans les caméras numériques modernes. Différents groupes de paramètres de calibrages additionnels ont été définis à travers les années comme par exemple Abraham & Hau (Abraham et Hau 1997) qui définissent un modèle optimal pour le calibrage de caméras numériques.

V.2.3.1 Distorsion optique

Les trois paramètres intrinsèques utilisés pour modéliser la distorsion radiale Δr sont généralement exprimés suivant un ordre impair polynomial $\Delta r = K_1 r^2 + K_2 r^5 + K_3 r^7$, où « r » est la distance radiale. La distorsion radiale " Δr " varie considérablement en fonction de la focale. Les coefficients K_i sont généralement très corrélés, avec " $K_1 r^3$ " qui comptabilise la plus grande erreur. Les paramètres « K_2 » et « K_3 » sont typiquement utilisés dans les cas d'objectifs photographiques à basse distorsion (Utilisation de lentilles asphérique par le constructeur), les objectifs grands angles et dans les applications de mesure à haute précision. La distorsion en barillet généralement remarquée lors d'une prise de vue utilisant des objectifs grands angles sont représentées par « K_1 ». Des recherches récentes ont démontré la possibilité de modéliser la distorsion radiale en fonction du facteur zoom et de l'inclure dans l'entête EXIF (Exchangeable image file format) du fichier images (Fraser et Al-Ajlouni 2006).

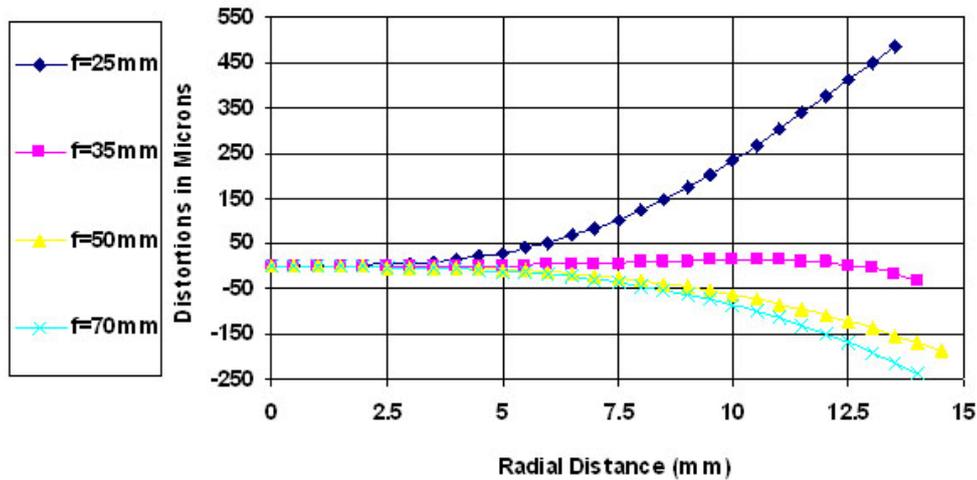


Figure V-4 Variation de la distorsion radiale en fonction de la focale (Appareil Nikon D100) – Travaux de Romondino & Fraser (Remondino et Fraser 2006)

V.2.3.2 Décentrage

La distorsion du décentrement est due à un mauvais alignement des éléments optiques constituant l'objectif tout au long de l'axe optique. Les paramètres de distorsion du décentrement P_1 et P_2 (Brown 1971) sont fortement couplés avec les paramètres de décentrement du point image (x, y) . La distorsion du décentrement a habituellement une échelle beaucoup plus petit que la distorsion radiale, et elle varie avec le focus.

Le couple distorsion du décentrement et décentrage du point image varie en fonction de la distance focale, plus la distance focale est grande et plus ces paramètres sont grands, cela pose de multiples problèmes lors de l'utilisation d'objectifs à grandes focales.

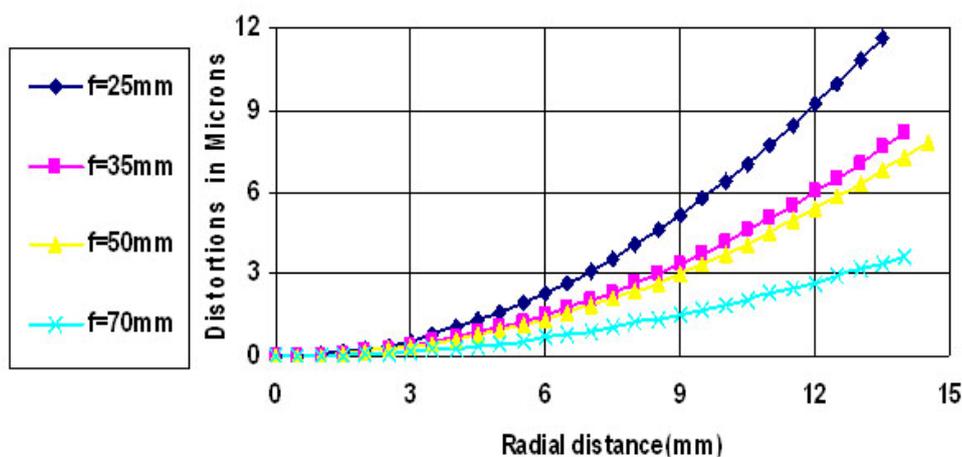


Figure V-5 Variation de la distorsion de décentrement en fonction de la focale (Appareil Nikon D100) – Travaux de Romondino & Fraser (Remondino et Fraser 2006)

V.2.4 Paramètres extrinsèques du système stéréoscopique

Les paramètres extrinsèques représentent la position de chaque caméra par rapport à l'autre. Généralement nous prenons la caméra gauche comme référence et nous calculons la translation et rotation sur les trois axes X, Y et Z de la caméra droite par rapport à la référence (caméra gauche).

V.3 Classifications des méthodes et modèles de calibrage

Dans le domaine de la photogrammétrie, différentes classifications des techniques de calibrages des caméras existent. La nature de l'application et la précision désirée dicte la méthode la plus appropriée pour un cas donné. Une première classification basée sur le modèle caméra (Wiley et Wong, 1995) peut être proposée :

- **Méthodes utilisant un modèle caméra basé sur la projection perspective :**

Ces méthodes nécessitent généralement une distorsion optique maîtrisée (pouvant être estimée). Généralement ce modèle exige plus de 5 points (Wiley et Wong, 1995) d'apprentissage (points connus d'une mire par exemple) en utilisant plusieurs images.

Due à sa nature non linéaire, ce modèle nécessite une méthode d'approximation de type moindres carrés afin de trouver les paramètres géométriques des caméras.

- **Méthodes utilisant un modèle caméra projective :** Un tel modèle est caractérisé par les matrices essentielle (matrice modélisant le positionnement de deux caméras dans l'espace) et fondamentale (matrice qui fait correspondre tous les pixels de deux images stéréo). Il peut gérer des distances focales variables ou inconnues, mais a besoin d'au minimum 6 à 8 points d'apprentissage pour faciliter l'obtention des paramètres géométriques des caméras (problème linéaire). Les paramètres de distorsion qui sont des paramètres non linéaires sont difficilement traités avec ce modèle.

D'autres critères peuvent être utilisés afin de classifier les méthodes de calibrage de caméras :

- **Modèles utilisant des grilles de point 3D au lieu des grilles 2D** (Triggs 1998) (Zhang 2000). Alors que certaines méthodes de vision par ordinateur et d'auto calibrage photogrammétrique peuvent gérer les deux cas, des modèles comme la matrice essentielle ne sont pas adaptés pour les grilles planaires.
- **Modèles basés sur des points et d'autres sur des lignes** (Fryer et Brown 1986). Les méthodes de calibrage utilisant en entrée des points sont plus populaires en

photogrammétrie, elles utilisent en entrée des points d'une mire d'échiquier par exemple. L'utilisation seule de lignes engendre des résultats intrinsèques moins robustes.

Des classifications plus spécifiques (Zhang et Ji 2001) peuvent être faites à partir des paramètres d'estimation et la technique d'optimisation utilisée.

- **Techniques linéaires :** Les techniques linéaires (Abdel-Aziz et Karara 1971) (Okamoto 1981) comme leur nom l'indique se basent sur des méthodes d'optimisation linéaire. Elles ont l'avantage d'être efficaces mais souffrent d'un manque de précision et de robustesse.
- **Techniques non linéaires.** Ces techniques (Sobel 1974) (Wong 1975) (Faig 1975) (Paquette, et al. 1990) utilisent plutôt des méthodes d'optimisation non linéaires comme les moindres carrés par exemple. Elles fournissent des solutions précises et robustes (Brown 1971) mais nécessitent une bonne estimation initiale des paramètres. Dans la plus part des systèmes photogrammétriques quelques paramètres sont fournis par les constructeurs de caméra, comme la distance focale et la résolution du capteur optique.
- **Techniques combinant le linéaire et le non linéaire.** Dans ce type de techniques, la méthode linéaire est utilisée pour récupérer les approximations initiales des paramètres, les paramètres de calibrage seront ensuite affinés itérativement par une méthode non linéaire (Faugeras et Toscani 1986) (Tsai 1987) (Weng, Cohen et Herniou 1992) (Heikkilä et Silven 1997).

V.4 Principaux algorithmes de calibrage de caméra en vision par ordinateur

Différents algorithmes pour le calibrage de caméras ont été proposés dans la littérature (Remondino et Fraser 2006) dans les domaines de la photogrammétrie et la vision par ordinateur. Les algorithmes sont généralement basés sur le modèle caméra perspective ou projective (modèle Pinhole). L'approche la plus utilisée dans différents domaines comme la robotique par exemple est l'auto calibration (Thormählen, Broszio et Mikulastik 2006) qui a vu son apparition durant les années 70.

Il existe une vaste panoplie d'articles dans la documentation scientifique qui traitent du sujet du calibrage des caméras numériques. Ils vont de brefs commentaires sur le calibrage des caméras (Fryer, Camera Calibration 1996) (C. Fraser 2001) à la description générale

(Bösemann, Godding et Riechmann 1990) (Fraser et Shortis 1995) (Jantos, et al. 2002), en passant par les appareils photo de type compacts numériques (Kunii et Chikatsu 2001) (Läbe et Förstner 2004) (Cronk, Fraser et Hanley 2006), stabilité des paramètres (Shortis et Beyer 1997) (Peipe et Stephani 2003) (Läbe et Förstner 2004), comportement des paramètres d'entrée/sortie (Wiley et Wong. 1995) (Läbe et Förstner 2004) et la précision des résultats (D'Apuzzo et Maas 1999) (Salvi, Armanguè et Batlle 2002) (Fraser et Al-Ajlouni 2006).

Les modèles de calibrage pour la vision par ordinateur ont traditionnellement utilisés des grilles de référence. La matrice de calibrage « K » est déterminée en utilisant plusieurs images d'une grille d'où des points de coordonnées connues peuvent être extraits (une mire d'échiquier par exemple). Les méthodes les plus connues et utilisées sont celles de Tsai (Tsai 1987), Heikkila & Silven (Heikkilä et Silven 1997) et Zhang (Zhang 2000). Elles se basent toutes sur le modèle caméra « Pinhole » à projection perspective et incluent des fonctions de modélisation de la distorsion optique.

Le modèle de calibrage de Tsai (Tsai 1987) suppose que certains paramètres de la caméra soient fournis par le constructeur, cela réduit l'estimation initiale des paramètres intrinsèques. Elle requiert « n » points par image ($n > 8$), et résout le problème de calibrage en utilisant « n » équations linéaires. Un deuxième modèle de distorsion radiale est utilisé quand aucun décentrement du point focal sur le CCD lié à la distorsion n'est considéré. Les deux étapes supportent aussi bien une entrée d'une ou plusieurs images d'une mire aussi bien plane que tridimensionnelle, à condition que les coordonnées des points soient connues.

La technique développée par Heikkila & Silven (Heikkilä et Silven 1997) extrait en premier lieu des estimations initiales des paramètres de caméras utilisant l'algorithme DLT (Direct Linear Transformation) (Abdel-Aziz et Karara 1971) ensuite une approximation non linéaire à base de moindres carrés et utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt est appliquée afin de raffiner les paramètres intrinsèques incluant la distorsion. Ce modèle utilise deux coefficients pour la distorsion radiale et de décentrement, cette méthode supporte assez bien une entrée d'une ou plusieurs images d'une mire aussi bien plane que tridimensionnelle.

La méthode Zhang (Zhang 2000) requiert des images d'une mire de calibrage plane placée à différentes orientations (plus que deux) face à la caméra. L'algorithme utilise la détection de coins afin d'extraire les points de la mire afin de calculer une transformation projective les points des « n » différentes images. Ensuite, les paramètres intrinsèques et

extrinsèques sont calculés en utilisant des fonctions linéaires, tandis que les paramètres de distorsion sont optimisés avec une méthode non linéaire de type moindres carrés. Une minimisation finale non linéaire de l'erreur de projection est appliquée utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt afin de raffiner tous les paramètres de calibrage. L'approche de Zhang (Zhang 2000) est assez similaire à celle de Triggs (Triggs 1998) qui a besoin d'un minimum 5 vues d'une scène plane.

Le terme d'auto calibration en vision par ordinateur est utilisé quand aucun objet de calibrage de type mire est employé, et les propriétés métriques de la caméra sont calculés à partir d'images non calibrées, utilisant les contraintes de la caméra ou de la scène à modéliser. L'auto calibrage est généralement adoptée en modélisation 3D en améliorant la reconstruction projective. En général, trois types de contraintes sont appliquées (séparément ou en ensemble) afin de commencer l'auto calibrage : Les contraintes de la scène, les contraintes de déplacement de la caméra ou les contraintes liées aux paramètres intrinsèques de la caméra. Mais dans le cas où nous avons une caméra inconnue, un déplacement de caméra inconnu et une scène inconnue aussi, seules les contraintes liées à l'orientation interne (CCD) de la caméra peuvent être utilisés.

La majorité des techniques qualifiées d'auto calibrage décrites dans la littérature en vision par ordinateur traitent les paramètres intrinsèques de la caméra comme une constante inconnue (Faugeras, Luong et Maybank 1992) (Hartley 1994) (Pollefeys, VanGool et Oosterlinck 1996) (Heyden et Aström 339-343) (Triggs, The Absolute Quadric 1997). Le problème du paramètre de la rotation interne du CCD par rapport au point focal a été étudié également par Pollefeys & al (Pollefeys, Koch et Van Gool 1997) et Heyden & Astrom (Heyden et Aström 339-343). L'auto calibrage peut être une problématique lorsque le déplacement de la caméra n'est pas assez suffisant afin de récupérer les paramètres de calibrage (Sturm 1997).

De toutes les méthodes évoquées précédemment, aucune ne fait office de solution universelle au calibrage de caméras, et donnent toutes des résultats approximatifs qui se rapprochent de la solution optimale avec une certaine erreur propre à chacune d'elles. Cela est du en grande partie à la variété des méthodes d'acquisition utilisé (distance focale variable de l'objectif photographique, nombre de lentilles influant la distorsion optique, etc.).

V.5 Principaux algorithmes de calibrage utilisant les AGs

Les méthodes d'optimisation mathématique utilisées pour le calibrage des caméras peuvent présenter quelques problèmes (stabilité de la méthode, point initial d'optimisation), et cela a incité les chercheurs à tester des approches basées sur des algorithmes génétiques (Holland 1975).

Les algorithmes d'optimisation, et plus spécifiquement ceux basés sur l'approche évolutionnaire sont largement utilisés dans le domaine de la vision par ordinateur pour diverses utilisations (Janko, Chetverikov et Ekart 2007) (Dipanda, et al. 2003) (Anam, et al. 2009) (Johnson, Bhat et Thibault 2006) (Heinemann, et al. 2006). Leur succès dans le domaine du calibrage de caméra et la vision stéréoscopique vient du fait qu'ils sont capables de minimiser la fonction non linéaire pour le calcul des paramètres caméras. La minimisation de fonctions non linéaires n'est pas une tâche facile à réaliser, car cette fonction n'est pas convexe et contient beaucoup de minimas locaux complexes.

Les méthodes de descente du gradient ne sont pas adaptées à la problématique de calibrage de caméras, car elles peuvent facilement être piégées dans un minimum local, et en plus, le gradient de la fonction objective n'est pas toujours disponible.

Les algorithmes génétiques ont été étudiés pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Ce sont des méthodes de recherche basées sur le principe de population : des populations successives de solutions candidates sont générées stochastiquement et l'optimisation est effectuée par une recherche multi-agent aléatoire qui permet d'éviter les minimas locaux, nous les décrivons plus en détail dans le chapitre VI.

Nous pouvons citer quelques applications des AG dans le domaine de la vision par ordinateur :

- (Janko, Chetverikov et Ekart 2007) ont développé un AG capable de retrouver le bon alignement d'une texture afin de la projeter sur son modèle 3D,
- (Dipanda, et al. 2003) qui à partir d'un système d'acquisition basé sur une caméra et un projecteur laser, utilise les AG pour faire l'appariement entre les points images et les rayons laser afin d'effectuer la reconstruction 3D,
- (Anam, et al. 2009) qui utilise les AG pour la reconnaissance faciale de sujets à partir de photographies 2D,
- (Johnson, Bhat et Thibault 2006) qui ont développé un AG pour calibrer un vidéo projecteur en utilisant une surface d'affichage sphérique et une caméra calibrée. Le calibrage du vidéo projecteur relève une multitude de similitudes avec celui des

caméras. Son calibrage a comme objectif de retrouver sa position spatiale à la caméra et aussi de retrouver ses paramètres intrinsèques comme la focale,

- (Heinemann, et al. 2006) ont développé une méthode de repérage spatial spécialement conçu pour les robots footballeurs de la RoboCup, lesquels sont équipé d'une caméra « œil de poisson » offrant une vue distordue de 360° du terrain de jeux. Cette technique utilise un algorithme évolutionnaire pour le calibrage automatique d'une caméra indépendamment de caractéristiques matérielles. L'approche de (Heinemann, et al. 2006) prend en entrée une vue 360° du terrain de football, le marquage blanc au sol de l'aire de jeux étant utilisé comme repère servant au positionnement.

Les algorithmes génétiques ont démontré qu'ils étaient prometteurs dans diverses applications de la vision par ordinateur, et récemment dans le calibrage des caméras. Nous décrivons ci-dessous les différentes applications des algorithmes évolutionnaires utilisés pour le calibrage. Rares sont les algorithmes destinés pour les systèmes stéréoscopiques, le modèle reste néanmoins dans la même logique.

V.5.1 An Evolutionary Algorithm for camera calibration (Guermeur et Louchet 2003)

Cette approche (Guermeur et Louchet 2003) concerne en priorité le calcul des paramètres de distorsion optiques liés aux lentilles de l'objectif photographique à l'aide des AG, ainsi que d'autres paramètres intrinsèques. En effet, la distorsion optique est plus importante lors de l'utilisation d'objectifs grands angles de moyenne gamme. Cet effet indésirable est en partie maîtrisé et supprimé dans des objectifs photographiques de haute gamme qui coûtent très cher. Cependant les paramètres de distorsion, fournies par les fabricants restent dans la plupart des cas imprécis.

Cette approche calcule les paramètres intrinsèques indépendamment des paramètres extrinsèques, cela présente l'avantage d'obtenir des paramètres internes précis. En effet, lors de l'utilisation d'algorithmes optimisant les paramètres intrinsèques et extrinsèques ensemble, les paramètres caméras estimés satisfont la fonction d'évaluation liée à l'erreur de calcul de distances mais pas aux paramètres réels internes aux caméras. Une amélioration basée sur un système de poids des paramètres appliquée à ces dernières pourra compenser cet écart.

Les données d'entrée de cette approche (Guermeur et Louchet 2003) sont un groupe de points (alignés en 5x5) détectés sur une mire plane en utilisant le détecteur de Harris pour sa bonne précision d'après les auteurs.

Le codage des individus v_i de la population génétique est sous forme de vecteurs de paramètres intrinsèques représentés comme suit : $v_i = (a_1, a_2, a_3, p_1, p_2, p_3, x_0, y_0, k)$

Où

- a_1, a_2, a_3 représentent les paramètres de distorsion (classiquement appelés k_1, k_3, k_5),
- p_1, p_2, p_3 représentent les coefficients tangentiels,
- x_0, y_0 représentent le centre d'image (erreur projection point focal sur le CCD),
- k est le facteur d'échelle horizontale.

Chaque gène (paramètre) des individus de la population génétique est un nombre réel en s'inspirant des travaux de (Rechenberg 1973).

L'évaluation de chaque individu v_i se base sur le critère d'alignement des points de la mire. Pour chaque ensemble de points (nous avons 5 ensembles en tout, chaque ensemble regroupant 5 points alignés horizontalement), une ligne droite est tracée approximativement en utilisant la méthode des moindres carrés à laquelle nous ajoutons la distance au carré de chaque point de l'ensemble par rapport à cette droite. Ensuite, les résultats de chaque ensemble sont additionnés (cette valeur est à minimiser).

L'approche utilise un croisement génétique barycentrique classique, en prenant deux individus parents (v_1, v_2) nous obtenons les deux enfants (v_{n1}, v_{n2}) suivant la fonction suivante :

$$v_{n1} = K v_1 + (1 - K) v_2$$
$$v_{n2} = (1 - K) v_1 + K v_2$$

Équation V-1 Fonction de croisement, approche de (Guermeur et Louchet 2003)

Où K est un nombre aléatoire dans l'intervalle $[0,1]$.

Pour générer un nouvel individu avec l'AG, un bruit gaussien est ajouté en guise de mutation à un individu sélectionné.

V.5.2 Camera Calibration Using Compound Genetic-Simplex Algorithm (Savii 2004)

Cette méthode (Savii 2004) est une approche de calibrage de caméras à deux étapes. Premièrement, un AG est utilisé pour trouver une bonne approximation de la solution.

Ensuite, un algorithme de minimisation multidimensionnelle non linéaire (Algorithme Nelder-Mead simplex) est appliqué pour affiner les résultats. Tous les paramètres intrinsèques et extrinsèques sont estimés simultanément.

Les données d'entrée sont un ensemble de coordonnées de coins (8 coins) d'une mire tridimensionnelle (un cube). Ces coordonnées sont fournies dans le repère image (coordonnées 2D sur l'image) et dans le repère spatial (coordonnées par rapport au cube 3D).

Chaque individu représente une solution potentielle au problème de calibrage, et chaque individu est composé de gènes représentant les paramètres à estimer. Chaque gène est représenté par un codage réel. La fonction d'évaluation dans cette approche représente la somme des distances Euclidiennes entre les distances réelles et celles estimées entre les coins de la mire 3D.

A la fin de l'exécution de l'AG, le meilleur individu fera office d'entrée à l'algorithme de minimisation multidimensionnelle (Algorithme Nelder-Mead simplex), une solution affinée est ainsi obtenue. Si l'erreur obtenue après l'exécution de ce dernier est acceptable, les résultats seront définitifs, sinon le processus de calibrage recommencera à partir de l'AG qui inclura le dernier meilleur individu pour l'initialisation de la nouvelle population.

V.5.3 Calibrating a Robot Camera (Yang et Illingworth 1994)

Cette méthode traite du problème du calibrage d'une caméra montée sur un bras de robot. L'objectif est d'estimer les paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra par rapport au repère du bras de robot.

Le calibrage de la caméra s'effectue en acquérant deux prises photographiques d'un objet de calibrage avec des dimensions 3D connues en deux mouvements maîtrisés (connus) du bras robotique (trois positions du robot en prenant en compte la position initiale).

Une méthode conventionnelle est d'abord utilisée afin de retrouver une solution initiale, qui sera l'entrée de l'AG afin d'optimiser cette solution.

Les AG sont ainsi utilisés afin d'optimiser les paramètres caméras. La fonction d'évaluation des individus génétiques à minimiser est la distance euclidienne des points de références dans le plan image. Elle est représentée comme suit :

$$f(p) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n [(u_{ij} - x_{ij}/z_{ij})^2 + (v_{ij} - y_{ij}/z_{ij})^2]$$

Équation V-2 Fonction d'évaluation, approche de (Yang et Illingworth 1994)

où :

- n : est le nombre de points de référence de l'objet de calibrage ($n \geq 7$),
- i : les positions du bras robotique (3 positions en tout),
- (u_{ij}, v_{ij}) : sont les coordonnées image des points de référence, elles représentent les coordonnées du point i à la position j du robot,
- (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) : les coordonnées dans l'espace des points de référence, elles représentent les coordonnées 3D du point i à la position j du robot.

Etant donnée une solution initiale p de 16 dimensions (les 16 dimensions regroupent les paramètres intrinsèques, et les paramètres extrinsèques pour 2 déplacements du bras robotique) $p = (p(1), \dots, p(16))$ calculée par une technique de calibrage conventionnelle, une population génétique initiale est tout d'abord créée $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$, où N est la taille de la population, en perturbant les 16 dimensions de la solution initiale. Chaque dimension représente ainsi un gène d'un individu qui est une solution potentielle.

Pour chaque solution potentielle $p_i \in P, i=1, \dots, N$, un nouveau candidat est généré \acute{p}_i par mutation suivant la fonction suivante :

$$\acute{p}_i(j) = p_i(j) + N(0, \lambda f(p_i)) \quad j = 1, \dots, 16$$

Équation V-3 Fonction de mutation, approche de (Yang et Illingworth 1994)

où :

- λ : est la probabilité de mutation,
- $N(\mu, \sigma^2)$: est une variable Gaussienne de moyenne μ et de variance σ^2 .

Pour chaque paire de solutions candidates p_i et \acute{p}_i , l'algorithme sélectionne celle qui présente la valeur minimale de la fonction d'évaluation f , et l'introduit dans la nouvelle population générée.

L'algorithme évolutionnaire effectue l'optimisation par la répétition des opérations précédentes jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit satisfait. Le critère d'arrêt est que la fonction d'évaluation minimale f_{min} reste la même pendant un temps donné. Le meilleur individu sera ensuite défini comme solution optimale au problème.

V.5.4 Combined Evolution Strategies for Dynamic Calibration of Video-Based Measurement Systems (Cerveri, Pedotti et Borghese 2001)

Cette approche offre la possibilité à l'aide des stratégies évolutionnaires de calibrer un système de prise de vue vidéo stéréoscopique avec une barre rigide. Les deux extrémités de la

barre rigide forment 2 points que nous appellerons P et Q . A un instant j sur les deux caméras, les deux points forment une distance 3D fixe dans l'espace qui est L . Au cours du déplacement de la barre rigide dans la scène, une multitude de distances connues délimitées par les extrémités P et Q pourra être définie. Cet ensemble de points et distances forme une alternative à l'utilisation d'une mire plane de type échiquier.

Toute imprécision dans l'estimation des paramètres de calibrage des caméras se reflétera dans la précision du positionnement 3D des extrémités de la barre rigide (P et Q), sa longueur calculée (L), ainsi que la distance entre les deux droites passant par les centres optiques et se croisant à un point 3D. De ce fait, ces paramètres géométriques constituent la fonction d'évaluation pour l'algorithme de (Cerveri, Pedotti et Borghese 2001).

$$J = \alpha \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (d_j - L)^2} + \beta \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{e_{int j P}^2 + e_{int j Q}^2}{2} \right)}$$

Équation V-4 Fonction d'évaluation (Cerveri, Pedotti et Borghese 2001)

Où :

- N : nombre de positions de la barre rigide dans la scène.
- L : longueur réelle de la barre rigide (distance entre P et Q).
- d_j : longueur estimée de la barre rigide à un instant (ou position) j .
- $e_{int j P}$: erreur d'intersection des droites passant par les deux centres focaux gauche et droite au niveau du point P.
- $e_{int j Q}$: erreur d'intersection des droites passant par les deux centres focaux gauche et droite au niveau du point Q.
- α et β : sont des facteurs de poids, ils ont été fixé respectivement à 1 et 0,1.

La fonction d'évaluation précédemment décrite est à minimiser, l'algorithme de (Cerveri, Pedotti et Borghese 2001) prévoit de partager les paramètres de calibrages en deux ensembles :

- S_1 : qui regroupe les longueurs focales des deux caméras (f_1 et f_2), le facteur de distorsion (k) ainsi que les paramètres de translation (T) et rotation (R).
- S_2 : qui regroupe les points principaux (c_1 et c_2). Nous rappelons que le point principal est le point d'intersection entre l'axe optique et le plan principal image.

Les paramètres de l'ensemble S_1 sont calculés avec une méthode conventionnelle dite « modélisation à partir du mouvement » tandis que le deuxième ensemble sera optimisé par l'approche évolutionnaire.

V.5.5 Camera Calibration with Genetic Algorithms (Zhang et Ji 2001)

Cette approche (Zhang et Ji 2001) se rapproche de notre méthode pour le calibrage de caméras à l'aide des AG. Elle a pour but de retrouver les paramètres intrinsèques et extrinsèques d'une caméra à l'aide d'une mire de calibrage géométriquement connue.

Nous dénotons par q le vecteur constitué par les paramètres intrinsèques et extrinsèques à estimer : $q = [u_0, v_0, f, s_x, s_y, \omega, \phi, k, t_x, t_y, t_z]^T$.

Où :

- u_0, v_0 : coordonnées du point principal (projection du point focal sur le CCD)
- f : distance focale
- s_x, s_y : facteurs d'échelle (pixels/mm)
- ω, ϕ, k : angles d'Euler sur les trois axes X, Y et Z
- t_x, t_y, t_z : translations sur les trois axes X, Y et Z

Pour des raisons de notation le vecteur q est dénoté par : $q = (q_1, q_2, \dots, q_{11})^T$ où les q_i représentent les paramètres précédemment prédéfinis. Ce vecteur correspond à une solution possible au problème de calibrage et fait partie de l'ensemble des solutions potentielles Q ,

$Q = \{q : q_i \in [q_i^-, q_i^+] ; i = 1, 2, \dots, n\}$, où q_i^- et q_i^+ sont les bornes de l'intervalle de variation donné pour chaque paramètre obtenu. Ces bornes sont transmises à l'AG en entrée et sont obtenues initialement par la connaissance que nous avons de la caméra (des bornes larges peuvent être définies pour les paramètres inconnus). Les paramètres n'ont pas forcément les mêmes bornes.

La fonction d'évaluation à minimiser pour l'AG est la suivante :

$$f(q) = \sum_{i=1}^M [(g(q, X_i) - c_i)^2 + (w(q, X_i) - r_i)^2] \quad q \in Q$$

Équation V-5 Fonction d'évaluation, approche de (Zhang et Ji 2001)

Où :

- c_i, r_i : sont les coordonnées 2D du point de l'espace X_i sur l'image.
- $g(q, X_i)$ et $w(q, X_i)$: sont les fonctions permettant de trouver les coordonnées de la projection d'un point X_i de l'espace sur l'image.

La fonction d'évaluation représente ainsi une distance Euclidienne entre les coordonnées des points de la mire sur le CCD et ceux estimés en utilisant les paramètres caméras estimés d'une solution q .

Le croisement dans cette approche est défini comme suit. Supposons q_1 et q_2 deux solutions potentielles à une génération t . A la génération $t+1$ deux individus fils q_{1a} et q_{2a} peuvent être générés par croisement en suivant la fonction suivante :

$$\begin{aligned} q_{1a} &= (1 - \alpha p_1) q_1 + \alpha p_1 q_2 \\ q_{2a} &= (1 - \alpha p_2) q_2 + \alpha p_2 q_1 \end{aligned}$$

Équation V-6 Fonction de croisement, approche de (Zhang et Ji 2001)

Où :

- α : est la probabilité de croisement définie dans l'intervalle $[0, 1]$.
- p : est un poids qui augmente en fonction de l'évaluation d'un individu.

