



**HAL**  
open science

# Analyse statistique de la diversité en anthropométrie tridimensionnelle

Aikaterini Kollia

► **To cite this version:**

Aikaterini Kollia. Analyse statistique de la diversité en anthropométrie tridimensionnelle. Autre. Université de Lyon, 2016. Français. NNT : 2016LYSEM812 . tel-03270846

**HAL Id: tel-03270846**

**<https://theses.hal.science/tel-03270846>**

Submitted on 25 Jun 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



NNT : 2016 EMSE 0812

## THÈSE

présentée par

Aikaterini KOLLIA

pour obtenir le grade de  
Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : MECANIQUE ET INGENIERIE

### ANALYSE STATISTIQUE DE LA DIVERSITE EN ANTHROPOMETRIE TRIDIMENSIONNELLE

soutenue à Saint-Etienne, le 13 Janvier 2016

#### Membres du jury

Président :	Rodolphe LE RICHE	Professeur, Mines Saint-Etienne, Saint-Etienne
Rapporteurs :	François GOULETTE	Professeur, Mines ParisTech, Paris
	Xuguang WANG	Professeur, IFSTTAR, Lyon
Encadrants :	Laura BOUTEN	PhD, Décathlon, Villeneuve d'Ascq
	Laurent NAVARRO	CR, Mines Saint-Etienne, Saint-Etienne
Directeur de thèse :	Stéphane AVRIL	Professeur, Mines Saint-Etienne, Saint-Etienne
Invités :	Alexandre ABAD	MBA, Décathlon, Villeneuve d'Ascq
	Jérémy CORNOLO	PhD, Décathlon, Villeneuve d'Ascq

Spécialités doctorales	Responsables :	Spécialités doctorales	Responsables
SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX	K. Wolski Directeur de recherche	MATHEMATIQUES APPLIQUEES	O. Roustant, Maître-assistant
MECANIQUE ET INGENIERIE	S. Drapier, professeur	INFORMATIQUE	O. Boissier, Professeur
GENIE DES PROCEDES	F. Gruy, Maître de recherche	IMAGE, VISION, SIGNAL	JC. Pinoli, Professeur
SCIENCES DE LA TERRE	B. Guy, Directeur de recherche	GENIE INDUSTRIEL	A. Dolgui, Professeur
SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT	D. Graillot, Directeur de recherche	MICROELECTRONIQUE	S. Dauzere Peres, Professeur

**EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)**

ABSI	Nabil	CR	Génie industriel	CMP
AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BALBO	Flavien	PR2	Informatique	FAYOL
BASSEREAU	Jean-François	PR	Sciences et génie des matériaux	SMS
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BERGER DOUCE	Sandrine	PR2	Sciences de gestion	FAYOL
BERNACHE-ASSOLLANT	Didier	PR0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean Pierre	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaid	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BLAYAC	Sylvain	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie des matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BRUCHON	Julien	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	SMS
BURLAT	Patrick	PR1	Génie Industriel	FAYOL
COURNIL	Michel	PR0	Génie des Procédés	DIR
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences et génie des matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSÉ	David	PR0	Sciences et génie des matériaux	SMS
DESRAYAUD	Christophe	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR0	Génie Industriel	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FEILLET	Dominique	PR1	Génie Industriel	CMP
FEVOTTE	Gilles	PR1	Génie des Procédés	SPIN
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	CIS
GOEURIOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GRILLOT	Didier	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
HAN	Woo-Suck	MR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmut	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
LI	Jean-Michel		Microélectronique	CMP
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MAURINE	Philippe			CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MONTHEILLET	Frank	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
MOUTTE	Jacques	CR	Génie des Procédés	SPIN
NEUBERT	Gilles			FAYOL
NIKOLOVSKI	Jean-Pierre	Ingénieur de recherche		CMP
NORTIER	Patrice	PR1		SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	MR	Génie des Procédés	CIS
ROBISSON	Bruno	Ingénieur de recherche		CMP
ROUSSY	Agnès	MA(MDC)	Génie industriel	CMP
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)	Mathématiques appliquées	FAYOL
ROUX	Christian	PR	Image Vision Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériaux	SMS
TRIA	Assia	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	PR2	Sciences et génie des matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	DR	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR1	Génie industriel	CIS
YUGMA	Gallian	CR	Génie industriel	CMP

**ENISE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)**

BERGHEAU	Jean-Michel	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
BERTRAND	Philippe	MCF	Génie des procédés	ENISE
DUBUJET	Philippe	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FEULVARCH	Eric	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FORTUNIER	Roland	PR	Sciences et Génie des matériaux	ENISE
GUSSAROV	Andrey	Enseignant contractuel	Génie des procédés	ENISE
HAMDI	Hédi	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
LYONNET	Patrick	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
RECH	Joël	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SMUROV	Igor	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
TOSCANO	Rosario	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
ZAHOUANI	Hassan	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE

# Table des matières

Introduction générale	1
<b>I État de l'art</b>	<b>7</b>
<b>1 Données anthropométriques</b>	<b>9</b>
1.1 Description des données anthropométriques . . . . .	9
1.1.1 Données unidimensionnelles (1D) . . . . .	9
1.1.2 Données bidimensionnelles (2D) . . . . .	10
1.1.3 Données tridimensionnelles (3D) . . . . .	10
1.2 Acquisition des données anthropométriques . . . . .	11
1.2.1 Méthodes utilisant un appareillage traditionnel . . . . .	11
1.2.2 Modèles de corps humain à partir de mesures traditionnelles . . . . .	11
1.2.3 Mesures et modèles par photogrammétrie . . . . .	11
1.2.4 Mesures par imagerie 3D . . . . .	15
1.2.5 Normes internationales . . . . .	15
1.2.6 Comparaison des méthodes et des données anthropométriques . . . . .	15
1.3 Base de données . . . . .	17
1.3.1 Base de données 1D . . . . .	17
1.3.2 Corps humain scanné en 3D . . . . .	17
1.3.3 Normes internationales . . . . .	18
1.3.4 Séparation des populations . . . . .	18
<b>2 Exploitation des données</b>	<b>21</b>
2.1 Traitement des données obtenues à l'aide de scanners 3D . . . . .	21
2.1.1 Représentation du nuage de points . . . . .	22
2.1.2 Segmentation automatique du corps . . . . .	22
2.1.3 Définition des points et des lignes d'intérêt . . . . .	24
2.1.4 Méthodes de traitement utilisées lors d'autres applications . . . . .	24
2.2 Morphologies représentatives des séries des données . . . . .	26
2.2.1 Analyse statistique multiparamétrique . . . . .	26
2.2.2 Formes moyennes tridimensionnelles . . . . .	27
2.2.3 Systèmes de tailles . . . . .	30
<b>3 Positionnement de l'étude</b>	<b>31</b>
3.1 Motivations . . . . .	31
3.2 Contexte industriel . . . . .	33
3.3 Objectifs . . . . .	33

3.3.1	Industriels . . . . .	33
3.3.2	Scientifiques . . . . .	34
<b>II Mise en place de la méthodologie</b>		<b>35</b>
<b>4</b>	<b>Analyse de la morphologie individuelle</b>	<b>37</b>
4.1	Représentation des données tridimensionnelles . . . . .	37
4.1.1	Systèmes des coordonnées . . . . .	37
4.1.2	Intérêt du changement de système des coordonnées . . . . .	38
4.2	Alignement et superposition . . . . .	38
4.2.1	Déplacement linéaire . . . . .	39
4.2.2	Rotation . . . . .	39
4.3	Obtention des lignes et points d'intérêt . . . . .	40
4.3.1	Séparation de la tête . . . . .	40
4.3.2	Détection des points de rebroussement sur le plan frontal (entrejambe et aisselles) . . . . .	43
4.3.3	Positionnement des lignes d'intérêt . . . . .	44
4.4	Extraction des mesures unidimensionnelles . . . . .	45
4.5	Synthèse . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Morphologie 3D des populations</b>	<b>49</b>
5.1	Changement de système de coordonnées . . . . .	49
5.1.1	Diminution d'espace de configuration . . . . .	49
5.1.2	Transformation de coordonnées 3D en images 2D . . . . .	49
5.1.3	Comparaison et correspondance des sujets . . . . .	50
5.2	Digitalisation de l'image . . . . .	51
5.2.1	Génération d'un maillage commun . . . . .	51
5.2.2	Projection sur un maillage commun . . . . .	51
5.3	Optimisation de la position relative des sujets . . . . .	52
5.3.1	Motivation . . . . .	52
5.3.2	Coefficient de corrélation de deux images A et B . . . . .	52
5.3.3	Matrice de coefficients de corrélation $r_{s,t}$ . . . . .	53
5.3.4	Meilleure position relative . . . . .	54
5.4	Synthèse . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Analyse statistique de la morphologie 3D</b>	<b>57</b>
6.1	Obtention de la morphologie moyenne . . . . .	57
6.1.1	Propriétés statistiques . . . . .	57
6.1.2	Élimination des points aberrants . . . . .	57
6.2	Analyse statistique à plusieurs degrés . . . . .	61
6.2.1	Analyse en composantes principales . . . . .	61
6.2.2	Choix des éléments à analyser - points dé-corrélés . . . . .	62
6.2.3	Prédiction des morphologies à partir des résultats statistiques . . . . .	65
6.3	Autres méthodes statistiques pour l'analyse et la comparaison des résultats . . . . .	68
6.3.1	Coefficient de variation . . . . .	68
6.3.2	T - test . . . . .	69
6.4	Synthèse . . . . .	69

<b>7</b>	<b>Systèmes de tailles</b>	<b>71</b>
7.1	Séparation des populations . . . . .	71
7.2	Taux de couverture . . . . .	73
7.3	Industrialisation et communication à la population cible . . . . .	75
7.4	Synthèse . . . . .	75
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>77</b>
<b>III</b>	<b>Application de la méthodologie aux trois parties du corps</b>	<b>79</b>
<b>9</b>	<b>Analyse des pieds scannés</b>	<b>81</b>
9.1	Introduction . . . . .	81
9.2	Matériels et méthodes . . . . .	82
9.2.1	Campagnes de mensuration du pied . . . . .	82
9.2.2	Détection du bruit sur les scans . . . . .	83
9.2.3	Alignement des pieds scannés . . . . .	85
9.2.4	Mesures unidimensionnelles . . . . .	87
9.3	Résultats . . . . .	90
9.3.1	Incertitude d'extraction des mesures . . . . .	90
9.3.2	Différence entre les scanners sur les mesures extraites . . . . .	91
9.3.3	Anthropométrie du pied . . . . .	95
9.4	Discussion . . . . .	97
9.5	Conclusion . . . . .	99
<b>10</b>	<b>Anthropométrie des têtes</b>	<b>101</b>
10.1	Introduction . . . . .	101
10.2	Base de données et Méthodes . . . . .	102
10.2.1	Données normatives . . . . .	102
10.2.2	Bases de données anthropométriques . . . . .	104
10.2.3	Alignement des sujets scannés aux points anatomiques . . . . .	105
10.2.4	Mesures unidimensionnelles . . . . .	107
10.2.5	Sélection des sujets . . . . .	110
10.2.6	Coordonnées d'image et digitalisation . . . . .	111
10.2.7	Optimisation de la position relative des sujets . . . . .	111
10.2.8	Analyse en composantes principales . . . . .	111
10.3	Résultats . . . . .	115
10.3.1	Mesures unidimensionnelles . . . . .	115
10.3.2	Analyse en composantes principales . . . . .	118
10.3.3	Systèmes de tailles et morphologie moyenne 3D . . . . .	124
10.3.4	Comparaison des morphologies moyennes 3D . . . . .	125
10.3.5	Position relative des sujets . . . . .	128
10.3.6	Incertitudes des calculs . . . . .	129
10.4	Discussion . . . . .	131
10.4.1	Traitement de scans . . . . .	131
10.4.2	Têtes modèles . . . . .	131
10.4.3	Analyse factorielle à trois dimensions . . . . .	132
10.4.4	Application aux produits . . . . .	133
10.5	Conclusion . . . . .	133

<b>11 Poitrine féminine</b>	<b>135</b>
11.1 Introduction . . . . .	135
11.2 Matériels et méthodes . . . . .	136
11.2.1 Campagne de mensuration . . . . .	136
11.2.2 Mesures unidimensionnelles . . . . .	136
11.2.3 Alignement des sujets scannés . . . . .	137
11.2.4 Coordonnées d'image et digitalisation . . . . .	138
11.2.5 Optimisation de la position relative des sujets . . . . .	138
11.2.6 Élimination des points aberrants et formes moyennes . . . . .	139
11.2.7 Analyse en composantes principales . . . . .	139
11.3 Résultats . . . . .	140
11.3.1 Formes moyennes . . . . .	140
11.3.2 Position relative des sujets . . . . .	140
11.3.3 Analyse en composantes principales . . . . .	142
11.3.4 Asymétrie de la poitrine . . . . .	145
11.3.5 Séparation en tailles factorielles . . . . .	145
11.3.6 Incertitude des calculs . . . . .	147
11.4 Discussion . . . . .	148
11.4.1 Traitement des scans . . . . .	148
11.4.2 Formes moyennes . . . . .	148
11.4.3 Analyse en composantes principales . . . . .	148
11.4.4 Tailles factorielles . . . . .	149
11.4.5 Application aux produits . . . . .	149
11.5 Conclusion . . . . .	149
<b>Conclusion générale</b>	<b>149</b>
<b>Annexes</b>	<b>I</b>
<b>Liste des publications</b>	<b>III</b>
<b>Méthodologie étudiée et non utilisée</b>	<b>XII</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>XV</b>
<b>Table des figures</b>	<b>XXIII</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>XXVII</b>

# Remerciements

Je voudrais remercier toutes les personnes qui m'ont permis de m'améliorer durant cette thèse et qui m'ont aidé à la parfaire.

En commençant par Yohann qui m'a intégré dans les équipes Décathlon. Merci !

Merci Stéphane de m'avoir accepté en thèse et de toujours porter un œil nouveau sur ce travail. Tes commentaires m'ont toujours aidé à retourner ma vision des choses et à rechercher des solutions plus novatrices.

Merci Jérémy, ton rôle a été très important pour mon évolution personnelle et professionnelle. Même parfois je m'intéressais beaucoup plus à d'autres sujets de l'entreprise que ma thèse, tu étais là à essayer de trouver les réponses et à me cadrer afin d'obtenir le meilleur de moi-même. Tu m'as indiqué des chemins à suivre et des portes à ouvrir qui ont fortement impactées mon développement.

Merci Laurent. J'ai un peu rendu ta vie difficile en te donnant les premières versions à corriger avec un français très à moi. Il faut que tu saches que j'étais impatiente d'avoir ton feedback avec les commentaires et corrections (et surtout avec des détails qui m'ont bien fait rire !). Chaque une de nos réunions se transformait en dix milles idées et leur combinaison a aussi fait la différence de cette thèse.

Merci Laura pour ton énergie positive dès mon arrivée. L'imprimante qui m'énervait parce qu'elle ne marchait pas, effectivement, ce n'était pas grave. Tu as essayé de cadrer mes retours de Saint Étienne après les réunions de travail avec Laurent... et je sais que ce n'était pas évident ! Comme les versions à corriger aussi ! Mais tu as toujours vu d'autres aspects qui m'ont aidé à dépêtrer les grands points bloquants.

Merci à vous Mr Wang, Mr Goulette et Mr Le Riche d'avoir accepté d'être rapporteurs et de m'avoir permis avec vos commentaires et corrections si justes et positives de m'améliorer et d'améliorer le manuscrit de cette thèse.

Merci à toutes les membres du CIS, individuellement, en particulier les thésards de mon année et des deux années antérieures, pour leur accueil et pour les parties de mini-basket et de ping-pong. Cela a fait de chaque déplacement un plaisir. Un plus pour Françoise et Amélie pour votre sourire et réactivité et aussi pour votre capacité à résoudre les éléments administratives si... facilement !

Merci à toi Bilal de m'avoir accueilli chaque fois (afin... toutes les fois que tu étais là et que les clés n'étaient pas restées à l'intérieur !) et de discuter de tout parce que de toute façon on avait notre diplôme !

Merci à l'équipe Décathlon pour leurs conseils et l'ambiance d'équipe. Avec vous, je continue à découvrir le ch'nord mais aussi la sensation d'être enfermé dans un ascenseur de 1x1,5 m avec 10 personnes ! Une vue dans la loupe pour la petite équipe internationale du laboratoire morphologie et les welshs qui vont avec. Et encore un regard pour Rokiatou et son énergie de tous les jours. Sans oublier ma decat-marraine Maud pour ta disponibilité sur des discussions pro et perso, pour me montrer des astuces et bien sûr pour coudre ensemble et faire des cupcakes !

Un clin d'œil à Virginie parce que tu étais là à chaque fois, avant, durant et après la soutenance. Pour ton avis et ta façon d'aborder les choses et de communiquer...

Merci à ma famille qui même de loin m'a soutenue et m'a aidée à avancer. Vous m'avez beaucoup manqué durant ces années. En même temps, de cinq continents différents c'est difficile de se voir tous ensemble! Merci à mon grand-père et à Christiane d'être venus jusque Saint-Etienne pour ma soutenance.

Σ' ευχαριστώ οικογένεια για όλη την στήριξη και τη βοήθειά σου. Μου έλειψες. Από την άλλη, πέντε ήπειροι είναι δύσκολο να συναντηθούν! Να 'ναι καλά και η τεχνολογία που μας επέτρεπε να μιλάμε όσο επιθυμούσαμε.

Ευχαριστώ όλους τους φίλους μου από την Ελλάδα και τις τηλεφωνικές ώρες που περάσαμε μαζί. Έβλεπα τον ήλιο μέσα από τη φωνή σας. Και σε κάθε μου ταξίδι πίσω στο σπίτι ομορφαίνατε την στιγμή που σας αντίκριζα. Ευχαριστώ κύριε Αλέκο για τις φιλοσοφικές και διδακτορικές συζητήσεις μας. Η τοξοβολία ήταν ένα από τα πράγματα που με έκανε να αλλάζω διάθεση και να βάζω στόχους διαφορετικούς από τους καθημερινούς. Τέλος, θα ήθελα να σε ευχαριστήσω Αλέξανδρε για όλες τις στιγμές που ήσουν εκεί να με στηρίζεις με τον τρόπο σου. Σε ευχαριστώ για όλα.

Merci à vous tous,

Κατερίνα

# Introduction générale

L'Homme, dès les premiers temps eut la curiosité et le désir de découvrir le monde qui l'entourait. En l'étudiant il souhaita protéger son corps et il commença à s'habiller. Dans les temps plus récents, l'habillement devint indispensable et les métiers de tailleur et cordonnier furent créés. Ils produisaient tout sur mesure et donc adapté à leur clientèle. Après la révolution industrielle, la confection de masse devint une réalité. Les mesures représentatives des populations devinrent alors indispensables afin d'aider les tailleurs modernes et les cordonniers à concevoir des équipements morphologiquement adaptés.

La morphologie peut initialement être analysée par l'observation simple. Elle peut servir ensuite pour classer différents sous-ensembles. Vers 300 avant J.C. par exemple, Aristote a étudié et comparé les animaux, pour les classer par rapport à leur morphologie et leurs habitudes. Hippocrate avait déjà étudié l'anatomie intérieure et extérieure du corps humain. A l'époque, le corps humain servait aussi de critère pour mesurer les distances et quelques-unes de ces unités existent toujours : le pied, le pouce, le yard. L'anthropométrie avait déjà ses premiers adeptes d'où aussi son nom grec à deux composantes : *άνθρωπος* (humain) + *μέτρον* (mesure).

Aujourd'hui, l'avancement de la technologie nous donne la possibilité de représenter la morphologie en trois dimensions. Mais bien que les outils 3D existent et qu'ils soient prometteurs, la maîtrise et l'analyse des résultats n'est pas simple. La richesse d'un scan tridimensionnel est évidente. Pour chaque partie de l'objet scanné existent tous les détails morphologiques. Il est possible alors d'extraire des informations sur la taille, les courbes et la forme en général de l'objet entier ou de ses parties. L'extraction de ces éléments est utile afin d'adapter son environnement à ces spécificités morphologiques.