La mutation d'un individu q_k^t en q_k^{t+1} dans cette approche est définie comme suit :

$$q_k^{t+1} = \begin{cases} q_k^t + I\Delta(t, q_k^+) + (I - 1)\Delta(t, q_k^-) \\ q_k^+, \\ q_k^-, \end{cases} \left| \begin{cases} \Delta(t, q_k^+) = c(q_k^+ - q_k^t)(1 - r^{(1-t/(\alpha T))}) \\ \Delta(t, q_k^-) = c(q_k^t - q_k^-)(1 - r^{(1-t/(\alpha T))}) \end{cases}$$

Équation V-7 Fonction de mutation, approche de (Zhang et Ji 2001)

Où :

- I : est un indicateur prenant la valeur 0 ou 1 en fonction d'un tirage au sort.
- q_k^+, q_k^- : sont les bornes maximales et minimale de l'intervalle de recherche.
- r : est une variable aléatoire dans l'intervalle $[0, 1]$.
- α : variable qui varie dans l'intervalle $[1, 1.15]$.
- T : est le nombre total d'itérations.
- c : est la « Golden Function » définie par les auteurs de la méthode et qui prend la valeur $(3 - \sqrt{5})/2$.

V.6 Conclusion

Le problème du calibrage de caméras est un problème complexe, c'est un problème non linéaire qui nécessite une approximation afin de trouver une solution acceptable à une application donnée.

Différentes applications des AG dans le domaine de la vision par ordinateurs ont été développées et font partie incontestablement du domaine de la vision par ordinateur. Nous avons énuméré différentes techniques présentes dans la littérature scientifique qui concerne le calibrage de caméras. Deux courants méthodologiques s'opposent, d'un côté les partisans des méthodes dites conventionnelles qui se basent sur les calculs géométriques matriciels du modèle sténopé avec une touche d'une méthode d'approximation pour trouver un résultats satisfaisant, et d'autre part, les partisans des méthodes évolutionnaires qui utilisent des AG afin de trouver une solution se rapprochant de l'optimum tout en évitant le piège des minima locaux.

Chapitre VI.

Algorithme génétique pour la calibration

Résumé

Dans ce chapitre nous allons commencer par donner une brève introduction aux algorithmes génétiques. Nous poursuivrons par la description de notre AG pour le calibrage de caméras stéréoscopiques. Nous décriront les données d'entrée, les principaux opérateurs tels que le croisement et la mutation et la fonction d'évaluation qui permet d'évaluer les individus de la population génétique.

VI.1 Introduction

Le calibrage des caméras est une étape cruciale dans la stéréovision (Clarke et Fryer 2003), il permet de déterminer la précision du relief acquis en stéréoscopie. Il consiste à estimer les paramètres des caméras, comme la transformation géométrique d'un appareil photo par rapport à l'autre, mais aussi d'autres paramètres internes à chaque appareil photo telles que la distance focale, la distorsion optique, ou le décentrage du point focal par rapport au CCD.

Différentes techniques de calibrage existent (Z. Zhang 1998), elles sont généralement basée sur le modèle sténopé et utilisent des images d'un objet de référence avec des dimensions connues (Mire de calibrage).

Les méthodes d'optimisation mathématique utilisées peuvent avoir quelques problèmes (stabilité de la méthode, le point initial d'optimisation), et cela a incité les chercheurs à tester des approches basées sur des algorithmes génétiques (Holland 1975).

Des méthodes alternatives de calibrage de caméras autre que celles conventionnelles ont fait depuis relativement peu de temps leur apparition. Ce sont les méthodes basées sur les algorithmes évolutionnaires et plus précisément les Algorithmes Génétiques (AG) qui se classifient autant que méthode d'optimisation stochastique non linéaire.

Dans ce contexte, nous pouvons citer, par exemple (Zhang et Ji 2001), qui étalonne un appareil photo avec un damier, (Cerveri, Pedotti et Borghese 2001) qui utilise l'évolution des stratégies pour l'étalonnage des deux caméras, ou (Dipanda, et al. 2003) qui utilise une caméra et un laser et autres approches citées dans le chapitre précédent.

Nous abordons dans ce chapitre les algorithmes génétiques

VI.2 Apports des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont efficaces pour trouver des solutions se rapprochant le plus de l'optimal dans des espaces de recherche non linéaires et peu explorés. Ils ont été utilisé la plus part du temps pour résoudre des problèmes complexes d'optimisation tel que le calibrage de caméras (Zhang et Ji 2001) (Ji et Zhang 2001) (Huang et Qi 2000) (Guermeur et Louchet 2003) (Whitehead et Roth 2004) (Savii 2004), le calibrage de spectromètres (Sprzeczak et Morawski 2000) ainsi que le calibrage de différents instruments et modèles (Ozdemir et Mosley 1998) (Balascio, Palmeri et Gao 1998).

Les algorithmes génétiques ont un apport considérable pour le calibrage de caméra par rapport aux méthodes conventionnelles, car ils n'ont pas de contraintes vis-à-vis du modèle et

peuvent ainsi explorer toutes les solutions de l'espace de recherche afin d'optimiser le résultat.

Comparés aux méthodes conventionnelles, les algorithmes génétiques offrent les avantages suivants :

- Simples : les AG sont de nature simple, ils utilisent une méthode stochastique afin de se rapprocher de la solution optimale.
- Efficaces : les AG sont particulièrement efficaces dans des domaines où le calcul de la solution optimale linéairement est très difficile voir impossible.
- Flexibles : les AG peuvent s'adapter à des configurations et modèles différents, et n'ont pas besoin de paramètres initiaux précis afin de trouver une solution optimale.
- Robustes : les AG explorent une grande population de solutions, ils peuvent explorer parallèlement différentes sous populations et éviter ainsi de tomber sur un minimum local.

Afin de mieux comprendre le principe de fonctionnement, nous proposons ci dessous une introduction aux AG. Nous nous pencherons ensuite sur les détails de l'AG pour le calibrage de caméras stéréoscopiques proposé en définissant son fonctionnement et ses principaux paramètres.

VI.3 Introduction aux algorithmes génétiques

Les AG sont des algorithmes d'exploration stochastiques basés sur le mécanisme de la sélection naturelle et de l'évolution (J. H. Holland 1992). Ils ont été conçus pour explorer efficacement de grands espaces de solutions non linéaires, où le problème à résoudre ne peut être formulé de manière exacte, mettant ainsi en difficulté les méthodes d'optimisation traditionnelles.

Les AG réalisent une recherche multidirectionnelle dans une population de solutions potentielles. Une population de solutions potentielles est modifiée par l'application d'opérateurs génétiques d'une génération à l'autre. Les principaux « opérateurs génétiques » sont : la génération de la population initiale, l'évaluation de chaque individu, la sélection et le croisement/mutation.

VI.3.1 Opérateurs génétiques

VI.3.1.1 La génération de la population

Cette étape consiste à générer une population constituée de « n » individus, chaque *Individu* représente une ou une partie de la solution. La représentation de chaque individu suit un codage particulier, le plus communément utilisé est le codage binaire. Les individus sont aussi appelés *chromosomes* et leur représentation est un ensemble de *gènes*.

Ex : individu A : 00110100

VI.3.1.2 L'évaluation

Chaque individu (chromosome) est potentiellement une solution au problème à résoudre, mais toutes les solutions n'ont pas le même degré de pertinence. L'évaluation d'un individu ne dépend pas de l'évaluation des autres, elle a pour objectif de donner une note à chacun suivant sa pertinence (*fitness*) au problème traité afin de faire évoluer la population dans le sens des solutions acceptables (Coueque, Ohler et Tollari 2002).

VI.3.1.3 La sélection

Cette opération se base sur la faculté d'adaptation de chaque individu de la population des solutions potentielles à son environnement (théorie de la sélection naturelle introduite par Charles Darwin). Seuls les individus répondant au mieux à certains critères survivent et se multiplient. La fonction d'évaluation évalue chaque chromosome de la population, et seuls ceux qui auront une qualité suffisante seront gardés durant les générations (Coueque, Ohler et Tollari 2002).

La probabilité de sélectionner un individu est proportionnelle à sa note d'évaluation, cela n'empêche pas la sélection d'un individu ayant une note d'évaluation minimale, ou d'exclure le meilleur individu (dans la plus part des cas si le meilleur individu est exclu, il est automatiquement remis dans la nouvelle population).

Cette étape ressemble à celle de la sélection naturelle, les individus les plus adaptés survivent et se reproduisent tandis que ceux qui sont les moins adaptés disparaissent.

Différentes techniques de sélection peuvent être employées, voici les plus importantes :

Sélection par roulette (roue de la fortune) : A la différence de la roue de la fortune classique, ce type de sélection est proportionnel au score de l'évaluation, en d'autres termes, chaque élément de notre roue de la fortune occupe une partie proportionnelle à sa faculté d'adaptation (score). Le tirage quand à lui s'effectue d'une manière classique (homogène).

Sélection par rang : La sélection par rang effectue un tri de la population par fitness. A chaque individu est associé un rang (rang 1 pour le plus mauvais, rang 2 pour le suivant, etc.). Les individus choisis sont ceux qui possèdent les meilleurs rangs, le hasard n'est pas pris en compte dans ce mode de sélection.

Sélection « steady-state » : Le but est de garder la majorité de la population d'une génération à l'autre. A chaque génération sont sélectionnés quelques individus (parmi ce qui ont le meilleur fitness) pour créer des chromosomes fils. Les chromosomes les plus mauvais de la population sont éliminés et remplacés par les nouveaux. Le reste de la population survie à la nouvelle génération.

Sélection par tournoi : La sélection par tournoi a pour principe de choisir « n » individus au hasard et à prendre le meilleur. Autant de tournois sont organisés qu'il y a d'individus à garder.

Sélection uniforme : Dans ce cas, le score d'adaptation n'est pas pris en compte, tous les individus ont la même probabilité de sélection qui est de $1/n$, où « n » est le nombre total d'individu à une itération donnée de l'AG. Ce mode de sélection a peu d'intérêt dans les applications réelles des AG.

VI.3.1.4 Le croisement

Il consiste au fait que deux individus échangent des parties de leur représentation suivant une probabilité donnée. La probabilité de croisement dépend du problème à résoudre et de l'application, dans la plupart des cas la probabilité utilisée est de l'ordre de 70%.

Si la représentation des individus est binaire nous pouvons donner l'exemple suivant :

Individus parents :	A : 00 110100	B : 01 010010
Individus enfants :	A' : 00 010010	B' : 01 110100

VI.3.1.5 La mutation

La mutation est définie par une opération où un gène d'un individu aléatoirement sélectionné, se verra remplacé par un autre. Généralement, la probabilité de mutation d'un individu est fixée entre 0,1% et 1%. Cette probabilité est toujours faible afin d'éviter une recherche de solution aléatoire et de conserver le principe de l'évolution. La mutation évite de faire converger l'algorithme trop rapidement, et ainsi éviter au maximum les extremas locaux.

Si la représentation des individus est binaire nous pouvons donner l'exemple suivant :

Individu avant mutation : A : 001**1**0100

Individu après mutation : A' : 001**0**0100

VI.3.2 Algorithmes génétiques – Schéma d'exécution

L'exécution d'un algorithme génétique d'une façon générale peut être déroulée de la manière suivante (voir Figure VI-1) :

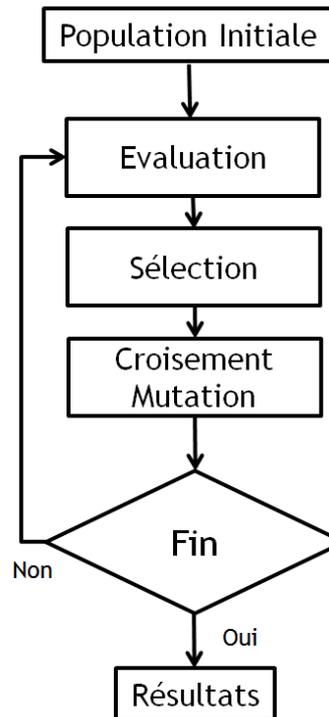


Figure VI-1 Schéma simplifié d'un algorithme génétique

1. Génération aléatoire d'une population de « n » individus (chromosomes)
2. Evaluation de chaque individu de la population
3. Sélection de 2 individus parents en fonction de leur score *fitness*
4. En fonction de la probabilité de croisement, croiser les deux individus parents et ainsi générer deux enfants
5. En fonction de la probabilité de mutation, muter les deux enfants précédemment générés
6. Placer les nouveaux individus dans la population
7. Utiliser la nouvelle population pour une nouvelle exécution de l'algorithme jusqu'à ce qu'une solution approximative satisfaisante soit trouvée

VI.4 Calibrage des caméras stéréoscopiques avec un algorithme génétique

Nous avons opté pour une stratégie évolutionnaire afin d'effectuer le calibrage de nos systèmes d'acquisition stéréoscopique, nous avons ainsi défini une nouvelle méthode de calibrage stéréoscopique basé sur les algorithmes génétiques qui se distingue des autres approches génétiques par les points suivants :

- premièrement, notre approche est spécifique à la stéréoscopie (nous cherchons directement les paramètres qui relient les deux caméras),
- cette méthode utilise le concept de distance entre les points dans sa fonction d'évaluation (elle ne nécessite pas de coordonnées 3D de points spécifiques),
- et enfin, notre méthode peut être appliquée aux deux modèles optiques, Pinhole et télécentrique.

VI.4.1 Données en entrée

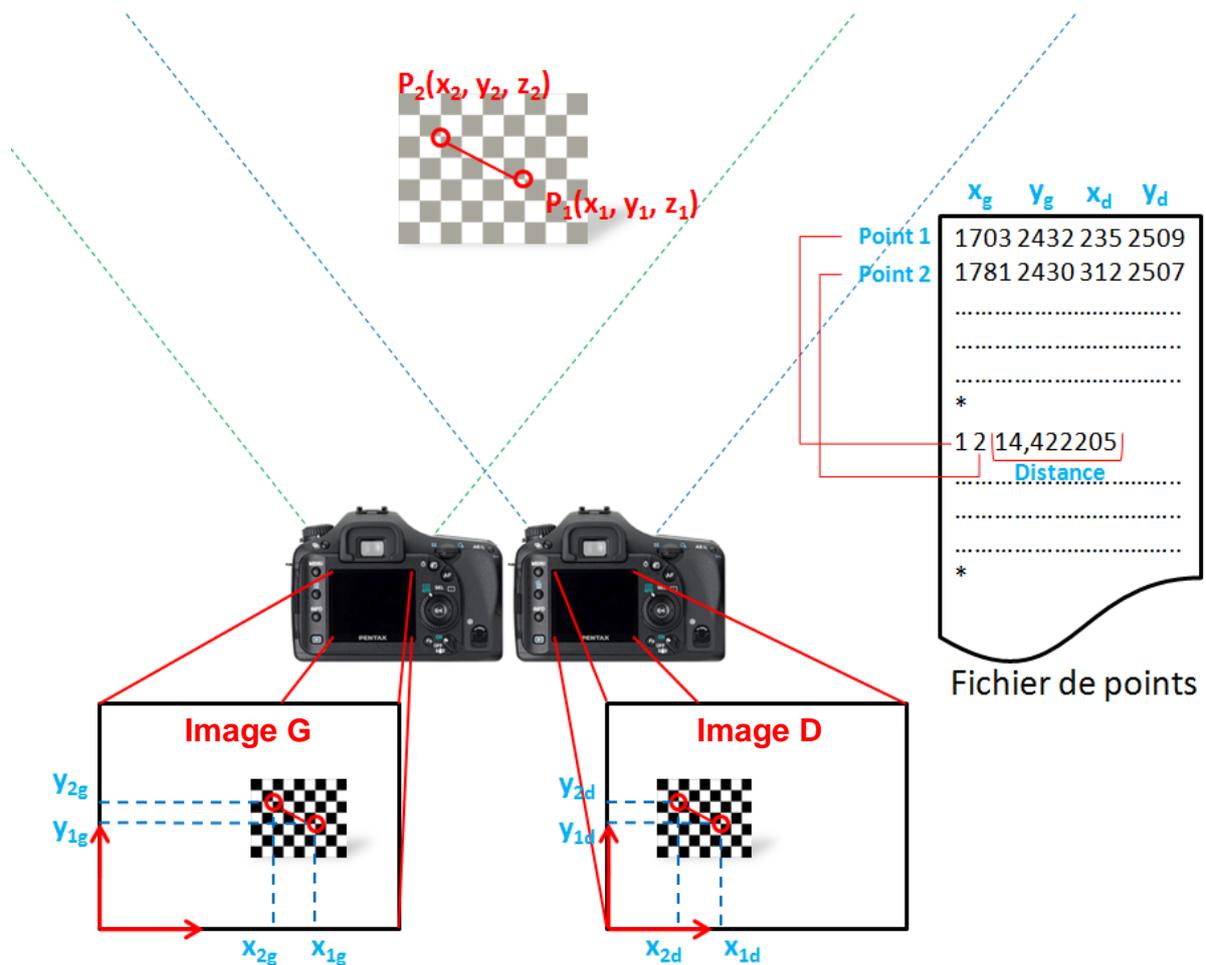


Figure VI-2 Données d'entrée de l'algorithme génétique (ensemble de points et distances)

Les données d'entrée de notre méthode sont un ensemble de distances connues d_1, \dots, d_n entre des points, par exemple ceux d'une mire de calibrage plane, et les coordonnées (x, y) en pixels de ces points sur chaque couple d'images gauche et droite. Peu importe le type des points utilisés du moment que nous connaissons la distance entre eux et leur projection sur le CCD.

Afin de faciliter le processus de calibrage, nous avons utilisé une procédure de détection automatique de ces points (voir Figure VI-3) par le biais d'un programme basé sur la librairie OpenCV (OpenCV s.d.).

Nous prenons ainsi en photo, en utilisant notre dispositif stéréoscopique, une mire (échiquier) dont nous extrayons les coins. Comme mentionné ci-dessus, n'importe quel autre objet avec des dimensions connues pourra aussi être utilisé, et les points n'ont pas à être obligatoirement alignés ou coplanaires.

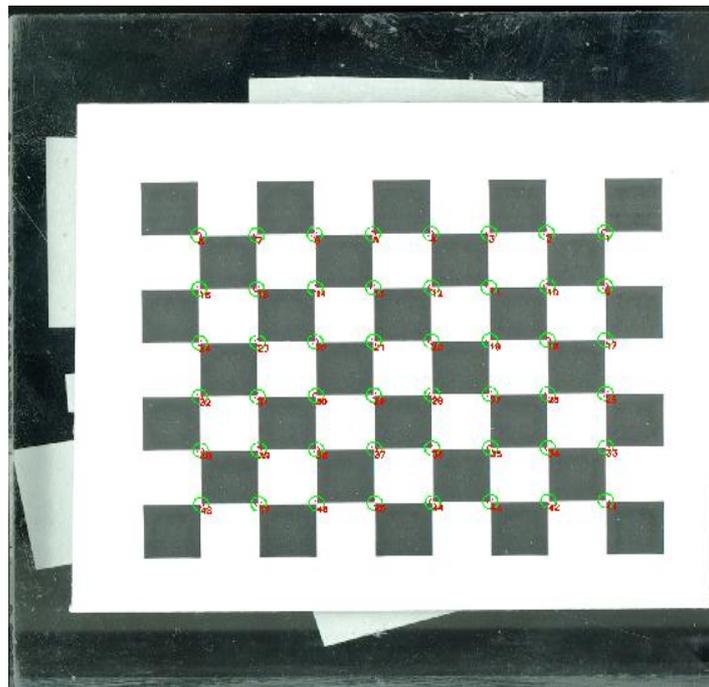


Figure VI-3 Détection des coins d'une mire avec un programme développé avec la librairie OpenCV (OpenCV s.d.)

Un fichier de point est ainsi créé, il contient toutes les coordonnées (x, y) des points de la mire dans les images gauche et droite (voir Figure VI-2), ainsi que des distances entre des points aléatoirement choisis. Un nombre défini de différentes positions de la mire seront capturées par le système d'acquisition, chaque prise de vue permettra de générer un fichier de points correspondant qui servira d'entrée à l'AG.

Les autres données d'entrée concerne les paramètres connus des caméras comme la taille du CCD et sa résolution. Nous fournissons aussi à l'algorithme des bornes initiales aux paramètres à estimer qui limite l'espace de recherche de la solution optimale. Les paramètres à estimer sont : la distance focale des deux caméras, les translations sur les trois axes de la caméra de droite, les trois rotations d'Euler sur les trois axes, le décentrement du point focal ainsi que les paramètres k_1 , k_3 et k_5 de la distorsion optique.

Etant donné P l'ensemble des paramètres p_i à estimer, P est défini comme suit :

$$P = \{p : p_i \in [p_i^-, p_i^+] ; i = 1, 2, \dots, n\}$$

Équation VI-1 bornes initiales des paramètres à estimer

où :

p_i^+, p_i^- : sont les bornes max et min de l'intervalle des valeurs possible du paramètre p_i

n : nombre total de paramètre à estimer

VI.4.2 Représentation génétique des individus

Nous décrivons dans cette section la représentation génétique des individus dans notre AG. Nous dénotons par C_l et C_r respectivement les points focaux des caméras gauche et droite. Nous supposons que le repère du système de coordonnées est centré sur C_l qui aura comme coordonnées $(0, 0, 0)$ (voir Figure VI-4).

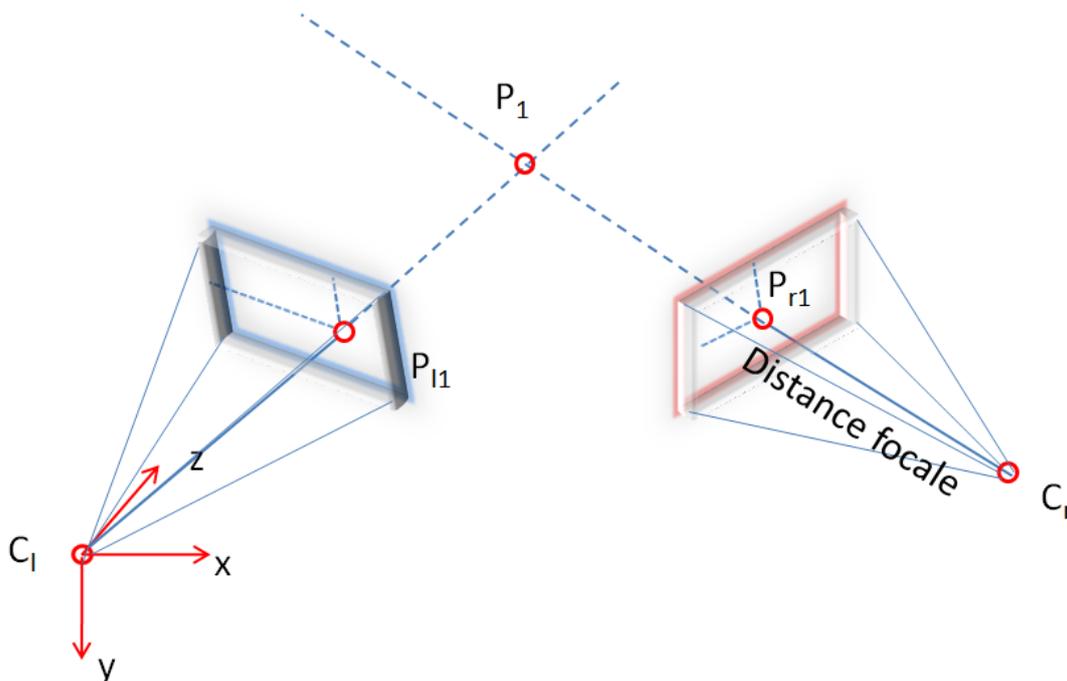


Figure VI-4 Système de coordonnées des caméras

Nous voulons trouver la matrice qui passe les coordonnées d'un point P_r se trouvant dans le système de coordonnées local de C_r aux coordonnées globales du système ayant pour repère C_l . Pour cela, nous avons estimé :

- 1) Les translations de C_r à C_l : (T_x, T_y, T_z)
- 2) Les angles de rotation d'Euler de C_r à C_l : (R_x, R_y, R_z)

A ces six paramètres initiaux l'utilisateur pourra définir une petite translation 2D des centres des lentilles par rapport aux centres des CCD, c'est-à-dire, 4 paramètres de translation (translation en x et y de la caméra gauche et celle de droite). Sachant que tous les paramètres à estimer sont des nombres réels bornés par les intervalles fournis en entrée.

L'utilisateur pourra aussi optimiser les paramètres de distorsion qui sont représentés par les coefficients k_1 , k_3 et k_5 pour chacune des deux caméras (i.e. distorsion en « barillet » ou en « croissant ») (voir Figure V-3).

Finalement, puisque notre méthode est compatible avec les systèmes optique Pinhole et télécentrique, nous avons ajouté deux paramètres à estimer : dans le premier cas (Pinhole) il s'agit de deux distances focales, dans le deuxième cas il s'agit de deux facteurs d'agrandissement (échelle).

La représentation génétique d'un individu (i.e. solution possible au problème de calibrage) est donc représentée sous forme de vecteur à 16 paramètres. Ces « gènes » sont encodés avec des valeurs réelles.

VI.4.3 Fonction d'évaluation

La fonction d'évaluation F qui mesure la finesse d'un individu I est basée sur les principes suivants. Nous considérons l'ensemble des distances d_1, \dots, d_n qui ont été fournies à notre méthode. Nous calculons les distances estimées correspondantes d_1', \dots, d_n' selon les paramètres donnés par I .

Pour une distance donnée d_i qui a été calculée entre deux points réels P_1 et P_2 , nous calculons d_i' de la manière suivante : considérons $P_{l1}, P_{r1}, P_{l2}, P_{r2}$ comme étant respectivement les projections de P_1 et P_2 sur les CCD gauche et droite. Nous calculons deux points estimés P_1' et P_2' . Ces points sont obtenus par le calcul de l'intersection entre les droites 3D correspondantes (par exemple pour le point P_1 , ces lignes sont (C_b, P_{l1}) et (C_r, P_{r1})).

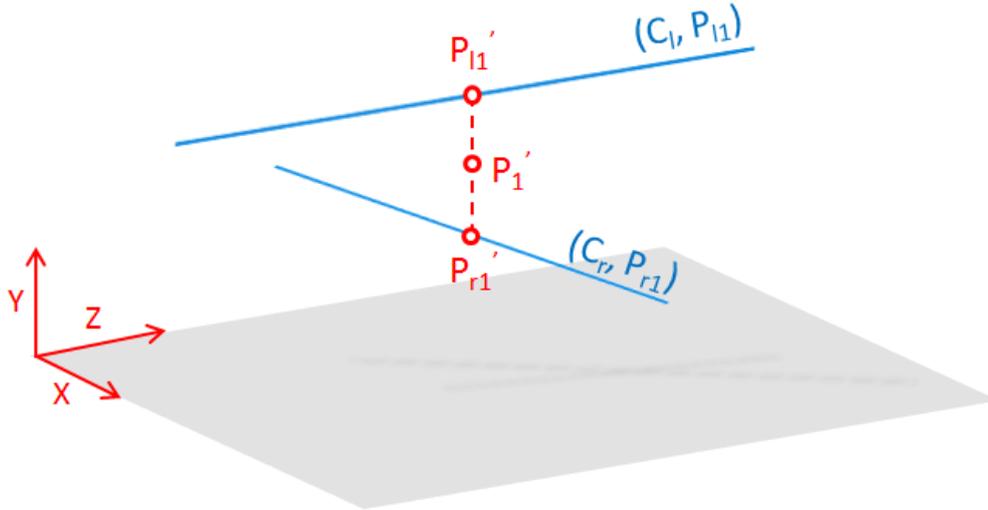


Figure VI-5 Intersection imparfaite entre deux droites 3D définissant la position d'un point P_1 dans l'espace

Avec des données réelles et la discrétisation dues aux pixels, l'intersection n'est pas exacte (voir Figure VI-5), ce qui nous pousse à calculer le segment de droite le plus court entre les deux lignes, et nous considérons son milieu comme intersection de nos deux droites dans l'espace.

L'erreur de l'intersection utilisée ci-dessous est la longueur du segment (qui vaut 0 si l'intersection est parfaite). Notons e_μ , la valeur qui correspond à l'erreur moyenne entre des distances réelles d_i entre des couples de points de la mire et celles estimées d'_i calculés avec la triangulation en utilisant les paramètres caméras optimisés :

$$e_\mu = \frac{1}{n} \sum (d_i - d'_i)^2$$

Équation VI-2 erreur moyenne entre les distances réelles d_i et estimées d'_i

Notons e_\cap , qui correspond à l'erreur d'intersection moyenne. Finalement la fonction d'évaluation est la suivante :

$$F(I) = e_\mu * [1 + \alpha e_\cap]$$

Équation VI-3 Fonction d'évaluation de l'AG

où α est le poids qui ajuste l'importance relative des deux erreurs de mesure. Globalement, nous voulons minimiser l'erreur moyenne des distances. Nous ajoutons une contrainte liée à l'erreur d'intersection comme mentionné dans (Cerveri, Pedotti et Borghese 2001). Nous avons expérimentalement observé qu'un alpha égal à 0,1 permettait d'obtenir une plus grande

précision du calibrage. En effet, nous avons effectué des tests sur un ensemble de données Pentax, en variant α ($\alpha=0, \alpha=0.001, \alpha=0.05, \alpha=0.1, \alpha=0.5, \alpha=1$) (voir Figure VI-6).