L'histoire et l'évolution de l'homme à divers endroits de la terre a fait que ses caractéristiques morphologiques dépendent de ses origines et ses habitudes. Afin de concevoir des produits adaptés aux différentes populations, il est aujourd'hui nécessaire d'étudier les différences morphologiques par zone géographique. En dehors des différences entre les populations, la diversité existe également dans une population donnée. De plus, la morphologie évolue au fil des années. Pour étudier la morphologie humaine il est alors indispensable d'étudier statistiquement un grand nombre de sujets.

Le contexte industriel de cette thèse implique également la considération de zones géographiques. DECATHLON a commencé à concevoir de l'équipement sportif dans les années 80. Tous les magasins à l'époque étaient situés en France et la conception était basée uniquement sur la population française. Actuellement les magasins ont été développés à l'international et leur potentiel à l'étranger est devenu important. Par exemple, en Chine il y a actuellement 124 magasins soit plus du double de la situation il y a 3 ans.

Les systèmes traditionnels de conception concevaient des produits basés sur la population française. Les retours des clients de différents pays étaient mauvais concernant l'adaptation des produits à leurs caractéristiques morphologiques. En étudiant et comparant ces caractéristiques avec des méthodes traditionnelles il est apparu que des mesures traditionnelles n'étaient pas

toujours différentes entre les populations. Cependant avec des mesures identiques, la forme du corps était différente. Afin d'étudier et comparer les caractéristiques morphologiques une interrogation demeurerait en ce qui concerne la comparaison des surfaces, des volumes ou des formes en général. Cette thèse vise à donner des éléments de réponse sur ce point en analysant de manière détaillée le corps humain. Pour ce faire, différentes populations et parties du corps sont à étudier statistiquement.

Différentes méthodes statistiques existent. Ces méthodes, utilisées dans plusieurs domaines pour les données unidimensionnelles, peuvent être adaptées afin de servir les particularités d'un nuage de points et d'une morphologie tridimensionnelle. En débutant avec des statistiques de premier ordre et en complétant avec des statistiques à plusieurs degrés, de nombreuses informations morphologiques peuvent être extraites.

Les données tridimensionnelles sont des données volumineuses. Même si des méthodes simples de géométrie et de mathématiques sont appliquées, leur manipulation et leur étude peut facilement devenir une tâche lourde et lente. L'analyse morphologique peut consister en une analyse séparée de différentes parties du corps. Afin de résoudre ces problématiques et d'apporter une analyse morphologique détaillée et efficace, l'étude globale a été traitée avec une approche commune et adaptable aux différentes parties du corps.

De ce fait, le manuscrit est organisé de la manière suivante :

Dans la *première partie* un état de l'art est présenté. Les données anthropométriques et leurs méthodes d'acquisition sont décrites et comparées entre elles. On s'intéresse également aux bases de données anthropométriques et à la séparation des populations telle que pratiquée dans la littérature. Le contexte normatif est aussi expliqué. Une fois que les données sont acquises, les différentes méthodes de traitement sont analysées. Des réponses différentes à la question d'interprétation d'un scan 3D sont données afin d'utiliser les informations qu'il contient. Ces informations sont ensuite étudiées statistiquement pour calculer des morphologies représentatives des populations. A la fin de cette partie les objectifs industriels et scientifiques de cette thèse sont présentés.

Dans la *deuxième partie* les méthodes d'interprétations des scans tridimensionnels sont développées. Dans un premier temps, l'analyse se concentre sur la morphologie individuelle. Comment obtenir des informations intéressantes, ou comment manipuler un nuage de points brut sont parmi les questions abordées. Ensuite, la correspondance morphologique entre les sujets est considérée. Le nuage de points brut est transformé en un élément qui peut être traité de manière rapide et précise en préservant sa richesse quant à la morphologie tridimensionnelle. La position relative des sujets est améliorée également. Une fois que tous les sujets scannés ont été transformés, l'analyse statistique peut être mise en place. Ici, les méthodes statistiques utilisées classiquement pour les données unidimensionnelles ont été adaptées aux données tridimensionnelles. Plusieurs préconisations ont été prises pour que l'adaptation des méthodes corresponde aux besoins et spécificités des morphologies tridimensionnelles. Afin d'appliquer les résultats à la conception des produits, la création de systèmes de tailles est analysée.

Dans la *troisième partie* les méthodes sont appliquées aux différentes parties du corps. L'interprétation des pieds scannés est le premier exemple d'application des méthodes. Une campagne de mensuration a été mise en place afin de collecter des données. L'intérêt ensuite est de pouvoir manipuler efficacement un nuage de points brut afin d'extraire les données morphologiques unidimensionnelles. Ces données sont analysées pour aborder les premières notions de comparaison des populations. Ensuite vient l'analyse de la tête scannée afin d'étudier les détails de sa morphologie et montrer les avantages d'une analyse en trois dimensions. Tous les points d'une tête scannée sont intégrés dans la procédure. Non seulement les mesures unidimensionnelles mais également la forme sont comparées. Pour l'analyse morphologique les résultats statistiques tridimensionnels montrent des résultats inaccessibles par les données unidimensionnelles. La dernière partie du

corps étudiée est la poitrine issue des scans du corps entier. Les statistiques en trois dimensions ont été utilisées afin d'estimer les morphologies les plus représentatives des populations. La création d'un système de tailles issus des morphologies représentatives est essayée et discutée. La simplicité et l'efficacité des méthodes mises en place sont également montrées.

Dans la dernière partie de ce manuscrit l'ensemble des méthodes et des résultats sont discutés. Les avantages des méthodes appliquées pour l'industrie et la science sont mis en évidence et les résultats obtenus sont présentés. De potentielles futures études sont également proposées.



Première partie

État de l'art



# Chapitre 1

## Données anthropométriques

Les données anthropométriques sont les éléments nécessaires pour la description de la morphologie humaine. Ce sont les caractéristiques extérieures du corps humain. Afin de les obtenir, différents outils peuvent être mis en place et ensuite des modèles anthropométriques peuvent être créés. Les données de plusieurs populations sont sauvegardées dans les bases de données anthropométriques et les populations sont séparées suivant différents critères.

### 1.1 Description des données anthropométriques

Les données anthropométriques peuvent être divisées en trois grandes catégories par rapport à leur nombre de dimensions dans l'espace : données uni-, bi- et tridimensionnelles.

#### 1.1.1 Données unidimensionnelles (1D)

Ce sont les données qui sont décrites uniquement par une variable (figure 1.1). Elles pourront être les :

- hauteurs, largeurs, longueurs,
- périmètres, arcs,
- aires des sections,
- volumes des formes du corps.

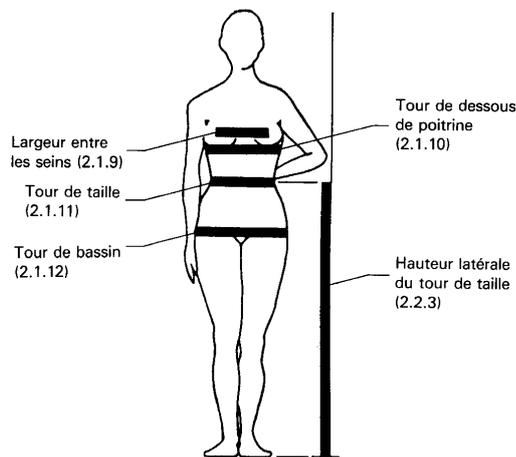


FIGURE 1.1 – Descriptions anthropométriques par des données unidimensionnelles [56].

### 1.1.2 Données bidimensionnelles (2D)

Les données bidimensionnelles sont décrites dans un plan. Par exemple les courbures et les sections du corps humain (figure 1.2).

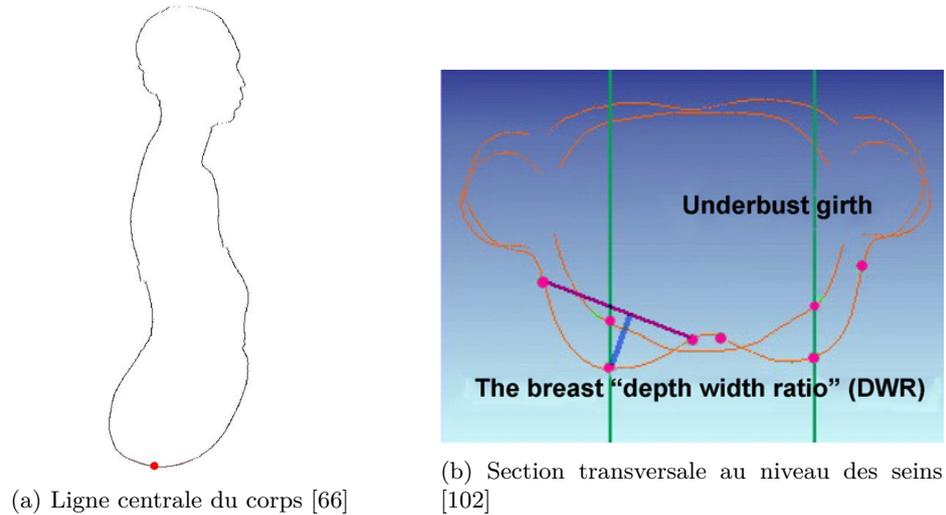


FIGURE 1.2 – Descriptions anthropométriques par des données bidimensionnelles.

### 1.1.3 Données tridimensionnelles (3D)

Les données qui sont décrites dans les trois dimensions sont les données tridimensionnelles. Pour décrire un élément en 3D il est possible d'utiliser plusieurs courbures, nuages de points ou des formes géométriques simplifiées (figure 1.3).

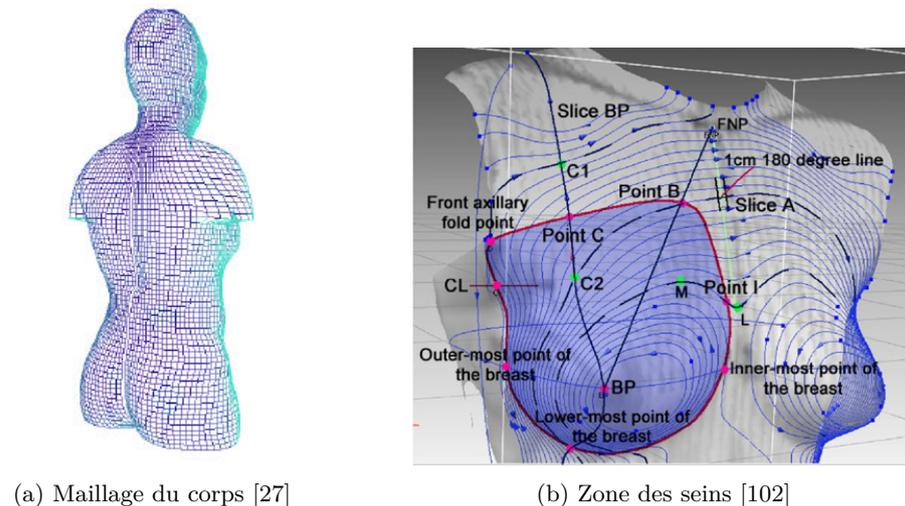


FIGURE 1.3 – Descriptions anthropométriques par des données tridimensionnelles.

## 1.2 Acquisition des données anthropométriques

Les méthodes d'acquisition de données anthropométriques sont soit des méthodes directes soit des méthodes d'estimation. Les méthodes directes consistent en un appareillage traditionnel ou en la numérisation des images 2D et 3D. Les méthodes d'estimation sont basées sur l'hypothèse que la géométrie du corps en 3D peut être obtenue à partir d'un nombre limité des mesures 1D ou 2D, puis d'une interpolation de ces mesures à l'aide d'une base de connaissances.

### 1.2.1 Méthodes utilisant un appareillage traditionnel

L'appareillage traditionnel est encore majoritairement utilisé pour obtenir les dimensions du corps humain. Suivant les données à acquérir, les principaux appareils sont présentés dans le tableau 1.1. Des formations spécifiques destinées aux mesureurs et des contrôles de qualité doivent être effectués fréquemment et régulièrement par des personnes expérimentées dans le domaine de l'anthropométrie de façon à garantir des niveaux acceptables d'erreurs [53]. La formation de référence [41] de personnes expérimentées en anthropométrie est une période d'environ trois semaines pendant laquelle, sous la direction des anthropométristes professionnels, les étudiants apprennent à positionner et dessiner les points d'intérêt et à mesurer les dimensions du corps humain.

### 1.2.2 Modèles de corps humain à partir de mesures traditionnelles

Pour obtenir une géométrie 3D les chercheurs ont modélisé le corps humain à base de formes géométriques [46, 47, 100]. Chaque forme représente un segment ou une zone du corps humain (tableau 1.2) et ses dimensions principales sont définies à partir des relevés anthropométriques. Pour représenter de manière plus détaillée la morphologie complexe du corps humain, la création des modèles nécessite de nombreux relevés anthropométriques et est, par conséquent, très chronophage quand il s'agit d'examiner des séries des données.

### 1.2.3 Mesures et modèles par photogrammétrie

Avec l'avancement de la technologie optique, plusieurs auteurs ont étudié la possibilité de relever des mesures anthropométriques à partir d'images (tableau 1.3). Jensen [59] est le premier à avoir utilisé une photographie et un miroir pour recomposer le corps humain à partir de zones elliptiques d'épaisseur  $2\text{cm}$ . Baca [8] a développé une méthode pour calculer des mesures anthropométriques en utilisant les images de quatre positions statiques. Il les a appliquées au modèle de Hatze [47]. Ce modèle utilise une morphologie complexe pour définir le corps humain à partir de 242 mesures anthropométriques. Gittoes et al. [39] ont relevé 95 mesures anthropométriques à partir de trois images (face, profil droit, profil gauche) pour l'application au modèle de Yeadon [100] (modèle de 40 segments basé sur 95 mesures). Afin de décrire encore mieux le corps humain, Pillet et al. [81] obtiennent un modèle formé de cylindres à base elliptique et à base circulaire. Ils utilisent des mesures obtenues d'un système optoélectronique (VICON®) et deux photographies. Les cylindres initiaux, en projection sur les photographies, sont ensuite reformés et adaptés à la morphologie du sujet. Toute cette procédure dure près de cinq minutes par sujet.

La meilleure précision que l'on peut obtenir avec les méthodes de photogrammétrie, dépend du nombre et des types de vues des photographies prises. Pour décrire alors précisément la morphologie humaine, plusieurs photographies et/ou du temps de personnalisation sur un modèle initial sont requises. Ainsi, la précision et le temps sont des facteurs limitant l'application de ces méthodes à l'anthropométrie 3D.

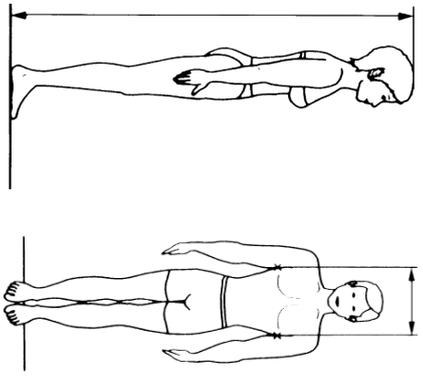
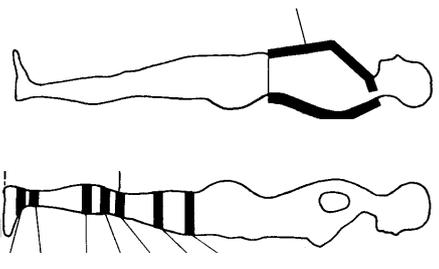
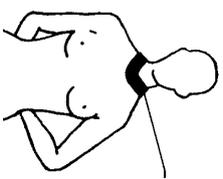
Appareil	Somatomètre, pied à coulisse	Ruban métrique	Balance	Inclinomètre	Chaînette
Mesures	Distances linéaires entre des points du corps et des surfaces de référence normales, largeurs et épaisseurs des segments corporels 	Périmètres, arcs, lignes du corps 	Masse	Pente d'épaule	Tour d'encolure 

TABLE 1.1 – Mesures réalisées à l'aide d'appareillages traditionnels [56, 55].

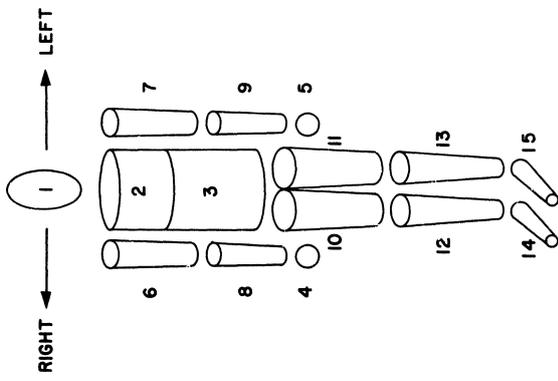
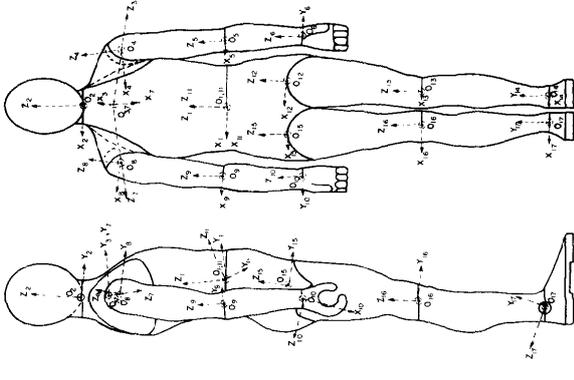
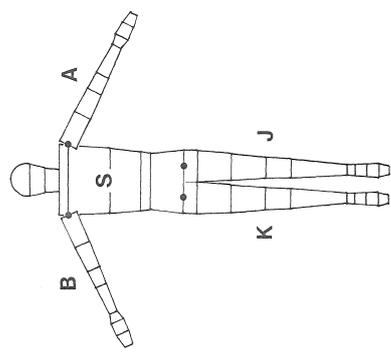
Auteurs	Hanavan [46]	Hatze [47]	Yeadon [100]
Modèle			
Mesures anthropométriques	25	242	95
Segments	15	17	40
Géométrie utilisée	cylindres à base elliptique, cylindres à base circulaire	Géométrie complexe	Solide type « stadium », Cône tronqué

TABLE 1.2 – Modèles 3D à partir de mesures 1D.

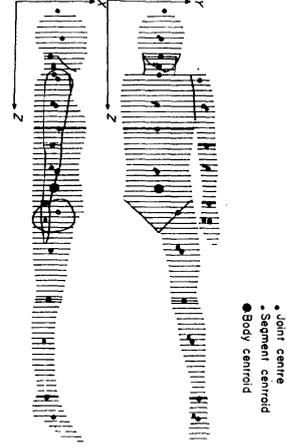
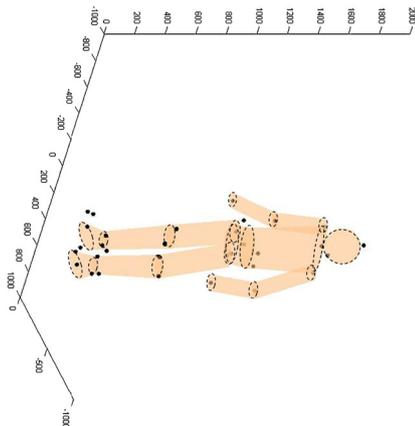
Auteurs	Jensen [59]	Baca [8]	Gittoes et al. [39]	Pillet et al. [81]
Modèle		Hatze [47]	Yeardon [100]	
Géométrie utilisée	Zones elliptiques d'épaisseur de 2cm	Modèle de Hatze [47]	Modèle de Yeardon [100]	cylindres à base elliptique cylindres à base circulaire personnalisées en projetant les cylindres sur les photos du sujet
Photos requis	1 (et un miroir)	4 positions statiques	3 (face et deux profils)	2 (face et profil)

TABLE 1.3 – Mesures et modèles anthropométriques à partir d'images 2D.

### 1.2.4 Mesures par imagerie 3D

Avec les méthodes utilisées en photogrammétrie, l'obtention des mesures anthropométriques est devenue potentiellement plus simple. Il en découle, de ce fait, une demande croissante pour des méthodes automatisées d'acquisition de données, notamment 3D. Cette partie ne se réfère qu'aux méthodes n'utilisant pas d'irradiation et n'étant pas dangereuses pour les sujets considérés.

Les premiers à avoir utilisé la morphologie 3D du corps humain sont les industries de divertissement et de jeux vidéo. Ensuite l'industrie des scanners 3D s'est développée exponentiellement. La plupart des scanners projettent du laser ou de la lumière blanche sur le corps humain et avec des méthodes de triangulation déterminent sa forme extérieure. La forme est décrite à partir d'un nuage de points dont la densité est de 4 à 38 *pts/cm*<sup>2</sup> et la précision est de 1 à 3 *mm* selon les fabricants. Il existe deux problématiques générales :

- les logiciels associés à chaque scanner suivent des procédures différentes pour définir les mesures anthropométriques. En effet, sur une comparaison de trois scanners 3D, seules 4 mesures sur 21 sont extraites identiquement [89].
- Pour valider la précision d'un scanner son fabricant définit une méthode. Ces méthodes ne sont pas communes aux différents fabricants et les précisions des scanners ne sont alors pas directement comparables.

Comme cela va être montré dans les prochains chapitres, la morphologie 3D acquise à partir des scanners 3D n'est utilisée actuellement que pour obtenir des données unidimensionnelles. Afin d'analyser des séries de ces données unidimensionnelles, la grande problématique des chercheurs est l'automatisation du positionnement des points et des lignes d'intérêt sur le corps humain.

### 1.2.5 Normes internationales

Afin d'obtenir des mesures anthropométriques comparables aux données de la littérature il convient que les normes internationales soient utilisées. Plus précisément, les normes ISO 8559 :1989 [56] et ISO 7250 :2008 [55] définissent les mesures du corps humain et leurs méthodes associées pour la confection de vêtements et la conception technologique. Ces deux normes se réfèrent uniquement aux mesures unidimensionnelles.

Pour obtenir des données anthropométriques à partir des données de scanner 3D il existe la norme ISO 20685 :2010 [54] sur l'exploration des données tridimensionnelles. Cependant cette norme aussi ne se réfère qu'aux mesures unidimensionnelles. Pour valider l'extraction des mesures unidimensionnelles précises à partir de données 3D *"la norme de précision d'une mesure obtenue d'une image en 3D est le mesurage traditionnel correspondant, effectué par un spécialiste expérimenté de l'anthropométrie"* d'après la norme. Pour la plupart des mesures, une précision de  $\pm 1\%$  ou de  $\pm 5mm$  est suffisante [56].

### 1.2.6 Comparaison des méthodes et des données anthropométriques

La finalité de l'anthropométrie nécessite une procédure précise et rapide :

- précise pour obtenir la forme détaillée du corps humain la meilleure possible,
- rapide pour pouvoir analyser un nombre d'échantillons important afin d'avoir une vision claire des différences anthropométriques entre différentes populations.

Les méthodes en appareillage traditionnel sont chronophages et pour les mettre en place, du personnel formé est nécessaire [53].

D'autre part, l'information anthropométrique est limitée quand elle est décrite uniquement par les données unidimensionnelles (comme elles ont été définies dans la section 1.1.1). La tête,

par exemple<sup>1</sup>, peut être décrite par seulement une mesure : le tour de tête. Cette mesure est utilisée pour la séparation de tailles de casques (section 10.2.1). En étudiant uniquement le tour de tête, la population chinoise porte en moyenne des tailles de casques inférieures à celles de la population européenne (histogramme 10.14). Cependant la distribution de ventes par taille affirme le contraire. Afin de comprendre ce phénomène, il faut étudier la forme de la tête.

Dans la littérature [11] il est montré que pour le même tour de tête, les formes peuvent être différentes (figure 1.4). Dans une première approche, la différence peut se calculer en étudiant également la largeur de la tête. Il en résulte que les têtes chinoises sont plus larges que les têtes européennes (diagramme 10.15). Les clients chinois achètent probablement des tailles de casques plus grandes pour pouvoir passer leur têtes dans les parties latérales du casque<sup>2</sup>.

Cette analyse est plus complète. Cependant ces deux mesures n'indiquent pas toutes les différences existantes sur la forme du tour de tête. En ajoutant dans les prochaines étapes d'autres mesures ou courbes, la forme du tour est décrite de manière plus détaillée.

Le tour de tête est un élément défini en deux dimensions de l'espace. Afin de décrire en détails la morphologie de la tête entière, plusieurs mesures, courbes et éléments anthropométriques sont nécessaires. En extrapolant cette réflexion, une analyse complète de la morphologie devrait considérer tous les points d'un objet scanné. Or un point est défini dans l'espace par trois coordonnées. Toutes les informations morphologiques ne sont plus accessibles avec des données unidimensionnelles extraites alors qu'elles sont encore avec des données tridimensionnelles. L'extraction des données unidimensionnelles à partir des données tridimensionnelles, réduit fortement la richesse des informations morphologiques de l'objet scanné.

Pour obtenir une morphologie précise en 3D les mesures traditionnelles et la photogrammétrie ne sont pas adéquates. On s'intéresse à décrire une morphologie 3D avec plus de détails, parce qu'elle affecte la conception de tous produits où l'ajustement correct est un élément indispensable (casques, masques, orthèses etc.).

Pour acquérir des données brutes, le moyen le plus adapté à notre étude est alors l'utilisation de scanners 3D. Pour l'exploitation rapide des informations précises à partir de données brutes il est nécessaire de mettre en place des méthodes efficaces, applicables de manière relativement simple et ne nécessitant pas de moyens de calcul très importants. A ce jour, la littérature montre que la morphologie 3D n'est pas encore très utilisée. D'autre part, l'extraction des mesures unidimensionnelles à partir des points 3D reste encore une procédure semi-automatique avec des résultats différents pour chaque scanner et logiciel associé.

Pour comparer et valider des mesures issues de scanners 3D, la norme ISO 20685 :2010 [54] définit comme norme les mesures traditionnelles effectuées par des personnes expérimentées.

1. Pour une explication compréhensible et exhaustive, l'exemple qui suit est en interaction avec le chapitre 10.  
2. Ce résultat est issu également des commentaires des clients en Chine.

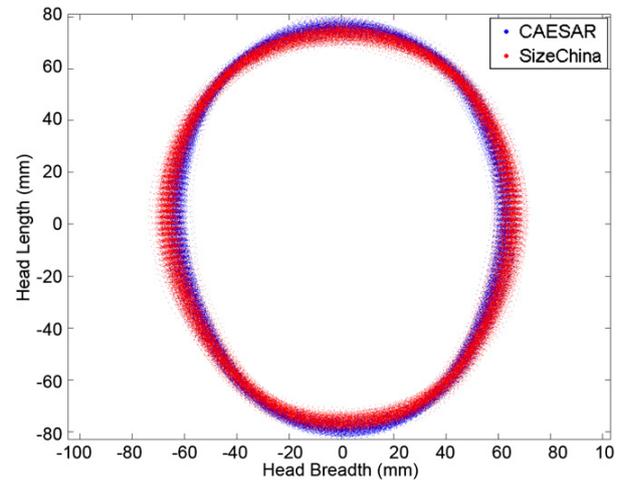


FIGURE 1.4 – Plan du tour de tête montrant des différences morphologiques entre les têtes **chinoises** et **caucasiennes**. Le tour de tête est identique pour tous les sujets [11].

Cependant, dans la littérature, la validité n'est pas encore montrée. Han et al. [45] ont examiné la différence entre les mesures traditionnelles et les mesures à partir des scanner 3D en 2010. Pour 1794 femmes, ils ont observé de grandes différences (valeurs moyennes jusqu'à 39mm) pour les circonférences du corps humain. La plupart des circonférences apparaissent plus grandes quand elles sont extraites à partir des données 3D. La principale explication à ce phénomène est l'écrasement des tissus mous lors des mesures traditionnelles. De plus il y a une différence entre les chemins de mesure manuels et 3D (figure 1.5). A l'inverse, la circonférence de la base du cou apparaît plus grande en mesure traditionnelle et selon les auteurs il faut améliorer le logiciel associé au scanner. Les auteurs montrent finalement que les mesures extraites du scanner ne sont pas compatibles avec les mesures traditionnelles.

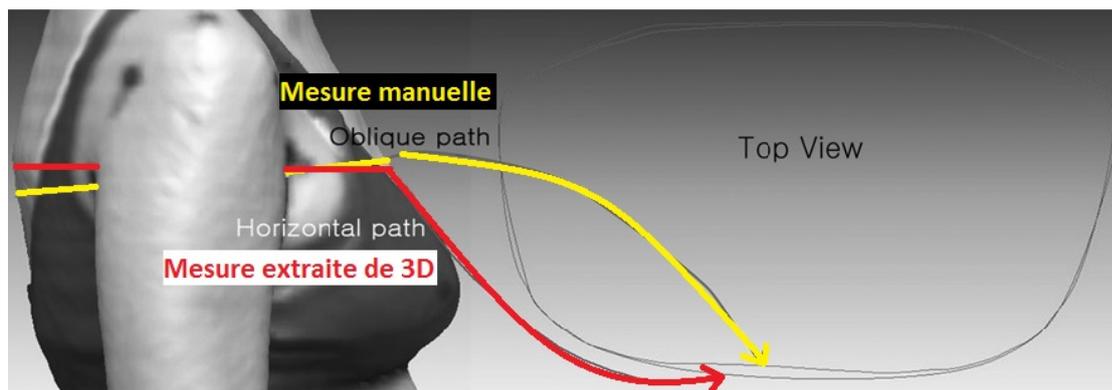


FIGURE 1.5 – Différences possibles entre les mesures traditionnelles et celles extraites de 3D : chemins de mesures traditionnelles (oblique path) et mesures extrait de 3D (horizontal path) [45].

## 1.3 Base de données

Cette section a pour objectif de rassembler les bases de données existantes avant la description des méthodes de traitement des données 3D. La plupart de ces données sont utilisées par les chercheurs sur les études de traitement 3D. Ainsi, ce chapitre vise à démontrer l'intérêt d'études approfondies sur la différence morphologique entre les populations.

### 1.3.1 Base de données 1D

Plusieurs bases de données anthropométriques 1D existent dans la littérature pour différentes populations et pour plusieurs populations spécifiques. Les anthropométristes utilisent souvent les méthodes traditionnelles pour obtenir des données et pour examiner les parties du corps.

### 1.3.2 Corps humain scanné en 3D

Les bases de données des sujets scannés en 3D ont commencé à être créés dès les années '90. Celle qui est la plus utilisée par les chercheurs est la "CAESAR" (Civilian American and European Surface Anthropometry Resource). Elle contient 2400 sujets scannés d'Amérique du Nord et 2000 sujets scannés d'Europe (Pays-bas et Italie) âgés de 18 à 65 ans. Les personnes, avant d'être scannées, étaient prémarquées à différents points anatomiques. "SizeUK" est la base

de données de la population anglaise. 11000 personnes ont été scannées (hommes et femmes de 16 à 90+ ans) et 10000 scanners considérés comme statistiquement représentants ont été gardés. La "Size Korea" contient 5000 personnes de 8 à 79 ans. En ce qui concerne les scanners de têtes uniquement, "SizeChina" contient 1500 têtes scannées d'adultes chinois.

### 1.3.3 Normes internationales

Les exigences générales pour la création de bases de données anthropométriques sont décrites dans la norme ISO 15535 :2007 [53]. Cette norme définit la procédure de la collecte de données requises et le processus d'analyse statistique. Elle fournit les informations nécessaires telles que caractéristiques de la population utilisatrice, méthodes d'échantillonnage, éléments mesurés et statistiques afin de rendre la comparaison possible à l'échelle internationale. Par exemple, avant le traitement statistique, *"on doit obtenir la valeur moyenne et l'écart-type de chaque tranche d'âge, puis vérifier séparément l'exactitude des mesures prises sur chaque sujet sur un écart-type de  $\pm 3 SD$  à partir de la moyenne"*.

### 1.3.4 Séparation des populations

Pour étudier la morphologie du corps et comparer ses caractéristiques les chercheurs classent les personnes en groupes. A l'intérieur de ces groupes existent des caractéristiques qui sont fortement corrélées et qui ont une différence importante si on les compare à d'autres groupes. Les paramètres de séparation utilisés dans la plupart des études sont l'âge, le sexe et l'ethnie/race<sup>1</sup>. La séparation en âge et en sexe est facile à définir (tranche d'âge et masculin/féminin), au contraire le paramètre ethnie/race peut être interprété avec plusieurs choix (tableau 1.4).

Dans un contexte général, beaucoup d'études examinent des populations différentes pour appliquer les résultats à la conception des lieux de travail et/ou au domaine de la santé publique.

La NASA, par exemple, fournit des informations anthropométriques pour la conception des lieux de travail dans l'espace. Les limites des dimensions anthropométriques pour la conception sont une "petite" femme japonaise et un "grand" homme américain.

Le service de la santé publique des États-Unis a fourni des données anthropométriques de la population hispanique [76]. Moore et al. [75] ont étudié les données anthropométriques de la graisse corporelle en relation avec la consommation de produits laitiers. Ils ont séparé leur sujets en Non-Hispaniques Noirs, Hispaniques et Non-Hispaniques Blancs. Lutsey et al. [70] ajoutent une autre population sur cette division, les Non-Hispaniques Chinois. Dans leurs données anthropométriques il est montré que la taille moyenne des Chinois et Hispaniques est inférieure à celle des Blancs et Noirs. En outre le tour de taille des Chinois est moins élevé que celui des autres groupes ethniques.

Zhuang et al. [103] ont étudié l'anthropométrie de la tête et du visage pour quatre populations : Blanc, Africain Américain, Hispanique, Autre (Asiatique, Iles Pacifique, Américain Natif, race mixé). Ils mentionnent que le terme "race" reflète l'usage courant, mais ne reflète pas la compréhension actuelle de l'anthropologie pour la diversité humaine moderne.

Rosnah et al. [85] trouvent des différences entre les Malaisiens et les Non-Malaisiens pour les personnes âgées. De la même manière, Hu et al. [49] trouvent pour les personnes âgées des différences entre les Chinois et les Japonais. Lin et al. [67] comparent quatre populations de la race mongolienne (Chinois, Japonais, Coréen, Taïwanaise).

---

1. Dans ce manuscrit, les termes "race" ou "ethnie" ne sont employés qu'en référence aux études les utilisant. Nous préférons l'utilisation du terme "population", qui est plus représentatif de la réalité géographique d'aujourd'hui.

Yue et al. [101] ont montré que les genoux chinois étaient plus petits que les genoux des blancs. Des différences existent aussi entre Caucasiens et indigènes chez les enfants australiens [60]. Jayaratne et al. [58] ont conclu que les critères néoclassiques (relations fixes entre les dimensions du visage qui sont utilisées par des artistes et les chirurgiens esthétiques) ne sont pas valides pour les visages des Chinois du sud.

L'ensemble de ces études ne comparent que des mesures unidimensionnelles. Ball et al. [11] montrent une différence de la forme de tête entre les Caucasiens et les Chinois. Leur étude va être présentée de manière détaillée à la section 2.2.1.

D'un point de vue global, l'évolution des caractéristiques anthropométriques semble être commune [33]. Cela signifie que les équations qui prédisent la croissance sont les mêmes pour toutes les populations (étudiées pour l'anthropométrie de la bouche et du pharynx).

Toutes ces études montrent un intérêt des chercheurs pour la comparaison de l'anthropométrie des populations. Les séparations suivent deux paramètres : l'ethnie et la race. Même si les divisions ne sont pas identiques, tous trouvent des différences pour les caractéristiques étudiées. Par contre, comme la mobilité des personnes a augmenté, dans toutes les villes et pays existent des populations avec différentes origines et caractéristiques. Al Haboubi [3] constate que pour la conception il est plus intéressant d'étudier l'ensemble de la population d'un lieu sans prendre en compte la race et l'ethnie.

Autteurs	Populations	Parties du corps	Éléments de comparaison
Najjar et al. [76]	Hispanique	Corps entier	Mesures 1D
Moore et al. [75]	Non-Hispaniques noires, Hispaniques et Non-Hispanique blancs	Corps entier	Mesures 1D de la graisse corporelle
Lutsey et al. [70]	Hispanique, non-Hispanique noire, non-Hispanique blanc, non-Hispanique Chinois	Corps entier	Mesures 1D de la graisse corporelle
Zhuang et al. [103]	Blanc, Africain Américain, Hispanique, autre	Tête et visage	Distances 1D à partir de 3D (Manuellement piqués)
Rosnahl et al. [85]	Malaysien, Non-Malaisiens (personnes âgées)	Corps entier	Distances 1D
Hu et al. [49]	Chinois, Japonais (personnes âgées)	Corps entier	Distances 1D
Lin et al. [67]	Mongolique (Chinois, Japonais, Coréen, Taïwanaise)	Corps entier	Distances 1D
Yue et al. [101]	Chinois, blanc	Genou	Distances 1D à partir de 3D (Manuellement piqués)
Kagawa et al. [60]	Australien caucasien et indigène (enfants)	Corps entier	Distances 1D à partir de 3D
Jayarathne et al. [58]	Canons néoclassiques, Chinois du sud	Visage	Distances 1D à partir de 3D (Manuellement piqués)
Ball et al. [11]	Caucasien, Chinois (masculin)	Tête	Forme au niveau de la tour de tête, 50 points choisis au hasard

TABLE 1.4 – Études analysant l'anthropométrie de différents populations.

## Chapitre 2

# Exploitation des données

Une fois que les données anthropométriques décrites sont disponibles, leur traitement et analyse peuvent suivre. Initialement, l'anthropométrie d'un individu est à comprendre et à exploiter. Ensuite on peut extraire les données représentatives des populations.

### 2.1 Traitement des données obtenues à l'aide de scanners 3D

Cette section est orientée vers le traitement des données tridimensionnelles dans le domaine de l'anthropométrie. Il existe peu d'équipes scientifiques qui s'intéressent à ce sujet, principalement parce que les logiciels de chaque scanner fournissent des données dont le pré-traitement est confidentiel. Afin de permettre l'analyse de la morphologie issue de différents scanners et d'utiliser ensuite tous les détails morphologiques des nuages de points, cette section vise à apporter les éléments initiaux de traitement anthropométrique.

Pour analyser la morphologie 3D d'une population cible, il faut commencer par savoir analyser la morphologie individuelle de chaque sujet. Ces données obtenues à l'aide d'un scanner 3D sont des points décrits dans un espace tridimensionnel. Ces points représentent l'enveloppe de l'objet scanné. Pour étudier alors une morphologie tridimensionnelle, les données initiales sont des nuages de points. Pour les représenter il existe différentes approches, qui vont être décrites dans la suite de ce chapitre.

Pour commencer l'interprétation en appliquant une procédure automatique, il est indispensable de faire correspondre des éléments de référence dans tous les scans. En quelques sorte, il faut déterminer une origine pour chaque scanner. Les éléments de référence sont des éléments qui sont représentatifs à travers et à l'intérieur des populations. Par exemple, le point d'entrejambe est le même pour toutes les personnes dans toutes les populations : c'est le point à partir duquel les deux jambes sont séparées. Autrement dit, si on s'intéresse à la morphologie de la poitrine, il faut connaître les coordonnées du plan du tour de poitrine ou celles de la sous-poitrine pour pouvoir superposer et/ou analyser la morphologie individuelle de tous les scans de manière identique.