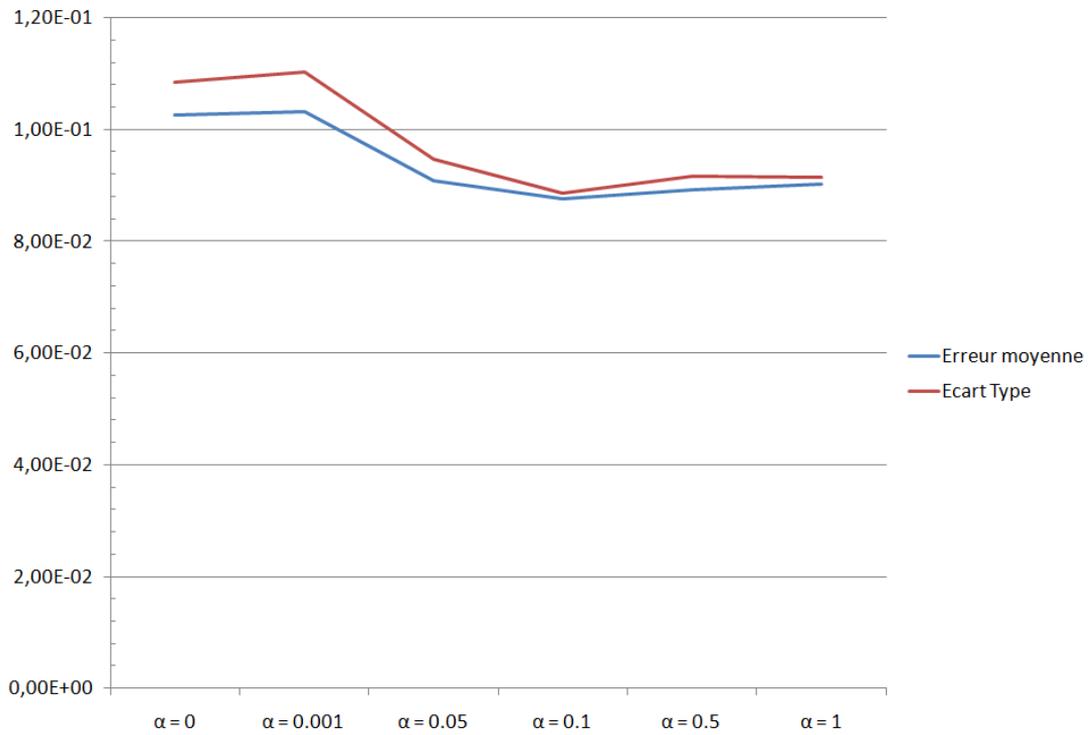


Figure VI-6 Précision du calibrage en *mm* du système Pentax utilisant différentes valeurs du poids α (meilleure précision quand $\alpha = 0,1$)

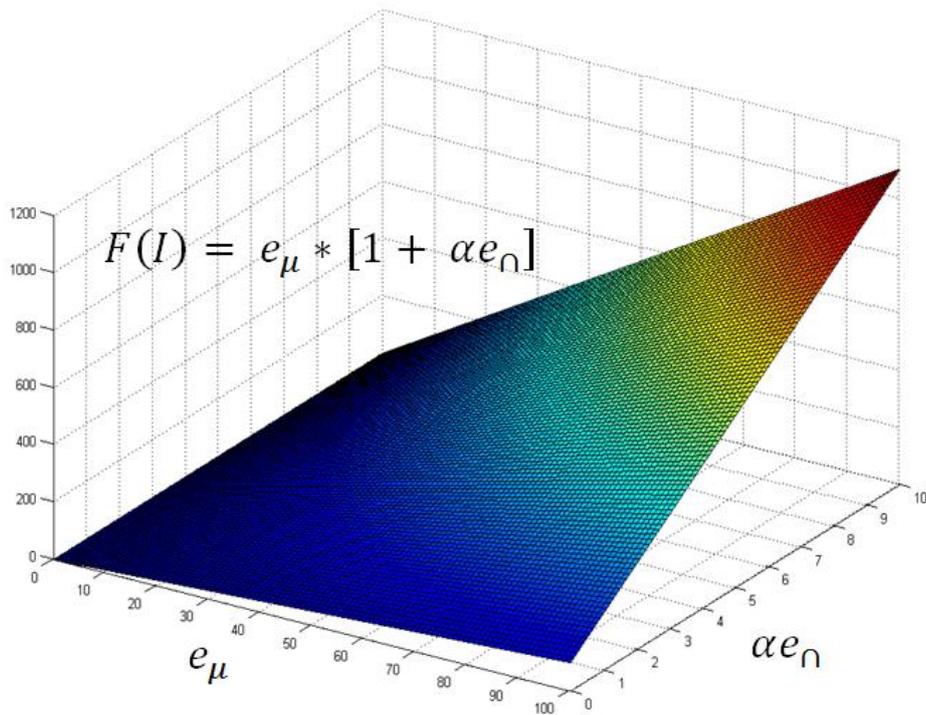


Figure VI-7 Graphe de la fonction d'évaluation (MathWorks s.d.)

La fonction d'évaluation est représentée par un graphe en 3D (MathWorks s.d.) Ci-dessus (voir Figure VI-7), l'axe x représente e_μ , l'axe y représente αe_η et l'axe z représente l'évaluation de l'individu.

Nous avons représenté notre AG pour le calibrage de caméra stéréoscopique dans la Figure VI-11. Les différents opérateurs nécessaires à son exécution sont décrits ci-dessous.

VI.4.4 Génération de la population initiale

Afin d'optimiser l'AG, nous avons opté pour une génération favorisée de la population initiale, pour une population initiale désirée N par exemple, un nombre $N*300$ d'individus sera généré aléatoirement suivant les bornes initiales, et nous ne garderons que les N meilleurs. Une génération de la population initiale non favorisée avec notre AG est aussi possible.

Nous avons utilisé un algorithme génétique générationnel où les deux meilleurs individus sélectionnés de deux couples pris aléatoirement de la population sont copiés d'une génération à une autre. Il utilise une sélection en tournoi qui sélectionne quatre individus, ensuite une autre sélection en tournoi est appliquée qui permettra de garder deux individus pour la reproduction.

VI.4.5 Croisement

Nous avons implémenté deux opérateurs de croisement : un opérateur de recombinaison linéaire, et un opérateur de croisement uniforme. A chaque génération la probabilité d'utiliser l'un ou l'autre est de 50%.

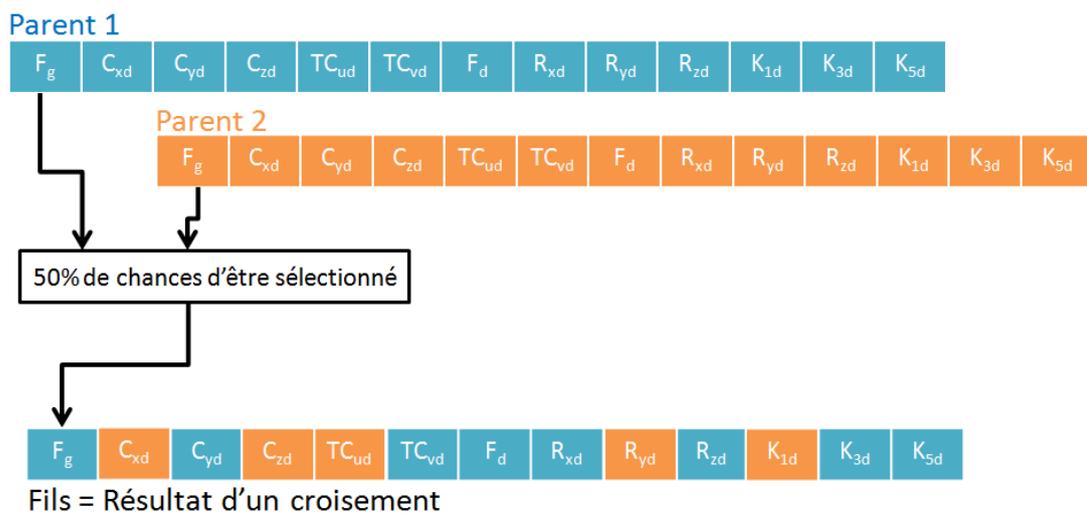


Figure VI-8 Croisement uniforme

Lors de l'application d'un croisement uniforme (voir Figure VI-8), le nombre de points de coupure (gènes à permuter entre les deux parents) n'est pas connu à priori, une probabilité de 50% détermine ainsi pour chaque gène si il va être permuté entre les deux parents ou pas.

Lors de l'application d'un croisement de type recombinaison linéaire (voir Figure VI-9), chaque gène de l'individu fils représentera la moyenne entre les deux gènes parents. La probabilité de croisement est de l'ordre de 0.85.

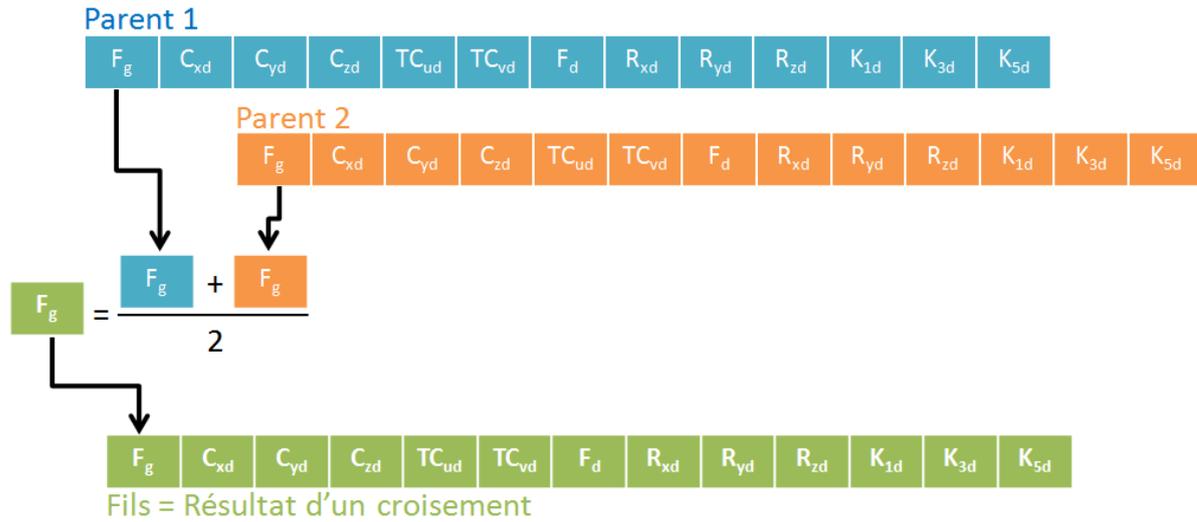


Figure VI-9 Croisement à recombinaison linéaire

VI.4.6 Mutation

L'opérateur de mutation ajoute du bruit généré aléatoirement à un paramètre avec une probabilité de mutation P_{mut} . La probabilité de mutation est fixée à 0.1.

Etat donné p_i un gène composant un individu i , et p_i' est le même gène après avoir subi une mutation, nous pouvons formuler la mutation comme suit :

$$p_i' = p_i + [(\beta - 1/2) * \psi * (p_i^+ - p_i^-)]$$

Équation VI-4 Fonction de mutation

Où :

β : est un nombre réel aléatoirement choisit dans l'intervalle $[0, 1]$.

ψ : est un coefficient de réduction de mutation.

p_i^- et p_i^+ : sont respectivement les bornes max et min de l'intervalle des valeurs possibles du paramètre i .

VI.4.7 Ascension locale

L'ascension locale est une technique d'optimisation mathématique qui appartient à la famille des algorithmes d'exploration locale. Cette technique est utilisée pour la résolution des

problèmes ayant plusieurs solutions possibles plus ou moins bonnes. Elle cherche une meilleure solution (si elle existe) dans le voisinage d'une solution existante (trouvée par l'AG dans notre cas).

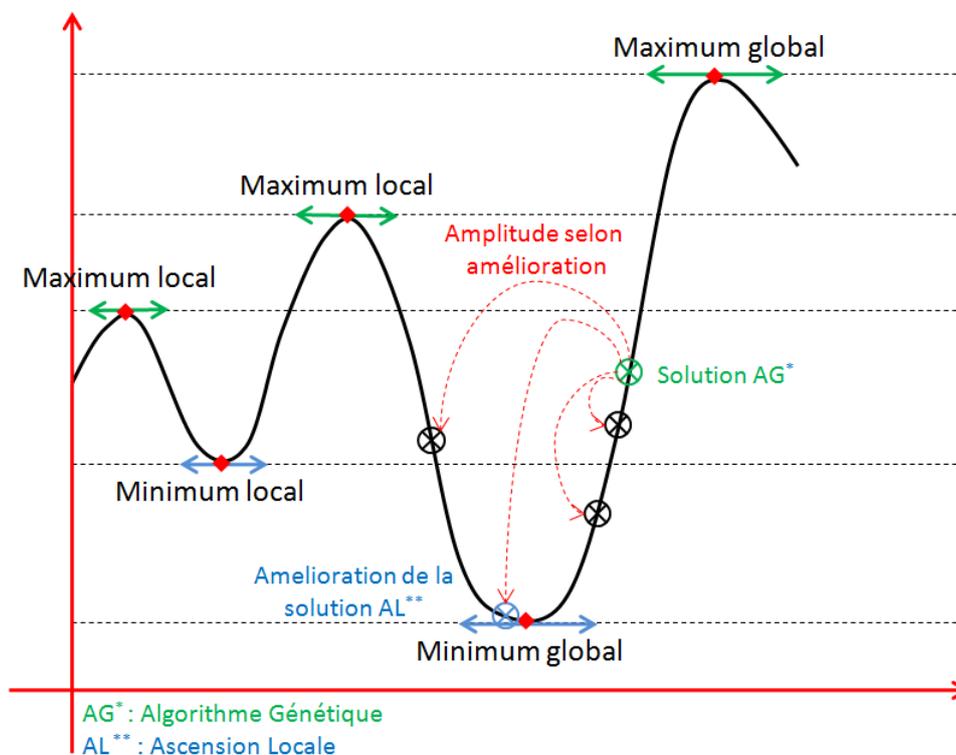


Figure VI-10 Amélioration de la solution avec ascension locale (cas d'une fonction de minimisation)

Cet algorithme intervient sur une solution stochastique potentiellement non optimale, il applique des changements (mutations) suivant une fonction particulière sur la solution en question, et évalue la nouvelle solution trouvée. Si la solution est meilleure il continue l'opération en mutant encore cette dernière sinon il considère qu'il a trouvé l'optimum. Notons que cet algorithme améliore une bonne solution trouvée mais le risque de rester dans un minima local existe toujours.

Notre algorithme génétique se met en pause quand les améliorations relatives du meilleur individu est en dessous d'un seuil T (T égale 0.1%). Dans ce cas, nous utilisons un algorithme d'ascension locale basé sur l'exploration aléatoire du voisinage local du meilleur individu.

Cet opérateur de recherche est comme une mutation aléatoire ayant une amplitude variable (voir Figure VI-10). Quand la mutation est réussie, nous augmentons l'amplitude, et quand ce n'est pas le cas, nous le diminuons. Cet opérateur de recherche local est donc similaire à la stratégie d'évolution (1+1) (Baeck, Hoffmeister et Schwefel 1991).

VI.4.8 Algorithme global

// Initialisation de la population

1. **Pour** $i=1$ à $N*300$ **Faire** Générer individus (génération aléatoire dans des intervalles définis)

2. $Population \leftarrow$ les N meilleurs individus // **Garder les N meilleurs individus**

// Générer la population suivante

3. **Tant que** amélioration $> T$ **Faire**

Répéter $N-1$ fois:

a) Sélectionner 2 parents de la population par tournoi

b) Faire un croisement (soit linéaire ou uniforme) avec la probabilité P_c

c) Muter l'une des progénitures (dénnoté par I)

d) Evaluer I

e) Ajouter I à la *Nouvelle population*

4. $Population \leftarrow$ *Nouvelle population* + meilleur individu précédent

5. **Fin tant que**

6. Réaliser une ascension locale à partir du meilleur individu

7. **Si** Amélioration $> T$ **Alors** Aller à 3

8. **Sinon** Afficher le meilleur individu

Figure VI-11 Aperçu général de l'algorithme génétique pour le calibrage

VI.5 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre notre algorithme génétique pour le calibrage des caméras qui se distingue de la majorité des AG disponibles dans la littérature de l'intelligence artificielle pour la vision par ordinateur par le fait qu'il est spécifique aux systèmes d'acquisition stéréoscopiques.

La fonction d'évaluation de notre AG se base sur deux facteurs importants, qui sont l'erreur moyenne de la distance estimée en utilisant les paramètres d'un individu i , et l'erreur d'intersection moyenne entre les deux droites qui permettent d'estimer la position d'un point dans l'espace. Ces deux facteurs couplés ensemble pour former la fonction d'évaluation ont démontré leur efficacité lors de la sélection des individus les plus rapprochés de la solution optimale.

Chapitre VII.

Paramétrage de la méthode et évaluation sur des données artificielles

Résumé

Nous abordons tout d'abord dans ce chapitre la problématique du paramétrage de l'AG. Nous effectuons plusieurs évaluations concernant la variation de plusieurs paramètres pertinents afin de trouver le bon réglage. Nous exposons la variabilité de la précision du calibrage et des paramètres caméras au cours de plusieurs exécutions de l'AG.

Nous nous intéressons ensuite à l'évaluation de notre AG sur des données artificielles. Cette évaluation sera effectuée sur des caméras et des points d'apprentissage virtuels afin d'éliminer tous les facteurs réels liés au matériel et à l'optique. Une distance est calculée entre les paramètres trouvés par l'AG et ceux définis pour les caméras artificielles.

VII.1 Introduction

Le paramétrage de notre AG pour le calibrage est décisif pour obtenir une bonne précision lors de l'estimation des paramètres des caméras. En effet, les AG se basent sur différentes variables leur permettant de converger vers une solution au problème exposé. Ces variables sont appelées paramètres de l'AG.

Les paramètres de l'AG peuvent déterminer la nature du croisement/mutation et la taille de la population, ils concernent toutes les étapes du déroulement de l'AG, en commençant par l'initialisation de la population, en passant par l'évolution et en finissant par l'évaluation des individus. Chaque étape a en effet un ensemble de paramètres la concernant variant d'un problème à un autre.

Nous définissons dans notre approche un paramétrage adapté à une problématique liée à un système d'acquisition constitué d'appareils photos de type Pentax K10D, et essayons ensuite de voir si ces paramètres peuvent être adaptés à un autre système d'acquisition constitué de Canon 1Ds Mark III.

Nous nous intéressons en deuxième partie à l'évaluation de notre AG sur des données artificielles. Cette évaluation sera effectuée sur des caméras et des points d'apprentissages artificiels afin d'éliminer tout les facteurs réels liés au matériel et à l'optique. Nous définissons deux caméras stéréoscopiques (définition des paramètres intrinsèques et extrinsèques) afin de générer un groupe de points dans l'espace. Ce groupe de points servira comme points d'apprentissage pour notre AG afin de comparer les paramètres caméras trouvés et ceux précédemment définis.

VII.2 Paramétrage de l'AG

Plusieurs paramètres entrent dans le déroulement de l'AG. Nous avons déterminé un ensemble d'entre eux qui nous paraissent les plus pertinents. Ces paramètres sont :

- Bornes initiales
- Taille de la population
- Probabilité de croisement
- Probabilité de mutation
- Coefficient de l'erreur du point (Fonction d'évaluation)
- Ascension locale (générationnelle ou finale)

▪ Nombre de générations

Afin de définir les bonnes valeurs pour les paramètres de l'AG, nous avons effectué une évaluation de la précision de calibrage suivant la variation d'un ensemble de ces paramètres. Nous avons commencé par effectuer le paramétrage de l'AG en utilisant des fichiers de points composés de 92 distances entre des coins aléatoirement choisis d'une mire de 4mm prise en photo par un système d'acquisition constitué de deux Pentax K10D à 10Mp chacun, munis d'objectifs Pentax 50mm macro. Nous avons fourni à notre AG cinq images de la mire à différentes orientations pour l'apprentissage, ainsi que trois autres images pour le test.

Les différents couples d'images servant à l'apprentissage et le test sont convertis en fichiers d'entrées (voir la section VI.4.1), les images test servent à évaluer la qualité des paramètres obtenus en apprenant sur les autres images.

VII.2.1 Probabilité de croisement et mutation

Nous nous sommes tout d'abord demandés, quelle était l'influence du couple probabilité de mutation et probabilité de croisement dans la précision moyenne des résultats de l'AG.

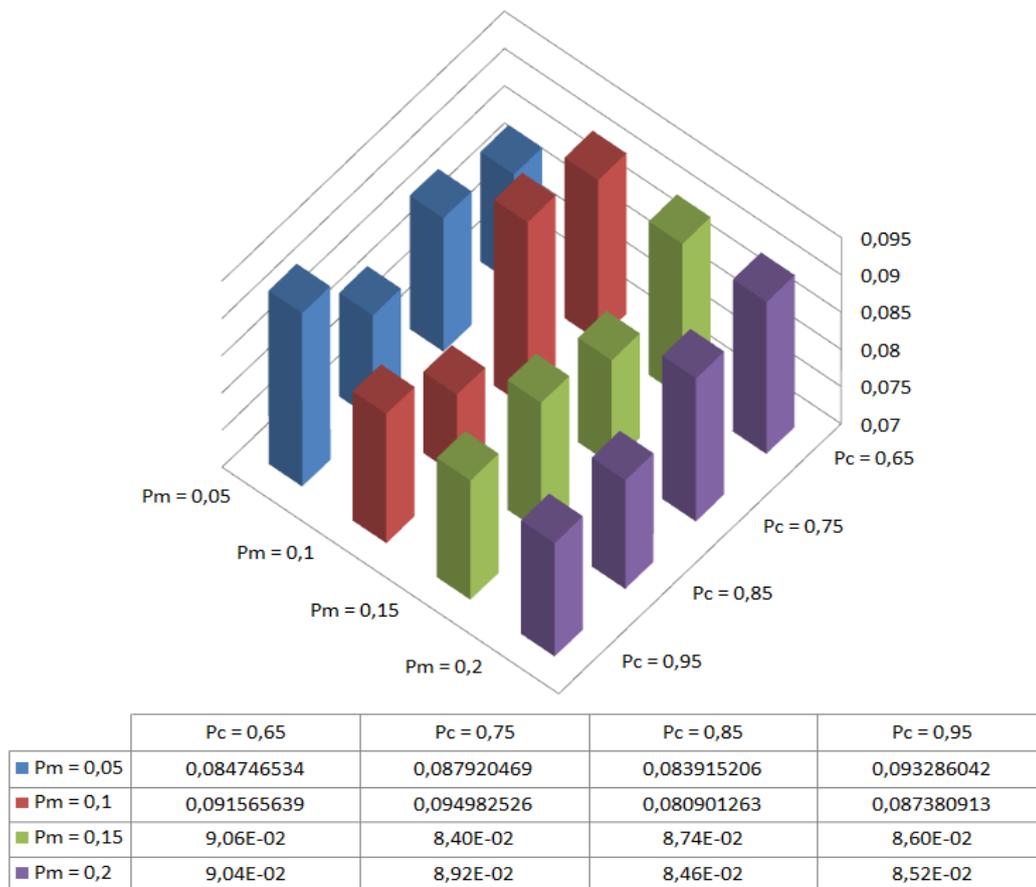
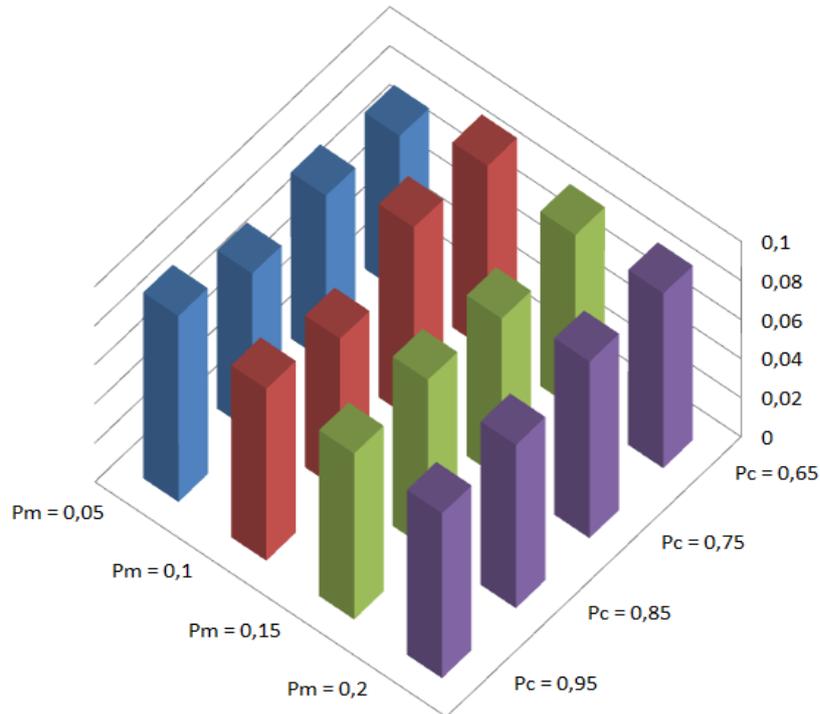


Figure VII-1 Moyenne (10 executions) de la précision en mm de l' algorithme génétique (en calculant des distances aléatoires sur les images de test) en fonction de la probabilité de croisement et probabilité de mutation



	Pc = 0,65	Pc = 0,75	Pc = 0,85	Pc = 0,95
Pm = 0,05	0,079825155	0,085159847	0,081062066	0,095204314
Pm = 0,1	0,094648426	0,099021917	0,077776517	0,088058974
Pm = 0,15	8,93E-02	8,23E-02	8,68E-02	8,49E-02
Pm = 0,2	8,95E-02	9,04E-02	8,36E-02	8,45E-02

Figure VII-2 Ecart type (10 executions) de la précision en mm de l' algorithme génétique (en calculant des distances aléatoires sur les images de test) en fonction de la probabilité de croisement et probabilité de mutation

Nous avons fixé les autres paramètres (nous avons pris les paramètres couramment utilisés pour ce système), et nous avons fait varier la probabilité de mutation en fonction de la probabilité de croisement.

Les résultats obtenus (voir Figure VII-1), montrent clairement que le couple donnant la meilleur précision était : Probabilité de mutation = 0,1 et Probabilité de croisement = 0,85. Les valeurs de ces deux paramètres seront utilisées pour la continuation du paramétrage des autres variables.

VII.2.2 Taille de la population et bornes initiales

Nous nous sommes ensuite penchés sur la question de l'influence de la taille de la population d'apprentissage en fonction des bornes initiales sur la précision des résultats de calibrage de l'AG. Nous avons défini 3 catégories de bornes initiales qui sont : bornes larges, moyenne et serrées (voir Tableau VII-1). Les bornes initiales des paramètres caméras

précédemment utilisées ont été supposés « Bornes moyennes ». Nous avons divisé les intervalles sur deux pour chaque paramètre afin d'obtenir des bornes serrées, et nous les avons élargi de deux fois pour obtenir des bornes larges.

Bornes serrées		Bornes moyennes		Bornes larges	
Paramètres caméra	Intervalle	Paramètres caméra	Intervalle	Paramètres caméra	Intervalle
cx	75 85	cx	70 90	cx	60 100
cy	-3 3	cy	-5 5	cy	-10 10
cz	-3 3	cz	-5 5	cz	-10 10
f	48 53	f	45 55	f	40 60
rx	-5 5	rx	-10 10	rx	-20 20
ry	-5 5	ry	-10 10	ry	-20 20
rz	-5 5	rz	-10 10	rz	-20 20

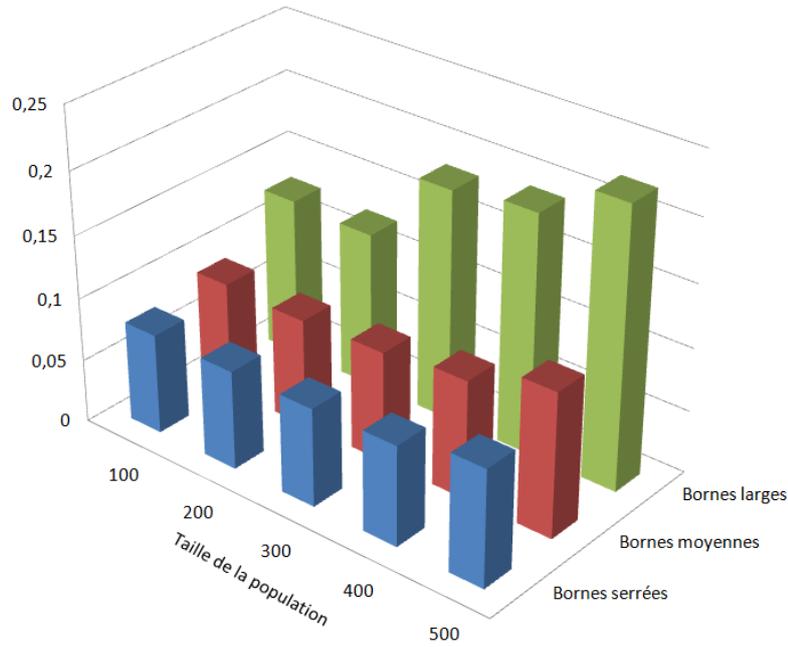
Tableau VII-1 Les différents intervalles pour les paramètres caméra

Nous avons exécuté l'AG en utilisant 5 tailles de populations génétiques différentes : 100, 200, 300, 400, 500. Les résultats sont affichés dans la figure suivante (voir Figure VII-3 et Figure VII-4).

Nous remarquons que la précision de l'algorithme génétique est directement liée à la largeur des bornes initiales, cela est logique car l'algorithme génétique a moins de chance de générer des valeurs très éloignées de l'optimum. Dans des cas réels, pour pouvoir restreindre l'intervalle des bornes initiales, plusieurs exécutions successives de l'AG sont possibles, afin de canaliser cette restriction au plus proche de la configuration réelle des caméras.

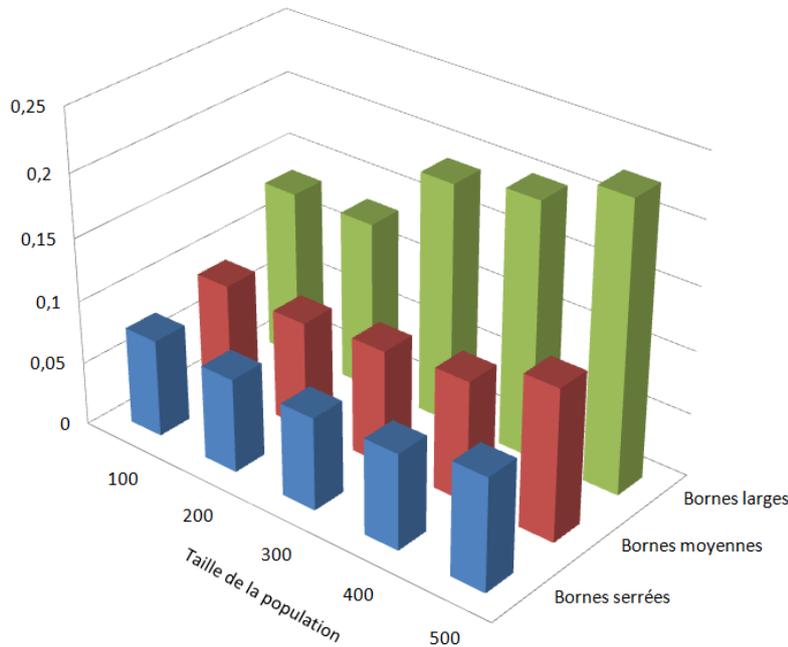
Concernant la taille de la population génétique, nous avons remarqué qu'à hauteur de 200 individus, la précision de l'AG est la meilleure relativement à la taille des bornes initiales utilisées.

Cette évaluation nous a permis aussi de ne détecter aucune relation directe entre la largeur des bornes et la taille de population. Avoir des bornes larges et une grande population, ne donne pas une meilleure précision qu'avec les mêmes bornes et une plus petite population.



	100	200	300	400	500
Bornes serrées	0,079756154	0,078702842	0,078428625	0,079837629	0,093257422
Bornes moyennes	8,91E-02	8,64E-02	8,83E-02	9,46E-02	1,15E-01
Bornes larges	1,27E-01	1,25E-01	1,84E-01	1,91E-01	2,23E-01

Figure VII-3 Moyenne de la précision de l' algorithme génétique en mm, en fonction de la taille de la population et des bornes initiales



	100	200	300	400	500
Bornes serrées	0,077335975	0,07456831	0,073570723	0,076264605	0,08950507
Bornes moyennes	8,97E-02	8,63E-02	9,16E-02	9,63E-02	1,20E-01
Bornes larges	1,35E-01	1,35E-01	1,91E-01	2,02E-01	2,28E-01

Figure VII-4 Ecart type de la précision de l' algorithme génétique en mm, en fonction de la taille de la population et des bornes initiales

VII.2.3 Fonction d'évaluation et ascension locale

Afin d'évaluer chaque individu de la population, l'AG utilise la fonction d'évaluation suivante:

$$F(I) = e_{\mu} * [1 + \alpha e_{\sigma}]$$

Équation VII-1 Fonction d'évaluation de l'AG

où e_{μ} est la précision moyenne, e_{σ} l'erreur d'intersection entre les deux droites qui passent par les points focaux gauche et droite (les coordonnées d'intersection de ces deux droites représente les coordonnées du point réel dans l'espace) et finalement α qui représente le poids de e_{σ} dans la fonction d'évaluation précédemment défini (voir section VI.4.3).

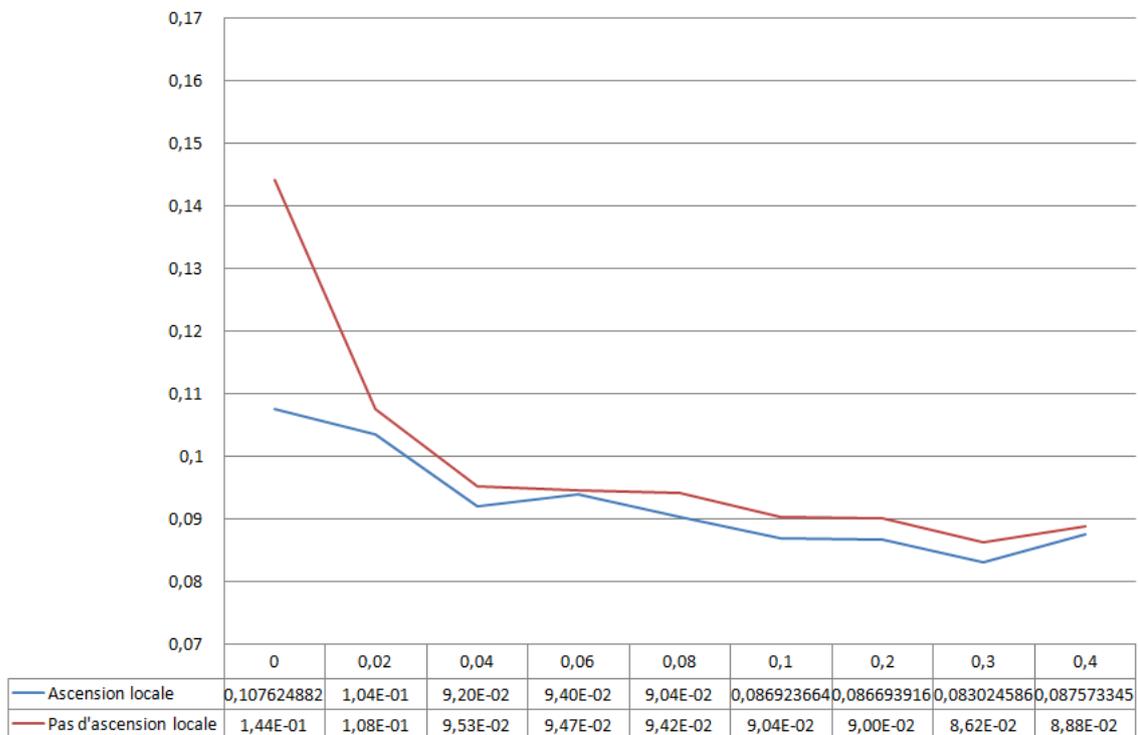


Figure VII-5 Moyenne de la précision de l'algorithme génétique en fonction du coefficient erreur point et de l'ascension locale finale

Selon le paramétrage de l'AG, une ascension locale peut être utilisée dans le but de rechercher une meilleure solution voisine de celle retrouvée par l'AG. L'ascension locale peut être exécutée à la fin de l'exécution de l'AG, nous appellerons cette opération *d'Ascension locale finale*, comme nous pourrions l'exécuter à chaque génération de population, nous appellerons ainsi cette opération *d'Ascension locale générationnelle*.

Nous avons voulu étudier l'impact du poids α de la fonction d'évaluation et de l'ascension locale finale sur la précision de l'AG. Nous avons fait varier le coefficient α de 0 à 0,4 en utilisant ou non l'ascension locale finale.

Nous avons remarqué premièrement (voir Figure VII-5 et Figure VI-5), que le coefficient α avait un effet mesurable en passant de la valeur 0 à 0,1, son utilisation améliore considérablement la précision moyenne de notre AG. Nous avons remarqué aussi que la valeur de α mise à part la valeur nulle n'affecté pas la précision de manière directe, nous supposant ainsi α égale à 0,1 pour la plus part des tests suivants.

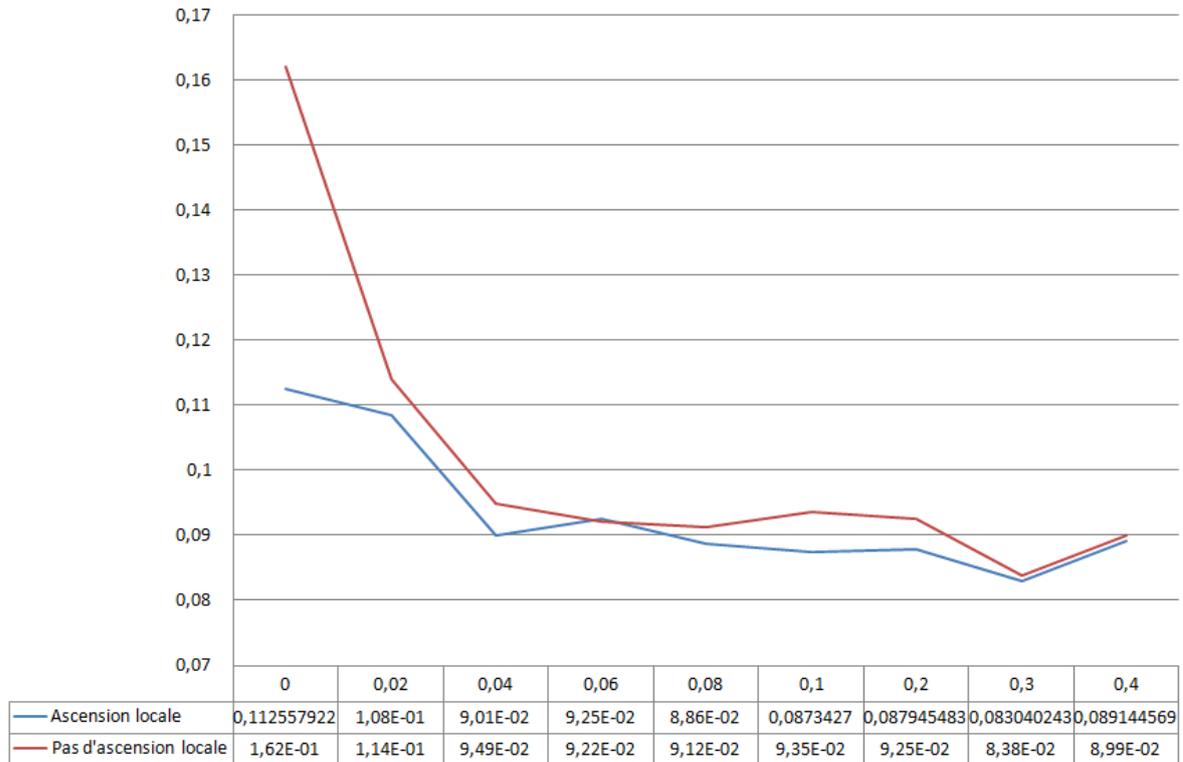


Figure VII-6 Ecart type de la précision de l'algorithme génétique en fonction du coefficient erreur point et de l'ascension locale finale

Les résultats affichés dans la figure précédente (voir Figure VII-5), nous montrent aussi une amélioration significative de la précision de l'AG en utilisant l'ascension locale finale.

VII.2.4 Robustesse de l'AG et variation des paramètres caméra

Les algorithmes génétiques sont des méthodes stochastiques. Contrairement aux méthodes dites conventionnelles, les AG ne donnent pas forcément le même résultat à la suite de deux exécutions en ayant des entrées et des paramètres identiques. L'enjeu est de mesurer la variation des résultats, et de juger si la précision (différence entre le Min et le Max de la variation) est acceptable pour l'application réelle. Nous avons donc fait tourner notre AG pour le calibrage 10 fois à la suite, en ayant comme entrée les mêmes paramètres. Nous avons ensuite tracé un graphe pour chaque paramètre pertinent afin de voir son comportement relatif aux autres paramètres au cours des exécutions (voir Figure VII-7).

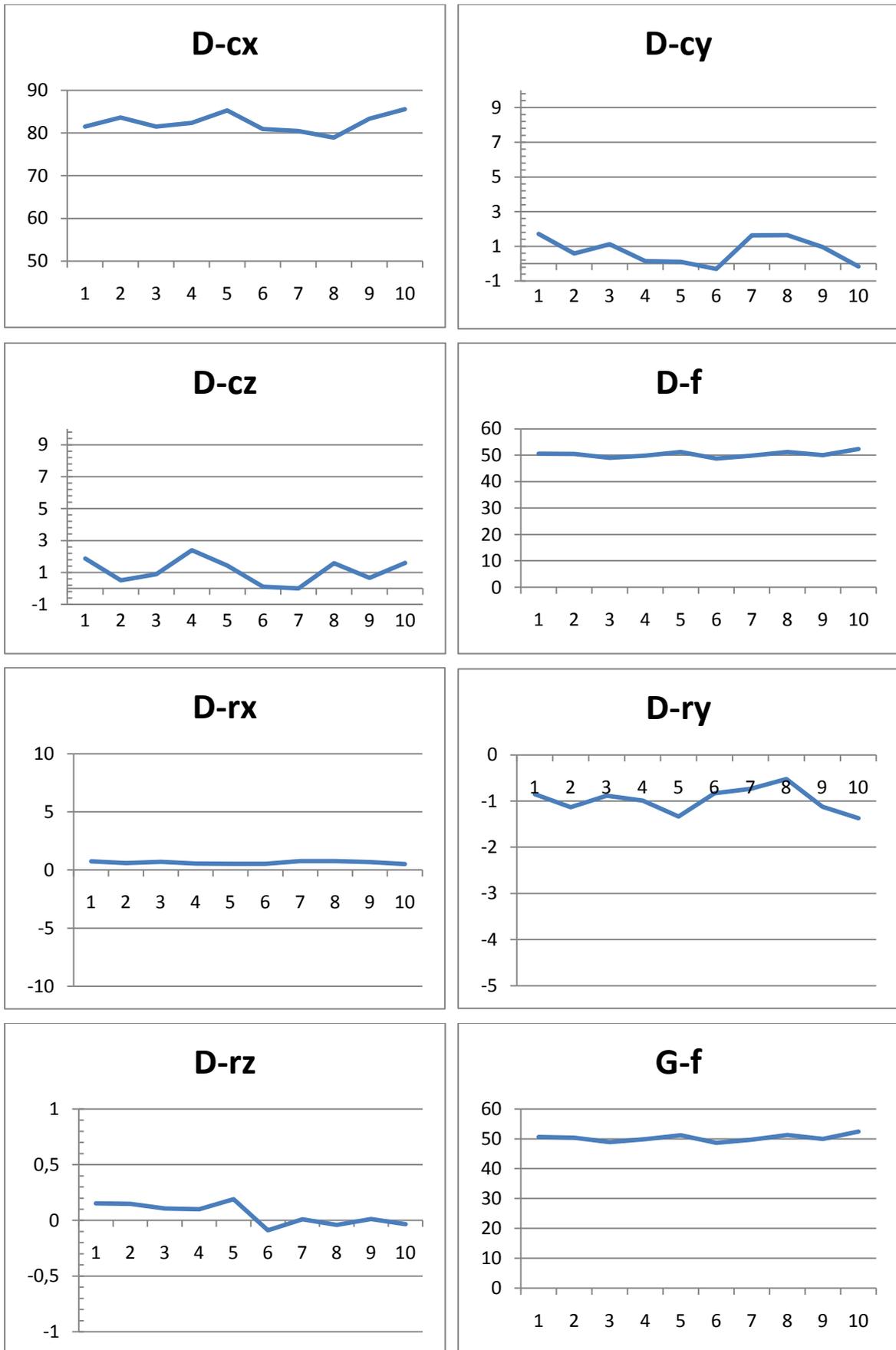


Figure VII-7 Variation des paramètres caméra sur 10 exécutions de l' algorithme génétique

Les graphes des variations des paramètres ont été mis à des échelles différentes afin de percevoir les variations qu'elles soient minimales ou pas. Le graphe suivant (voir Figure VII-8) montre la variation de la précision de l'AG au cours des mêmes exécutions.

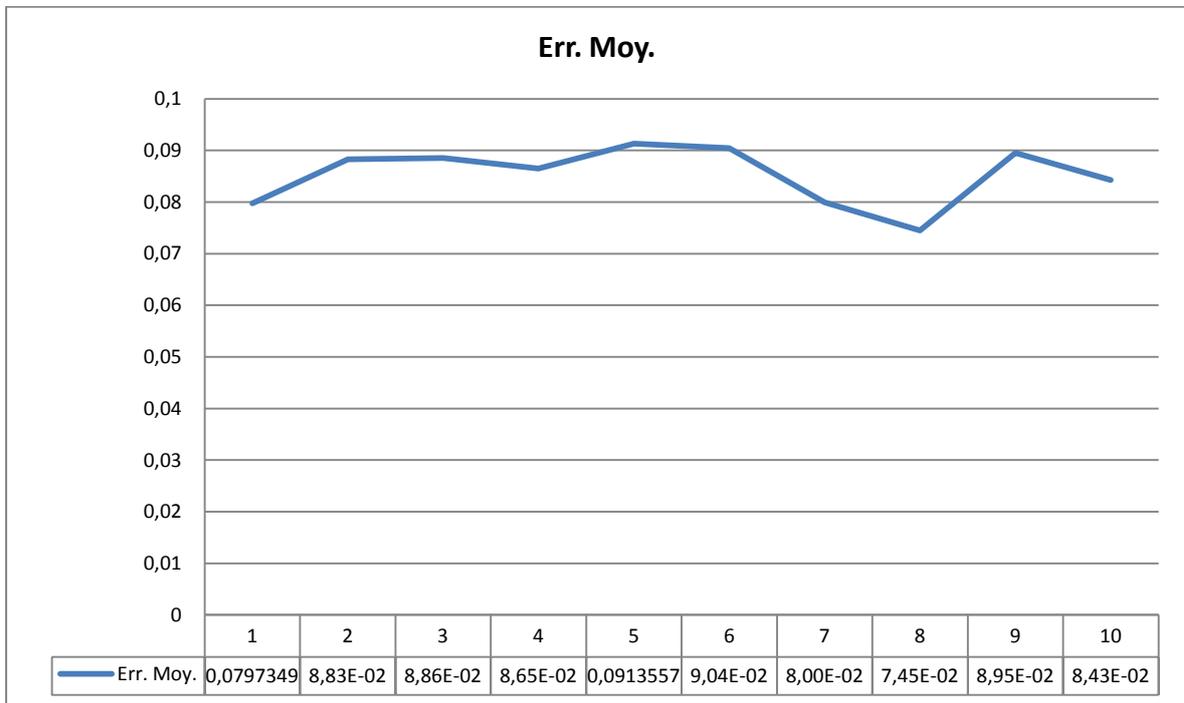


Figure VII-8 Variation de la précision de l' algorithme génétique pour dix exécutions successives

Nous constatons dans notre cas, les variations de l'erreur moyenne ne dépassent pas les 10µm, pour les autres paramètres les chiffres sont dans le tableau suivant (voir Tableau VII-2):

Paramètre/Err. Moy	Variation (Max - Min)
Erreur Moyenne	0,016845967 mm
G-f	3,775364677 mm
D-cx	6,651939651 mm
D-cy	2,017455098 mm
D-cz	2,403516678 mm
D-f	3,674765055 mm
D-rx	0,25690419°
D-ry	0,849209294°
D-rz	0,279107056°

Tableau VII-2 Variation des paramètres caméra au cours de 10 exécutions de l' algorithme génétique

La variation trouvée prouve la robustesse de l'AG, ces variations dépendent en partie aussi de la largeur des bornes d'initialisation sachant que notre évaluation a été effectuée avec des bornes initiales moyennes.

VII.2.5 Paramétrage de l'AG utilisant des images Canon 1Ds Mark III

Après avoir paramétré notre AG sur des données provenant d'un système d'acquisition constitué d'appareils photos de types Pentax K10D de 10Mp chacun munis d'objectifs 50mm Macro, nous nous sommes demandé si les paramètres changeaient pour un problème différent, par exemple en utilisant des caméras différentes.

Nous avons donc refait un paramétrage de l'AG sur des données provenant d'un système d'acquisition composé de deux caméras Canon 1Ds Mark III de 21Mp chacune, munis d'objectif 50mm macro.

La première évaluation comme pour le système Pentax portait sur le choix de la probabilité de croisement et mutation. Nous avons effectué une variation des deux paramètres, et nous avons constaté les résultats figurants sur la figure suivante.

Nous avons constaté que le couple P_m (Probabilité de mutation) et P_c (Probabilité de croisement) qui permettait à l'AG de donner la meilleure précision était : $P_m = 0,1$ & $P_c = 0,75$.

La probabilité de croisement la plus adaptée au problème du système d'acquisition Canon est donc différente de celle des Pentax qui était de $P_c = 0,85$ (voir Figure VII-9).

Nous nous sommes intéressés ensuite à la taille de la population génétique idéale pour ce système, nous n'avons pas pris en considération les bornes initiales, car notre conclusion précédente était que plus les bornes étaient réduites et plus les résultats étaient meilleurs. Nous utilisons des bornes ajustées pour tous les tests Canon.

Nous avons effectué dix exécutions de l'AG pour chaque taille de population donnée, et nous avons pris la moyenne de précision estimée. 5 tailles de populations génétiques ont été testées : 100, 200, 300, 400, 500, 1000 et 2000 individus.

A la différence du système d'acquisition Pentax, les résultats constatés pour le système Canon favorisent un AG utilisant 400 individus, malgré le fait qu'une taille de population entre 100 et 500 individus reste peu significative pour l'AG (voir Figure VII-9).

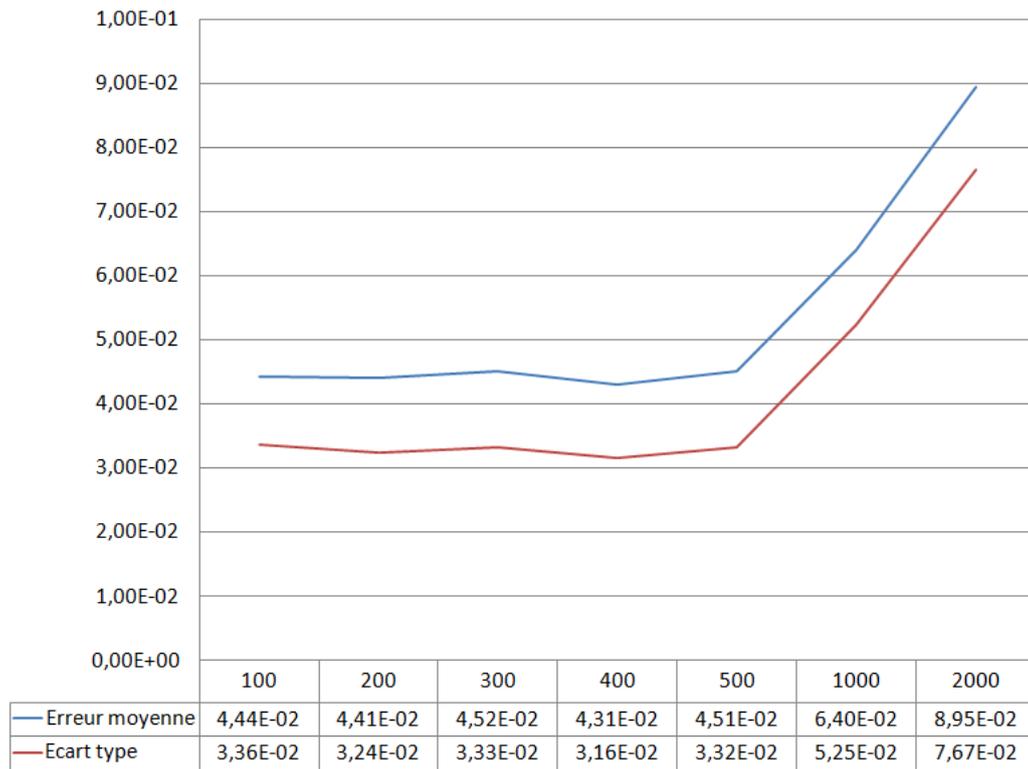


Figure VII-9 Paramétrage de la taille de la populations génétique pour le système d’acquisition Canon

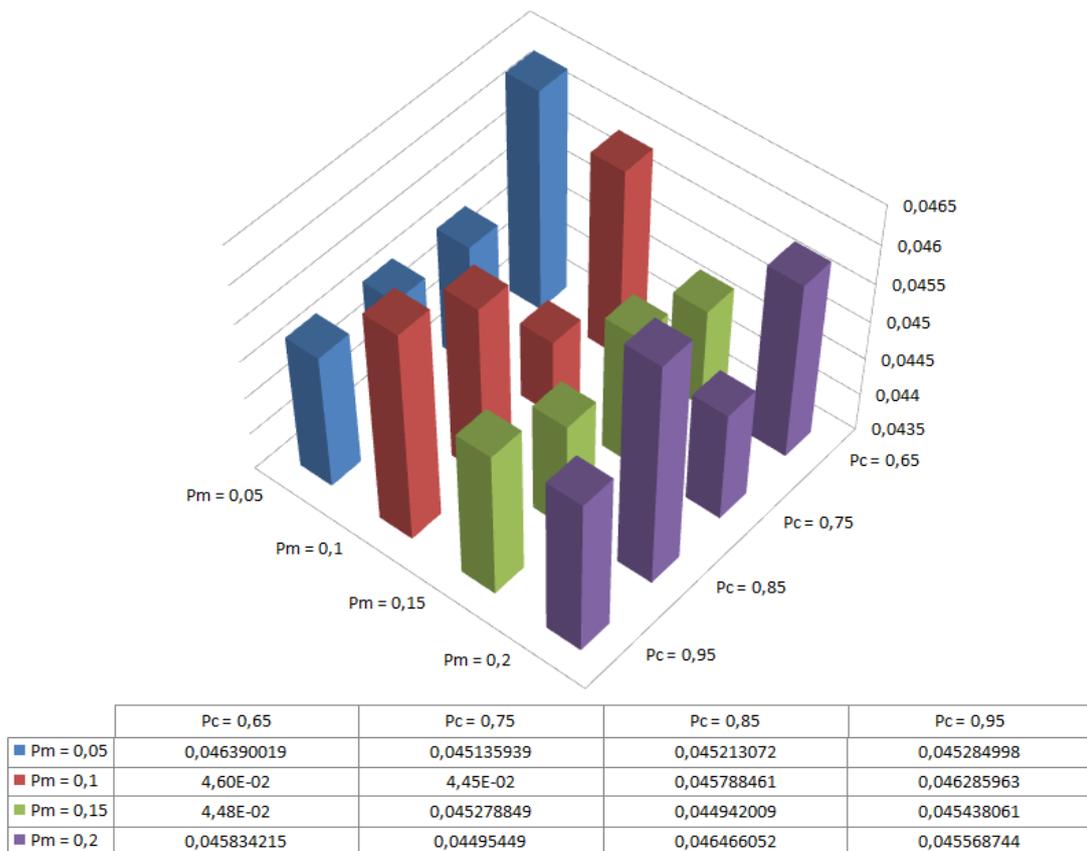


Figure VII-10 Paramétrage de la probabilité de croisement/mutation pour les Canon 1Ds Mark III

Nous avons terminé le paramétrage du système Canon par le coefficient erreur point d'intersection de la fonction d'évaluation en fonction de l'exécution ou non de l'ascension locale finale. Nous avons obtenu la meilleure précision en ayant 0,2 comme coefficient de la fonction d'évaluation en utilisant l'ascension locale finale (voir Figure VII-10 et Figure VII-11).

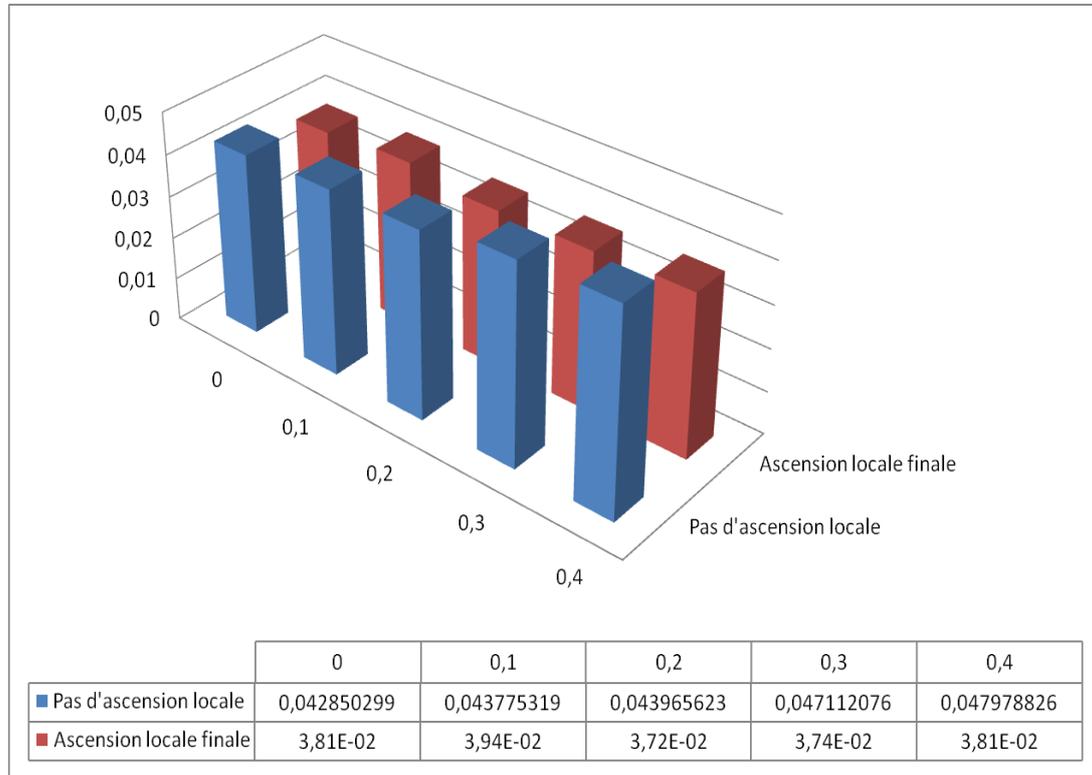


Figure VII-11 Paramétrage de la fonction d'valuation et de l'ascension locale

VII.3 Evaluation sur des données artificielles

L'évaluation sur des données artificielles a pour but d'aborder le problème du calibrage de caméras stéréoscopiques à l'envers. En effet, les tests d'évaluation précédemment effectués avaient pour objectif d'estimer les paramètres caméras à partir d'images de mires réelles. Dans les cas des données artificielles, nous définissons au préalable deux caméras virtuelles pour générer des points dans l'espace, et nous essayons de retrouver les paramètres des caméras précédemment définis en utilisant l'AG.

Afin d'effectuer notre évaluation sur des données artificielles, nous définissons tout d'abord les paramètres de deux caméras virtuelles (voir Figure VII-12), ces paramètres sont intrinsèques et extrinsèques à chacune des deux caméras.

Nous générons ensuite des fichiers de points artificiels à partir des paramètres des caméras virtuelles précédemment définis qui feront office de fichiers d'apprentissage. Ces points

artificiels sont définis sur différents niveaux de profondeur par rapport aux caméras artificielles et servent à définir un ensemble distances dans l'espace pour l'apprentissage de l'AG (voir Figure VII-13).

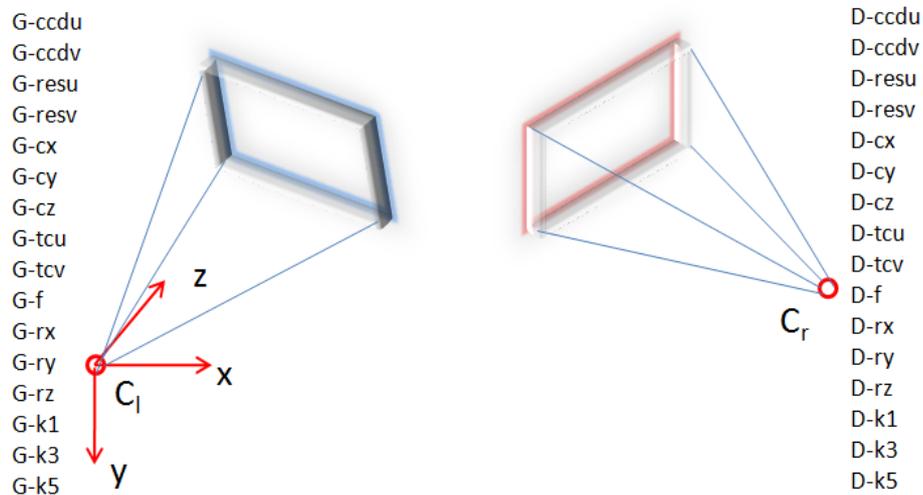


Figure VII-12 Définition de deux caméras artificielles

Nous exécutons ensuite notre AG en prenant comme entrée les points artificiels précédemment définis. Les nouveaux paramètres des caméras seront estimés, cela nous permettra de les comparer avec les vrais paramètres définis au tout début et ainsi de calculer une distance entre les deux (voir Figure VII-14).

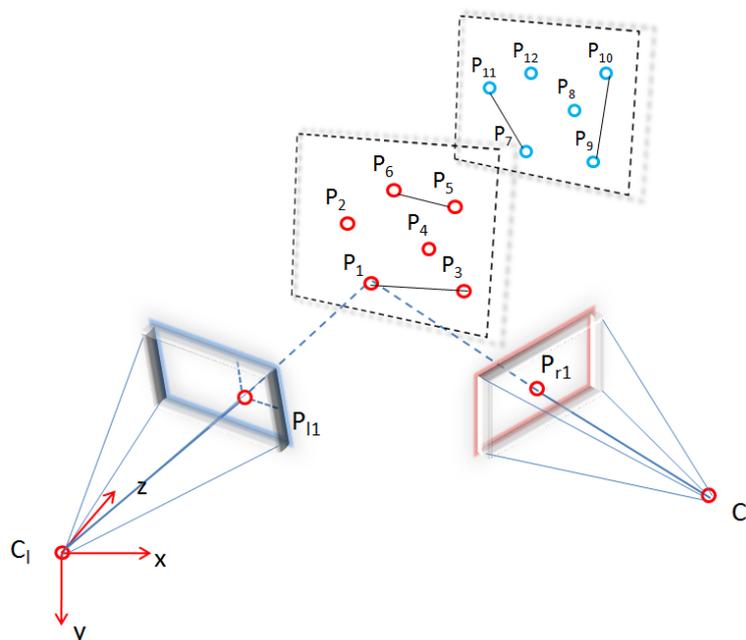


Figure VII-13 Génération des points artificiels

La distance ainsi calculée nous indiquera si l'AG a retrouvé des paramètres caméras proche des paramètres artificiels. Cette évaluation ne peut être effectuée sur des données réelles car nous ne connaissons pas précisément les paramètres caméras.