Pour que le nuage de points soit interprétable plus efficacement les expérimentateurs segmentent le corps humain ou définissent des zones spécifiques pour rechercher des points d'intérêt (points de référence). Ensuite, ils repèrent ces points en reconnaissant leurs caractéristiques géométriques.

### 2.1.1 Représentation du nuage de points

Un nuage de points peut être représenté de différentes manières :

- triangulation du maillage,
- paramétrage avec la reconstruction d'une surface,
- représentation conditionnée aux propriétés d'une surface.

La représentation conditionnée aux propriétés d'une surface (à partir des vecteurs tangentiels par exemple) n'est pas adaptée à cause de la perte des informations géométriques.

Plusieurs chercheurs analysent le paramétrage des nuages de points ainsi que la reconstruction d'une surface à partir de ces points. La représentation la plus commune est celle utilisant des B-splines [29, 10]. La perte de précision est évidente à cause de l'approximation en B-splines de l'objet 3D. Pour perdre moins en précision les chercheurs ont commencé à considérer la reconstruction des surfaces à partir des points (point-set surfaces) [4, 5]. La solution est une surface mobile des moindres carrés. Cette méthode est plus précise mais il y a toujours un pourcentage de la précision des données initiales qui est perdu.

Pour reconstruire la surface du corps humain, qui possède une géométrie 3D complexe, la création et l'assemblage de plusieurs surfaces est nécessaire (plusieurs surfaces pour un objet 3D). La seconde problématique, qui suit la reconstruction, est le mode de comparaison.

En 2005, Azariadis et Sapidis [7] ont conclu que pour éviter les erreurs dans la conception avec des nuages de points il faut éviter la reconstruction des surfaces. L'utilisation directe des nuages de points semble être la solution la plus adaptée pour :

- garder la précision et les détails des données initiales,
- minimiser les erreurs cumulées à chaque étape de l'interprétation des formes 3D,
- comparer les formes 3D de manière plus visible et facile à contrôler.

Après avoir interprété et comparé les nuages de points, pour l'objet 3D final (objet moyenne, objet paramétré, objet déformé) et pour sa représentation visuelle, on peut alors appliquer une surface ou maillage triangulaire. La contrainte pour le maillage triangulaire est d'obtenir un nuage de points structuré (points en ordre). Son volume de données est relativement grand par rapport à celui d'une surface.

### 2.1.2 Segmentation automatique du corps

La position la plus utilisée pour scanner les personnes est celle de la figure 2.1 [54]. Comme les jambes et les bras sont séparés du reste du corps la plupart des auteurs segmentent le nuage de points en cinq parties : deux bras, deux jambes et tronc. Les éléments importants et indispensables sont alors le positionnement des aisselles et de l'entrejambe.

Pour les trouver rapidement, l'hypothèse que ces points se repèrent au point de la séparation visuelle dans le plan frontal est faite : séparation des jambes pour l'entrejambe et séparation du bras et du tronc pour l'aisselle [99, 98, 66, 69] (figure 2.2a). Xiao et al. [99] ont appliqué cet algorithme dans plusieurs positions du même sujet. Cette séparation cause des erreurs de positionnement dans plusieurs cas, soit en raison de la position du sujet scanné soit en raison des tissus mous qui se trouvent dans les régions de séparation (figure 2.2b).

Dekker et al. en 1999 [27] avaient déjà présenté la séparation automatique du bras et du tronc en un point différent. Leur méthode détecte si différents segments apparaissent dans le même secteur. Par exemple, dans une demi-section transversale proche de l'aisselle, le bras et le tronc apparaissent dans le même secteur  $\theta$  (figure 2.3a). Le principe de détection est qu'il existe deux segments, si la courbure du nuage de points est double dans un secteur. Selon les

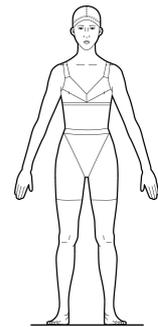
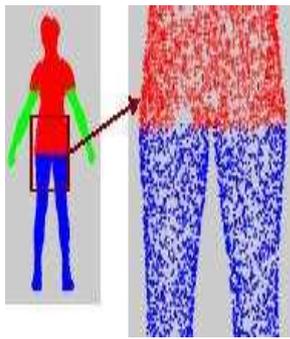
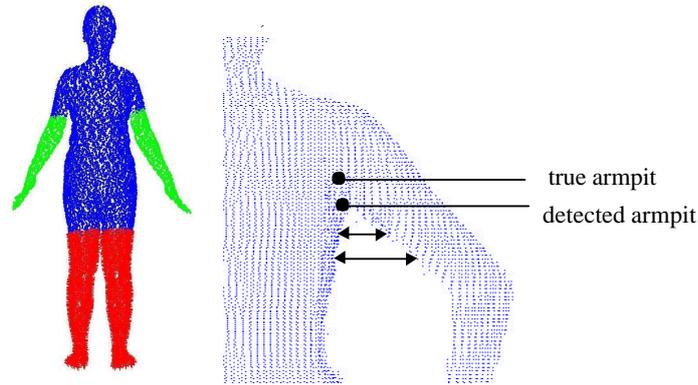


FIGURE 2.1 – Position des sujets scannés [54].



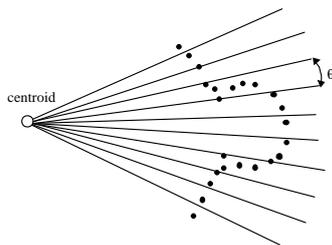
(a) Définition de l'entrejambe au point de séparation du nuage de points [99]



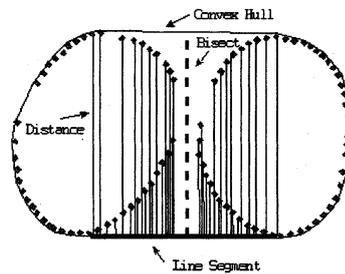
(b) Erreur sur le positionnement de l'entrejambe et de l'aisselle [99, 27]

FIGURE 2.2 – Définition de l'entrejambe et des aisselles au points de séparation au plan frontal.

auteurs, il y a des améliorations qui pourraient être obtenues en optimisant le positionnement des points de séparation. Nurre et al. [77] ont proposé un algorithme dit "cusp detector" et l'ont testé avec succès sur 123 sujets. Avec cet algorithme la segmentation verticale est faite à l'endroit où il n'y a pas de point de rebroussement dans la courbure transversale. La segmentation horizontale, entre les deux jambes par exemple, est définie par la position latérale de la cuspide (figure 2.3b).



(a) Courbure de deux segments au plan transversal [27]



(b) Segmentation horizontale de deux segments [77]

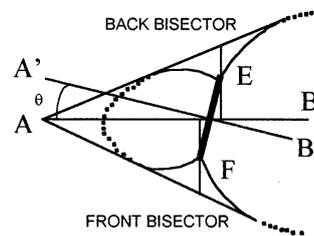


FIGURE 2.3 – Coupes transversales à côté des points d'intérêt et méthode pour la séparation des segments.

Pour la séparation de la tête du reste du corps, la figure 2.4 montre l'utilisation de la méthode de Nurre et al. [77]. Ils détectent, sur le plan frontal, la distance maximale perpendiculaire entre la morphologie du haut du corps et son enveloppe convexe. Le cou est localisé à cet en-

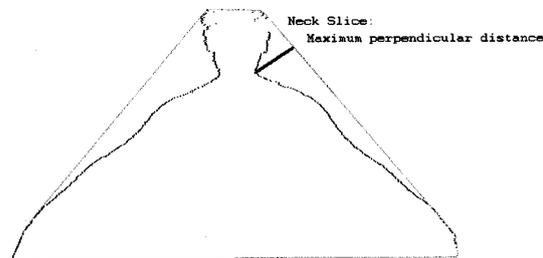


FIGURE 2.4 – Séparation de la tête au plan frontal [77].

droit.

### 2.1.3 Définition des points et des lignes d'intérêt

Pour définir automatiquement les points et les lignes d'intérêt du corps humain les chercheurs appliquent un algorithme de segmentation et/ou cherchent les caractéristiques d'une région d'intérêt. Les études qui sont mentionnées ci-dessous sont présentées aussi dans le tableau 2.1.

Suiberbuik et al. [94] ont défini 5 points anatomiques. Ils ont premièrement limité l'espace de recherche à des "régions d'intérêt", ces régions étant définies à partir de la base de données CAESAR. Pour définir les points anatomiques, trois méthodes ont été utilisées : appariement sur une surface modèle, appariement sur une fonction qui décrit l'environnement d'un point, calcul de la courbure en chaque point. La méthode la plus précise est l'appariement sur une surface modèle avec une différence entre les points calculés et les points obtenus par CAESAR de  $15mm \pm 3mm$  pour la malléole par exemple. Le temps de calcul pour cette méthode peut atteindre 55 minutes par point ce qui rend difficile son application à l'étude de séries de données.

Lu et Wang [69] ont obtenu 12 points en divisant automatiquement le corps en 5 segments (mains, jambes, tronc) aux points extrêmes locaux au plan frontal. Après la division, la recherche de points est limitée à des zones basées sur des données anthropométriques. Quatre méthodes ont été utilisées : analyse de la silhouette 2D (variation de courbure et profondeur de la silhouette), détermination de la circonférence minimum, détection à l'aide de niveaux de gris et détermination des parties convexes et concaves du corps. A partir de 12 points de référence 104 dimensions 1D ont été obtenues (longueurs, circonférences et aires). Pour valider la méthode, les points de 189 sujets ont été prémarqués manuellement et les différences entre les points calculés et les points prémarqués sont de (min, moyenne, max)  $6.75mm$ ,  $9.54mm$  et  $14.55mm$ . Dans cette étude les auteurs ne donnent pas les données anthropométriques des sujets. Le sujet utilisé semble maigre et porte un short jusqu'au niveau des genoux. Ceci modifie probablement les caractéristiques anthropométriques de la région tour de taille – genou mais fait ressortir clairement le point d'entrejambe.

Leong et al. [66] ont appliqué un algorithme sur les scans 3D de 5 femmes asiatiques pour obtenir 21 points et 35 lignes d'intérêt en appliquant des modèles mathématiques et logiques pour chaque point ou ligne. En créant une carte de profondeur 2D, ils ont évité la complexité de la reconstruction de la surface du corps. Pour positionner les points de référence, ils divisent le corps en sept parties (de la taille d'une fois la longueur de la tête) et ils repèrent les points qui correspondent dans chacune de ces parties. Ils mentionnent que ce ratio (sept fois la longueur de la tête pour la hauteur du corps) dépend de l'ethnie. Cette division est inutilisable si on s'attache à étudier des bases de données mondiales (avec des personnes de différentes ethnies) correspondant à une division des populations par zones géographiques.

Han et Nam [44] ont proposé des algorithmes pour l'identification automatique de 6 points caractéristiques du corps humain. Leurs régions d'intérêt de positionnement de chaque point n'est pas une portion du corps humain mais une région qui est définie statistiquement à partir de la base de données "Size Korea". Selon les auteurs, les résultats pour le point d'entrejambe des hommes pourraient être améliorés en augmentant la qualité des scanners. Le positionnement des points d'aisselles sur les femmes devrait être amélioré en prenant en compte le somatotype des sujets.

### 2.1.4 Méthodes de traitement utilisées lors d'autres applications

L'ICP (Iterative Closest Point) est un algorithme utilisé dans un certain nombre d'applications [14, 20]. Cet algorithme calcule les distances entre les points afin de définir la meilleure

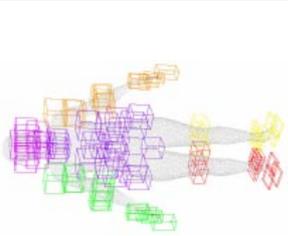
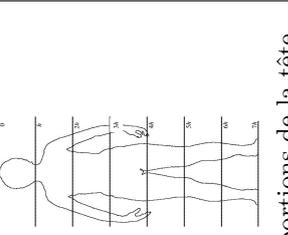
Auteurs	Suiberbuik et al. [94]	Leong et al. [66]	Lu et Wang [69]	Han et Nam [44]
Points obtenues	5 points sur la tête et le pied	21	12	6
Dimensions du corps	No	35 (basé sur [56])	104	No
Régions de recherche		 7 portions de la tête	Données anthropométriques chinoises	Données statistiques de la base de données "Size Korea"
Segmentation		Points extrêmes locaux au plan frontal	Points extrêmes locaux au plan frontal	Critères des facteurs de forme du corps
Algorithmes	surface modèle, fonction de l'environnement d'un point, calcul de courbure	Carte de profondeur, niveaux de gris, calcul de courbure	silhouette 2D, circonférence min, niveaux de gris, convexes et concaves du corps	Algorithmes basé sur des facteurs de forme du corps
Validation	points prédéfinis sur 10 sujets	5 femmes asiatiques	mesures traditionnelles sur 189 sujets (que pour 12 mesures, manque des données anthropométriques)	60 femmes et 60 hommes de différentes formes du corps
Erreur moyenne	15 mm	Jusqu'à 9.04 mm (selon les points)	14.55 mm	Jusqu'à 14.5 mm (selon les points)
Réduction du bruit	Logiciel PolyWorks	Laplace mask	Distance entre deux points	-

TABLE 2.1 – Extraction automatique des points et des lignes d'intérêt.

correspondance entre deux nuages de points tridimensionnels. Lors de cette thèse l'algorithme a été testé pour l'analyse du pied et les résultats sont présentés dans la partie concernant les applications (figure 9.10). Les résultats se sont montrés insuffisants pour l'application de notre méthodologie :

- l'orientation est faite en se basant sur tous les points du nuage de points et pas uniquement sur les points relatifs à l'application finale,
- le résultat n'est pas facilement contrôlé,
- le temps de calcul est relativement important par rapport aux autres méthodes utilisées.

De plus, pour les applications sur lesquelles porte cette thèse, l'orientation initiale des sujets scannés est connue.

Pour définir les points caractéristiques du visage et/ou les comparer les auteurs détectent des points caractéristiques dans les images. La première orientation est souvent faite par l'algorithme ICP. Cependant dans notre problématique les points caractéristiques du visage ont été déjà sélectionnés et sont disponibles. Le choix est fait de ne pas étudier en détail ces méthodes.

## 2.2 Morphologies représentatives des séries des données

### 2.2.1 Analyse statistique multiparamétrique

Pour caractériser la morphologie complexe du corps de manière plus précise, les chercheurs ont commencé à analyser statistiquement plusieurs mesures. Ils font, le plus souvent, une analyse factorielle sur ces mesures pour obtenir des groupes de caractéristiques communes parmi les sujets.

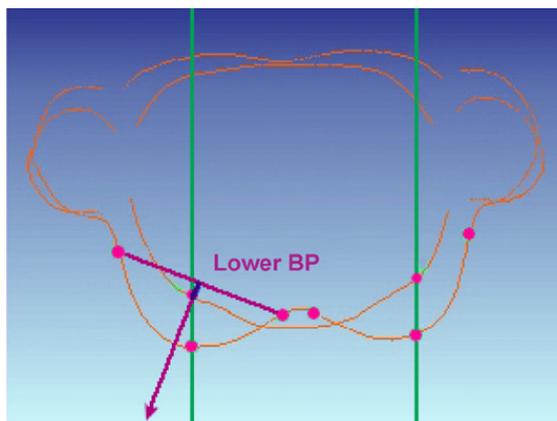
Zheng et al. [102] ont extrait de 456 sujets (avec des méthodes non-automatiques) 98 mesures unidimensionnelles de la poitrine : longueurs, angles, aires, volumes et courbures pour développer un nouveau système de tailles de la poitrine chinoise. Pour l'analyse statistique, ils ont utilisé les 98 mesures issues des scanners et 5 mesures prises manuellement. Après une analyse factorielle de ces 103 mesures ils ont conclu que pour séparer les tailles de la poitrine, deux mesures sont suffisantes. Les résultats ont montré que ces deux mesures sont le tour de sous-poitrine et le ratio profondeur / largeur du sein (figure 2.5a). Le premier élément pour le système de tailles est le tour de sous-poitrine et les sujets sont catégorisés à partir de cette mesure. Ensuite la catégorisation en ratio profondeur / largeur du sein est réalisée à l'aide d'une clusterisation.

Ben Azouz et al. [12] ont fait aussi une analyse factorielle pour obtenir les paramètres qui définissent la forme du corps en 3D. Les deux paramètres principaux extraites étaient la taille et le poids de la personne.

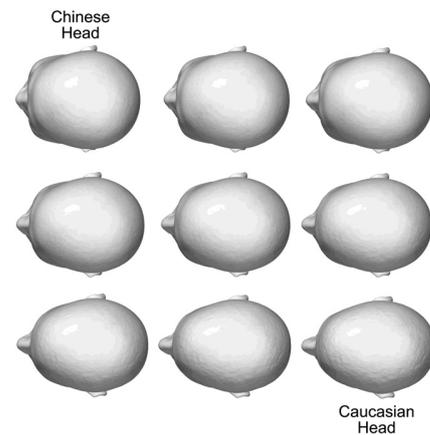
Pour analyser les différences entre les têtes chinoises et caucasiens, Ball et al. [11] ont appliqué une analyse factorielle à 1200 sujets (figure 2.5b). A chaque scanner un maillage commun qui est utilisé dans l'industrie de l'animation a été appliqué. Ce maillage est constitué de 11213 éléments. L'analyse factorielle des ces éléments a montré que les deux facteurs principaux étaient la taille globale de la tête et sa hauteur totale. Dans l'étape suivante, ils ont analysé la forme des plans du tour de tête. Ils ont montré que la probabilité que les deux populations soient les mêmes est extrêmement basse.

Dans toutes ces études le facteur principal est la taille des personnes : les sujets ont des mesures unidimensionnelles qui sont corrélées. Pour une mesure élevée il y a une forte probabilité pour que les autres mesures soient aussi élevées.

Les études mentionnées et les études qui vont être présentées dans la prochaine section sont également rattachées au tableau 2.2.



(a) Les deux principales mesures pour la catégorisation de la poitrine chinoise [102]



(b) Différences entre les têtes caucasiennes et chinoises [11]

FIGURE 2.5 – Analyse statistique multiparamétrique de la forme de la poitrine et de la tête.

### 2.2.2 Formes moyennes tridimensionnelles

Les études qui s'intéressent à la recherche des formes moyennes 3D des objets se concentrent autour du domaine de l'anthropométrie / anthropologie et plus précisément autour de la recherche craniofaciale. La forme est définie comme l'information géométrique qui reste lorsque l'information sur la translation, rotation et taille est filtrée [31]. Ainsi, les formes moyennes et leur variabilité rencontrée dans la littérature et mentionnée ci-dessous n'incluent pas le facteur taille. Sur la recherche craniofaciale, l'intérêt de la création des formes moyennes est la détection des anomalies génétiques.

Shaweesh et al. [88], ont créé des visages moyens pour quatre groupes (Européen, Japonais, enfants avec des troubles génétiques et groupe de contrôle). Pour un visage moyen, un échantillon de 14 personnes est suffisant. Pour la création de ces visages, les coordonnées de profondeur correspondantes (des distances inter-surfaciques) à partir des visages scannés sont moyennées.

Cette méthode peut être décrite en deux étapes :

- alignement : tous les scans sont centrés sur le point le plus bas du nez (Ns), le plan de Francfort étant horizontal. Ce plan passe antérieurement par le plancher de l'orbite et postérieurement au-dessus du méat acoustique externe (figure 2.6). Ensuite, le nasion (Na) est aligné en profondeur et en vertical avec le nasion du premier scan.
- Moyennage : les profondeurs des visages sont moyennées en utilisant la distance entre les surfaces des scans.

Leur étude suivante [95] mentionne quelques problèmes rencontrés :

- ces visages sont utiles pour une évaluation qualitative mais pas pour les applications quantitatives,
- dans les régions loin du point d'alignement ces visages sont moins représentatifs,
- la taille des scans est assez importante car ils sont créés à partir de milliers de points. Cette taille doit être réduite pour que le temps de calcul ne soit pas une limite pour les études suivantes.

Dans cette étude ils proposent aussi une autre méthode pour obtenir des visages moyens :

- moyennage des points anatomiques manuellement déterminés pour tous les scans,
- création de nappes paramétrées pour chaque visage de sorte que les points anatomiques

Auteurs	Shaweesh et al. [88]	Thomas et al. [95]	Drida et al. [30]	Hutton et al. [50]	Zheng et al. [102]	Ben Azouz et al. [12]	Ball et al. [11]
Partie du corps étudiée	Visage	Visage	Visage	Visage	Poitrine	Corps entier	Tête
Alignement	Centre au subnasale, plan de Frankfort horizontal, alignement du nasion	Aux points anatomiques moyens		Aux points anatomiques moyens	Pas pour les ID	3 axes principaux d'inertie du corps entier	Maillage générique de tête
Moyennes	Surfaces	Points des surfaces	Surfaces	Points des surfaces	Mesures unidimensionnelles	-	
Statistiques 3D	Moyenne des distances inter-surfaciques	Visage archétype : barycentre de l'analyse factorielle	Surface de la moindre déformation entre les surfaces	Moyennes des points du maillage	-	Analyse factorielle sur les vecteurs du maillage	Analyse factorielle sur les vecteurs du maillage
Contrôle de la moyenne	Que qualitative	-	Moyenne pas unique	Moyenne différente pour chaque visage base	-	-	-
Taille prends en compte	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui

TABLE 2.2 – Analyse statistique des formes anthropométriques.

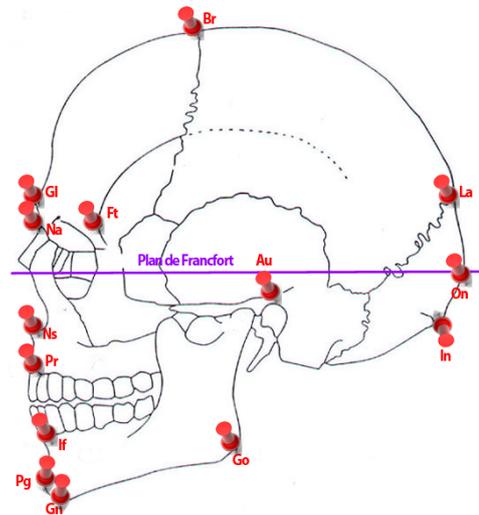


FIGURE 2.6 – Points anatomiques sur le crâne et plan de Francfort (<http://crime-expertise.org/>)

soient alignés avec les points anatomiques moyens,

- un maillage pour un visage est créé de façon arbitraire et les points des autres visages sont déplacés pour avoir la correspondance. Pour créer ce maillage ils se réfèrent à la méthode de Hutton et al. [50] (voir plus bas),
- inversement des nappes paramétrées pour obtenir les visages originaux.

Dans les nappes paramétrées une analyse factorielle est mise en place pour diminuer le nombre de points sur les surfaces. Le visage moyen est décrit alors par le barycentre de cette analyse.

Dans leur article en 2010 [23], en citant leurs études précédentes, les auteurs signalent que ces visages moyens ne s'apparentent pas à des visages typiques. Ils sont trop parfaits et apparaissent comme artificiels.

Pour étudier les visages d'enfants et identifier des éventuels syndromes, Hammond [43] a utilisé aussi des visages moyens. Il mentionne que les positions des points de référence peuvent être alignées et il est possible de calculer leurs positions moyennes qui produisent une représentation du visage moyen. Il ne donne pas plus de détails sur la méthode.

Une autre méthode qui analyse la moyenne à partir des surfaces est celle de Karcher [30]. Les auteurs ont utilisé les concepts de la géométrie riemannienne (géodésiques, courbures) afin d'analyser les formes du nez et créer leurs formes moyennes. La surface moyenne consiste en une surface de moindre déformation entre les surfaces des nez données. La moyenne créée avec cette méthode n'est pas toujours unique.

Hutton et al. [50] estiment des trajectoires moyennes de croissance. Ils choisissent neuf points anatomiques et interpolent la correspondance entre ces points. Les visages sont alignés sur les points anatomiques moyens. Pour créer le maillage pour tous les visages, ils créent un maillage d'un visage qui semble normal en ce qui concerne la couverture et l'absence de trous. Ils montrent que la sélection du visage de base n'est pas critique parce que les visages moyens créés avec différents visages de base sont presque identiques (pas de comparaison quantitative).

Un des éléments qui impacte fortement la forme moyenne finale en 3D est la sélection de l'alignement des formes moyennes individuelles. Cai et al. [17] ont réalisé une étude théorique sur le sujet. Ils ont montré que différentes méthodes d'alignement donnent des différences significatives pour l'anthropométrie 3D. Plus précisément, différents objets 3D vont être créés en

utilisant différents points de référence comme points d'alignement. Ils concluent aussi que les statistiques qui sont basées sur les coordonnées 3D sont incompatibles avec celles qui sont basées sur les mesures traditionnelles.

### 2.2.3 Systèmes de tailles

Les systèmes de tailles actuels sont définis uniquement à partir des dimensions unidimensionnelles. Pour le haut du corps, le tour de poitrine et le tour de taille sont les dimensions les plus utilisées. Pour le bas du corps, le tour de taille et le tour de bassin. Même pour les formes plus complexes, comme le pied ou la tête, les tailles sont déterminées à partir d'une seule mesure (longueur du pied, tour de tête).

Il est mentionné (section 1.2.6) que pour le corps humain, ayant une morphologie complexe, les données anthropométriques 3D sont les plus pertinentes. En analysant les études existantes, ces données ne sont pas utilisées.

## Chapitre 3

# Positionnement de l'étude

### 3.1 Motivations

Les applications de l'anthropométrie, multiples, peuvent être :

- l'analyse d'une morphologie individuelle,
- l'analyse statistique de la morphologie d'une population,
- les différences anthropométriques entre les populations,
- l'adaptation des produits et l'ergonomie.

La plupart des chercheurs n'étudient ces paramètres qu'avec des mesures unidimensionnelles, aujourd'hui encore. Pour décrire de manière plus détaillée le corps humain, qui a une morphologie complexe, les données tridimensionnelles sont les plus pertinentes. En outre, récemment les scanners 3D (laser ou lumière blanche) sont utilisés dans le domaine [84, 102, 44]. Cependant l'information utilisée est encore limitée aux données unidimensionnelles.

En anthropométrie tridimensionnelle la littérature n'est pas très abondante. Les formes moyennes ont été notamment utilisées pour identifier des troubles génétiques [88, 95]. Ces formes ne peuvent pas être assimilées à des visages typiques, car ces derniers sont trop artificiels [23]. En plus de la recherche craniofaciale, le corps entier aussi est étudié en anthropométrie 3D : sur une analyse factorielle, les deux principaux facteurs (qui décrivent le plus l'ensemble des sujets examinés) sont la taille et le poids de la personne.

La forme d'un objet est définie comme l'information géométrique qui reste quand l'information sur la translation, rotation et taille est filtrée [31]. Les chercheurs alors, pour étudier les différences entre les formes, alignent les sujets scannés et suppriment l'information sur la taille : la forme de la tête, par exemple, s'étudie après uniformisation des tailles pour tous les sujets. Cependant, pour créer des formes représentatives qui vont être utilisées par l'industrie du sport ou pour l'ergonomie, l'information sur la taille est indispensable. Pour la définition par exemple des systèmes de tailles à partir des mesures unidimensionnelles cette information est toujours conservée [102].

Afin de faire une analyse statistique multidimensionnelle, les auteurs appliquent des procédures sur les surfaces des scans. Cependant, pour éviter des erreurs dans la conception avec des nuages de points, il faut éviter la reconstruction des surfaces [7].

L'intérêt de la création des formes représentatives se concentre sur l'analyse de la différence entre les populations en les séparant selon l'ethnie et la race. Sur une comparaison de têtes de deux populations (chinoise, caucasienne), il a été montré statistiquement que ces deux populations ne sont pas identiques morphologiquement [11]. A notre époque, cette séparation selon ethnie ou race n'est plus représentative des populations, étant donnée la mobilité des personnes. Aussi, pour

des applications en ergonomie par exemple, il convient d'étudier la morphologie des individus habitant dans un lieu sans prendre en compte leurs origines [3].

L'obtention de la forme représentative 3D d'une population est faite une fois que les scanners sont alignés entre eux. Dans les plupart des cas, les points anatomiques qui sont défini manuellement sont utilisés pour cet alignement [88, 95, 50]. Pour les régions qui sont loin de ces points, la forme moyenne n'est pas représentative [95]. En outre, l'alignement sur un nombre important de points inclut l'erreur de positionnement de ces points. L'impact de l'alignement est très élevé parce que différents alignements créent différentes formes moyennes [17]. Pour cela il faut que l'alignement suive une procédure plus précise et automatique dans le cas de traitement de séries de données.

Pour le cas d'un scan corps entier, on pourrait imaginer sa division automatique en cinq segments aux points de l'entrejambe et des aisselles [77, 27, 99, 98, 66, 69].

Les algorithmes qui repèrent ces points aux lieux de séparation visuelle [99, 98, 66, 69] ne fonctionnent pas correctement dans plusieurs cas :

- les jambes se réunissent plus bas que le point réel d'entrejambe,
- les bras touchent le tronc, bien après les aisselles.

De plus, les méthodes qui définissent une relation entre le poids et/ou la forme du corps pour trouver l'emplacement de ces points [27, 44] ne peuvent pas être aussi précises. La raison est qu'il devrait y avoir autant de relations que de morphologies individuelles qui existent dans le monde. La méthode de Nurre et al. [77] semble la plus complète et est testée avec 95% de réussite. Il reste à considérer le temps de calcul nécessaire et peut-être la simplifier. Pour segmenter la tête, ils sont aussi les seuls à proposer une solution automatique.

Pour localiser les points d'intérêt en utilisant des zones spécifiques issues d'analyses statistiques [94, 66, 69, 44], il faut analyser les bases de données existantes pour chaque population mais aussi penser à l'évolution de leur morphologie. Il pourrait être plus efficace d'utiliser d'autres méthodes, directement applicables sur chaque sujet scanné. Par exemple le calcul de la courbure pour trouver des endroits spécifiques [94] ou le calcul des circonférences extrêmes [69] pour définir les lignes d'intérêt comme le tour de poitrine. La carte de profondeur [66] pourra être adoptée pour améliorer la performance des codes informatiques. Avec cet algorithme les images 3D sont représentées par des images en niveaux de gris en deux dimensions en gardant la même précision.

Toutes ces méthodes ont des axes d'amélioration mais l'intérêt des chercheurs montre qu'il pourrait être possible de diviser le corps correctement de manière automatique. Ensuite un modèle simple (par exemple celui de Hanavan [46]) pourrait être utilisé pour l'interprétation des séries de données 3D.

Les segments humains ont déjà été personnalisés en projetant manuellement des formes géométriques simples, générées automatiquement, sur deux photographies [81]. La même procédure peut être appliquée inversement et automatiquement dans le cas des scanners 3D. Les coordonnées tridimensionnelles pourront être projetées sur un modèle simple du corps humain qui va être commun pour tous les sujets. De ce fait, les formes 3D individuelles deviennent comparables entre eux.

Pour vérifier dans un premier temps les données issues des scanners 3D, il faut commencer par la vérification des données unidimensionnelles. La validation est faite en les comparant avec les mesures traditionnelles [54] ou en extrayant des points prédéfinis. Aussi elles pourront être comparées sur différents scans du même sujet [99].

L'auteur n'a pas trouvé d'études complètes et précises sur l'interprétation automatique des scanners 3D. De plus les chercheurs n'ont à ce jour pas développé de manière importante l'interprétation de la morphologie humaine en trois dimensions. Une combinaison des méthodes présentées avec un avancement sur la morphologie 3D et une analyse statistique des séries de données serait souhaitable pour donner des éléments indispensables à la confection des vêtements,

des équipements sportifs et aussi pour des applications ergonomiques et médicales. Par exemple, la conception actuelle pour l'industrie de l'habillement est basée sur un patronage des mesures unidimensionnelles. On pourrait améliorer la procédure de la conception en projetant des lignes d'intérêt sur le nuage de points tridimensionnel, par exemple les lignes d'intérêt sur le tronc pour obtenir la surface d'un T-shirt [7].

## 3.2 Contexte industriel

DECATHLON, une entreprise française, se développe actuellement fortement à l'étranger. Les produits, basés sur la morphologie française, ont été commercialisés dans les magasins étrangers. Cependant les retours des clients étaient que les produits n'étaient pas adaptés à leur morphologie. Afin de concevoir des produits morphologiquement adaptés aux personnes à l'international DECATHLON doit aujourd'hui étudier leur morphologie. Cela conduit à l'étude de plusieurs populations.

Les méthodes existantes pour l'analyse du corps humain sont des méthodes souvent automatiques (liées à un scanner donné) qui étudient la morphologie des personnes par des données unidimensionnelles (comme elles ont été définies à la section 1.1.1). De ce fait une problématique industrielle se pose : les données viennent de différentes campagnes de mensuration conduites avec des équipements différents, les données ne sont donc pas directement comparables.

Basé sur ce constat l'approche initiale de cette thèse était d'étudier les différences entre les populations afin d'adapter les produits sportifs. Ces différences étaient à étudier en utilisant uniquement des mesures unidimensionnelles. Il faudrait alors rendre les données extraites comparables. Cependant durant ce travail il a apparu que l'information par les données unidimensionnelles est parfois limitée. Par exemple, deux populations peuvent avoir la même longueur de pied mais pas la même forme. Ce fait est également remarquable par les retours des clients sur quelques produits.

## 3.3 Objectifs

Les objectifs de la présente thèse se divisent en deux parties : les objectifs industriels et les objectifs scientifiques. En résumé ces objectifs sont présentés au diagramme de la figure 3.1.

### 3.3.1 Industriels

L'objectif général de cette étude pour l'industrie est d'apporter les informations morphologiques aux métiers de la conception afin d'adapter correctement des produits au corps humain. Les caractéristiques du corps humain sont différentes selon les endroits du monde. Ces différences doivent être qualifiées et quantifiées entre les zones géographiques mais également à l'intérieur de chaque zone. Cette analyse, en combinaison avec les propriétés de chaque produit, permet d'obtenir les informations nécessaires pour la construction d'offres de systèmes de tailles. Ensuite, pour chaque taille la morphologie modèle doit être prédite, c'est à dire la morphologie sur laquelle le produit sera réalisé. La définition des morphologies modèles sera alors appliquée à la conception des produits ergonomiques adaptés aux populations. Dans ce manuscrit les informations morphologiques sont présentés pour trois parties du corps (pied, tête, poitrine).

### 3.3.2 Scientifiques

La diversité anthropométrique en trois dimensions est à étudier. L'adaptation des méthodes statistiques classiques dans la morphologie tridimensionnelle (statistiques de premier ordre, analyse en composantes principales) est alors envisagée. Pour la création d'offres de systèmes de tailles et pour le calcul du taux de couverture de chaque produit pour chaque population, l'analyse en trois dimensions donnera des informations plus précises et concrètes. Pour la définition, ensuite, des morphologies modèles, le développement d'une méthode robuste qui permet l'analyse qualitative et quantitative est indispensable. De plus, en automatisant ces procédures, l'erreur due à la main d'œuvre peut être diminuée et parallèlement un gain de temps peut être obtenu. En combinaison avec certaines des méthodes mentionnées dans ce chapitre, cette thèse vise à analyser l'anthropométrie internationale et extraire ces informations en développant des méthodes robustes qui pourront être appliquées ensuite dans le domaine de la santé et de l'ergonomie. Plusieurs parties du corps sont à étudier, de ce fait cette méthode doit être adaptable facilement.

En conclusion, plusieurs problématiques scientifiques liées à l'anthropométrie, sa mesure et son analyse se présentent à DECATHLON, et cette thèse tente d'apporter un cadre général pour leurs résolutions.

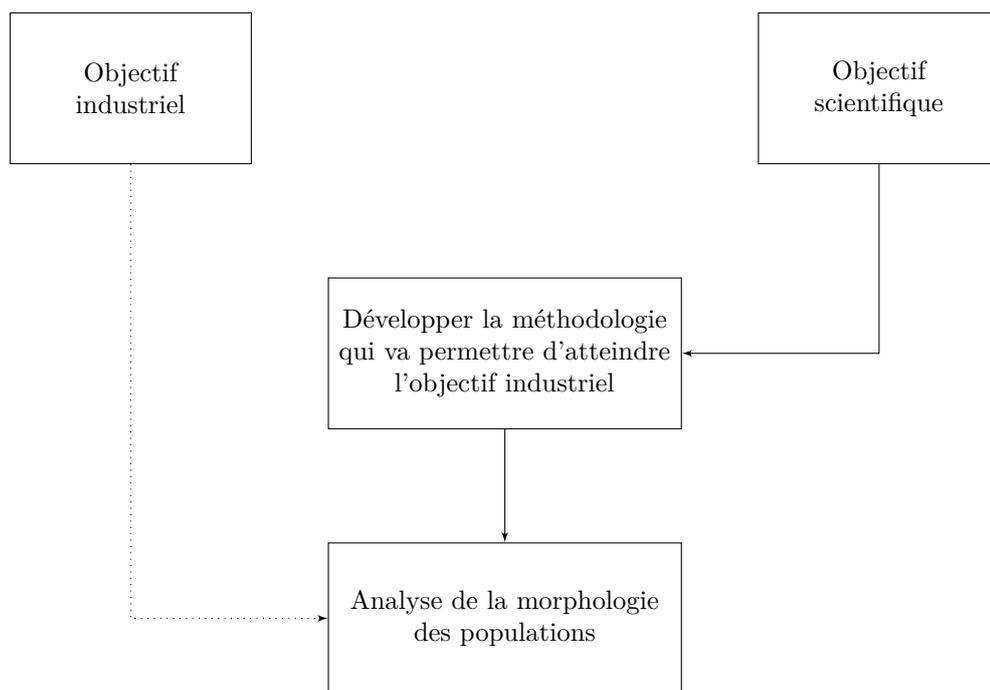


FIGURE 3.1 – Résumé des objectifs de la thèse.

## Deuxième partie

# Mise en place de la méthodologie



## Chapitre 4

# Analyse de la morphologie individuelle

Les données brutes d'un scanner 3D sont des nuages de points. Dans ce chapitre, vont être présentées les différentes méthodes de représentation des données tridimensionnelles pour décrire la morphologie humaine.

Une des problématiques présentées est la position des données dans l'espace réel. Le nuage de points qui représente le corps humain est souvent décrit avec des coordonnées sans origine et orientation globale pour tous les sujets. Dans ce cas, un alignement des scans devra être réalisé.

En ayant un repère commun à tous les sujets, des procédures automatiques peuvent être utilisées pour obtenir des caractéristiques anthropométriques et détecter les points anatomiques du corps. Cette étape est indispensable. Comme chaque scanner a son logiciel associé pour l'extraction des mesures, il y a des différences significatives sur les mesures obtenues [89]. De ce fait, les bases de données des mesures unidimensionnelles ne sont pas compatibles. En analysant directement la morphologie tridimensionnelle, ces mesures seront calculées de manière identique pour tous les sujets indépendamment de la base de données dont ils sont issus.

Enfin, le mode de calcul des mesures unidimensionnelles est décrit, une fois que l'endroit du corps requis pour obtenir cette mesure est défini.

## 4.1 Représentation des données tridimensionnelles

### 4.1.1 Systèmes des coordonnées

Les coordonnées de points d'un scanner 3D peuvent être décrites dans différents systèmes de coordonnées :

- cartésien  $(x,y,z)$ ,
- cylindrique  $(\rho, \theta, z)$ ,
- sphérique  $(\rho, \theta, \phi)$ .

Dans le tableau 4.1, le passage d'un système de coordonnées à un autre est rappelé. Cette transformation est bijective.