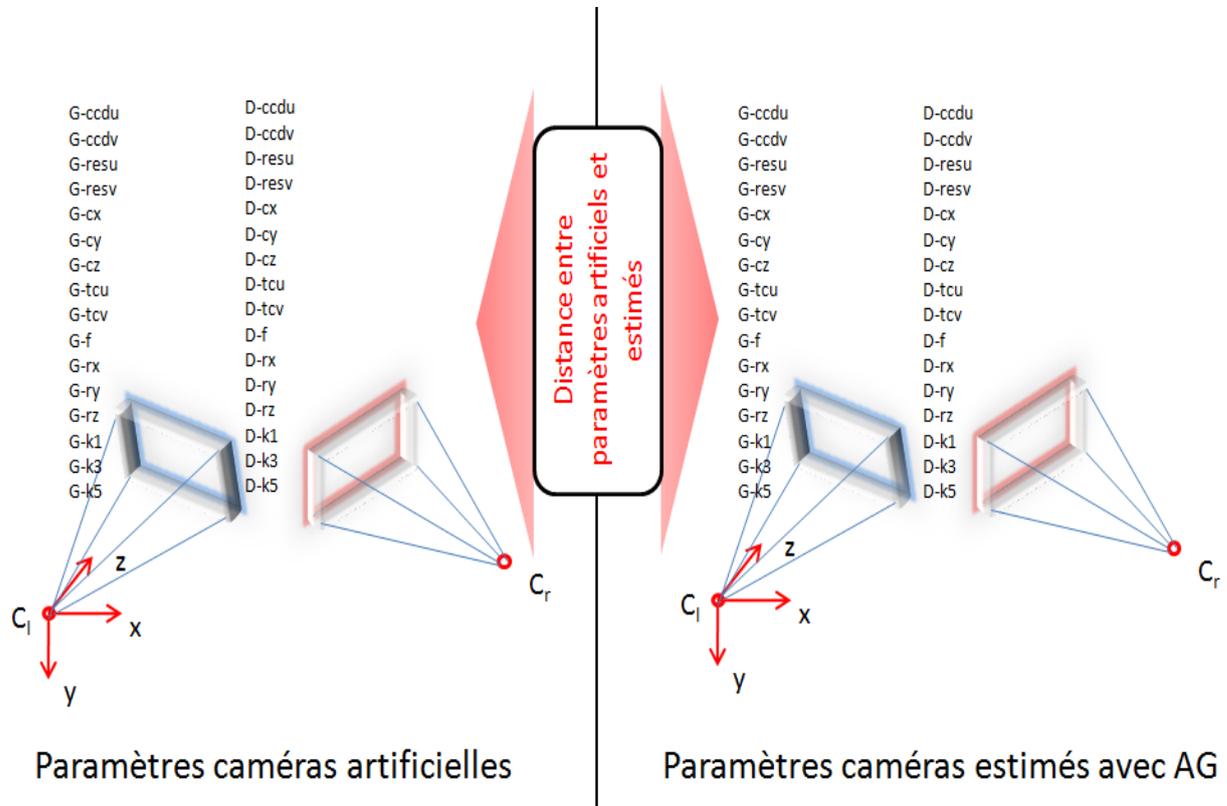


Figure VII-14 Distance entre paramètres caméras artificielles et estimées

La similarité cosinus entre les paramètres des caméras artificielles et estimées est calculée suivant la fonction suivante :

$$Similarité = \frac{\sum (Param_{estime} * Param_{artificiel})}{\sqrt{\sum Param_{estime}^2} * \sqrt{\sum Param_{artificiel}^2}}$$

Équation VII-2 Distance entre paramètres caméras artificielles et estimées

où $Param_{estime}$ représente les paramètres des caméras retrouvés par l'AG et $Param_{artificiel}$ représente les paramètres des caméras artificielles utilisés pour générer les fichiers de points.

Afin d'effectuer une évaluation de notre AG utilisant les points artificiels nous définissons deux caméras virtuelles avec les paramètres suivants (voir Tableau VII-3):

Paramètres caméra de gauche	Paramètres caméra de droite
G.Resu = 2592	D.Resu =2592
G.Resv =3872	D.Resv =3872
G.Ccdu =15.6	D.Ccdu =15.6
G.Ccdv =23.7	D.Ccdv =23.7
G.Tcu =0	D.Tcu =0
G.Tcv =0	D.Tcv =0
G.Cx =0	D.Cx =90
G.Cy =0	D.Cy = -0.2
G.Cz =0	D.Cz = 2.3
G.f =50	D.f =50
G.Rx =0	D.Rx = 0.5
G.Ry =0	D.Ry = -0.2
G.Rz =0	D.Rz = 0.1
G.k1 =0	D.k1 =0
G.k3 =0	D.k3 =0
G.K5 =0	D.K5 =0

Tableau VII-3 Paramètres caméras artificielles

Nous avons ensuite exécuté notre AG dix fois afin d’obtenir une moyenne de distances par rapport aux paramètres artificiels. Nous avons obtenu une similarité moyenne de : 0,999664304 (un résultat équivalent à 1 veut dire paramètres identiques aux paramètres artificiels, et un résultat équivalent à 0 veut dire qu’ils sont très éloignés). Les résultats de chaque paramètre sont décrits dans le tableau ci-dessous (voir Tableau VII-4):

Nom paramètre	Paramètres Artificiel	Paramètres moyens estimés
G-f	50	49,56225281
D-cx	90	90,72575254
D-cy	-0,2	0,593477414
D-cz	2,3	0,289058232

Tableau VII-4 (suite) Paramètres moyens estimés et paramètres artificiels

D-f	50	49,71700989
D-rx	0,5	0,574052395
D-ry	-0,2	-0,255299302
D-rz	0,1	0,104255048

Tableau VII-4 Paramètres moyens estimés et paramètres artificiels

Les paramètres trouvés par l'AG sont quasi identiques à ceux attribués aux caméras artificielles. Cela démontre l'efficacité de notre algorithme de calibrage dans des conditions maîtrisées. Les conditions de calibrage sur des caméras réelles sont plus difficiles, car elles sont liées à la qualité optico-physique du matériel utilisé.

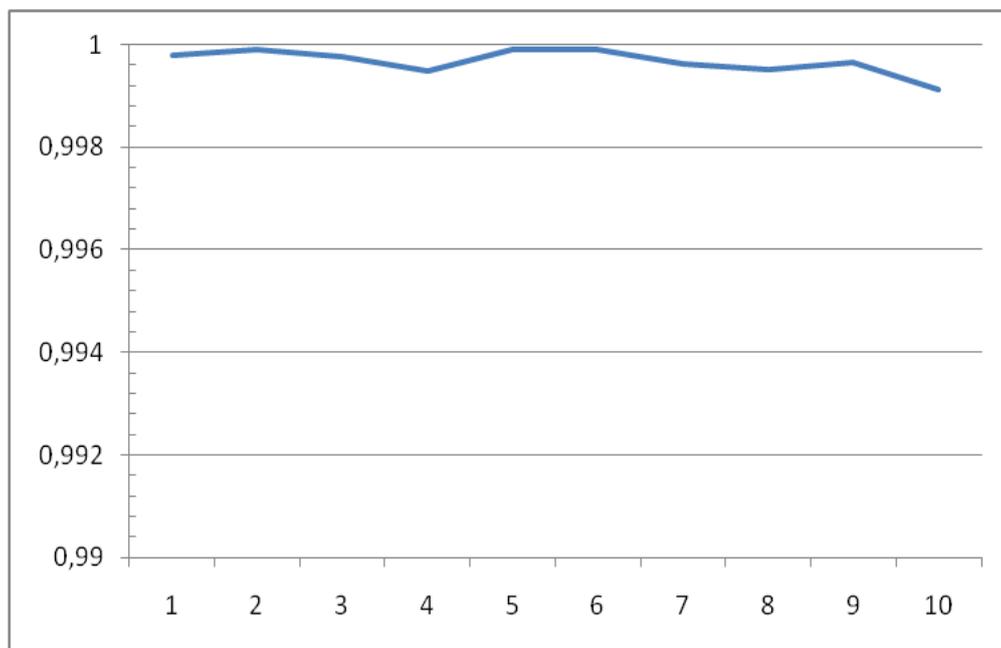


Figure VII-15 Variation de la distance entre les paramètres artificiels et estimé au cours des exécutions

Nous avons remarqué aussi que la variation de la similarité au cours des exécutions était assez stable (voir Figure VII-15), pour chacune des dix exécutions, les paramètres des caméras estimés et artificiels sont assez identiques.

VII.4 Conclusion

Différentes évaluations de l'AG ont été effectuées pour trouver les bons paramètres adaptés à plusieurs problématiques. Nous avons trouvé des corrélations entre différents paramètres qui contribuaient à l'amélioration de la précision de l'AG.

Dans la littérature, le paramétrage automatique des algorithmes génétiques a été de nombreuses fois abordé comme pour les travaux de Grefenstette (Grefenstette 1986) et Keane (Keane 1995). Le paramétrage automatique des AG s'intitule méta-optimisation, cette technique n'a pas été abordée dans notre cas de figure due à la problématique complexe étudiée. Mais cela reste une bonne perspective à venir pour l'amélioration de notre AG.

Les deux problématiques sur laquelle nous nous sommes penchés durant la phase de paramétrage portait sur le type de matériel d'acquisition stéréoscopique. Nous avons utilisé un matériel composé de caméras Pentax K10D de 10Mp chacun, et un autre composé de Canon 1Ds Mark III de 21Mp chacun. Et nous avons retrouvé le paramétrage suivant (voir Tableau VII-5):

	Système Pentax	Système Canon
Probabilité de croisement	0,85	0,75
Probabilité de mutation	0,1	0,1
Taille de la population génétique	200	400
Coefficient de la fonction d'évaluation	0,1	0,2
Exécution de l'ascension locale	Oui	Oui

Tableau VII-5 Paramétrage de l' algorithme génétique pour les systèmes d'acquisition stéréoscopique Pentax et Canon

L'évaluation sur les données artificielles nous a permit d'observer l'efficacité de l'algorithme dans des conditions dites maîtrisées. Cette évaluation est nécessaire car dans ce cas nous faisons abstraction de toutes les perturbations potentielles de types matériels ou optique.

Chapitre VIII.

Evaluation sur des données réelles et étude comparative

Résumé

Dans ce chapitre nous effectuons différents tests sur des données réelles. Les données réelles représentent pour nous les fichiers de points détectés sur une mire placée à une distance et avec une orientation donnée par rapport au système d'acquisition stéréoscopique.

Un protocole de calibrage utilisant différentes tailles de mires et différentes distances de prises de vues va être proposé. La précision de l'AG dépend fortement des données d'entrée. Nous testerons plusieurs entrées possibles afin d'en déterminer les plus adéquates pour chaque application.

Les précisions de différents systèmes d'acquisition calculées avec l'AG seront comparées.

VIII.1 Introduction

Le but de l'évaluation de notre algorithme de calibrage de caméras stéréoscopiques basé sur les algorithmes génétiques est de définir les entrées nécessaires afin d'obtenir la meilleure précision. L'entrée de notre AG pour le calibrage est un ensemble de fichiers de points, générés à partir de photos de mires de type échiquier. Ces fichiers de points contiennent les coordonnées de chaque point de l'échiquier de l'image gauche, et leurs correspondants dans l'image de droite. Ils contiennent aussi des distances entre des couples de points aléatoirement choisis, permettant ainsi à l'AG de faire son apprentissage.

Une étape intermédiaire de détection de contours entre la prise de photos d'une mire et le calibrage est effectuée. Nous avons conçu un programme utilisant la librairie OpenCV (OpenCV s.d.) qui permet automatiquement la détection d'un échiquier dans une image et la génération de fichier de points correspondant (voir Figure VIII-1).

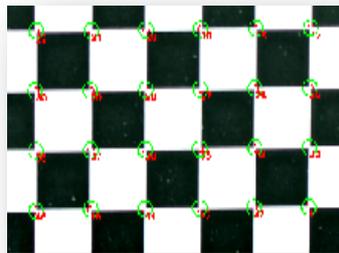


Figure VIII-1 Détection de coins avec la librairie OpenCV (OpenCV s.d.)

L'AG pour la calibration utilise en entrée comme précédemment décrit des fichiers qui se répartissent en deux catégories. Les fichiers de points d'apprentissage permettant l'entraînement de l'AG, et des fichiers de tests afin de mesurer la précision sur des distances entre des points d'une photo de mire qui n'a pas été utilisée pour l'apprentissage.

Au cours de cette partie qui est l'évaluation de l'AG sur des données réelles, nous n'utiliserons pas la méthode de validation croisée pour mesurer la précision de notre algorithme. La raison en est que notre but premier est de voir le comportement de l'AG relatif entre des entrées sorties différentes. Nous voulons aussi mettre en relation les différents tests que nous allons effectuer afin de voir l'effet de chaque donnée d'entrée sur l'AG. Ainsi, durant cette partie le but est de voir la variation de la précision, non sa valeur. Le chapitre « Paramétrage de la méthode » quant à lui, a pour but l'optimisation des paramètres de notre AG afin d'obtenir la meilleure précision.

Avant d'effectuer un calibrage de caméras stéréoscopiques, différentes questions peuvent être posées, quel nombre d'images nous allons prendre ? Quel est la taille de la mire la plus adaptée ? À quelle distance devons nous mettre les appareils photographiques ? Etc.

Afin de comparer les différents tests entre eux, nous avons l'obligation de garder les mêmes images tests à chaque exécution de l'AG. Puisque plusieurs tailles de mires interviennent durant notre travail d'étude, nous nous sommes donc posé la question, quelle mire prendre pour nos images de tests ? C'est pour cela qu'une première évaluation s'impose d'elle-même afin de définir le meilleur ensemble d'images test en fonction des images d'apprentissage.

VIII.2 Différentes études sur données réelles

VIII.2.1 Choix de l'ensemble d'apprentissage et de test

Au cours de cette évaluation nous voulons comprendre l'influence des images d'apprentissage sur les résultats obtenus utilisant des images tests. Des questions comme : est-ce que apprendre sur de grandes mire et faire le test sur des petites donnera les mêmes résultats que l'inverse ? etc.

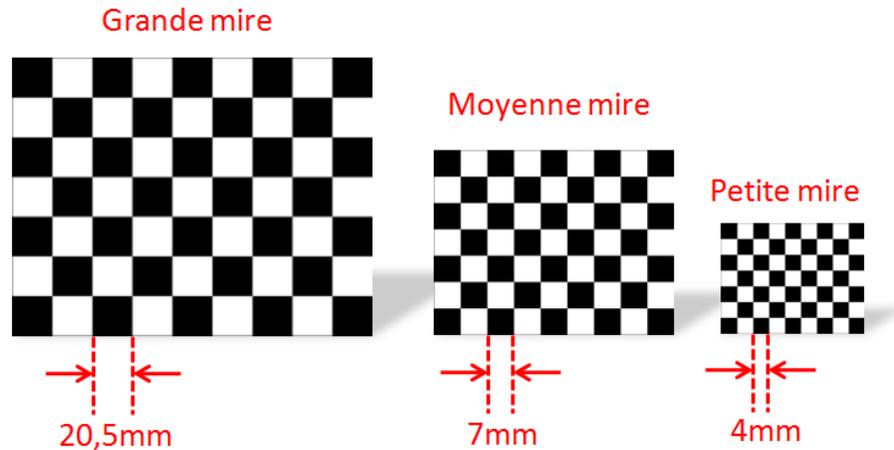


Figure VIII-2 Différents types de mires planes

Nous avons effectué 9 prises de vue (utilisant notre système d'acquisition PENTAX) pour chacune des 3 types de mires suivantes (voir Figure VIII-2): mire de 4mm, mire de 7mm et mire de 20,5mm. Sur les 9 images de chaque mire, 6 serviront d'apprentissage et les 3 restantes d'images test. Parmi les ensembles d'apprentissage et de test, nous avons formé des groupes mixtes provenant des trois mires (6 images d'apprentissage = 2 images de mire 4mm

+ 2 images mire 7 mm + 2 images mire 20,5mm), pareil pour les images test (3 images de test = 1 image mire 4mm + 1 image mire 7 mm + 1 image mire 20,5mm).

Nous prenons en pratique plusieurs images de mires pour le test et l'apprentissage, le but est de trouver le lien entre ces images d'apprentissage et ces images test. Nous avons donc obtenu une matrice, ayant pour colonnes le type de mire d'apprentissage utilisé, et en lignes le type de mire de test utilisé, chaque cellule contient le résultat d'une moyenne d'exécution de l'AG de 10 fois.

Nous avons remarqué (voir Figure VIII-3 et Figure VIII-4) que la taille de la mire d'apprentissage joué un rôle clé durant la phase de test. Le cas extrême est quand nous apprenons sur la plus petite mire (4mm) et nous testons sur la plus grande (20,5mm). Ensuite, en fonction de la différence de taille entre les mires d'apprentissage et les mires test, proportionnellement la précision moyenne baisse (voir Tableau VIII-1).

	App 4mm	App 7mm	App 20,5mm	App Mixte
Test 4mm	9,63E-02	7,04E-02	0,35914697	0,16084526
Test 7mm	2,52E-01	1,30E-01	0,68143511	0,17554534
Test 20,5mm	4,99E+00	1,88E+00	0,61196792	1,35453512
Test Mixte	1,84E+00	1,22E+00	0,44039684	0,30198009

Tableau VIII-1 Moyennes de la précision (en mm) de l'AG en fonction des images d'apprentissage et de test

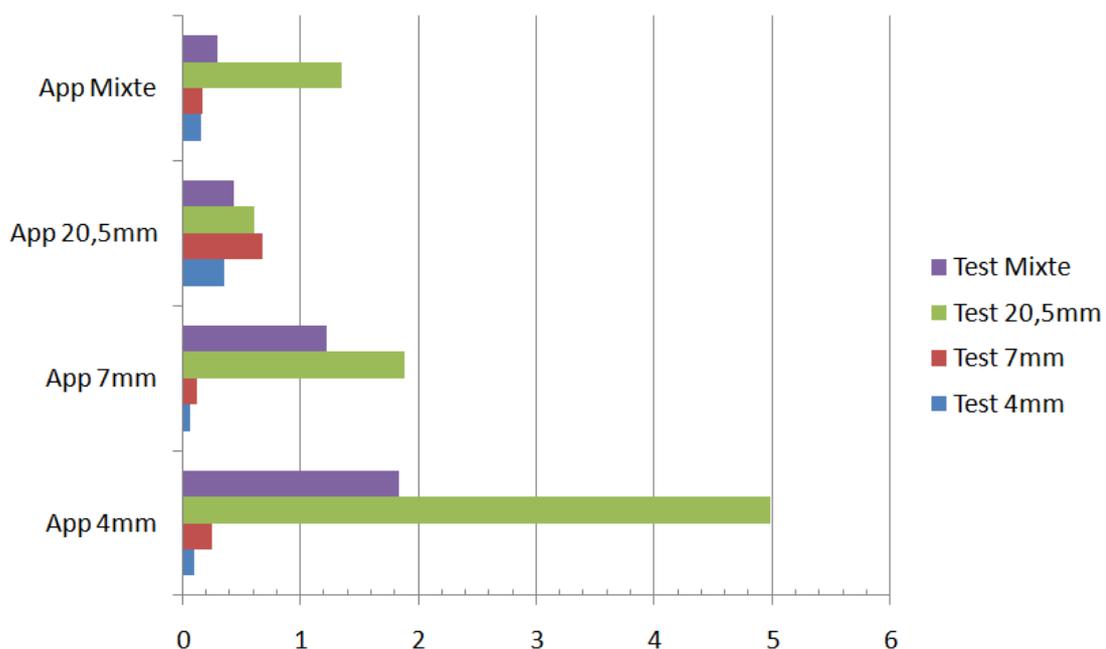


Figure VIII-3 Moyennes de la précision (en mm) de l' algorithm génétique en fonction des images d'apprentissage et de test

	App 4mm	App 7mm	App 20,5mm	App Mixte
Test 4mm	1,08E-02	5,90E-02	0,18209837	0,10753146
Test 7mm	2,33E-01	1,25E-01	0,418825	0,15518476
Test 20,5mm	3,11E+00	1,14E+00	0,56093211	1,23697682
Test Mixte	2,95E+00	1,92E+00	0,45070189	0,49176194

Tableau VIII-2 Ecarts types de la précision (en mm) de l' algorithme génétique en fonction des images d'apprentissage et de test

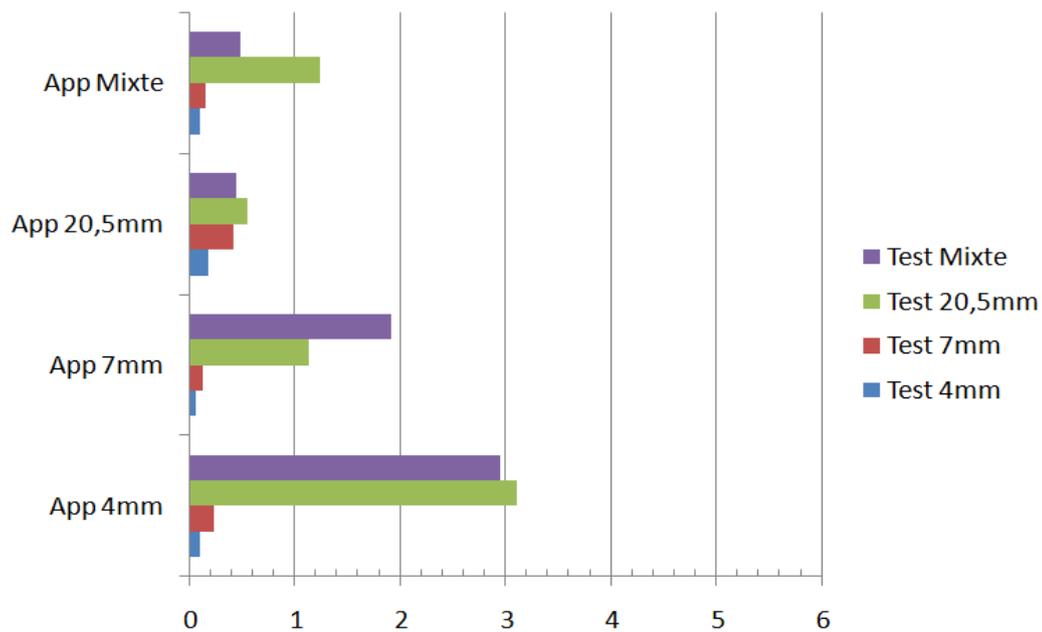


Figure VIII-4 Ecarts types de la précision (en mm) de l' algorithme génétique en fonction des images d'apprentissage et de test

L'apprentissage sur une grande mire (20,5mm) offre une certaine homogénéité des résultats sur différentes mires test. Par contre, si nous supposons que les mires tests ne doivent pas être de même taille que les mires d'apprentissage (cela évite les très bons résultats liés au fait d'apprendre et de tester sur le même type de mire), en se référant à la figure ci-dessus (voir Figure VIII-3 et Figure VIII-4), nous remarquons que les meilleurs résultats de la précision de l'AG sur des mires tests toute catégorie confondue, sont ceux de l'apprentissage mixte sur plusieurs types de mire, dans notre cas nous avons pris 2 images d'apprentissage de chaque mire photographiée.

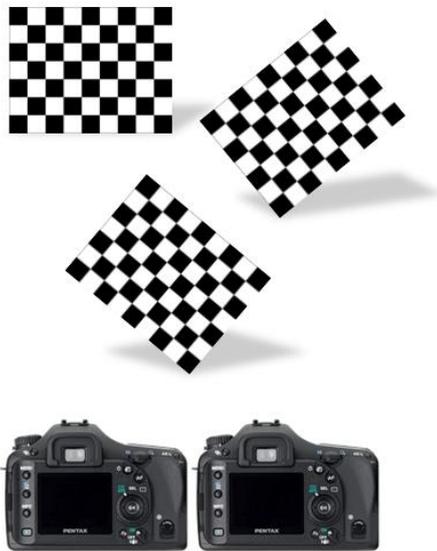
Afin de réduire le nombre de tests d'évaluation sur des données réelles, nous avons décidé de procéder d'une manière hiérarchique. Les résultats de chaque test nous mènent à une déduction que nous appliquons sur le prochain (le fait de trouver que l'apprentissage sur des mires mixte était intéressant, nous appliquons ce principe dans les évaluations suivantes).

Sachant que durant toutes les évaluations, nous garderont toujours les mêmes images test mixtes (3 images de mires différentes) et les mêmes paramètres supposés de l'AG.

VIII.2.2 Choix des orientations des mires d'apprentissage

Les différentes images de mires capturées, représentent la mire dans différentes orientations. Ces orientations peuvent être classifiées en deux catégories : celle avec des mires face aux appareils photographiques et ne présentant aucune orientation en profondeur (penché en arrière, de coté, etc.), et les autre orienté en profondeur par rapport aux caméras (voir Figure VIII-5).

Mires avec inclinaisons latérale



Mires avec inclinaisons en profondeur

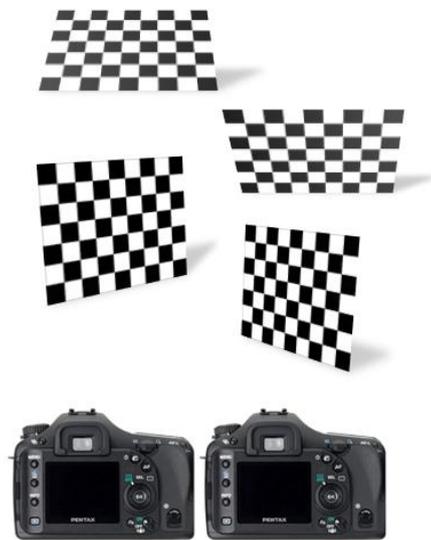


Figure VIII-5 Types orientations de la mire

En gardant le même principe de choix d'images de mires, nous avons sélectionné 2 images planes de chaque type de mire pour constituer notre ensemble d'apprentissage (6 images d'apprentissage en tout). Nous avons ensuite effectué la même chose mais en ne sélectionnant que des images avec des orientations en profondeur, et ensuite nous avons testé un ensemble composé de photos mixtes.

Nous avons obtenu les résultats figurant dans le graphique ci-dessus (voir Figure VIII-6), qui montre clairement l'efficacité d'un choix mixte des mires d'apprentissage. En effet, les mire d'apprentissage planes ont générés la pire précision, viennent ensuite les mires avec orientation en profondeur. En sélectionnant une mire plane et une mire avec orientation en

profondeur de chaque type de mire, notre ensemble d'apprentissage a donné les meilleurs résultats.

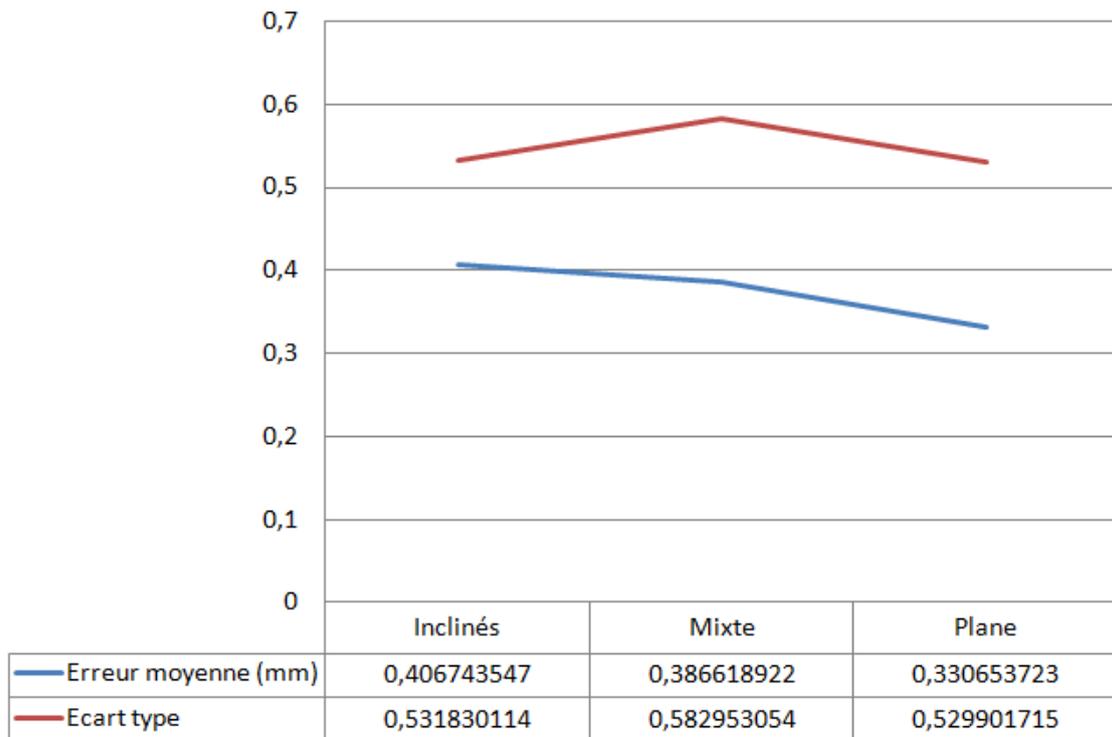


Figure VIII-6 Influence des orientations des mires d'apprentissage sur la précision de l'algorithme génétique

VIII.2.3 Choix du nombre d'images d'apprentissage

Notre attention s'est portée sur le nombre d'images optimal nécessaires pour avoir de bons résultats de calibrage. Pour cette évaluation, nous avons créé 5 ensembles d'apprentissage constitué respectivement : 3, 6, 9, 12 et 15 images. Le nombre d'images de chaque ensemble est un multiple de trois car nous ajoutons une image de chaque type de mire.

Nous avons exécuté l'AG 100 fois sur chaque ensemble et nous avons pris la moyenne des résultats obtenus, et ceci, afin de diminuer le poids de quelques résultats exceptionnels.

Les images tests quand à elles restent le mêmes que précédemment utilisées, une image dans une orientation différente de chaque mire.

Nous avons remarqué (voir Figure VIII-7) que le nombre d'images n'était pas proportionnel avec la précision du calibrage de l'AG. Trois images différentes de différentes tailles de mires, avec différentes orientations sont suffisantes pour avoir les meilleurs résultats. Le graphique nous montre que la précision se dégrade rapidement en utilisant plus

de 3 images, et elle s'améliore ensuite au fur et à mesure que nous y rajoutons d'autres images. Au niveau de l'utilisation de 15 images d'apprentissage, l'algorithme revient à des résultats se rapprochant de ceux du tout début, cette situation est due au sur-apprentissage.