Afin d'exprimer chaque segment corporel, le choix du système de coordonnées dépend de sa forme initiale. Par exemple, pour analyser la morphologie de la tête, celle-ci peut être modélisée comme une sphère et être exprimée en coordonnées sphériques. De la même manière, pour analyser la morphologie de l'avant-bras, un cylindre peut être utilisé en exprimant le nuage de

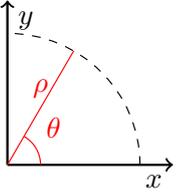
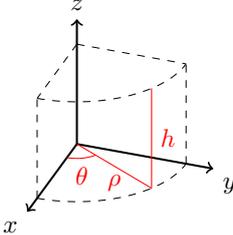
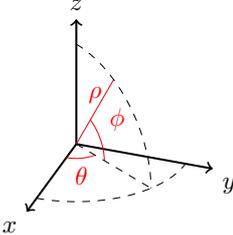
Coordonnées	Polaires	Cylindriques	Sphériques
Schéma			
De coordonnées cartésiennes	$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ $\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$	$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ $\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$ $h = z$	$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ $\theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$ $\phi = \arctan\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$
A coordonnées cartésiennes	$x = \rho \cos \theta$ $y = \rho \sin \theta$	$x = \rho \cos \theta$ $y = \rho \sin \theta$ $z = h$	$x = \rho \cos \theta \cos \phi$ $y = \rho \sin \theta \cos \phi$ $z = \rho \sin \phi$

TABLE 4.1 – Formules de passage aux différents systèmes de coordonnées.

points en coordonnées cylindriques. Il semble évident que la modélisation de l'avant-bras comme une sphère n'est pas pertinente.

#### 4.1.2 Intérêt du changement de système des coordonnées

L'intérêt du passage d'un système de coordonnées à un autre est d'augmenter les possibilités de comparaison des morphologies et de simplifier les calculs. Après obtention des résultats, les formes géométriques peuvent être exprimées en coordonnées cartésiennes pour être utilisées dans d'autres applications. Notamment, elles peuvent être utilisées pour la conception des produits dans les environnements CAO (conception assistée par ordinateur) et la production.

Pour décrire le volume et la forme du corps humain, les éléments initiaux sont des formes géométriques simples (tableaux 1.2 et 1.3 en pages 13 et 14) :

- sphères [46, 81],
- cylindres à base circulaire et à base elliptique [46, 81, 59],
- solides type «stadium» et cônes tronqués [100],

qui décrivent les segments du corps humain ou des zones des segments.

Les sphères peuvent être représentées en coordonnées sphériques et toutes les autres en coordonnées cylindriques ou en combinaison des deux.

La simplification de la géométrie peut être une première étape mais, pour obtenir des modèles précis, la personnalisation de chaque segment est indispensable. Par la suite, on étudie la procédure de cette personnalisation en expliquant les différentes étapes pour la description de la morphologie humaine.

## 4.2 Alignement et superposition

Quand la position relative du sujet et du scanner est constante, le positionnement et l'orientation du nuage de points dans l'espace est connue et identique pour tous les sujets. Cela permet d'appliquer des procédures automatiques sur une base de données pour analyser efficacement la

morphologie individuelle ainsi que les différences entre les sujets. Dans le cas contraire, les nuages de points ne peuvent pas être traités et analysés de manière automatique. Avant le passage aux différents systèmes de coordonnées, la position est ainsi déterminée dans le système cartésien.

L'alignement est alors une étape indispensable dans le cas où la position du sujet est aléatoire par rapport au scanner. L'alignement est aussi indispensable dans le cas où le sujet a une position connue mais l'élément d'analyse n'est qu'une partie de son corps. L'orientation des repères est donnée mais l'origine initiale du système de coordonnées n'est pas adéquate. Par exemple, sur une étude du tronc d'un scanner du corps entier, l'origine est positionnée au niveau des pieds. Elle devra être déplacée sur un point de référence relative au tronc.

La définition des axes et de l'origine du repère pour aligner tous les sujets est un élément qui influe fortement sur l'extraction des mesures et l'analyse de la forme des sujets dans les algorithmes automatiques. Avec différents points de référence pour l'alignement, différentes formes moyennes seront extraites [17]. Ces choix peuvent se baser sur des points anatomiques ou sur des plans de référence relatifs à la région étudiée. Pour passer ensuite aux coordonnées sphériques ou cylindriques, le centre choisi devra être à l'intérieur du cylindre ou de la sphère.

Un scan est caractérisé par un nuage de points et est interprété comme un corps rigide. Une fois que les vecteurs des trois axes et l'origine du repère sont choisis, la matrice de déplacement linéaire ainsi que celle de la rotation peuvent être constituées. Si  $P$  est l'ensemble de  $n$  points d'un scan on peut écrire pour tout point  $k$  :

$$(x_k, y_k, z_k) \in P, P \in \mathfrak{P}(\mathbb{R}^3), n \in \mathbb{N}$$

### 4.2.1 Déplacement linéaire

Supposons que sur la tête de la figure 4.1a, le point de l'origine est choisi au "milieu" de la tête dont les coordonnées sont  $(x_0, y_0, z_0)$ . Pour déplacer la tête, il suffit de déplacer tous ses points (figure 4.1b) :

$$(x'_k, y'_k, z'_k) = (x_k, y_k, z_k) - (x_0, y_0, z_0) \in P'$$

où  $P'$  est l'image de  $P$  par la translation  $[x_0, y_0, z_0]$ .

### 4.2.2 Rotation

Pour avoir la même orientation des sujets il faut ensuite pivoter les axes (figure 4.1c). En considérant le nuage de points comme un corps rigide la matrice de rotation peut être constituée. Si  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont les angles de rotation des trois axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  respectivement, la matrice de rotation  $M$  peut être écrite de la manière suivante<sup>1</sup> :

$$M = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha + \sin \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \alpha - \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ -\sin \gamma \cos \beta & \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha + \cos \gamma \sin \alpha \\ \sin \beta & -\cos \beta \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

Deux points définissent la position d'un axe, pour la définition d'un repère trois points non alignés sont requis. Les coordonnées après la rotation sont :

$$(x''_k, y''_k, z''_k) = M \times (x'_k, y'_k, z'_k) \in P''$$

où  $P''$  est l'image de  $P'$  par la rotation de matrice  $M$ .

1. Il existe douze écritures différentes de la matrice de rotation qui dépendent de l'ordre de rotation par rapport aux différents axes et conduisent au même résultat.

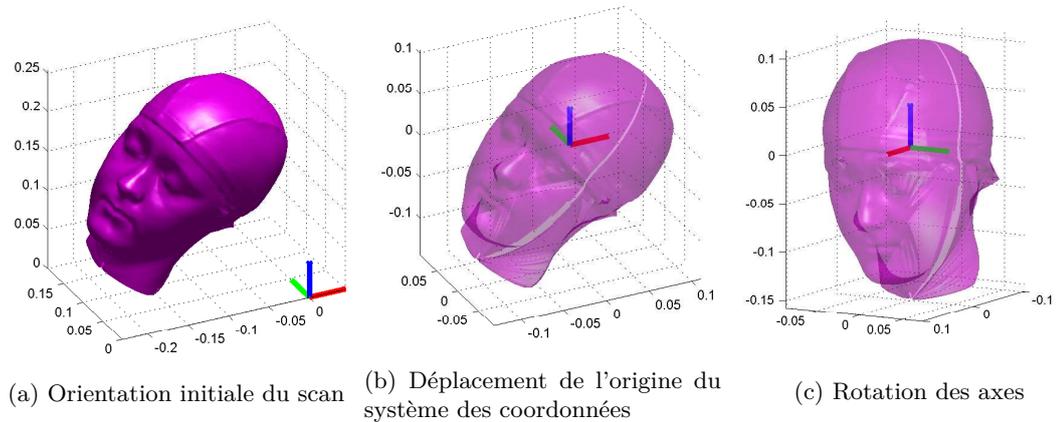


FIGURE 4.1 – Alignement des axes sur les scans de tête (axes en mètres).

### 4.3 Obtention des lignes et points d'intérêt

La superposition des sujets est faite par rapport aux lignes et points anatomiques du corps humain. Pour quelques-unes de ses parties, ces caractéristiques peuvent être extraites automatiquement. Pour cela la géométrie du nuage de points est à étudier. Les deux principaux paramètres à prendre en compte sont la morphologie complexe du corps et la diversité entre les personnes. En analysant les *maxima* et *minima* des courbures du corps humain, les positions anatomiques peuvent être repérées. En outre, en utilisant une projection des points dans une image binaire, des méthodes de traitement d'images peuvent être utilisées.

Pour les mesures liées à la conception des vêtements, la position de référence des sujets scannés est celle de la figure 4.2 [54]. Étant donné la position, la procédure pour acquérir des données anthropométriques est :

- élimination de la tête,
- détection des points d'aisselles,
- détection du point d'entrejambe,
- positionnement des hauteurs des tours d'intérêt,
- calcul des circonférences,
- calcul des formes moyennes tridimensionnelles.

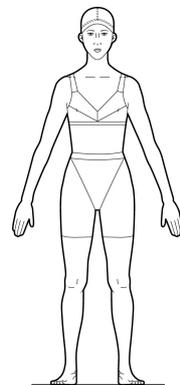


FIGURE 4.2 – Position des sujets scannés [54].

#### 4.3.1 Séparation de la tête

Pour séparer la tête du reste du corps une méthode a été présentée à la section 2.1.2 (figure 2.4 en page 23 [77]). Pour que celle-ci puisse être appliquée à tous les scans, quelques précautions ont été prises. Comme le montre la figure 4.3, les données sont incomplètes au niveau de la tête ce qui résulte de la présence des cheveux à cet endroit. En appliquant la méthode de [77] sur un scan choisi au hasard le résultat est présenté sur la figure 4.4a. Comme les données incomplètes à cet endroit de la tête ne sont pas les mêmes pour tous les scans, les droites pour l'élimination de la tête sont créés de manière différente de ce que l'on peut trouver dans [77]. Cette méthode et la détection de la hauteur du cou sont détaillées ci-dessous et à la figure 4.5.

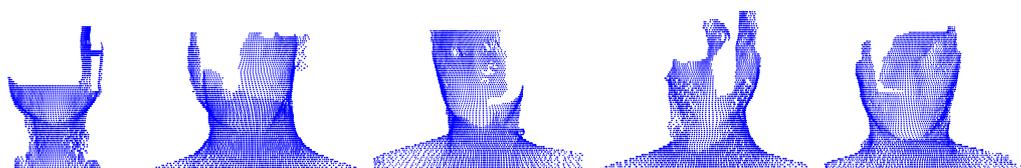


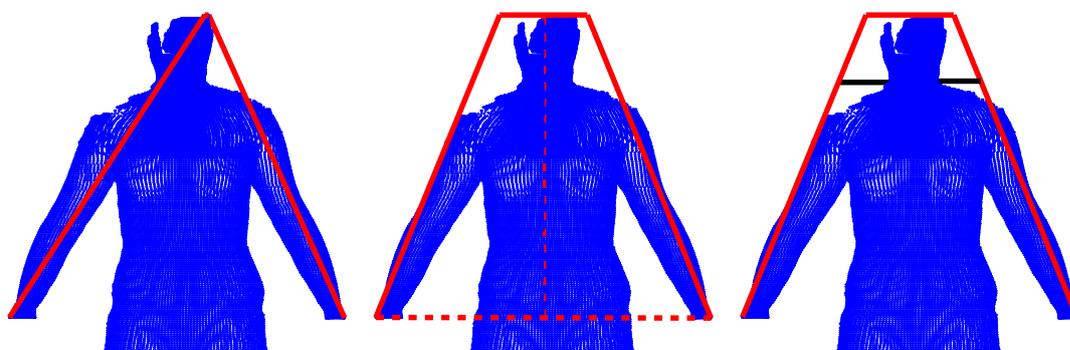
FIGURE 4.3 – Nuages de points au niveau de la tête sur les scans du corps entier.

### Définition des droites d'élimination

Les droites d'élimination (figure 4.4b) sont créées à partir de trois points du scan :

- le point extrême haut qui correspond à la tête,
- le point extrême droite et le point extrême gauche qui correspondent aux points des mains.

Les droites commencent alors aux points extrêmes des mains. Elles finissent à la hauteur du point le plus haut. Pour la direction latérale elles finissent écartées de dix centimètres du barycentre des deux points extrêmes des mains.



(a) Application de la méthode de [77] (b) Modification des droites d'élimination (c) Distances maximales droite et gauche (en noir)

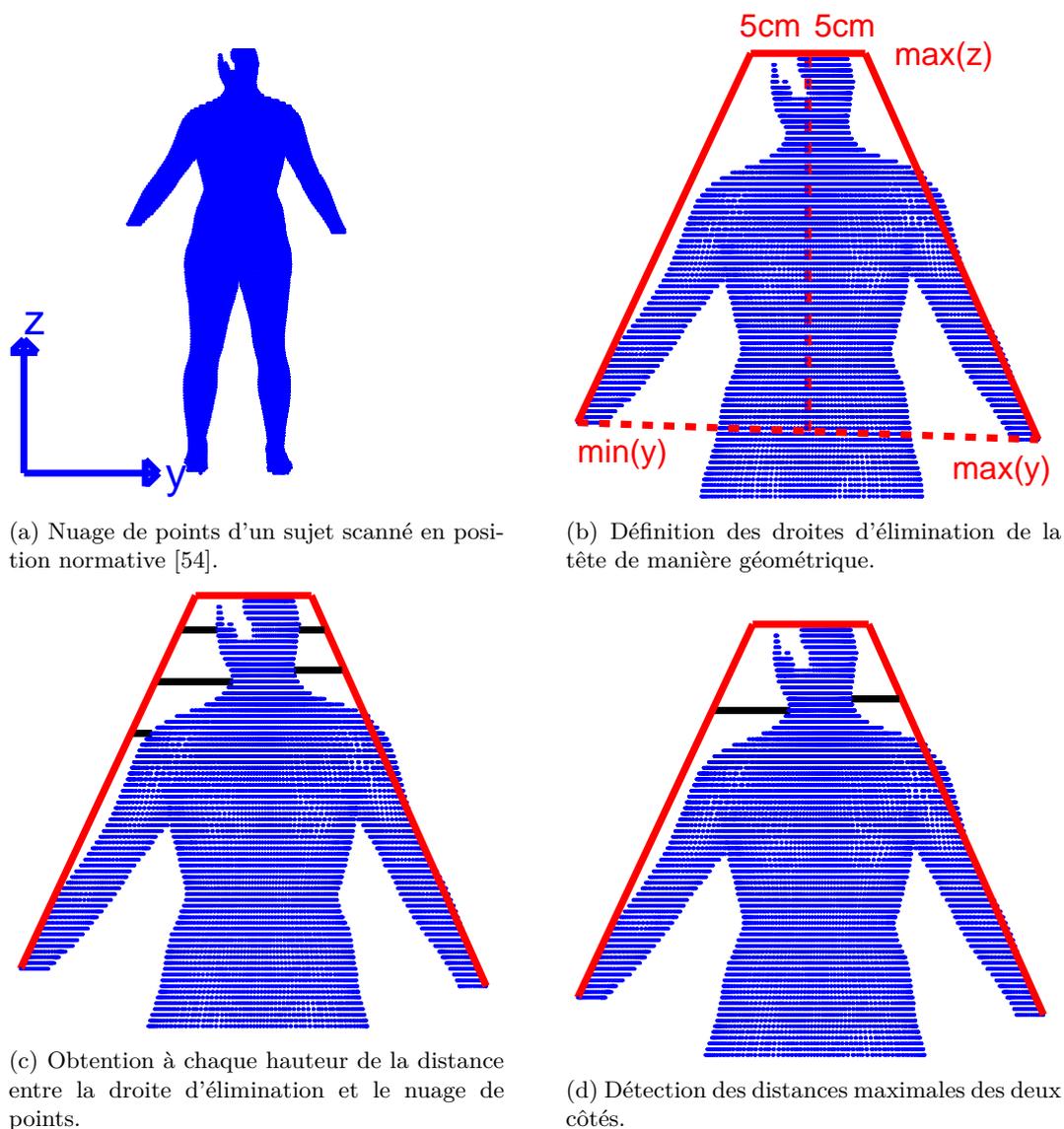
FIGURE 4.4 – Définition de la position du cou.

### Obtention de la hauteur du cou

La hauteur du cou est détectée à la position de l'écart maximal entre le nuage de points et les droites d'élimination (figure 4.4c). La hauteur est détectée sur les deux cotés

- pour minimiser les erreurs dues aux données manquantes des scans,
- parce que le corps humain n'est pas parfaitement symétrique.

La hauteur du cou est une mesure qui n'influe pas fortement sur l'extraction des mesures anthropométriques. La problématique qu'elle résout (par rapport aux méthodes qui sont utilisées pour détecter l'entrejambe et les aisselles) est l'élimination de deux branches séparées qui peuvent exister à cause du bruit présent au niveau de la tête (figure 4.3). Afin de séparer alors la tête, la hauteur du cou se trouve à la position moyenne de deux cotés si la différence entre la détection droite et gauche est de moins de 3% de la taille du sujet. Selon [96], 3% correspond à une demi-longueur du cou.



La hauteur du cou est calculé à la hauteur moyenne des deux côtés. Si la différence entre la hauteur du cou du côté droit et celle du côté gauche est supérieure à 3% de la taille du sujet, le sujet scanné est renvoyé par l'algorithme à l'opérateur afin de détecter manuellement sa hauteur de cou.

FIGURE 4.5 – Procédure d'obtention de la hauteur du cou.

### 4.3.2 Détection des points de rebroussement sur le plan frontal (entrejambe et aisselles)

La première localisation des aisselles et de l'entrejambe est calculée en détectant les points de rebroussement sur le plan frontal (figure 4.6a). Supposons qu'il existe deux branches dans un nuage de points et que le point de séparation des branches est à détecter (figure 4.6b, 4.6c et 4.6d). Deux méthodes sont appliquées pour augmenter la robustesse de la détection. La première utilise le nuage de points directement. Pour la deuxième le nuage de points est transformé en une image binaire.

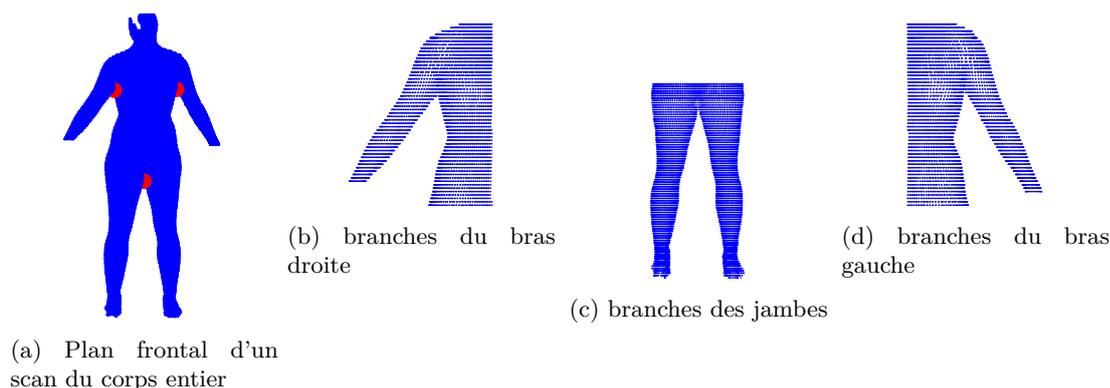


FIGURE 4.6 – Systèmes de deux branches à séparer sur le plan frontal.

La détection sur le plan frontal n'est qu'une première solution. Pour le futur, il est envisagé d'améliorer cette détection en appliquant les algorithmes sur les plans horizontaux.

#### Détection sur le nuage de points

Pour détecter le point de rebroussement sur le nuage de points il faut, dans un premier temps, orienter ce nuage sur un axe vertical. Cette orientation va permettre le calcul des distances entre les deux branches à chaque hauteur. Chaque tranche de hauteur choisie doit être :

- assez large pour contenir des points appartenant à deux branches et surtout des points appartenant au bord des branches,
- assez petite pour que la précision de détection soit acceptable.

Pour chaque tranche de hauteur choisie, la distance entre les points en direction latérale est calculée. Le point de rebroussement est trouvé sur la tranche où la distance maximale n'est plus différente des autres distances de la tranche. Cette distance ne peut pas être résolue par un nombre fixe car les points ne sont pas équidistants et leur densité dépend du scanner et/ou de la taille du sujet scanné. Pour notre étude, le scanner utilisé est le scanner NX16 de l'entreprise *TC*<sup>2</sup>. Sa densité de données déclarée par le fournisseur est 600000 à 800000 points. Après différents essais, il est défini que : le point de rebroussement est trouvé à la hauteur la plus basse  $h_p$  où la distance maximale  $d_{max}$  diminuée du 98<sup>e</sup> centile de l'ensemble des distances de la tranche ( $d_{98}$ ) est moins élevée que ce 98<sup>e</sup> centile. Autrement écrit :

$$h_p = \min(h), \quad \forall h \quad \exists \quad d_{max} - d_{98} < d_{98}$$

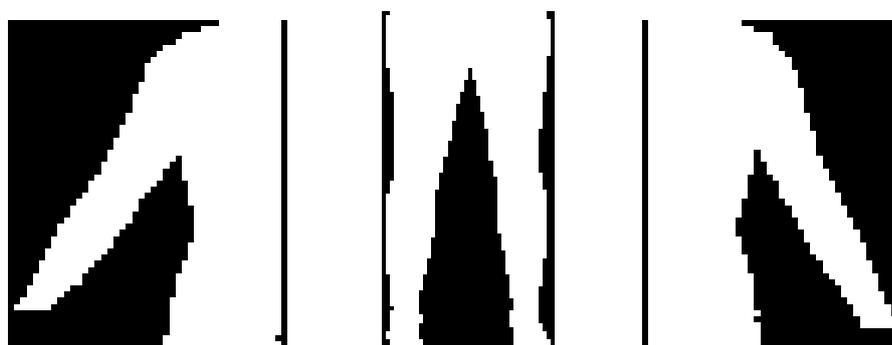
Cet algorithme est utilisé actuellement dans les cabines de scan "DECATHLON"<sup>1</sup>. Sur approximativement 1000 scans réalisés, la détection du point de rebroussement est réussie à 95% des cas.

1. Cela fait partie d'un projet confidentiel en développement de l'entreprise.

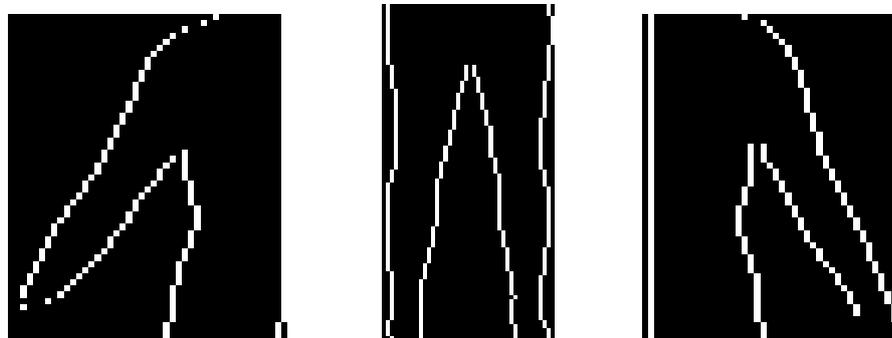
Une poursuite de ce travail de thèse sera l'étude plus précise sur les cas pour lesquels ce point n'est pas correctement détecté.

### Détection à l'aide d'une image binaire

L'image à créer est la projection dans le plan frontal du nuage de points. Cette empreinte créera une image binaire qui est simplement la discrétisation du plan du nuage de points en pixels (figure 4.7a). Les contours de cette image (figure 4.7b) sont détectés en utilisant l'opérateur de Sobel [91, 92]. Cet opérateur calcule le gradient de l'intensité d'une image dans un carré de  $3 \times 3$  pixels. La variation des couleurs est alors démontrée. Dans une image binaire le contour est détecté au changements des seules "couleurs" 0 et 1. Le point qui sépare les deux branches est maintenant le point d'intersection estimé à partir des deux contours à l'intérieur de la branche.



(a) Création d'image de la projection dans le plan frontal



(b) Détection des contours sur l'image

FIGURE 4.7 – Système de détection utilisant deux branches sur une image binaire.

### 4.3.3 Positionnement des lignes d'intérêt

Une fois que l'entrejambe et les aisselles sont détectées, les lignes d'intérêt peuvent être extraites sur les cinq parties du corps : bras, jambes, tronc. Le positionnement est relatif aux propriétés générales morphologiques de chaque segment. Pour cela, la méthode de détection de chaque ligne sera expliquée dans la partie concernant les applications de ce manuscrit.

## 4.4 Extraction des mesures unidimensionnelles

Une fois que la position et l'orientation de la ligne d'intérêt est connue (soit manuellement soit automatiquement), l'extraction de la mesure anthropométrique est possible. Pour la calculer, le nuage de points à la position spécifique est extrait. Par exemple, la tranche des points qui définissent le tour de tête sur un scan est représentée à la figure 4.8a.

L'ensemble de ces points définit une courbe (figure 4.8a). La longueur de cette courbe est la mesure considérée. La vue agrandie d'une partie de la tranche est présentée à la figure 4.8b. Les points ne sont pas ordonnés, et il est indispensable de les organiser afin de construire la courbe correspondant à la mesure. De plus, si lors de la construction de cette courbe, on connecte tous les points consécutifs alors on obtient une ligne brisée qui surévalue le tour de tête.

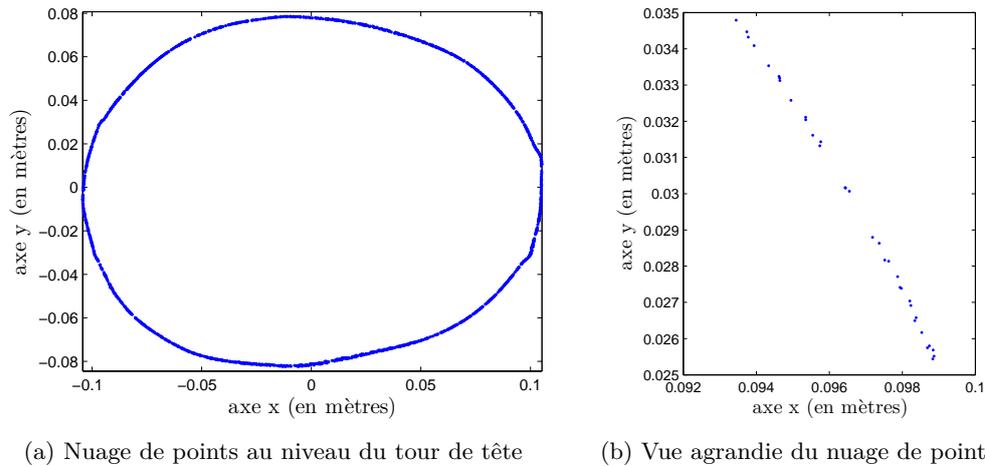


FIGURE 4.8 – Nuage de points de la tranche du tour de tête ou la circonférence est à calculer.

Le nuage de points étant inorganisé, les points voisins ne sont pas directement identifiables. En optimisant l'identification, les coordonnées des points sont transformées en coordonnées polaires. Les coordonnées  $\theta$  peuvent maintenant être classées en ordre croissant. Les points voisins sont donc consécutifs.

Dans le nuage de points il existe quelques régions pour lesquelles les artefacts peuvent influencer l'extraction de la mesure. Par exemple sur le tour de tête, à la région proche de  $y = 0$ , il existe une petite déformation causée par le bonnet de bain porté par les sujets scannés (comme cela va être expliqué à la section 10.2.2). D'autres artefacts peuvent exister à cause de la lumière présente pendant l'acquisition du scan. Afin d'éviter l'extraction erronée de la mesure, un filtre à médiane mobile est appliqué aux coordonnées polaires. Le rayon polaire de chaque point est défini comme la médiane des rayons des points voisins. De plus, pour éviter les régions plus ou moins denses du nuage de points (visibles également sur la figure 4.8b) la distance entre tous les points est uniformisée pour tous les sujets. Pour cette procédure, le nombre total de points est diminué. Cependant, des tests ont montré que le nombre de points n'affecte pas significativement l'extraction de la mesure s'il est supérieur à 100 points.

L'effet du filtre appliqué peut être montré après le passage en coordonnées cartésiennes. Cet étape est indispensable afin de calculer la longueur de la ligne d'intérêt (ligne jaune de la figure 4.9). La longueur de la ligne va être la somme des distances entre les points filtrés. L'effet de filtre est plus visible sur les zones contenant des artefacts. Par exemple sur la figure 4.10, apparaissent le nuage de points initial et le nuage de points filtré dans la région proche de  $y = 0$ .

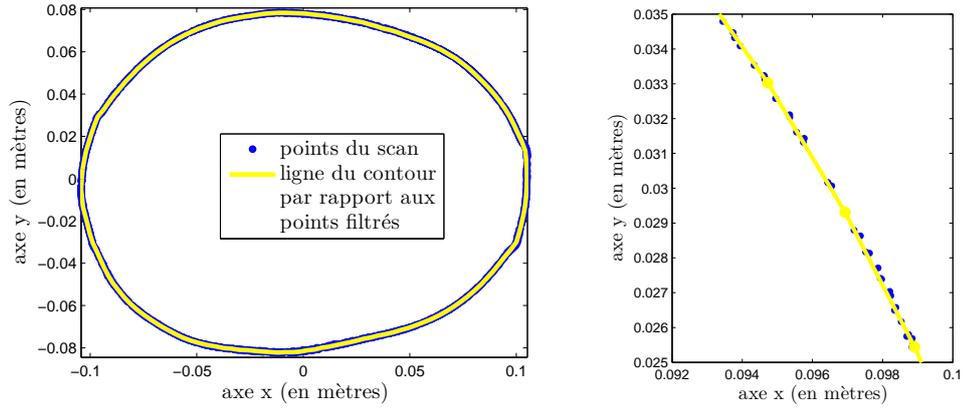
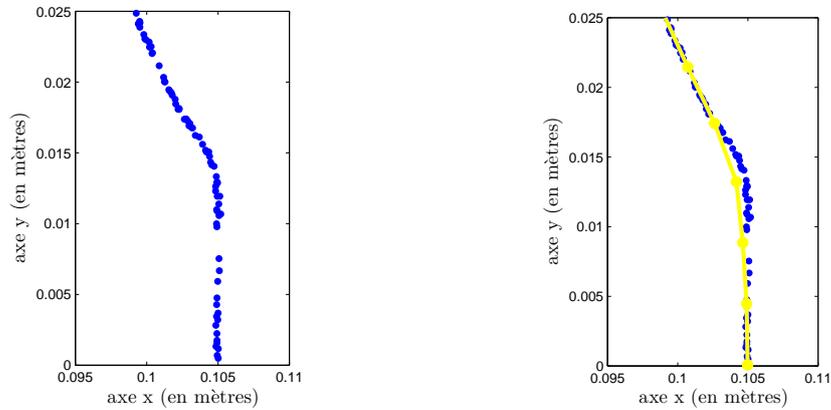


FIGURE 4.9 – Vue globale et vue agrandie du nuage de points et de la ligne finale de tour de tête



(a) Nuage de points initial du tour de tête dans la zone des artefacts.

(b) Nuage de points initial et nuage de points filtré afin de calculer la circonférence.

FIGURE 4.10 – Vue agrandie de la zone d'artefacts du tour de tête.

En connaissant les points consécutifs, il est possible de calculer leurs distances respectives. Si  $\alpha$  et  $\beta$  sont deux points consécutifs, ou dans le cas où  $\alpha$  et  $\beta$  sont deux points anatomiques dont la mesure anthropométrique est à calculer, leur distance est :

$$\Delta_s = \sqrt{(x_\beta - x_\alpha)^2 + (y_\beta - y_\alpha)^2 + (z_\beta - z_\alpha)^2} \quad (4.1)$$

La somme de ces distances est la circonférence calculée.

$$\text{circonférence} = \sum_{i=1}^n |\vec{\alpha\beta}_i|$$

Plus précisément cette valeur est le périmètre du polygone inscrit. Ci-dessous la déviation entre le polygone inscrit et la circonférence est évaluée, en calculant le périmètre du polygone circonscrit. La "vraie" valeur de la longueur de la courbe anthropométrique est située entre le périmètre inscrit et le périmètre circonscrit.

Deux points consécutifs dans le périmètre anthropométrique forment un triangle avec le centre qui est défini pendant le déplacement linéaire. On suppose que ce triangle est une partie d'un polygone régulier à  $n$  cotés. Dans le tableau 4.2 sont calculés les périmètres du polygone inscrit et circonscrit.

Polygone	Inscrit	Circonscrit
Schéma (en vert les points du scan)		
Longueur $\alpha$	$2 \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \sin \frac{\pi}{n}$	$2 \rho_1 \tan \frac{\pi}{n}$
Périmètre $P$	$2 \sum_{i=1}^n \rho_i \sin \frac{\pi}{n}$	$2 \sum_{i=1}^n \rho_i \tan \frac{\pi}{n}$
Comparaison	$\frac{P_{in}}{P_{con}} = \frac{\sin \frac{\pi}{n}}{\tan \frac{\pi}{n}} = \cos \frac{\pi}{n} \stackrel{n > 100}{>} 0.9995$	

TABLE 4.2 – Erreurs sur les calculs des mesures 1D.

Il n'y a aucune des parties du corps humain dont le nombre de points du contour est inférieur à 100. Suivant ce calcul, le tour inscrit et le tour circonscrit diffèrent de moins de 0.0001%. Comme la longueur de la vraie courbe du tour anthropométrique se trouvent entre ces deux, elle ne peut pas différer de plus de 0.0001% du tour calculé.

Le nombre de mesures extraites lors de ce travail ainsi que leurs descriptions sont présentés dans la partie concernant les applications (partie III de ce manuscrit). Pour le pied, les mesures sont décrites à la section 9.2.4, pour la tête à la section 10.2.4 et pour la poitrine à la section 11.2.2.

## 4.5 Synthèse

Les méthodes pour analyser la morphologie individuelle ont été présentées dans ce chapitre. Les différents systèmes de coordonnées ont été présentés afin de représenter le corps humain avec des géométries simples.

En considérant le nuage de points comme un corps rigide, le premier alignement des sujets est effectué. Les points anatomiques ont été ensuite détectés sur un scan du corps entier. A cet effet, deux méthodes ont été utilisées : la détection sur un nuage de points et la détection sur une image binaire.

Une fois que la position d'intérêt des différentes parties du corps est connue, les mesures unidimensionnelles ont été calculées à l'aide de la distance entre les points.

Après avoir présenté la théorie dans ce chapitre, l'application de cette théorie aux différentes parties du corps sera présentée dans la partie III. L'originalité de ces méthodes va être discutée dans la discussion générale de ce manuscrit. L'implémentation des algorithmes et des équations également.



## Chapitre 5

# Morphologie 3D des populations

Les personnes qui appartiennent à une même population ont des caractéristiques communes entre elles. L'objectif de cette section est de rendre possible et efficace la comparaison de ces caractéristiques.

Pour augmenter les possibilités de comparaison, les avantages du passage dans d'autres systèmes de coordonnées que les coordonnées cartésiennes vont être montrés. Ensuite les méthodes pour obtenir des correspondances au sein des populations vont être présentées.

### 5.1 Changement de système de coordonnées

#### 5.1.1 Diminution d'espace de configuration

Pour diminuer le temps de calcul et le volume des données stockées, l'espace de configuration doit être diminué. La *configuration* est l'ensemble de points d'un objet qui décrivent sa morphologie. La *matrice de configuration*  $X$  est la matrice  $p \times m$  de coordonnées cartésiennes de  $p$  points en  $m$  dimensions. L'*espace de configuration* est l'espace de toutes les coordonnées possibles des points [31]. Pour les applications anthropométriques tridimensionnelles  $m = 3$  et l'espace de configuration pour chaque sujet est  $\mathbb{R}^{pm}$ . Pour  $n$  sujets l'espace de configuration devient  $\mathbb{R}^{pnm}$ .

Pour diminuer la taille de cet espace, les variables  $p$ ,  $m$  ou  $n$  devront être réduites. En diminuant le nombre de sujets ( $n$ ) ou les points de chaque scan ( $m$ ) la perte des données est évidente. La variable  $p$  peut être diminuée de manière réversible en passant dans un autre système de coordonnées. Par exemple le passage aux coordonnées sphériques crée un espace de configuration pour tous les sujets de taille  $\mathbb{R}^{mn}$  et deux sous-ensembles fermés de  $\mathbb{R}$ . Plus précisément pour les trois coordonnées :

- $\rho \in \mathbb{R}^{mn}$ ,
- $\theta \in [-\pi, \pi] \subset \mathbb{R}$ ,
- $\phi \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \subset \mathbb{R}$ .

#### 5.1.2 Transformation de coordonnées 3D en images 2D

Avec le passage en coordonnées sphériques ou cylindriques (suivant le tableau 4.1, page 38), toutes les informations morphologiques sont disponibles sur une seule vue bidimensionnelle. Si  $\rho$  est la troisième dimension ( $\rho \in \mathbb{R}^{mn}$ ) :

$$\rho = f(\theta, \phi)$$

et maintenant  $f(\theta, \phi)$  peut être traitée comme une image analogique. La couleur de cette image à chaque paire  $(\theta, \phi)$  possible, correspond à la valeur de  $\rho$  (figure 5.1).

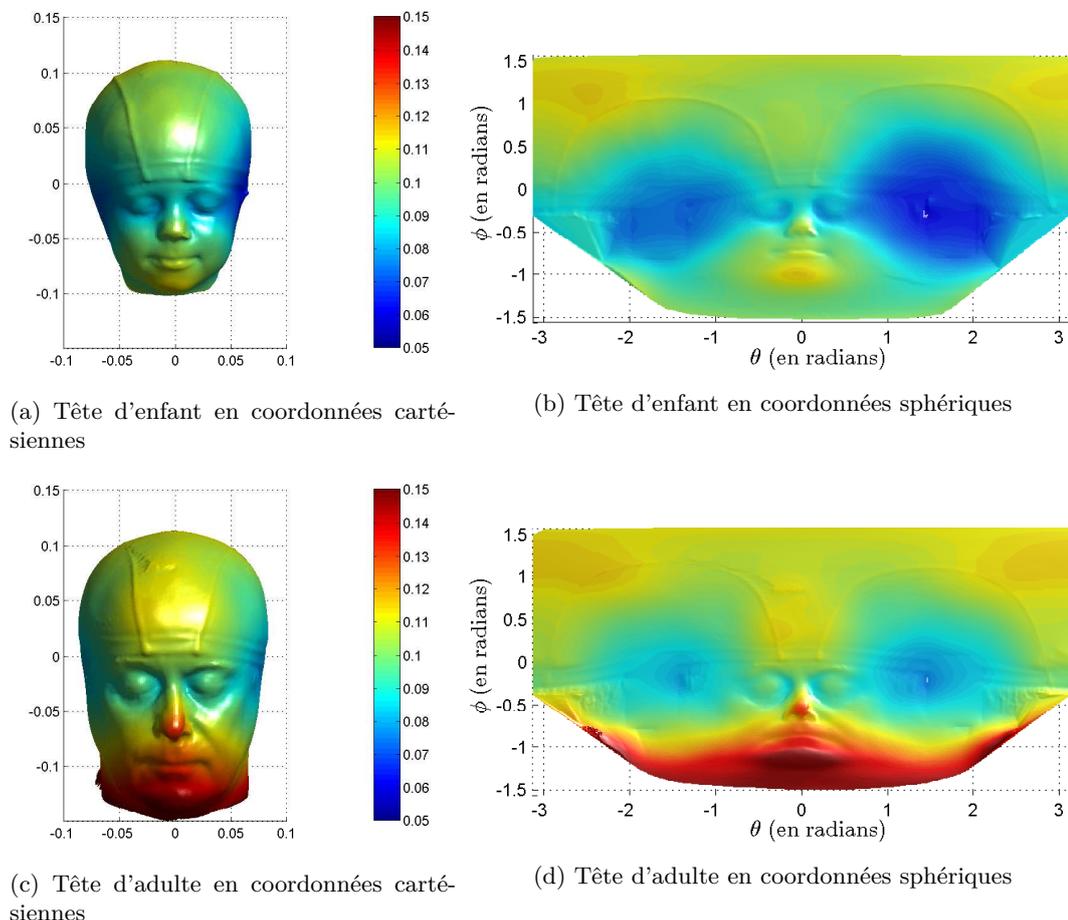


FIGURE 5.1 – Têtes de différentes tailles en coordonnées cartésiennes et sphériques. La couleur représente la valeur du rayon sphérique en mètres.