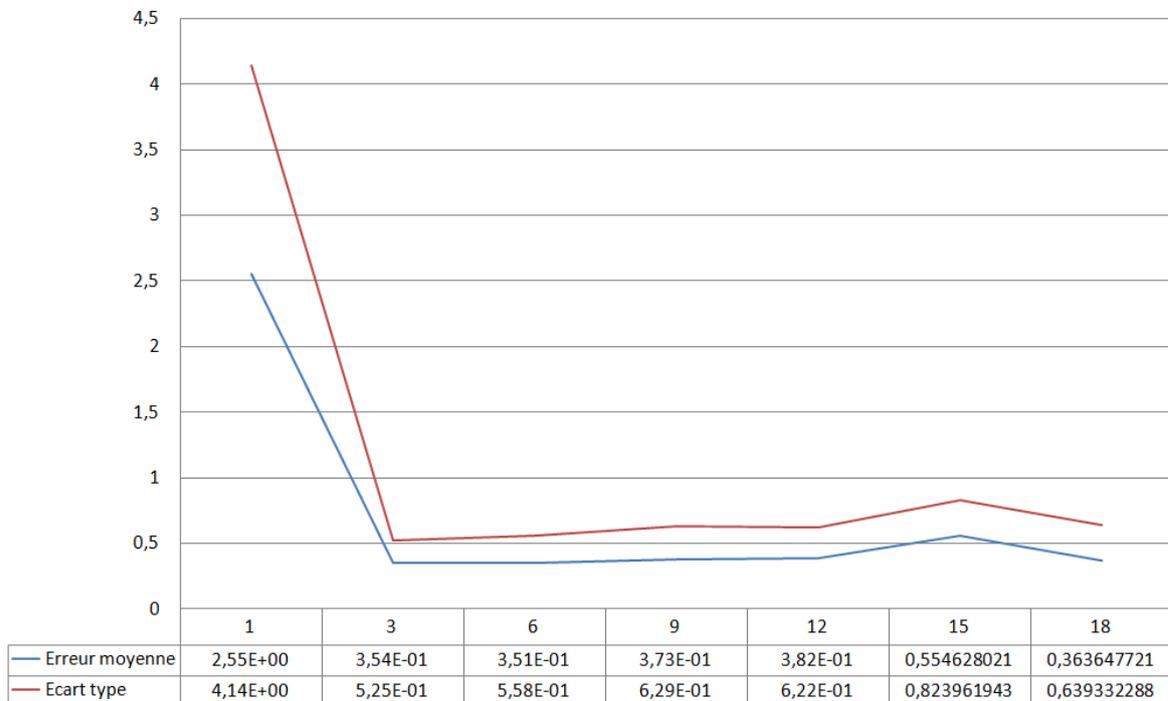


Figure VIII-7 Influence du nombre d'images sur la qualité des résultats de calibrage de l'algorithme génétique

En dessous de trois images d'apprentissage, les résultats obtenus ne sont pas exploitables, l'erreur dépasse les 2 mm en moyenne.

VIII.2.4 Choix de la distance de prise de vue de la mire

Afin de définir si la distance de prise de vue d'une mire donnée peut influencer la précision des résultats de calibrage avec les AG. Nous avons fait l'acquisition stéréoscopique des trois mires précédemment décrites (4mm, 7mm et 20,5mm) à deux niveaux de profondeurs supplémentaires. Nous aurons donc au total trois niveaux de prise de vue pour chaque mire (voir Figure VIII-8) :

- **Prise de vue à distance rapprochée :** Les mires sont mises à la distance la plus rapprochée des caméras à conditions qu'elles soient visibles par les deux caméras stéréoscopiques. La plus petite mire (4mm) a été positionnée à une distance de 46,5cm des caméras, la mire moyenne (7mm) a été positionnée à 50cm et la plus grande (20,5cm) a été mise à 134cm.

- **Prise de vue à distance moyenne :** Les mires ont été éloignées en fonction de leur taille de quelques centimètres. Nous avons donc positionné la plus petite mire (4mm) à une distance de 50cm des caméras, la mire moyenne (7mm) a été positionnée à 55cm et la plus grande (20,5cm) a été mise à 152,5cm.
- **Prise de vue à distance éloignée :** Pour le dernier niveau, les mires ont été encore une fois éloignées en fonction de leur taille. La plus petite mire (4mm) a été positionnée à une distance de 55cm des caméras, la mire moyenne (7mm) a été positionnée à 60cm et la plus grande (20,5cm) a été mise à 173cm.

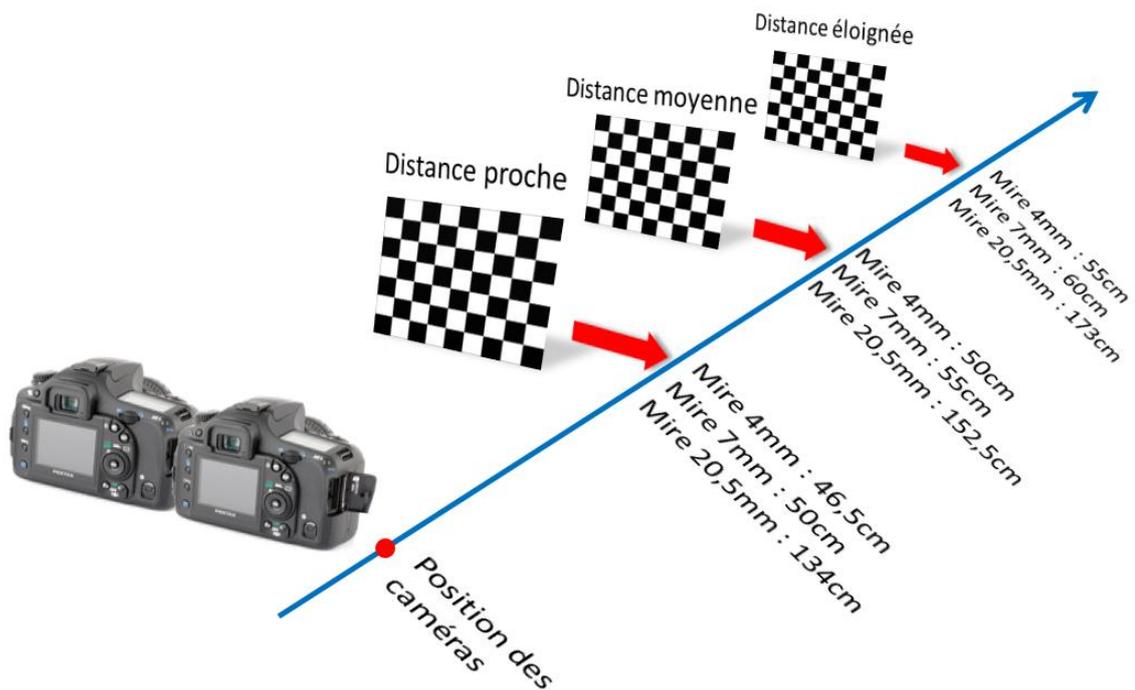


Figure VIII-8 Différentes distance des différentes mires utilisées lors des évaluations

Notre évaluation se résume à prendre une image de chacune de trois mires à chaque niveau suivant les recommandations déduites durant les évaluations précédentes (3 images dans différentes positions de différentes mires). Nous aurons ainsi un ensemble d'apprentissage de 3 images pour chaque test. Nous avons pris le soin de sélectionner les mêmes orientations des mires pour les trois éloignements afin de minimiser le nombre de variables.

Les tests ont été effectués dans les mêmes conditions que ceux des évaluations précédentes. Nous avons gardé aussi les mêmes images test à distance rapprochée (voir Figure VIII-8) afin de voir l'évolution de nos résultats.

La courbe ci-dessous (voir Figure VIII-9), nous montre que l'ensemble d'apprentissage le plus rapproché des appareils photos a donné les meilleurs résultats. Etant donné que

l'ensemble de test est constitué d'images provenant des prises les plus rapprochées des appareils photos, nous nous sommes demandé si les bons résultats de l'ensemble d'apprentissage rapproché n'était pas justement dues au fait que les images test soient aussi rapprochées (voir Figure VIII-8).

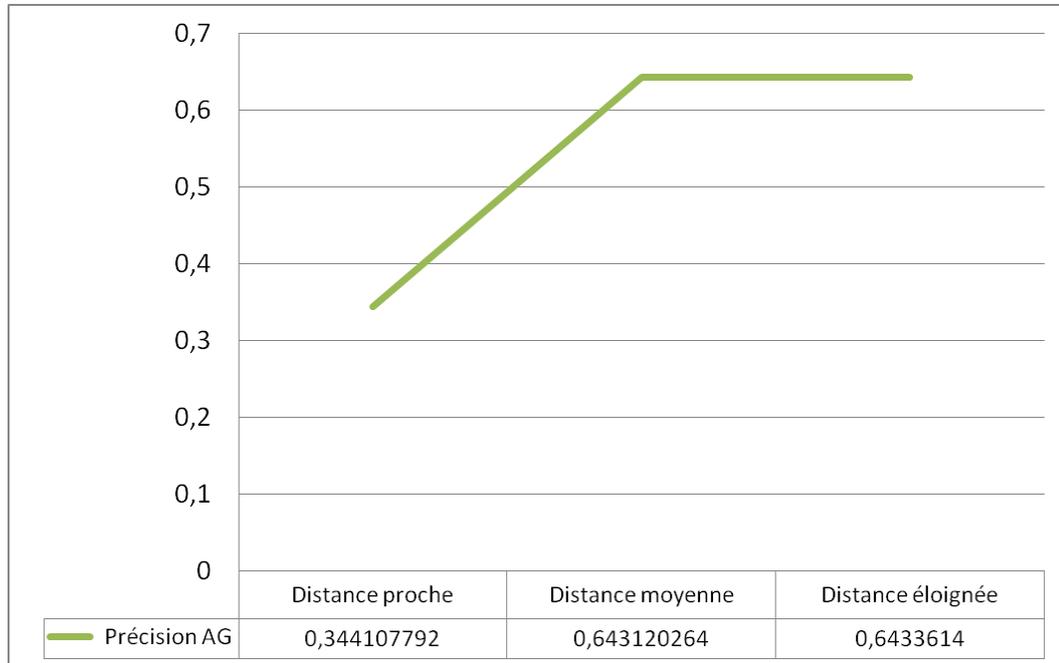


Figure VIII-9 Influence de l'éloignement des mires sur la précision de l'algorithme génétique, utilisation d'images test à distance rapprochées

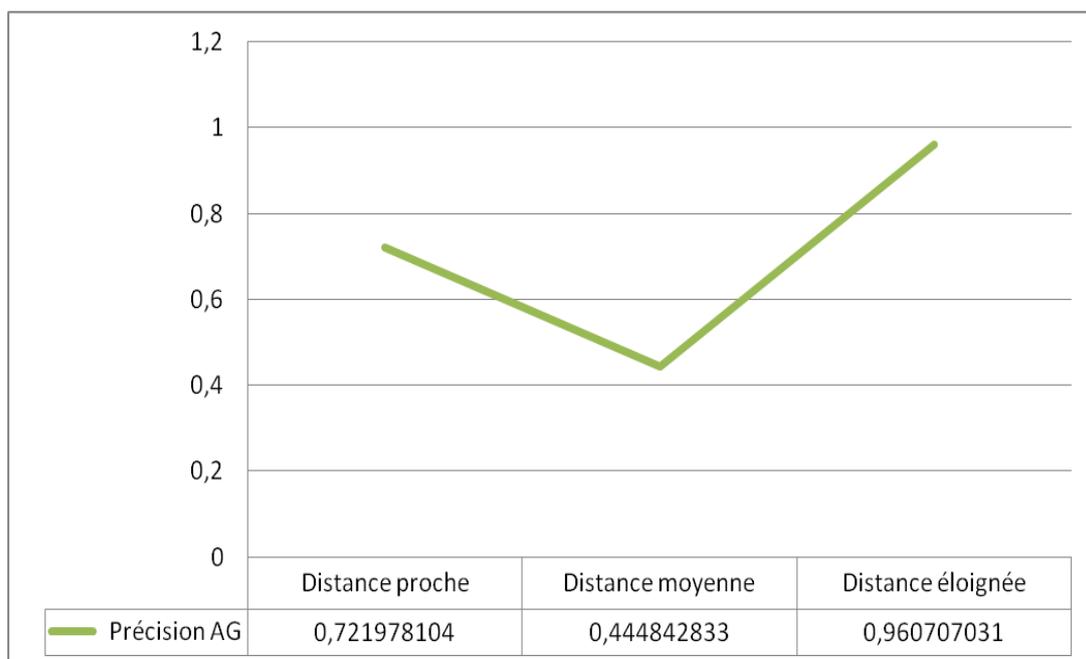


Figure VIII-10 Influence de l'éloignement des mires sur la précision de l'algorithme génétique, utilisation d'images test à distance moyenne

Afin d'en être sûr, nous avons effectué des tests complémentaires, reprenant les mêmes ensembles d'apprentissage précédents mais en utilisant des images test de niveau différents à chaque fois.

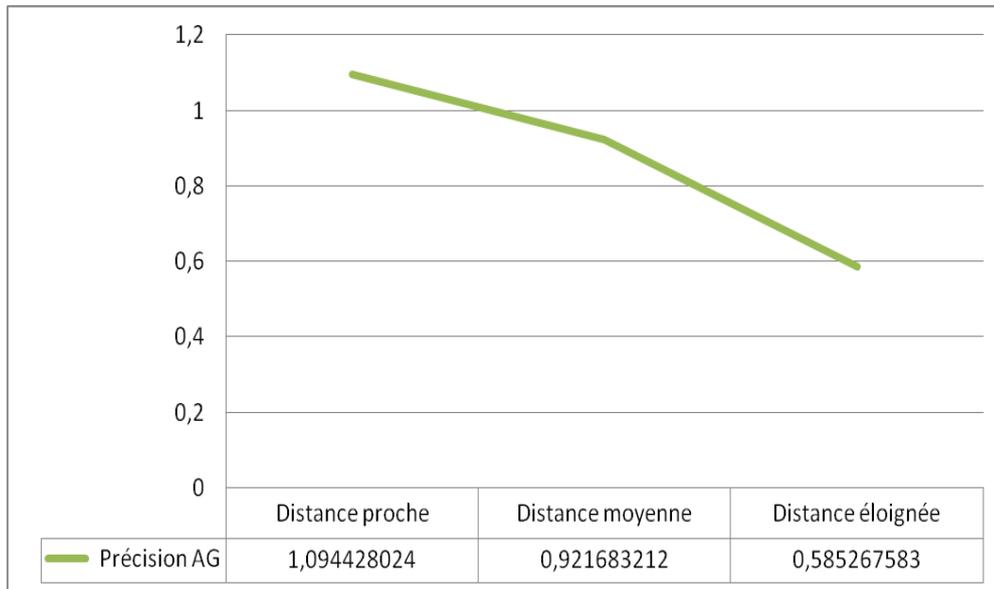


Figure VIII-11 Influence de l'éloignement des mires sur la précision de l'algorithme génétique, utilisation d'images test à distance éloignée

Les résultats obtenus (voir Figure VIII-10 et Figure VIII-11) nous confirment bien que l'entraînement de l'AG sur des images de même distance que les images test favorisent considérablement la précision de calibrage. Nous avons pris par conséquent les résultats les cas de précision optimaux pour chaque distance de travail, nous avons pris la précision du calibrage de l'ensemble d'apprentissage d'images rapprochées avec des images tests rapprochées, et la même chose pour les images à moyenne distance et à distance éloignée.



Figure VIII-12 Précision de l'algorithme génétique de calibrage en fonction de l'éloignement des mires utilisées pour l'apprentissage et le test

Nous avons conclut après comparaison des valeurs, que la précision générale diminuait en fonction de l'éloignement des mires par rapport aux caméras (voir Figure VIII-12). Nous recommandons une distance de prise de vue des mires égale à la distance de travail d'une application réelle.

VIII.2.5 Choix du nombre de distances par fichier image

Chaque fichier de point pour chaque image est constitué de deux parties, une partie englobant les coordonnées des points de la mire dans l'image gauche et droite, et l'autre définit des distances entres des points aléatoirement choisis. Nous nous intéressons dans cette étude à la deuxième partie du fichier de point, et nous nous sommes demandé si le nombre de distances d'apprentissage pouvait influencer la précision de l'AG pour le calibrage.

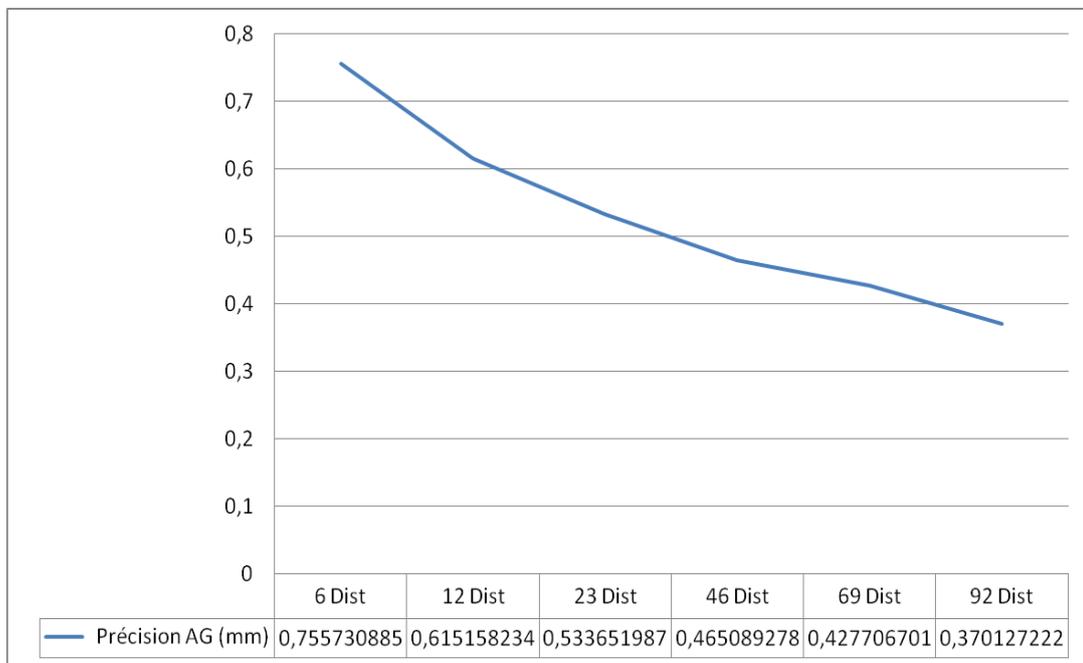


Figure VIII-13 Précision de calibrage avec l' algorithme génétique en fonction du nombre de distances par image (3 images d'apprentissage ont été utilisées)

Nous avons effectué plusieurs calibrages avec l'AG sur 3 images de mires mixtes à chaque fois, et nous avons testé la précision sur les mêmes images test précédemment utilisées. Pour chaque test de calibrage avec l'AG, nous incrémentons le nombre de distance des fichiers de points d'images servants à l'apprentissage. Nous avons effectué en tout 6 tests, correspondants aux nombres de distances des images d'apprentissage suivants : 6, 12, 23, 46, 69 et 92 distances.

Les résultats obtenus (voir Figure VIII-13) sont sans appel, plus le nombre de distances est grand, et plus la précision s'améliore, jusqu'à arriver à la barre des 92 distances ou cela se stabilise. Cela est dû à l'AG qui a plus de données d'apprentissage.

VIII.3 Comparaison de la précision entre différents matériels

Pour faire l'acquisition de photographies stéréoscopiques, nous disposons de plusieurs dispositifs dédiés (décrits dans le chapitre matériel photographique). Chaque dispositif est destiné à un usage particulier et chacun a sa propre configuration. En effet, les dispositifs destinés à acquérir des surfaces macros ont une distance inter appareil inférieure à ceux destinés à acquérir le visage ou de plus grandes zones.

Il n'est pas évident d'apprécier la précision d'un dispositif d'acquisition stéréoscopique juste en observant la précision moyenne sur des mires test. En effet, un dispositif testé sur une petite mire proche va donner une bonne précision « x », tandis que sur une plus grande mire à une plus grande distance cette précision peut varier du double au triple et même plus. Tout dépend de l'usage et de la distance de travail appliquée.

Une autre difficulté à prendre en considération est l'utilisation d'objectifs de marques et focales différentes sur les dispositifs d'acquisition, cela induit une distance de travail différente de chaque appareil, cela signifie en quelque sorte que pour un même objet de taille donnée, la distance la plus rapprochée pour l'avoir sur les deux caméras de chaque dispositif n'est pas la même (sachant que la distance influe sur la précision moyenne).

Durant les tests précédemment effectués, nous avons pris des cas généraux d'utilisation, des mires de différentes tailles à différentes distances ont été utilisées pour le calibrage et le test afin d'observer le comportement de l'AG dans des cas de figure à large utilisation. L'objectif de la comparaison de la précision des différents dispositifs d'acquisition stéréoscopiques est de dire qu'avec une distance de travail « d » et une surface observée « s » le meilleur dispositif est « x ».

Pour donner une idée de la précision maximale que nous pouvons avoir avec nos dispositifs d'acquisition, nous prenons des images d'une même petite mire à la distance la plus rapprochée possible de chaque dispositif. Nous testons sur d'autres images de la mire à la même distance afin d'en évaluer la précision. Cette approche du calibrage (utilisation d'une même petite mire à une distance très rapprochée) est adaptée à notre problématique qui est de

prendre des photos de zone assez planes comme la surface cutanée ou de profil portrait. Ces tests sont orientés précision de l'AG. Un point important à souligner est que pour notre système **VirtualSkinLAB** il y a une autre contrainte qui est la visualisation des images stéréoscopiques, une distance de travail trop courte par rapport à l'écartement inter appareils rend l'image non visualisable en stéréoscopie.

Nous avons testé trois systèmes qui sont :

- Le système composé de deux Pentax K10D à 10Mp chacun, équipés d'objectifs 50mm Macro.
- Le système composé de deux Canon 1Ds Mark III à 21Mp chacun, équipés d'objectifs 50mm Macro.
- Le système composé de deux Pixelink PL-B782U à 6Mp chacun, équipés d'objectifs télécentriques, qui représente un système original en stéréoscopie utilisant le modèle télécentrique.
- Microscope stéréoscopique Leïca MZ6

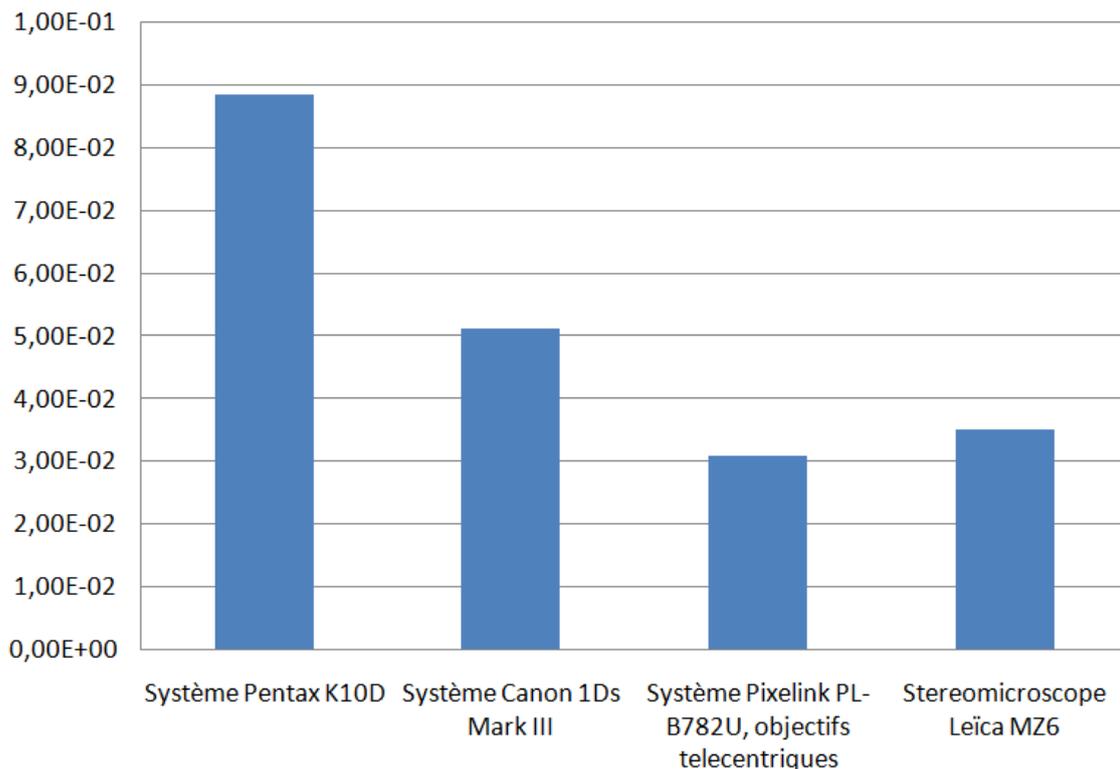


Figure VIII-14 Comparaison des précisions des systèmes d'acquisition stéréoscopiques

Les systèmes d'acquisition basés sur des appareils photos reflexe (Système Canon et Pentax) offre les pires précisions (voir Figure VIII-14) de toute la panoplie des systèmes testés, mais cela reste proportionnel aux mires et distances de travaux appliquées (voir Tableau VIII-3). En effet nous pouvons diviser ces résultats en deux catégories distinctes.

La première catégorie est celle qui regroupe les deux systèmes constitué d'appareils photos reflexes Pentax et Canon. Ces deux systèmes sont parfaitement comparables car ils se basent sur le même modèle optique et nous avons utilisé la même mire à la même distance pour le calibrage. La mire utilisée pour calibrer ces deux systèmes était celle de 4mm et a été placée à 46cm des caméras.

	Système Pentax K10D	Système Canon 1Ds Mark III	Système Pixelink PL-B782U, avec objectifs télécentriques	Système Microscope Leica MZ6
Photo Système				
Mire utilisée	4mm	4mm	2mm	2mm
Distance de travail	46cm	46cm	~10cm	~20cm
Précision moyenne en mm	0,08842	0,05127	0,03091	0,03519

Tableau VIII-3 Précision du calibrage de différents dispositifs d'acquisition stéréoscopique

Le système Canon a fourni la meilleure précision par rapport au Pentax, cela est dû à plusieurs facteurs :

- Le premier est que les images des Canon sont de plus grande résolution 21Mp, cela représente plus que le double des Pentax qui sont à 10Mp. Un pixel dans les images Canon représente donc une plus petite distance réelle que les Pentax.
- Un autre facteur bien connu dans la vision par ordinateur, est ce que nous appellerons la règle de la base stéréoscopique. La base stéréoscopique est la distance entre les deux appareils. Plus cette distance est grande et plus la précision des calculs 3D augmente. En contre partie la visualisation des images stéréoscopiques se dégrade en fonction de l'accroissement de cette distance.

Le choix entre les systèmes Canon et Pentax n'est pas si évident que cela. La décision d'adopter l'un ou l'autre doit être motivée par le but recherché. Si l'objectif est de visualiser

des photographies en stéréoscopie, de mettre des annotations et faire des calculs de distance et volumes 3D qui est notre objectif premier dans le cadre de la collaboration avec le CE.R.I.E.S le choix s'orientera vers le système Pentax malgré sa plus faible précision. Si par contre, l'objectif est de modéliser un sujet d'étude en 3D, le choix du système s'orientera incontestablement vers les Canon.

La deuxième catégorie de systèmes parmi ceux que nous avons testés, est celle qui regroupe le Microscope Leica MZ6 et les Pixelink PL-B782U équipés d'objectifs télécentriques. Ces deux systèmes sont comparables car nous avons utilisé la même mire pour les calibrer. Le microscope présente des effets optiques se rapprochant plus du télécentrisme que du modèle Pinhole.

Le système Pixelink a un léger avantage par rapport au microscope, mais son utilisation en tant que système d'acquisition stéréoscopique n'est à l'ordre du jour car les images produites ne sont pas visualisables en stéréo (absence de perspective dans les images). Le microscope fournit des images de très grande qualité, et sa précision le met en tête de liste des systèmes d'acquisition stéréo. Bien que des résultats très intéressants du microscope stéréoscopique et du système équipé d'objectifs télécentriques soient obtenus, ces deux systèmes restent malgré tout très instables du point de vue résultats de calibrage avec notre AG. Cela est due aux modèles optiques complexes qui sont dans certains cas hybrides (Pinhole et télécentrique). Nous rappelons que les résultats de précision proposés au cours des tests de comparaison matériel précédents sur les deux systèmes en question ont été sélectionnés parmi des résultats instables de l'AG et qui se rapproche au mieux de la réalité. Nous mettons la problématique posée par ce genre de systèmes en perspective après fin de cette thèse, et la classons en temps que problème en cours de résolution.

VIII.4 Etude comparative

Nous avons effectué une étude comparative de notre AG avec deux différents algorithmes de calibrage de caméras stéréoscopiques qui sont :

- Calibration Toolbox for Matlab (Bouguet s.d.)
- OpenCV Stereoscopic Camera Calibration (OpenCV s.d.)

Nous avons calibré le système d'acquisition stéréoscopique Pentax, en utilisant les mêmes images de mire (Mire de 7mm) en entrée pour les deux algorithmes conventionnels et notre AG. La mire était mise à une distance de 50cm des caméras, et nous avons utilisé le même nombre et les mêmes d'images d'apprentissage pour chaque méthode. Pour l'évaluation de la précision de chaque méthode, nous avons utilisé 8 images test de la mire. Nous avons calculé

pour chaque mire la moyenne d'erreur de l'estimation des distances entre les points qui la composent en utilisant pour chaque méthode les paramètres de calibrage correspondants.

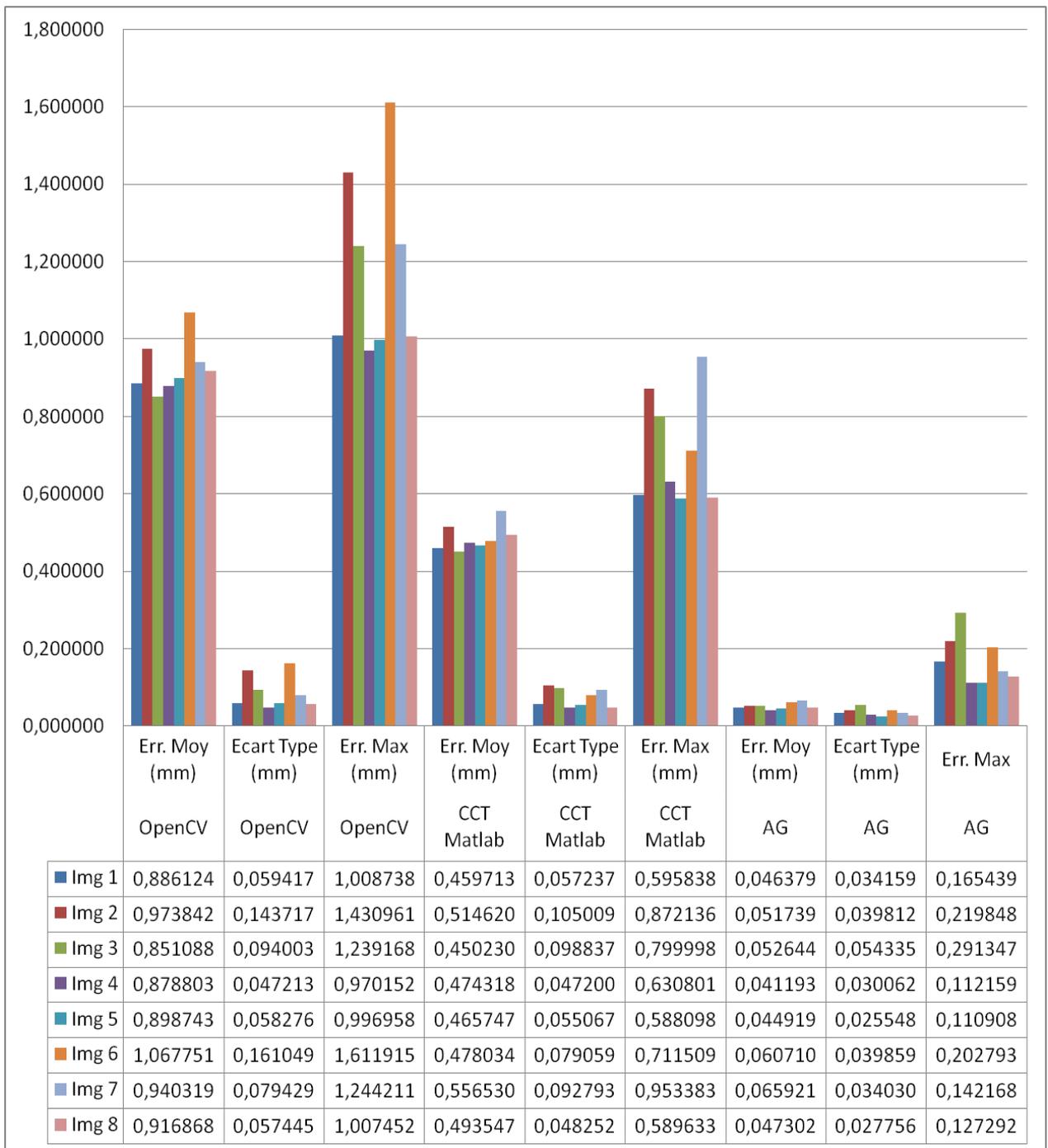


Figure VIII-15 Comparaison de notre algorithme génétique pour le calibrage avec deux méthodes conventionnelles, CCT Matlab : Camera Calibration Toolbox for Matlab (Bouguet s.d.), et Stereo Camera Calibration de OpenCV (OpenCV s.d.)

Les résultats obtenus (voir Figure VIII-15) donnent un net avantage à notre AG qui est globalement dix fois plus précis que la meilleure des deux autres méthodes.

Les deux méthodes conventionnelles (Bouguet s.d.) (OpenCV s.d.) sont destinées plutôt au milieu de la robotique et la vision par ordinateur non spécifique au macro ou micro relief. Cette donnée n'exige pas de ces deux méthodes des précisions au micron près, mais plutôt au millimètre près. Notre AG a été conçu pour une application précise visant le calcul d'un macro relief qui exige des résultats de calibrage nettement plus précis.

VIII.5 Conclusion

Différents tests sur des données de mire réelles ont été effectués. Nous avons défini un protocole de calibrage prenant en entrée des fichiers de points d'une image de mire sous forme d'échiquier. Nous avons observé le comportement de l'AG en utilisant différentes tailles de mires et des distances de travail différentes pour chacune d'elles.

Le calibrage des caméras n'est pas une science exacte, notre solution ainsi que les solutions présentées dans la bibliographie convergent vers une solution optimale sans l'atteindre, car des paramètres matériels font de ce problème non-linéaire, un problème complexe.

C'est pour cela que nous estimons que pour chaque type d'utilisation donnée, un protocole de calibrage devra être défini afin de minimiser l'erreur. Une application de type portrait (acquisition stéréoscopique du visage) réclamera un calibrage utilisant une grande mire, tandis qu'une application rapprochée avec le même système d'acquisition nécessitera une mire plus petite. Tout dépend de la taille du relief à analyser et à la distance de travail.

Concrètement, le protocole de calibrage d'un système d'acquisition stéréoscopique destiné à une application sur le visage est le suivant :

1. Utiliser un ensemble d'apprentissage composé de photographies de mires de plusieurs tailles (4mm, 7mm et 20,5mm)
2. Les mires doivent être positionnées face aux caméras suivant différentes orientations latérales et en profondeur
3. Le nombre d'images suffisant est estimé 3
4. Idéalement les mires devront être positionnées au niveau du visage, comme le visage n'est pas plat, des positions tout au long de la profondeur de champ de celui-ci sont recommandées
5. Un nombre de distances entre les points d'apprentissage dans chaque fichier d'entrée est fixé à 92

Nous avons comparé plusieurs systèmes d'acquisition stéréoscopiques montés par nous même. Chaque système présente ses avantages et ses inconvénients en matière de précision. Nous avons divisé les systèmes d'acquisition en deux catégories, chaque catégorie a été testée avec le même type de mires.

Nous avons observé un avantage en utilisant un système de très grande résolution avec un fort écartement mais cela nuit au but même du projet qui est la visualisation stéréo sur écran dédié. Nous avons aussi testé un microscope stéréoscopique qui présente des perspectives intéressantes en matière du micro relief.

Chapitre IX.

Applications réelles

Résumé

Ce chapitre présente les différentes applications réelles de **VirtualSkinLAB** qui ont été menées tout au long de cette thèse. Trois études/applications principales ont été effectuées : une étude cosmétologique au sein du CE.R.I.E.S./CHANEL, une étude dermatologique au sein de l'hôpital Saint André de Bordeaux et une dernière anatomique au sein du CHU de Tours.

Toutes ces applications ont permis de tester l'efficacité de notre système dans différentes situations faisant appel à des quantifications 3D spécifiques à chaque étude.

IX.1 Introduction

Le système **VirtualSkinLab** est dédié essentiellement à une application en dermatologie et en cosmétologie, il intègre différents outils logiciels et matériels permettant de parcourir toutes les étapes entrant dans le processus de l'étude de la peau in vivo.

Différentes études réelles dans des environnements liés aussi bien à la recherche sur la peau saine qu'au milieu hospitalier ont été effectuées. Ces études permettent d'une part d'évaluer les résultats obtenus grâce à notre système sur différentes pathologies ou applications cosmétologiques, et d'autre part elles nous permettent d'estimer la commodité de l'utilisation du système en présence de sujets réels.

Le facteur humain lié au contact direct avec les sujets d'études présentant des âges, de types de peaux, des pathologies cutanées, d'états de santé, de milieux sociaux et de caractères, tous différents, nous a incité à suivre un protocole stricte tant technique afin de ne pas gêner les sujets (ex. éclairage) que social qui englobe l'accueil et la gestion des personnes tout au long de l'étude. Les applications réelles faisant participer des bébés nous ont obligé de prendre des précautions supplémentaires par rapport à la sensibilité de ce types d'études.

IX.2 Applications réelles

Plusieurs études ont été effectués dans le cadre de ce travail de thèse, des études effectuées au sein du CE.R.I.E.S./CHANEL, d'autres au sein de l'hôpital Saint André de Bordeaux et une autre application expérimentale au laboratoire d'anatomie de l'hôpital Bretonneau de Tours qui fait actuellement l'objet d'une thèse indépendante du projet initial.

Chacune de ces études porte sur un domaine différent malgré leur point commun qui est le relief. En effet, les études effectuées au sein du CE.R.I.E.S./CHANEL concernent tout ce qui a une relation avec la cosmétologie, nous y testons les effets du maquillage et des crème hydratantes de marque CHANEL sur la peau des candidates. Les études effectuées au sein de l'hôpital Saint André de Bordeaux portent sur l'évaluation volumique d'une pathologie appelée Hémangiome infantile. Enfin, l'étude menée au laboratoire d'anatomie de l'hôpital de Tours s'intéresse plutôt à la quantification volumique des prélèvements cérébraux post mortem.

IX.2.1 Etude des cosmétiques

Les études effectuées au sein du CE.R.I.E.S. étaient destinées à évaluer la capacité de **VirtualSkinLAB** à assister les cosmétologues pour étudier la peau. Toutes les études ont été

effectuées sur de la peau saine. Une panoplie de sujet volontaires à majorité féminine a participé à l'étude, la moyenne d'âge des candidates est aux alentours de 50 ans. Chaque volontaire est prise en charge au CE.R.I.E.S. par un personnel qualifié dès son arrivée au centre, une durée de trente minutes de repos est de mise, avant toute intervention sur la peau, afin que la personne se décontracte et éviter toute rougeur ou sueur sur la peau liées à l'effort de déplacement. Les candidates passent ensuite entre les mains d'une technicienne du CE.R.I.E.S. afin de nettoyer la peau du visage de toute trace de crème hydratante, de maquillage ou de pollution de l'air extérieur.

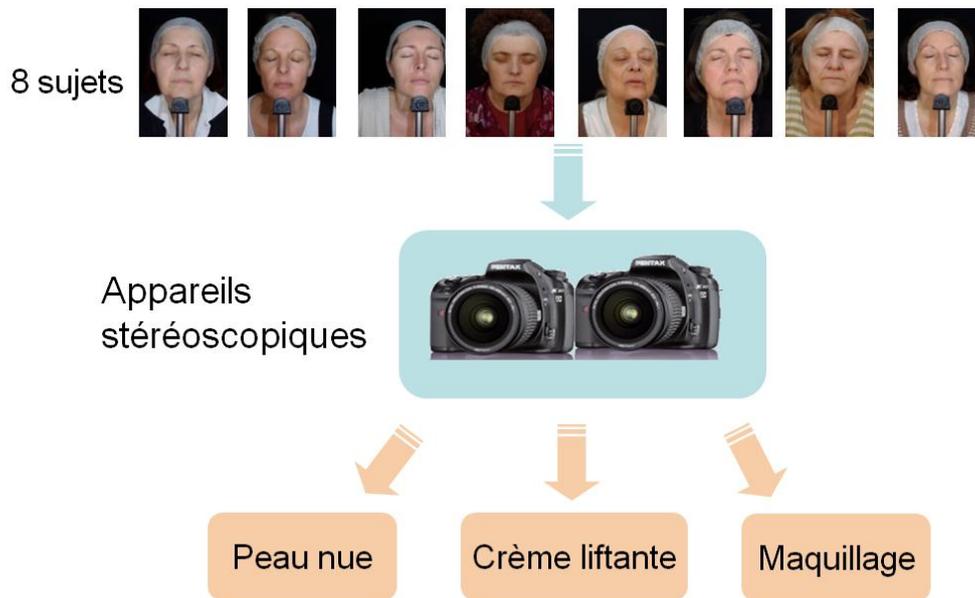


Figure IX-1 Protocol des prises de vue pour la cosmétologie au sein de CE.R.I.E.S./CHANEL

Trois groupes de prises de vues sont effectuées pour chaque candidate (voir Figure IX-1), chaque groupe concerne l'application d'un produit cosmétique donné. Les trois groupes de prise de vue sont les suivants :

- Peau Nue
- Crème liftant
- Maquillage (fond de teint + Rouge à lèvres)

L'application des produits cosmétiques est faite sur un demi-visage de chaque candidate afin de faire des comparaisons de texture au sein d'une même prise portrait.

Différents systèmes d'acquisition ont été utilisés durant chaque prise de vue. Un protocole de circuit a été mis au point afin de faire passer chaque candidate d'un système d'acquisition à un autre. Chaque système est conçu à des fins spécifiques, en tout, quatre système de prise de vue stéréoscopiques ont été utilisés :

- Système d'acquisition de portrait Pentax : ce système est utilisé pour prendre des portraits en stéréoscopie utilisant deux appareils photos PENTAX K10D à 10Mp chacun, un système d'éclairage à base de lumière flash diffuse est utilisée (voir Figure IX-2 à droite).
- Système d'acquisition de portrait Canon : ce système est utilisé pour prendre des portraits en stéréoscopie utilisant deux appareils photos Canon 1Ds Mark III à 21,5Mp chacun, un système d'éclairage à base de lumière flash diffuse est utilisée (voir Figure IX-2 à gauche).



Figure IX-2 Système de prise de vue stéréoscopique Canon à gauche et Pentax à droite

- Système d'acquisition avec caméras Pixelink (voir Figure IX-3): ce système est utilisé pour prendre des photos en stéréoscopie de petites zones (2x1cm). La pate d'oie, joues, ...etc. il utilise deux caméras Pixelink PL-B782U à 6Mp chacun, équipés de deux objectifs microscopiques. Un système d'éclairage à base de lumière Tungstène, deux torches ont été montées sur le support de caméras dirigées vers le champ de vision commun.



Figure IX-3 Système de prise de vue macro Pixelink

- Système d'acquisition avec BeamSplitter : Un objectif spécial de marque Loreo (BeamSplitter) a été monté sur un Nikon D80. Ce dispositif permet une facilité d'utilisation, ce système est un système expérimental destiné à une possible future distribution au près de dermatologues.

Au cours de notre étude, nous avons loué un système de modélisation du relief cutané basé sur de la projection de frange appelé DermaTop (voir Figure IX-4) afin de comparer ses performances avec le **VirtualSkinLAB**.



Figure IX-4 Système de location DermaTop Blue

Le système DermaTop offre 3 focales différentes pour 3 champs de vision et précisions différentes. Plus le grossissement de la caméra du système est grand, plus le système pourra modéliser le relief en détails. Les tests réels effectués, nous avons démontré que l'utilisation de la plus grande focale afin de modéliser le macro relief était très laborieux à utiliser sur des sujets In vivo, car il est très sensible au micro turbulences de la personne lors de la prise de vue. La précision optimale de cet appareil n'a donc pas pu être utilisée au maximum dans notre application.

La caméra noire et blanc du système nous a paru handicapante compte tenu de l'importance colorimétrique cutanée pour les dermatologues. Ce système s'oriente donc vers une logique de modélisation 3D pure.

Comme pour notre système d'acquisition basé sur la stéréoscopie, le système DermaTop est très sensible aux reflets et aux cheveux qui sont indétectables.

IX.2.2 Etude sur l'Hémangiome Infantile « Hôpital Saint André »

Durant cette thèse, nous avons été amenés à tester notre système **VirtualSkinLAB** dans un milieu hospitalier et plus précisément au département de dermatologie pour enfants, au sein de l'équipe du Prof. Alain Taïeb.

Notre étude a porté sur une pathologie appelée hémangiome infantile (ou hémangiome du nourrisson) qui est une tumeur bénigne apparaissant chez 10% des nouveaux nés. Elle disparaît d'elle-même chez 50% des cas au cours des 6 premières années de vie du bébé (Thivent 2009).

L'Hémangiome infantile se caractérise par une tâche rouge pouvant varier en taille, elle est souvent volumique car présentant une grosseur pouvant être importante, ou dans certain cas elle reste surfacique s'étendant sur le corps de l'enfant (voir Figure IX-5).



Figure IX-5 Hémangiome Infantile – Photo Prise au CHU de Bordeaux

L'équipe du Prof. Alain Taïeb a découvert un remède utilisant les bêta-bloquants qui est un médicament généralement utilisé en cardiologie, et qui agit d'une façon spectaculaire sur les hémangiomes. Le processus biologique précis sur la tumeur est encore inconnu mais ce traitement efficace est prescrit à beaucoup de patients atteints de cette pathologie.

L'objectif de notre étude était d'évaluer l'évolution volumique ou surfacique de l'hémangiome infantile sur des patients bénéficiant du traitement découvert par l'équipe du Prof. Alain Taïeb au CHU de Bordeaux. Nous avons effectué des prises de vues stéréoscopiques des zones atteintes par cette pathologie sur différents bébés qui étaient au début du traitement par bêta-bloquants, et nous avons refait la même opération après un temps donné afin de mesurer le taux de régression volumique (ou surfacique).

Afin de mener à bien notre étude, nous avons adapté un système de prise de vue stéréoscopique que nous avons conçu au préalable pour l'acquisition 3D des visages à ce cas de figure qui présente des contraintes particulières.

En effet, la particularité des enfants en bas âge est leur agitation, des systèmes d'acquisition de surface 3D comme ceux qui se basent sur la projection de franges et le laser ne sont pas adaptés dans ce cas, car ils demandent un certain temps d'acquisition qui n'est pas instantané. L'agitation de l'enfant ne permettra donc pas une acquisition correcte avec ce genre de dispositifs, c'est pour cela que notre système d'acquisition stéréoscopique montre toute son efficacité grâce à sa prise de vue de haute résolution instantanée.

Nous avons opté pour une position horizontale de l'enfant présentant l'hémangiome vers les appareils photos qui sont positionnés en haut et dirigés vers le bas (voir Figure IX-6).



Figure IX-6 Système d'acquisition avec appareils PENTAX K10D adapté à la prise de vue de bébés atteints d'hémangiome (Hopital Saint André de Bordeaux)

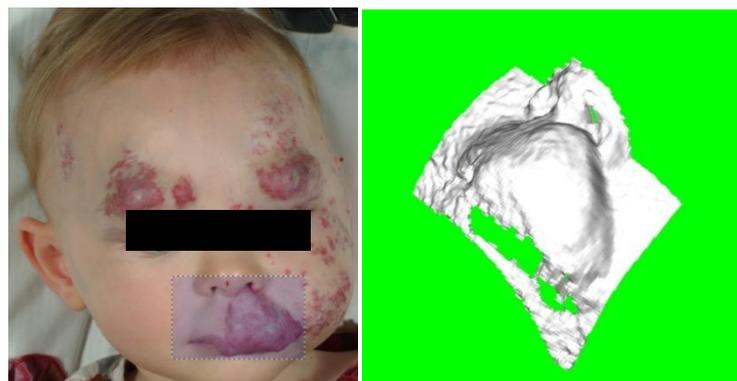


Figure IX-7 Modélisation d'une partie de l'hémangiome en 3D

Cette étude a permis aux dermatologues de constater des améliorations spectaculaires chez certains patients en utilisant le système **VirtualSkinLAB** en effectuant des mesures du volume de certaines parties de la tumeur sur le corps du bébé avant et après le traitement.

IX.2.3 Etude anatomique sur les cerveaux

Une Application originale de la prise de vue stéréoscopique fait l'objet d'une thèse à part « Acquisition, traitement et visualisation interactive stéréoscopique de données médicales surfaciques et volumiques : application à la détection des faisceaux de fibres blanches du cerveau humain. » menée par Barthélémy Serres dans le cadre d'une collaboration avec l'unité 930 « Imagerie et cerveau » de l'INSERM.



Figure IX-8 Utilisation du système d'acquisition stéréoscopique Pentax pour la modélisation anatomique d'un cerveau

Les points communs de cette application avec **VirtualSkinLAB** sont les premières étapes concernant l'acquisition, la génération de la carte de profondeur ainsi que le parcours de l'objet en 3D. Le but de cette thèse est de quantifier des volumes cérébraux extraits durant une phase d'étude anatomique sur un cerveau humain post mortem. Elle permettra entre autre de modéliser en 3D les fibres blanches qui constituent le cerveau.

Différentes prises de vue ont été effectuées au sein du laboratoire d'anatomie de la faculté de médecine de Tours pour tester notre dispositif d'acquisition stéréoscopique. Le système Pentax a été utilisé (voir Figure IX-8) pour cette application. Un exemple du modèle 3D généré à partir des prises de vue stéréoscopiques a été généré (voir Figure IX-9).



Figure IX-9 Modélisation 3D d'un cerveau et calage d'une texture 3D à l'aide des 3 repères rouges dans l'image

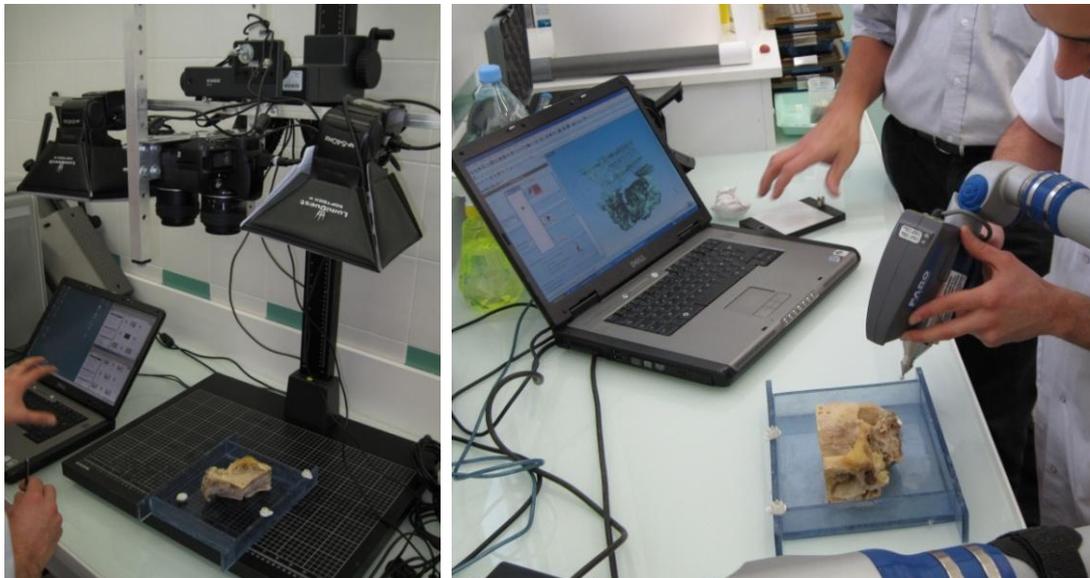


Figure IX-10 Essai d'un scanner laser à bras amovible sur des pièces à relief extrême (oreille interne)

Un Scanner laser à bras amovible a été testé (voir Figure IX-10) en même temps que le système d'acquisition stéréoscopique Pentax sur des parties de l'oreille interne du crâne humain. L'oreille interne comme son nom l'indique se situe dans une cavité de la pièce présentée, notre système stéréoscopique a atteint ses limites car il n'offre pas de possibilité de reconstruction 3D à partir de différents angles de vue de la pièce, ceci est considéré comme une perspective intéressante à la continuation du développement de **VirtualSkinLAB**.

IX.3 Conclusion

Différentes applications réelles faisant intervenir **VirtualSkinLAB** ont été effectuées durant le travail de cette thèse. Ces applications réalisées en collaboration avec le CE.R.I.E.S.,

le service de dermatologie de l'hôpital Saint André de Bordeaux ainsi qu'avec l'unité 930 « imagerie et cerveau » de l'INSERM nous ont permis de démontrer l'efficacité de notre système tant au niveau précision qu'au niveau de la visualisation et extraction de connaissances.

Notre système d'acquisition basé sur le principe de la stéréoscopie a démontré son efficacité dans les applications In-vivo. En effet, les systèmes utilisant des technologies comme la projection de franges ou le laser nécessitent un certain temps d'acquisition qui s'avère handicapant car le sujet est susceptible de bouger durant la prise (durant des acquisitions macroscopiques et microscopiques même le battement du cœur génère un mouvement non volontaire du sujet qui gêne l'acquisition).

L'avantage de la stéréoscopie a été encore plus convainquant lors de l'utilisation de **VirtualSkinLAB** pour suivre l'évolution de l'hémangiome infantile sur plusieurs bébés qui présentent la particularité d'être très agités, écartant ainsi la possibilité d'utiliser des systèmes avec un temps d'acquisition long (l'anesthésie générale est généralement utilisée dans l'imagerie médicale dans le cas de sujets jeunes, chose inconcevable dans notre cas).

La troisième application réelle de notre système qui est l'acquisition en 3D de cerveaux post mortem, présente la particularité d'être non In-vivo. Cela laisse le libre choix d'utiliser différentes technologies comme le scanner laser que nous avons comparé avec notre système et qui présente l'avantage de pouvoir acquérir l'intérieur d'un relief difficilement visible par des caméras stéréoscopiques positionnées frontalement.

Cependant, aucun système autre que celui basé sur la stéréoscopie offre la possibilité de visualiser la vue réelle en 3D (visualisation stéréoscopique), qui présente un apport considérable par rapport à la modélisation tridimensionnelle tant au niveau de la fidélité de la texture qu'au réalisme de la scène.

Chapitre X. Conclusion & perspectives

X.1 Conclusion

La prise de vue stéréoscopique est une technologie qui est apparue quasiment avec l'invention de la photographie. Elle a été utilisée à des fins de distraction sans réelle utilisation applicative. Cela a changé dès lors que cette technologie a intégré le domaine de la vision par ordinateur. La vision par ordinateur a propulsé cette technique vers l'avant en lui donnant un nouveau souffle notamment dans le domaine de la robotique.

Les possibilités offertes par la stéréoscopie durant le développement de la photogrammétrie se sont accrues de façon considérable. En effet, le développement d'algorithmes de mise en correspondance, de triangulation et d'interface homme machine ont fait de ce concept un outil de mesure et d'exploration 3D très efficace.

Nombreux sont les domaines qui ont adopté cette technique afin de réaliser des modélisations ou des calculs 3D, parmi eux : le bâtiment, l'architecture, la robotique, la géographie, le spatial et bien d'autres domaines où la profondeur est une donnée essentielle.

L'apport du travail accompli pour le C.E.R.I.E.S./CHANEL incluant cette thèse et celle de mon collègue Mohammed Haouach (Haouach, 2010) se matérialise dans l'application et l'amélioration de différentes techniques et algorithmes de stéréovision en dermatologie. En effet, le relief cutané et sa texture constituent des données importantes en dermatologie et cosmétologie. Ils permettent de définir une pathologie donnée, de la suivre au cours de son évolution et de tester l'efficacité des produits cosmétiques à effets actifs. Nous parlons d'effets actifs car la plus part des produits cosmétiques n'ont qu'un effet visuel qui font que masquer ou de mettre en valeur la zone souhaitée, nous nous intéressons dans notre étude qu'aux produits ayant des propriétés modificatrices du relief cutané.

Nous avons présenté dans la partie état de l'art différents dispositifs basés sur différentes technologies de modélisation 3D appliqués en dermatologie et cosmétologie. Dans ces domaines des contraintes méthodologiques et techniques comme le non contact direct mécanique ou à rayonnement de type laser avec la peau sont importants. La précision de chacun des dispositifs présentés varie en fonction du but de sa conception et la technique utilisée.

Nous nous sommes intéressés dans cette thèse au domaine biomédical et tout spécialement à la dermatologie, qui nécessite un dispositif d'acquisition stéréoscopique adapté à cause des différentes contraintes liés à l'acquisition In-Vivo. Nous nous positionnant dans la catégorie acquisition 3D passive sans contact qui est la plus adapté pour une application en dermatologie et cosmétologie.

Notre dispositif d'acquisition 3D se compose essentiellement de deux appareils photos de haute résolution fixé suivant une configuration donnée sur un support en aluminium permettant de réduire au maximum l'écartement entre eux, nous optons pour une configuration parallèle des appareils photo afin de faciliter les opération de calcul et de rectification. Les deux appareils photos sont entièrement contrôlés à distance via une connexion USB avec une application complète permettant d'ajuster tout les paramètres liés aux appareils photos (Vitesse d'obturation, ouverture du diaphragme, ...).

Le processus de prise de vue stéréoscopique appliqué à la dermatologie englobe des parties significatives pour l'obtention de photographie de qualité. Ces parties concernent l'éclairage et le calibrage des couleurs.

L'éclairage photo est un élément essentiel en photographie, car les appareils photos ne font que capturer la lumière reflétée par le sujet à photographier en salle sombre. Notre problématique essentielle est d'obtenir des photographies de qualité en ayant un éclairage homogène et en minimisant au maximum l'apparition d'ombres qui gêne considérablement le processus de mise en correspondance.

Pour cela nous avons combiné un éclairage rasant mettant en évidence le relief cutané et un éclairage plus diffus permettant d'atténuer l'effet d'ombre engendré par l'éclairage rasant. Notre problématique est d'autant complexifiée car nous utilisons deux appareils photos au lieu d'un seul, le problème essentiel c'est de pouvoir synchroniser les deux appareils photo avec le déclenchement des flashes, car le déclenchement des appareils photos n'est plus simultané au delà du 1/30 sec.

Les images prises par le système d'acquisition 3D passent par des dispositifs d'affichage divers tel que les écrans, les vidéo projecteurs, écrans 3D, elles passent aussi par d'autres dispositifs tels que l'imprimante. Afin de garder fidèle les couleurs tout au long de la chaîne graphique nous avons besoin de calibrer chaque dispositifs entrant dans le processus de traitement. Cela commence par le calibrage des caméras, des écrans, des vidéo projecteurs et éventuellement des imprimantes.

Afin d'y parvenir nous avons utilisé un capteur Eye-One (i1) de X-Rite et une mire couleur de Type Colorchecker SG, contenant 140 plages choisies spécifiquement pour leur localisation dans l'espace colorimétrique qui étendent le Gamut et vous permet de créer des profils ICC pour différents dispositifs. Les profils ICC permettent d'harmoniser la couleur réelle du pixel et le pixel de sortie.

Le sujet principal abordé au cours de cette thèse est aussi le calibrage géométrique de caméras stéréoscopiques équipant nos systèmes d'acquisition. Le problème du calibrage de

caméras est un problème complexe non linéaire qui nécessite une approximation afin de trouver une solution acceptable à une application donnée.

Nous avons énuméré différentes techniques présentes dans la littérature scientifique qui concerne le calibrage de caméra. Deux courants méthodologiques s'affrontent, d'un côté les partisans des méthodes dites conventionnelles qui se bases sur les calculs géométriques matriciels du modèle sténopé avec une touche d'une méthode d'approximation pour trouver un résultats satisfaisants, et d'autres parts, les partisans des méthodes évolutionnaires qui utilisent les AG afin de trouver une solution se rapprochant de l'optimum tout en évitant le piège des minimas locaux.

Nous avons proposé un nouvel algorithme génétique pour le calibrage des caméras qui se distingue de la majorité des AG disponibles dans la littérature par les points suivants :

- premièrement, notre approche est spécifique à la stéréoscopie (nous cherchons directement les paramètres qui relient les deux caméras),
- cette méthode utilise le concept de distance entre les points dans sa fonction d'évaluation (elle ne nécessite pas de coordonnées 3D de points spécifiques),
- et enfin, notre méthode peut être appliquée aux deux modèles optiques, Pinhole et télécentrique.

La fonction d'évaluation de notre AG se base sur deux facteurs importants, qui sont l'erreur moyenne de la distance estimée en utilisant les paramètres d'un individu i , et l'erreur d'intersection moyenne entre les deux droites qui permettent d'estimer la position d'un point dans l'espace. Ces deux facteurs couplés ensemble pour former la fonction d'évaluation ont démontrés leur efficacité lors de la sélection des individus les plus rapprochés de la solution optimale.

Nous avons paramétré notre AG pour deux problématiques de calibrage stéréoscopiques concernant deux dispositifs différents. Le premier est un dispositif d'acquisition équipé de caméras reflex Pentax K10D de 10Mp chacun, et l'autre équipé de caméras reflex Canon 1Ds Mark III de 21Mp chacun.

Nous avons effectué différentes évaluations de notre AG tant sur des données réelles qu'artificielles. L'évaluation sur les données artificielles nous a permit d'observer l'efficacité de l'algorithme dans des conditions dites maîtrisées. Cette évaluation est nécessaire car dans ce cas nous faisons abstraction de toutes les perturbations potentielles de types matériels ou optiques.

Le calibrage des caméras n'est pas une science exacte, notre solution ainsi que les solutions présentées dans la bibliographie convergent vers une solution optimale sans

l'atteindre, car des paramètres matériels font de ce problème non-linéaire, un problème complexe.

C'est pour cela que nous estimons que pour chaque type d'utilisation donnée, un protocole de calibrage devra être défini afin de minimiser l'erreur. Une application de type portrait (acquisition stéréoscopique du visage) réclamera un calibrage utilisant une grande mire, tandis qu'une application rapprochée avec le même système d'acquisition nécessitera une mire plus petite. Tout dépend de la taille du relief à analyser et à la distance de travail.

Nous avons comparé plusieurs systèmes d'acquisition stéréoscopiques montés par nous même. Chaque système présente ses avantages et ses inconvénients en matière de précision. Nous avons divisé les systèmes d'acquisition en deux catégories, chaque catégorie a été testée avec le même type de mires.

Nous avons observé un avantage en utilisant un système de très grande résolution avec un fort écartement mais cela nuit au but même du projet qui est la visualisation stéréo sur écran dédié. Nous avons aussi testé un microscope stéréoscopique qui présente des perspectives intéressantes en matière du micro relief.

Différentes application réelles faisant intervenir **VirtualSkinLAB** ont été effectuées durant le travail de cette thèse. Ces applications réalisées au sein du CE.R.I.E.S., de l'hôpital Saint André de Bordeaux ainsi qu'au CHU de Tours nous ont permis de démontrer l'efficacité de notre système tant au niveau précision qu'au niveau de la visualisation et extraction de connaissances.

X.2 Perspectives

VirtualSkinLAB est une application moderne du principe de la stéréoscopie dans le domaine biomédical. Son développement se poursuivra bien au delà de cette thèse et fera l'objet de différentes collaborations de recherche futures.

Au stade actuel de l'avancement de notre travail, différentes perspectives peuvent être proposés. Elles concernent aussi bien la partie d'acquisition stéréoscopique que le calibrage des caméras.

Différents systèmes d'acquisition stéréoscopiques ont été assemblé durant ce travail de thèse, chaque système est dédié à une utilisation spécifique et se caractérise par des spécificités techniques particulières.

En effet, la résolution du capteur, la distance focale (Zoom), les dimensions du capteur ainsi que celle du système, l'objectif photographique utilisé, l'ouverture du diaphragme maximale, la vitesse d'obturation minimale et bien d'autres caractéristiques techniques, font

tous converger un système vers une utilisation spécifique (utilisation pour des prises en portrait, macroscopique ou microscopique).

La principale caractéristique géométrique essentielle à la prise de photographies 3D macro ou microscopique est la parallaxe (distance entre les points focaux de deux caméras gauche et droite). Plus cette distance est minimisée et plus le système d'acquisition pourra se rapprocher du sujet de l'étude. La parallaxe peut être minimisée à un certain point qui ne peut pas dépasser les dimensions des deux caméras (les caméras sont collées du côté le plus rapproché du point focal).

L'idée d'utiliser un microscope stéréoscopique pour l'acquisition de zones microscopiques résout une bonne partie de la problématique de la parallaxe, mais l'architecture optique de ce genre de diapositifs reste complexe (modèle Pinhole ou Télécentrique) et complique le calibrage géométrique servant aux calculs 3D. Ceci représente une perspective intéressante, et est considéré comme une étape incontournable dans la bataille de la précision de mesure.

Un autre point à améliorer pour la partie d'acquisition est l'éclairage macroscopique qui devra être plus uniforme utilisant plutôt une lumière froide et instantanée (Flash annulaire).

La partie AG pour le calibrage de caméras stéréoscopiques comporte aussi différents travaux complémentaires futurs dans le but d'améliorer la précision et simplifier son processus.

Dans la littérature, le paramétrage automatique des algorithmes génétiques a été de nombreuses fois abordés comme pour les travaux de Grefenstette et Keane (Grefenstette 1986) (Keane 1995). Le paramétrage automatique des AG s'intitule méta-optimisation, cette technique n'a pas été abordée dans notre cas de figure due à la problématique complexe étudiée. Mais cela reste une bonne perspective à venir pour l'amélioration de notre AG.

Une autre perspective intéressante à explorer est d'utiliser une mire tridimensionnelle pour le calibrage. Cela offrira plus de points d'apprentissage en une prise de vue et pourra éviter l'acquisition photographique de différentes orientations d'une mire plane de type échiquier, le processus de calibrage sera ainsi simplifié et plus rapide.

Annexes

Annexe A : Présentation du CE.R.I.E.S./CHANEL

Le CE.R.I.E.S. (Centre de Recherches et Investigations Epidermiques et Sensorielles de CHANEL) est basé à Neuilly sur Seine en France. Il focalise ses recherches sur la peau saine en utilisant l'évaluation clinique, la biophysique, l'analyse statistique et la recherche fondamentale.

Les objectifs du CE.R.I.E.S. sont :

Pouvoir améliorer la compréhension de la structure et de la fonction de la peau saine par des études cliniques et biologiques effectuées dans ses laboratoires en France ainsi qu'à l'aide de projets de recherche fondamentaux exécutés dans le monde entier en collaboration avec des chercheurs du domaine.

Représenter CHANEL en étant un pôle d'excellence en ce qui concerne la santé de la peau. C'est une source d'innovation qui mène CHANEL à identifier et à développer des principes actifs innovateurs, des concepts de produits et des stratégies de soin de la peau.

De cette façon il rassemble des spécialistes de diverses disciplines, dont la principale vocation est le développement des méthodes permettant de décrire et de diagnostiquer une peau saine. L'approche du CE.R.I.E.S en matière de recherche sur la peau consiste en une analyse multicritère de données cliniques et biophysiques collectées sur la peau des visages d'un grand nombre de femmes de tout âge. Cette approche est une étape clé pour comprendre comment les différentes fonctions de la peau se combinent pour constituer différents groupes de peaux saines.

En parallèle, l'approche biologique permet une meilleure compréhension de la physiologie de la peau saine par l'étude des mécanismes moléculaires. En conséquence, cela devrait permettre de développer des stratégies de soin de peau individualisées et de prévenir le vieillissement de la peau par l'intégration de l'expertise de la peau basée sur une recherche s'étendant du principe fondamental jusqu'aux tests cliniques. En plus de sa propre recherche, le CE.R.I.E.S soutient des projets de recherche liés à la santé de la peau dans des laboratoires du monde entier.

Annexe B : Publications Scientifiques

Nous présentons ci-dessous les différentes publications scientifiques qui ont découlé de ce travail de thèse.

1. K. Benzeroual, C. Guinot, G. Venturini. An evolutionary algorithm for the calibration of stereoscopic cameras. The 2009 International Conference on Genetic and Evolutionary Methods - GEM'09, Las-Vegas, USA, 13-16 juillet 2009. Résumé: p. 48-53.
2. K. Benzeroual, M. Haouach, C. Guinot, G. Venturini. A system for the acquisition, interactive exploration and annotation of stereoscopic images. 12th Conference on Artificial Intelligence in Medicine (AIME'09), Vérone, Italie, 18-22 juillet 2009. Résumé : p. 156-160.
3. K. Benzeroual, M. Haouach, G. Venturini, C. Guinot. Acquisition, visualization and exploration of stereoscopic images of skin with virtual reality. ISBS International Symposium of the International Society for Biophysics and Imaging of the Skin (ISBS) in association with the European Society for Cosmetic and Esthetic Dermatology (ESCAD) –From surface to deepness, 9-12 septembre 2009, Besançon, France. Résumé: Congress book p. 112.
4. K. Benzeroual, M. Haouach, C. Guinot, G. Venturini (2008). Acquisition et exploration de données stéréoscopiques : application à des photographies numériques de peau humaine. Congrès conjoint de la Société Statistique du Canada et de la Société Française de Statistique (SSC-SFDS), Ottawa, Canada.
5. K. Benzeroual, M. Haouach, C. Guinot, G. Venturini (2008). Acquisition, visualization and exploration of three-dimensional skin photographs with a new tool: Skin3D, 17th Congress of European Academy of Dermatology and Venereology (EADV), Paris, France.
6. M. Haouach, K. Benzeroual, C. Guinot, G. Venturini. Acquisition, annotation and interactive exploration of stereo images with virtual reality. Second International Conference on Health Informatics, HEALTHINF 2009, Porto, Portugal, 14-17 janvier 2009. Proceedings of the Second International Conference on Health Informatics. (L. Azevedo & AR. Londral, editeurs), ISBN 978-989-8111-63-0, INSTICC Press, Porto, 2009, pages 369-374.

7. M. Haouach, K. Benzeroual, G. Venturini, C. Guinot. Acquisition, annotation and exploration interactive d'images stéréoscopiques en réalité virtuelle : application en dermatologie. 9èmes Journées Francophones d'Extraction et Gestion des Connaissances, EGC'2009, 27 au 31 janvier 2009, Strasbourg. Revue des Nouvelles Technologies de l'Information, RNTI-E-15, Extraction et Gestion des Connaissances EGC'2009, éditeurs Jean-Gabriel Ganascia, Pierre Gançarski, I.S.B.N. 9782854288780, Cépaduès Editions, Toulouse, 2009, pages 295-300.

Bibliographie

<http://www.kavo-everest.com/Default.aspx?navid=554039&oid=550&lid=En> (accès le Mars 12, 2010).

<http://www.rodin-web.org/frames.htm> (accès le Mars 12, 2010).

3D LIFEVIZ Esthetique. http://www.quantificare.com/index.php?q=LifeViz_EsthetiqueFR (accès le Mars 12, 2010).

3D LIFEVIZ Micro. <http://www.quantificare.com/index.php?q=274> (accès le Mars 12, 2010).

3D Skin Analyzer. <http://www.biophymed.com/> (accès le Mars 12, 2010).

3D VuCAM. http://www.stereovisioninc.com/3d_vucam.html (accès le Mars 12, 2010).

4Dynamics - Mephisto 3D Scanning Engine.
http://www.thinglab.co.uk/scanning_product.php?URL_=product_digiscan_4dd_mephisto&SubCatID_=31 (accès le Mars 12, 2010).

Aarts, E. H. L., et V. Laarhoven. «Statistical cooling: A general approach to combinatorial optimization problems.» *Philips J. Res.*, Vol. 40, 1985: 193-226.

Abdel-Aziz, Y.I., et H.M. Karara. «Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry.» *Symposium on Close-Range Photogrammetry*, 1971: 1-18.

Abraham, S., et T. Hau. «Towards autonomous highprecision calibration of digital cameras.» *SPIE Videometrics V*, Vol. 3174, 1997: 82-93.

Albouy, B., S. Treuillet, et Y. Lucas. «Reconstruction tridimensionnelle d'escarres par stéréovision couleur non calibrée.» *Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur*, 2005.

Anam, S., Md. Shohidul Islam, M.A. Kashem, M.N. Islam, M.R. Islam, et M.S. Islam. «Face Recognition Using Genetic Algorithm and Back Propagation Neural Network.» *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009 Vol I*, 2009.

Application of photometric stereo in dermatology.
<http://www.uwe.ac.uk/cems/research/groups/mvl/projects/dermatology.shtml> (accès le Mars 12, 2010).

Baack, T., F. Hoffmeister, et H.P. Schwefel. «A Survey of Evolution Strategies.» *Fourth Int. Conf. Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann*, 1991: 2-9.

Baguley, R. <http://www.televisioninfo.com/content/Sharp-Aquos-LC-46D64U-LCD-HDTV-Review-606/Performance:-Color.htm> (accès le Mars 12, 2010).

Balascio, C. C., D. J. Palmeri, et H. Gao. «Use of genetic algorithm and multi-objective programming for calibration of a hydrologic model.» *Trans. ASAE, vol.41, no.3*, 1998: 615-619.

Barel, A.O., M. Paye, et H. Maibach. *Handbook of cosmetic science and technology - Third Edition*. USA: informa, 2009.

Basri, R., D. Jacobs, et I. Kemelmacher. «Photometric Stereo with General, Unknown Lighting.» *International Journal of Computer Vision*, 2006: 374-381.

Benzeroual, K., C. Guinot, et G Venturini. «An Evolutionary Algorithm for the Calibration of Stereoscopic Cameras.» *The 2009 International Conference on Genetic and Evolutionary Methods - GEM'09*, 2009: 48-53.

Bösemann, W., R. Godding, et W. Riechmann. «Photogrammetric investigation of CCD cameras.» *SPIE Vol. 1395*, 1990: 119-126.

Bouguet, J. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ (accès le Mars 12, 2010).

Breuckmann *µkroTOP*. http://www.exactmetrology.com/breuckmann_uikrotopzoom.htm (accès le Mars 13, 2010).

Breuckmann *Dermatop Blue*. <http://www.breuckmann.com/bodymetrie-life-science/applikationen/kosmetik.html> (accès le Mars 12, 2010).

Breuckmann *FaceScan*. <http://www.breuckmann.com/bodymetrie-life-science/applikationen/digitale-3d-abbilder.html> (accès le Mars 13, 2010).

Brown, D.C. «Close-range camera calibration.» *PE&RS, Vol. 37(8)*, 1971: 855-866.

Cerveri, P., A. Pedotti, et N. A. Borghese. «Combined Evolution Strategies for Dynamic Calibration of Video-Based Measurement Systems.» *IEEE Transactions on evolutionary computations, Vol.5, No.3*, 2001: 271-282.

Clarke, T.A., et J.G. Fryer. «The development of camera calibration.» *The Photogrammetric Record, vol. 16, issue 91*, 2003: 51-66.

CNC Milled Aluminium Mount. <http://www.ledamatrix.com/v3mount/index.html> (accès le Mars 12, 2010).

Coueque, Y., J. Ohler, et S. Tollari. *Algorithmes génétiques pour résoudre le problème du commis voyageur*. Avril 2002. <http://sis.univ-tln.fr/~tollari/TER/AlgoGen1/AlgoGen1.html> (accès le Mars 14, 2010).

- Creaform*. <http://www.inspeck.com/> (accès le Mars 12, 2010).
- Cronk, S., C.S. Fraser, et H.B. Hanley. «Automatic Calibration of Colour Digital Cameras.» *Photogrammetric Record (in press)*, 2006.
- D'Apuzzo, N., et H.-G. Maas. «On the suitability of digital camcorders for virtual reality image data capture.» *Proceedings of SPIE Videometrics VI, El-Hakim and Gruen (Eds.), Vol. 3461*, 1999: 259-267.
- Denis, F. http://www710.univ-lyon1.fr/~fdenis/club_EEA/cours/acq_eclairage.html (accès le Mars 12, 2010).
- di3D*. <http://www.di3d.com/index.php> (accès le Mars 12, 2010).
- Digital 3-D Cameras*. <http://www.pokescope.com/cameras/index.html> (accès le Mars 12, 2010).
- Dipanda, A., S. Woo, F. Marzani, et J.M. Bilbault. «3-D shape reconstruction in an active stereo vision system using genetic algorithms.» *journal of pattern recognition society*, vol.36, 2003: 2143-2159.
- Dordogne, J. *Ajout de nouvelles fonctionnalités au sein du système de communication et d'archivage PACS des images médicales au sein du CHU de Tours*. Tours: Polytech's Tours, 2009.
- Dubosq Diableries*. <http://thatsanegative.wordpress.com/2008/07/14/satans-stereographs-les-diableries-c-1861/> (accès le Mars 13, 2010).
- Echiquier Adelson*. http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Grey_square_optical_illusion.PNG (accès le Mars 13, 2010).
- Ettaleb, A., P. Humbert, et S. Makki. «Réplique cutanée : intérêt en dermatologie et en cosmétologie .» *Cosmétologie et dermatologie esthétique 50-140-I-10*, 2001.
- Faig, W. «Calibration of close-range photogrammetru systems: Mathematical formulation.» *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol.41, 1975: 1479-1486.
- Faugeras, et Toscani. «The calibration problem for stereo.» *IEEE CVPR*, 1986: 15-20.
- Faugeras, O., Q.T. Luong, et S Maybank. «Camera selfcalibration: Theory and experiments.» *ECCV'92 Vol. 588*, 1992: 321-334.
- Fauster, L. «Stereoscopic Techniques in Computer Graphics.» Unoversité de Vienne, 2007.
- FinePix Real 3D W1*. http://www.fujifilm.com/products/3d/camera/finepix_real3dw1/ (accès le Mars 13, 2010).
- FotoScan 3D*. <http://www.precision3d.co.uk/> (accès le Mars 12, 2010).

Fraser, C. «Photogrammetric camera component calibration. A review of analytical techniques.» *Springer Series in Information Sciences, Vol. 34*, 2001: 95-121.

Fraser, C. S., et M. Shortis. «The Photogrammetric Record.» *The Photogrammetric Record, 15(85)*, 1995: 107-122.

Fraser, et Al-Ajlouni. «Zoom-dependent camera calibration in digital close-range photogrammetry.» *PE&RS, (in press)*, 2006.

Fryer, et Brown. «Lens distortion for close-range photogrammetry.» *PE&RS, Vol. 52(1)*, 1986: 51-58.

Fryer, J. «Camera Calibration.» *Close-range Photogrammetry and Machine Vision*, 1996: 156-179.

Grefenstette, J.J. «Optimization of control parameters for genetic algorithms.» *IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics 16*, 1986: 122-128.

Guermeur, P., et J. Louchet. «An Evolutionary Algorithm for Camera Calibration.» *WSEAS Transactions on Computers, Issue 3, Vol.2*, 2003: 799-804.

Guinot, Christiane. «Apport des méthodes PLS, d'analyse des données et d'extraction des connaissances pour la recherche clinique et épidémiologique et l'aide au développement de produits.» HDR, Tours, 2003.

Hall, E.L., J.B.K. Tio, C.A. McPherson, et F.A. Sadjadi. «Measuring curved surfaces for robot vision.» *Computing Journal, Vol. 15*, 1982: 42-54.

Haouach, M., K. Benzeroual, C. Guinot, et G. Venturini. «Acquisition, annotation and interactive exploration of stereo images with virtual reality.» *Second International conference on Health Informatics*, 2009: 369-374.

Hartley, R. «Euclidean reconstruction from uncalibrated views.» *Applications of Invariance in Computer Vision*, 1994: 237-256.

Heikkilä, J., et O. Silven. «A four-step camera calibration procedure with implicit image correction.» *CVPR97*, 1997.

Heinemann, P., F. Streichert, F. Sehnke, et A. Zell. «Automatic Calibration of Camera to World Mapping in RoboCup using Evolutionary Algorithms.» *Congress on Evolutionary Computation*, 2006: 1316 - 1323.

Heyden, A., et K. Aström. «Euclidean Reconstruction from Constant Intrinsic Parameters.» *IEEE CVPR*, 339-343: 1996.

Holland, John H. «Adaptation In Natural And Artificial Systems.» *MIT press*, 1992.

Holland, John H. «Adaptation In Natural And Artificial Systems.» *MIT press*, 1975.

Hometrica. <http://www.hometrica.ch/en/products.html> (accès le Mars 12, 2010).

Huang, H. Y., et F. H. Qi. «A genetic algorithm approach to accurate calibration of camera.» *Inf. Millim. Waves*, vol.19, no.1, 2000: 1-6.

Janko, Z., D. Chetverikov, et A Ekart. «Using genetic algorithms is computer vision: registering images to 3D surface model.» *Acta Cybernetica* vol. 18 , Issue 2, 2007: 193-212.

Jantos, R., T. Luhmann, J. Peipe, et C.-T. Schneider. «Photogrammetric Performance Evaluation of the Kodak DCS Pro Back.» *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 33(5) , , 2002.

Ji, Q., et Y. Zhang. «Camera Calibration With Genetic Algorithms.» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol.31, no.2, 2001.

Johnson, C.M., A. Bhat, et W. Thibault. «An evolutionary approach to camera-based projector calibration.» *Genetic And Evolutionary Computation Conference*, 2006: 1871 - 1872.

Keane, A.J. «Genetic algorithm optimization in multi-peak problems: studies in convergence and robustness.» *Artificial Intelligence in Engineering* 9, 1995: 75-83.

Konica Minolta VI-910. <http://www.konicaminolta.eu/measuring-instruments/products/3d-measurement/non-contact-3d-digitizer/vi-910/introduction.html> (accès le Mars 12, 2010).

Kunii, Y., et H. Chikatsu. «On the application of 3 million consumer digital camera to digital photogrammetry.» *SPIE Videometrics VII*, Vol. 4309, 2001: 278-287.

La balance des blancs. http://blog.fotolia.com/france/actualite/photo/balance_des_blancs.html (accès le Mars 12, 2010).

La correction gamma. <http://www.profil-couleur.com/tp/216-correction-gamma.php> (accès le Mars 12, 2010).

Läbe, T., et W. Förstner. «Geometric stability of lowcost digital consumer cameras.» *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 35(5), 2004: 528-535.

LASSOUAOU, N., L. HAMAMI, et N. NOUALI. «LES ALGORITHMES GENETIQUES APPLICATION A LA SEGMENTATION DES IMAGES.» *RIST*, Vol.14 N°02, 2004: 27-56.

Leica HDS3000. http://hds.leica-geosystems.com/hds/en/Leica_HDS3000.pdf (accès le Mars 12, 2010).

Les profils ICC. <http://www.profil-couleur.com/tp/205-profil-icc.php> (accès le Mars 12, 2010).

Loreo. <http://www.loreo.com/> (accès le Mars 12, 2010).

Masuda, Y., Yamashita, T., T. Hirao, et M. Takahashi. «An innovative method to measure skin pigmentation.» *Skin Research and Technology*, 2009: 224-229.

MathWorks. «Matlab.»

Meir, R., et G. Rätsch. «An introduction to boosting and leveraging.» *Advanced lectures on machine learning*, 2003 : 118-183.

Musée des sciences. <http://users.telenet.be/thomasweynants/stereoscope.html> (accès le Mars 13, 2010).

Okamoto, A. «Orientation and construction of models - part i: The orientation problem in close-range photogrammetry.» *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol.5, 1981: 1437-1454.

OpenCV. <http://opencv.willowgarage.com/wiki/> (accès le Mars 15, 2010).

Ozdemir, D., et W. M. Mosley. «Effect of wavelength drift on single and multi-instrument calibration using genetic regression.» *Appl. Spectrosc.*, vol.52, no.9, 1998: 1203-1209.

Paar, G., Md. Perucha, A. Bauer, et B. Nauschnegg. «Photogrammetric Fingerpring Unwrapping.» *Journal of Applied Geodesy*, 2008: 13 - 20.

Paquette, L., R. Stampfler, W. A. Devis, et T. M. Caelli. «A new camera calibration method for robotic vision.» *Closed Range Photogrammetry Meets Machine Vision*, 1990: 656-663.

Peipe, J., et M. Stephani. «Performance evaluation of a 5 megapixel digital metric camera for use in architectural photogrammetry.» *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34 (5/W12)*, 2003: 259-261.

Pollefeys, M., R. Koch, et L Van Gool. «Self- Calibration and Metric Reconstruction in spite of Varying and Unknown Internal Camera Parameters.» *IEEE ICCV*, 1997: 90-95.

Pollefeys, VanGool, et Oosterlinck. «The Modulus Constraint: A New Constraint for Self-Calibration.» *13th IEEE CVPR*, 1996: 349-353.

PRIMOS

lite.

http://www.gfm3d.com/index.php?option=com_content&view=article&id=145:augenfalten&catid=48:produkte&Itemid=83&lang=en (accès le Mars 13, 2010).

PRIMOS

premium.

http://www.gfm3d.com/index.php?option=com_content&view=article&id=92:augenfalten&catid=48:produkte&Itemid=83&lang=en (accès le Mars 12, 2010).

Quantirides. http://www.monaderm.com/Appareil_scientifique.php?appareil=quantirides (accès le Mars 12, 2010).

Rechenberg, I. *Evolutions strategie: Optmierung Technicher System nach Prinzipien der Biologischen Evolution*. Stuttgart: Fromman Holzboog, 1973.

Reisch, M. S. «Europe's Beauty Race.» *C&EN Chemical and Engineering News* vol.87, num.19, 2009: 10-15.

Remondino, F., et C. Fraser. «Digital Camera Calibration Methods Considerations and Comparison.» *ISPRS Commission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology*, 2006: 266-272.

Rohr, M., Schrader, A. «FOITS (Fast Optical in vivo Topometry of Human Skin) – A Classical Method in Modern Efficacy Testing.» *SOFW- Journal*, 2009: 3-10.

Salvi, Armanguè, et Batlle. «A comparative review of camera calibration methods with accuracy evaluation.» *Pattern Recognition*, Vol. 35, 2002: 1617-1635.

Salvi, J., J. Pagès, et J. Batlle. «Pattern codification strategies in structured light systems.» *Pattern Recognition. Volume 37, Issue 4*, 2004: 827-849.

Samuel Van Hoogstraten. <http://liedlein.exblog.jp/2658640/> (accès le Mars 13, 2010).

Savii, G. G. «Camera Calibration Using Compound Genetic-Simplex Algorithm.» *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* Vol.6, No. 4, 2004: 1255-1261.

Scanner 3D. http://fr.wikipedia.org/wiki/Scanner_3D (accès le Mars 12, 2010).

Sensable Phantom Premium 1.0.
http://www.inition.co.uk/inition/product.php?URL_=product_ffhaptic_sensable_phantompremium&SubCatID_=36 (accès le Mars 12, 2010).

Shortis, M., et H.A. Beyer. «Calibration stability of the Kodak DCS420 and 460 cameras.» *SPIE Videometrics V*, Vol. 3174, 1997.

Skin Mapping 2. <http://dibcms.joanneum.at/projects/skinmapping> (accès le Mars 12, 2010).

Sobel, I. «On calibrating computer controlled cameras for perceiving 3D scenes .» *Artif. Intell.*, vol.5, 1974: 1437-1454.

Sprzeczak, P., et R., Z. Morawski. «Calibration of spectrometer using genetic algorithm.» *Trans. Instrum. Meas.*, vol.49, 2000: 449-454.

Sturm, P. «Critical Motion Sequences for Monocular Self-Calibration and Uncalibrated Euclidean Reconstruction.» *IEEE CVPR*, 1997: 1100-1105.

tc2. <http://www.tc2.com/> (accès le Mars 12, 2010).

The 3D Advantage . <http://www.stereoscopy.com/3d-concepts/cameradig.html> (accès le Mars 12, 2010).

The Stereoscope and Stereo-photography.
<http://users.telenet.be/thomasweynants/stereoscope.html> (accès le Mars 12, 2010).

Thivent, Viviane. *UN REMÈDE MIRACLE - contre les hémangiomes infantiles.* 29 Avril 2009. <http://www.cite->

sciences.fr/francais/ala_cite/science_actualites/sitesactu/question_actu.php?langue=fr&id_article=12163 (accès le Mars 12, 2010).

Thormählen, T., H. Broszio, et P. Mikulastik. «Robust Linear Auto-calibration of a Moving Camera from Image Sequences.» *ACCV 2006, Vol. 3852*, 2006: 71-80.

TiVi600. <http://www.wheelsbridge.se/> (accès le Mars 12, 2010).

Triggs. «Autocalibration from planar scenes.» *ECCV 98*, 1998: 89-105.

Triggs, B. «The Absolute Quadric.» *IEEE CVPR*, 1997: 609-614.

Tsai, R.Y. «A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses.» *IEEE Int. Journal Robotics and Automation, Vol. 3(4)*, 1987: 323-344.

USB Digital Cameras. <http://www.bigcatchusa.com/> (accès le Mars 12, 2010).

Vue stereo. http://axel.inria.fr/_detail/vr/stereoscopy.jpg?id=vr&cache=cache (accès le Mars 12, 2010).

Wei, G., et S. De Ma. «Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments.» *IEEE Trans. on PAMI, Vol. 16(5)*, 1994: 469-479.

Weng, J., P. Cohen, et M. Herniou. «Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation.» *IEEE Trans. On PAMI, Vol. 14(10)*, 1992: 965-980.

Wheatstone. <http://www.lst.inf.ethz.ch/teaching/lectures/ss05/230/films/index.html> (accès le Mars 13, 2010).

Whitehead, A., et G. Roth. «Estimating Intrinsic Camera Parameters from the Fundamental Matrix Using an Evolutionary Approach.» *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004: 1113-1124.

Whole Body Color 3D Scanner. <http://www.cyberware.com/> (accès le Mars 12, 2010).

Wikipédia. *Distorsion (optique)*. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Distorsion_\(optique\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Distorsion_(optique)) (accès le Mai 02, 2010).

—. *Microscope confocal*. http://fr.wikipedia.org/wiki/Microscope_confocal (accès le Avril 7, 2010).

Wiley, A.G., et K.W. Wong. «Geometric calibration of zoom lenses for computer vision metrology.» *PE&RS, Vol. 61(1)*, 1995: 69-74.

Wong, K. W. «Mathematical formulation and digital analysis in close-range photogrammetry.» *Photogramm. Eng. Remote Sens., vol.37*, 1975: 1355-1373.

Wu, J. *PhD thesis, Rotation Invariant Classification of 3D Surface Texture Using Photometric Stereo*. Edinburgh, United Kingdom: Department of Computer Science, School of Mathematical and Computer Sciences, Heriot-Watt University, 2002.

www.Profil-couleur.com. <http://www.profil-couleur.com/lc/013-spectre-lumiere.php> (accès le Mai 25, 2010).

X-Rite il. http://www.xrite.com/product_overview.aspx?ID=1238 (accès le Mars 13, 2010).

Yang, D., et J. Illingworth. «Calibrating a robot camera.» *Proceedings of the conference on British machine vision (vol. 2)*, 1994: 519-528.

Zahouani, H., et P. Humbert. «Méthodes quantitatives d'évaluation du relief cutané.» *Cosmétologie et Dermatologie esthétique*, 2002: 6.

Zhang. «A flexible new technique for camera calibration.» *IEEE Trans. on PAMI, Vol. 22(11)*, 2000: 1330-1334.

Zhang, L., B. Curless, et S. M. Seitz. «Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming.» *Int. Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, 2002: 24-36.

Zhang, Y., et Q. Ji. «Camera Calibration With Genetic Algorithms.» *IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 31, issue 2*, 2001: 120-130.

Zhang, Z. «A Flexible New Technique for Camera Calibration.» *Technical Report MSR-TR-98-71 of Microsoft Research*, 1998.



■ ■ Résumé

Le sujet de cette thèse consiste à définir un outil complet permettant l'acquisition du relief et de la texture d'une surface 3D dans le but l'appliquer dans le domaine de la dermatologie, et plus généralement dans le domaine biomédical.

Il s'agit d'abord d'étudier et de spécifier ou concevoir les aspects matériels tels que les appareils photographiques professionnels, les systèmes d'assemblage des appareils stéréoscopiques, le système d'éclairage et le système de déclenchement des appareils.

Ensuite, la thèse porte sur les aspects algorithmiques et logiciels qui sont liés à tous les traitements mathématiques et informatiques nécessaires pour obtenir une surface 3D la plus fiable possible. Un des problèmes majeurs traités est la calibration géométrique de caméras stéréoscopiques. L'approche développée consiste à repousser les limites des méthodes classiques dans ce domaine en proposant l'utilisation de méthodes d'optimisation plus performantes et plus faciles à mettre en œuvre.

Nous avons montré que les algorithmes d'optimisation utilisant les principes des algorithmes génétiques peuvent obtenir des résultats plus fiables que leurs concurrents et qu'ils permettent de traiter plus facilement des conditions variables d'expérimentations.

Les applications réelles de notre algorithme génétique pour le calibrage portent sur de nombreux matériels d'acquisition (caméras industrielles, appareils photo reflex « grand-public » et professionnels, microscopes stéréoscopiques, objectifs à séparation de vue, objectifs sténopés et objectifs télécentriques), chaque dispositif d'acquisition est adapté à une utilisation spécifique suivant l'étude demandée (zones microscopiques, visage, partie du corps, ...).

Cette thèse constitue la partie « acquisition/calibration » du système **VirtualSkinLAB**.

■ ■ Summary

This thesis "Acquisition of stereoscopic images and camera calibration with genetic algorithms: application in the biomedical domain" consists to define a complete tool for acquiring the topography and texture of a 3D surface in order to apply it in the dermatological and more generally in the biomedical field.

First, the objective is to study and to specify or design hardware devices such as professional cameras, assembly systems for stereo equipments, lighting system and trigger system for devices.

Then, the thesis focuses on algorithmic and software aspects which relate to all mathematic and computational treatments needed to obtain a 3D surface.

One of major issues addressed is the geometric calibration of stereo cameras. The developed approach pushes the limits of conventional methods in this field by proposing the use of more efficient and easier to implement optimization methods.

We have shown that the algorithms using the principles of genetic algorithms can obtain more reliable results than their competitors and they can deal more easily the variable conditions of experiments.

The real applications of our genetic algorithm for camera calibration cover many acquisition devices (industrial cameras, SLR cameras, stereo microscopes, beam splitters, pinhole and telecentric objectives), each acquisition device is adapted to a specific use following the requested study (microscopic areas, face or body parts).

This thesis "acquisition / calibration" is a part of a global system called **VirtualSkinLAB**.