Afin de passer à un autre système de coordonnées avec les équations du tableau 4.1 (page 38) l'alignement adéquat des sujets devra être réalisé. Pour transformer par exemple la tête en coordonnées sphériques, le centre de la tête choisi devra être à l'intérieur de la sphère. Ce point est expliqué de manière détaillée aux sections 10.2.3 pour la tête et 11.2.3 pour la poitrine.

### 5.1.3 Comparaison et correspondance des sujets

L'effet du passage à un autre système de coordonnées est aussi apparent sur la comparaison et la correspondance entre formes anthropométriques. Deux dimensions sur les trois ( $\theta$  et  $\phi$  en coordonnées sphériques et  $\theta$  et  $z$  en coordonnées cylindriques) ont toujours le même support pour tous les sujets (figure 5.1). Ceci est dû à la définition du passage des coordonnées cartésiennes aux autres systèmes. Indépendamment de la taille de la personne et grâce à la morphologie du

corps humain, quelques régions peuvent avoir les mêmes limites. Par exemple, pour les points du visage sur la tête entière  $\theta \in [-\frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{3}]$ .

## 5.2 Digitalisation de l'image

Comme expliqué à l'aide de la figure 5.1, la taille géométrique de chaque image est connue et identique pour tous les scans. Cependant, le nombre de points ainsi que leur répartition dans l'image sont différents pour chaque sujet.

Pour pouvoir traiter de manière identique l'ensemble de la population et pour créer une correspondance entre leurs images, l'image initiale devra être digitalisée avec une résolution commune pour tous les sujets.

### 5.2.1 Génération d'un maillage commun

Pour une résolution donnée on pose  $d_h$  la définition (nombre de points-pixels) horizontale et  $d_v$  la définition verticale. Les dimensions de l'image créée sont  $d_h \times d_v$  points.

Sur cette image, un point  $k$  en coordonnées sphériques aura pour coordonnées

$$\bar{\theta}_m = -\pi + \frac{2\pi}{d_h} \cdot m \quad , \quad m = 1 \rightarrow d_h \quad (5.1)$$

$$\bar{\phi}_n = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{d_v} \cdot n \quad , \quad n = 1 \rightarrow d_v \quad (5.2)$$

Ce maillage est représenté à la figure 5.2 pour une résolution  $15 \times 10$ .

Chaque point peut avoir une couleur-valeur différente qui correspondra à la couleur sur l'image et dans ce cas au rayon sphérique. La résolution choisie dépend de l'application finale et devra être optimisée par rapport au temps de calcul et au niveau de détail désiré, selon les parties du corps humain considérées.

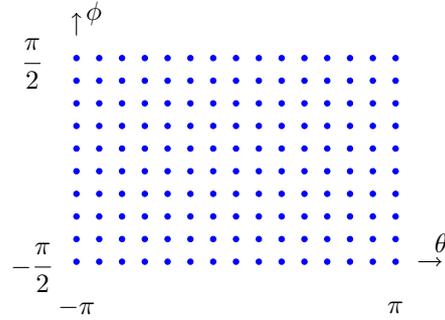


FIGURE 5.2 – Maillage commun pour tous les sujets avec résolution  $15 \times 10$

### 5.2.2 Projection sur un maillage commun

Les coordonnées de chaque point  $p$  d'un scan sont les  $(\theta_p, \phi_p)$ ,  $p \in \mathbb{N}$ . Pour faire correspondre les coordonnées  $(\theta, \phi)$  des points de tous les scans, tous vont être projetés sur les points du maillage commun (figure 5.3b) :

$$\theta_p = \bar{\theta}_m \quad | \quad \arg \min_{m=1 \rightarrow d_h} (|\bar{\theta}_m - \theta_p|)$$

$$\phi_p = \bar{\phi}_n \quad | \quad \arg \min_{n=1 \rightarrow d_v} (|\bar{\phi}_n - \phi_p|)$$

Potentiellement sur certaines paires  $(\bar{\theta}_m, \bar{\phi}_n)$  correspondent plusieurs points  $p$  avec paires  $(\bar{\theta}_p, \bar{\phi}_p)$ . Dans ce cas la valeur  $\rho_{m,n}$  est obtenue par moyennage des valeurs  $\rho_p$  de chaque point  $p$ . En cas d'absence de points sur une paire  $(\bar{\theta}_m, \bar{\phi}_n)$  la valeur  $\rho_p$  est obtenue par interpolation linéaire à partir des paires voisines.

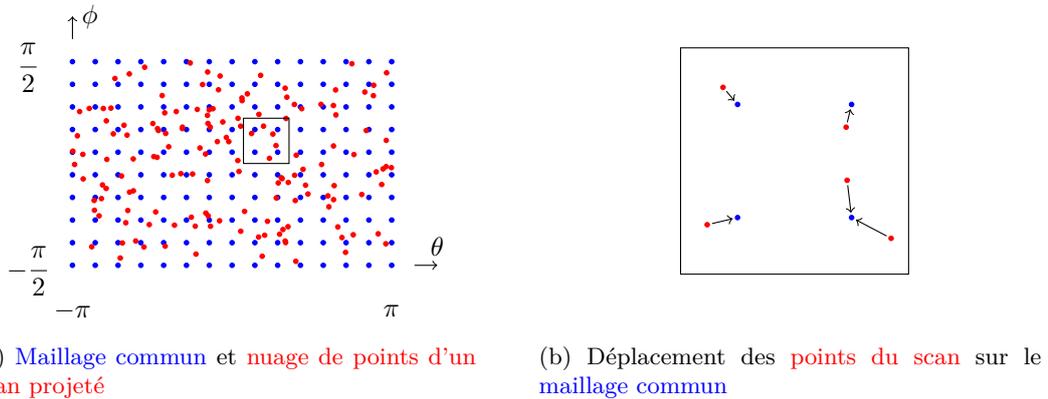


FIGURE 5.3 – Projection de deux ensembles de coordonnées ( $\theta$  et  $\phi$ ) d'un scan sur le maillage commun. La troisième coordonnée se déplace afin de créer une correspondance pour tous les sujets.

Cette procédure peut générer des modifications du nuage de points initial. La première modification est due au déplacement des points initiaux sur les positions du maillage commun. Ensuite, par le fait qu'il y a des régions projetées plus ou moins denses dans le nuage de points, le point final est calculé par moyennage ou interpolation linéaire. Ces imprécisions ont été prises en compte et calculées pour chaque application (sections 10.2.6 et 10.3.6 pour la tête et 11.3.6 pour la poitrine).

## 5.3 Optimisation de la position relative des sujets

### 5.3.1 Motivation

L'alignement influe fortement sur l'analyse des formes anthropométriques [17]. Le premier alignement est un élément indispensable pour générer l'image mais dans plusieurs cas elle peut être améliorée car :

- potentiellement elle est basée sur des points manuellement choisis,
- dans 5% des cas, les algorithmes de la détection automatique des points ne sont pas pertinents,
- pour la plupart des applications anthropométriques c'est une région du corps humain qui est intéressante et non seulement quelques uns de ses points.

Si la région d'intérêt est celle qui est représentée à la figure 5.4, la meilleure position relative entre deux sujets va être celle qui minimise l'écart morphologique à la région d'intérêt. Pour détecter la meilleure position relative il faut calculer le coefficient de corrélation à chaque position possible et extraire celle qui le maximise.

### 5.3.2 Coefficient de corrélation de deux images A et B

Choisissons deux images  $A$  et  $B$  de dimensions identiques  $m \times n$  qui correspondent à une partie de visage de deux sujets (figure 5.5).

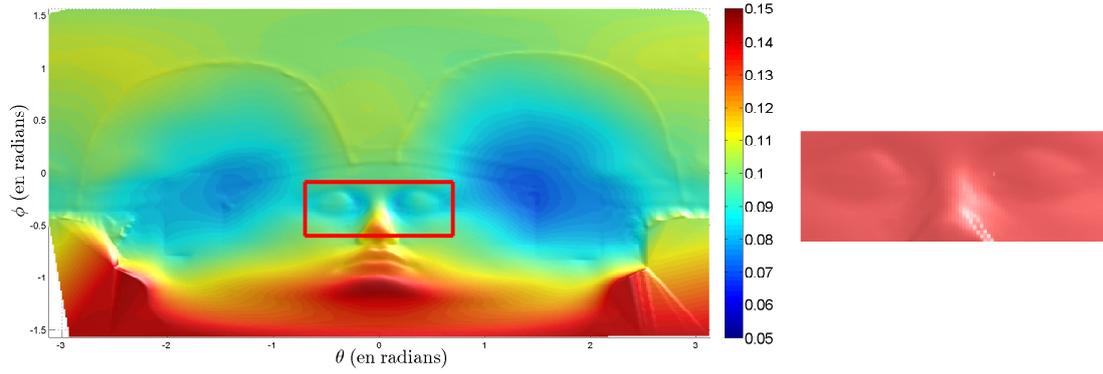


FIGURE 5.4 – Région d'intérêt pour optimiser la position relative des sujets. La couleur du visage représente le rayon sphérique en mètres.

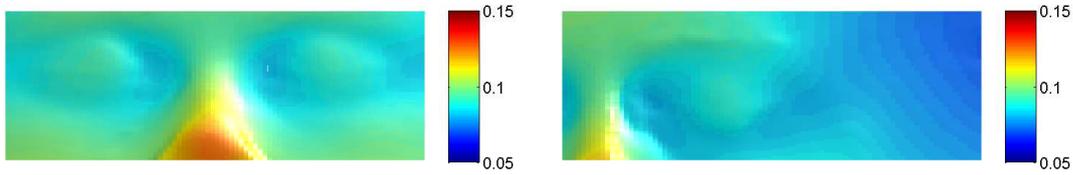


FIGURE 5.5 – Différentes régions des visages. La couleur du visage représente le rayon sphérique en mètres.

Le coefficient de corrélation est donné par :

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (\rho_{m,n}^A - \bar{\rho}^A)(\rho_{m,n}^B - \bar{\rho}^B)}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (\rho_{m,n}^A - \bar{\rho}^A)^2\right) \left(\sum_m \sum_n (\rho_{m,n}^B - \bar{\rho}^B)^2\right)}} \quad (5.3)$$

où

- les dimensions des images  $A$  et  $B$  sont

$$m \times n$$

- le rayon sphérique à la position  $(m, n)$  est

$$\rho_{m,n}$$

- la valeur moyenne des rayons de l'image est

$$\bar{\rho} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_m \sum_n \rho_{m,n}$$

### 5.3.3 Matrice de coefficients de corrélation $r_{s,t}$

On pose  $r_{s,t}$  le coefficient de corrélation qui est calculé à l'aide de l'équation (5.3) pour une position relative de deux images  $(s, t)$ .  $s$  et  $t$  indiquent la différence entre la position initiale et la

position actuelle de la région d'intérêt sur le visage à corrélérer (figure 5.6). Par exemple  $r_{3,-5}$  est le coefficient qui est calculé quand la région d'intérêt est translatée de 3 pixels vers le haut (soit  $3 \cdot \frac{\pi}{d_v}$  suivant l'équation (5.2)) et 5 pixels à gauche (soit  $-5 \cdot \frac{2\pi}{d_h}$  suivant l'équation (5.1)). Pour toutes les différentes positions relatives, le coefficient  $r_{s,t}$  est calculé. La matrice de coefficients est maintenant constituée.  $r_{s,t}$  est l'élément de la ligne  $s$  et de la colonne  $t$ .

### 5.3.4 Meilleure position relative

La position relative à laquelle deux sujets correspondent le plus est la position

$$s, t \quad | \quad \arg \max (r_{s,t}).$$

Une fois que cette position est trouvée les deux sujets peuvent être superposés en translatant le scan de  $s$  pixels dans la direction verticale et de  $t$  pixels dans la direction horizontale. Leur écart dans la région d'intérêt est alors minimisé. La quantification de la minimisation et la déformation qui en résulte au nuage de points sont montrées dans les applications aux sections 10.3.5 et 10.3.6 pour la tête et 11.3.2 pour la poitrine.

## 5.4 Synthèse

Une méthodologie permettant la comparaison des caractéristiques morphologiques des populations a été présentée dans ce chapitre.

Les nuages de points des sujets scannés sont initialement exprimés en coordonnées cartésiennes. Ces coordonnées ont été transformées en coordonnées d'image. Ensuite, toutes les images ont été uniformisées pour avoir la même résolution.

L'image de chacun des sujets a la même taille, ce qui rend les sujets de tailles différentes comparables. Également, le volume des données a été diminué.

En utilisant la corrélation entre deux images, il est devenu possible d'améliorer la position relative des sujets. Cela a créé un degré de correspondance plus élevé que l'alignement basé sur les points anatomiques.

Cette méthodologie présentée va dans les prochains chapitres être appliquée aux différentes parties du corps. Elle va être évaluée pour chaque application dans la partie 3 de ce manuscrit.

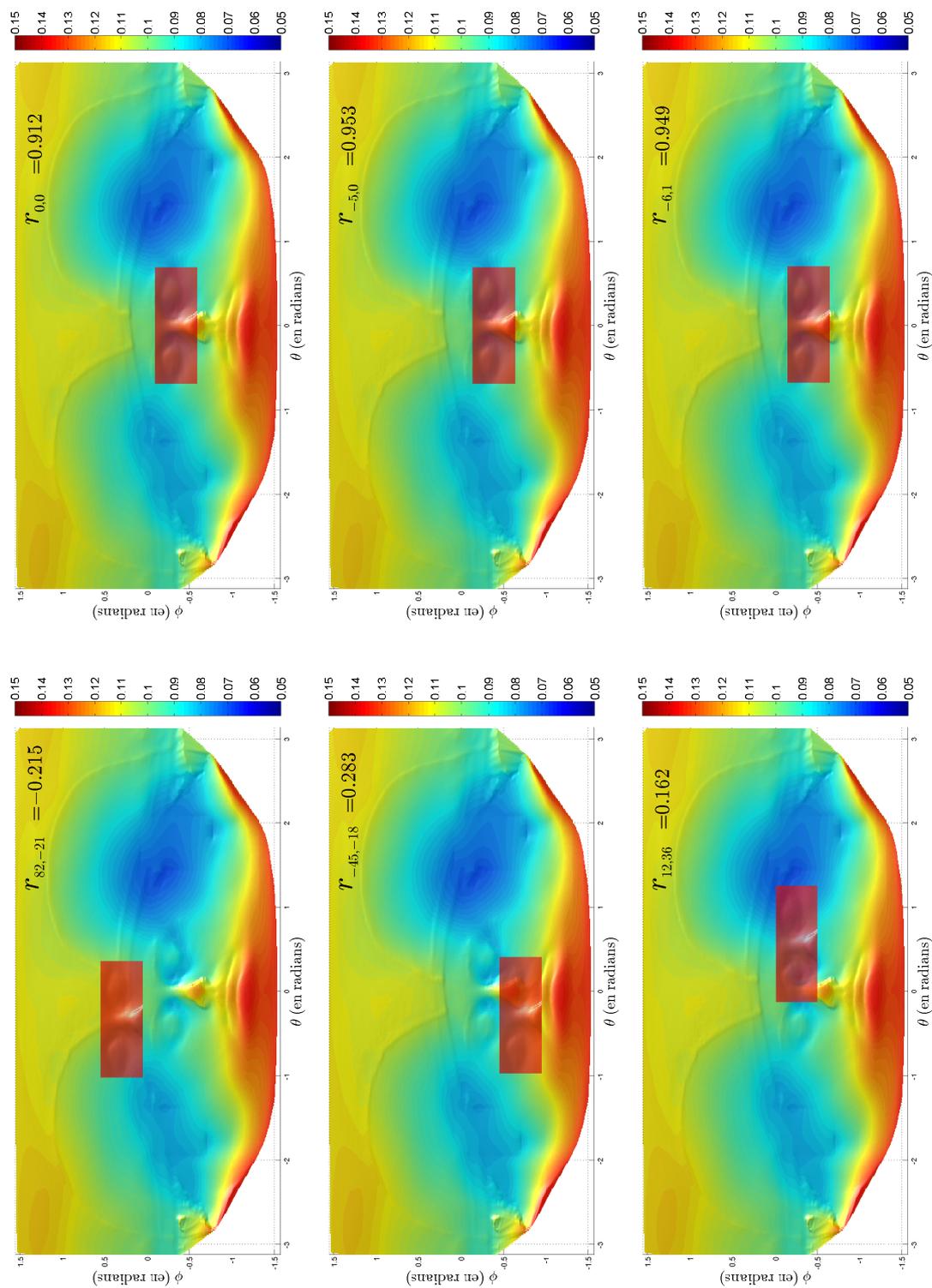


FIGURE 5.6 – Positions relatives de deux visages et coefficient de corrélation  $r$  associé. La couleur du visage représente le rayon sphérique en mètres.



## Chapitre 6

# Analyse statistique de la morphologie 3D

Les sujets étant alignés, des méthodes statistiques peuvent être appliquées. En premier lieu, les statistiques de premier ordre vont être adaptées pour le cas de la morphologie tridimensionnelle. Pour ce faire les spécificités des scanners et des points aberrants vont être examinés. Un algorithme va être présenté pour que ces points n'influent pas sur les résultats des études. Ensuite, les statistiques à plusieurs degrés vont être adaptées. Une méthode va être développée pour s'assurer que toutes les régions du segment corporel ont un poids égal sur l'analyse statistique. En dernière partie, les analyses seront inversées, pour pouvoir calculer des morphologies modèles à partir des résultats statistiques multidimensionnels.

### 6.1 Obtention de la morphologie moyenne

#### 6.1.1 Propriétés statistiques

Pour chaque nœud  $(m, n)$  du maillage commun, la valeur moyenne des éléments  $\rho$  (rayons sphériques, cylindriques etc.) est

$$\mu_{m,n} = \frac{1}{N} \sum_N \rho_{m,n}$$

ou  $N$  est le nombre de scans créant la morphologie moyenne. Respectivement, l'écart-type est

$$\sigma_{m,n} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_N (\rho_{m,n} - \mu_{m,n})^2}$$

La morphologie moyenne ainsi que son écart-type sont maintenant constituées des valeurs  $\mu_{m,n}$  et  $\sigma_{m,n}$  à chaque nœud  $(m, n)$ .

#### 6.1.2 Élimination des points aberrants

La technologie actuelle des scanners peut parfois générer des points correspondant à du bruit et des aberrations dues souvent aux reflets des lumières structurées utilisées. Pour éviter la détérioration de la valeur moyenne due à des points aberrants, une procédure itérative est appliquée (diagramme de la figure 6.1 et figure 6.2). Plus précisément, quand la différence de

la valeur  $\rho$  d'un scan avec la valeur moyenne dépasse une limite déterminée, cette valeur est supprimée. Pour des applications anthropométriques on peut considérer qu'une mesure n'est pas aberrante quand elle est incluse dans les limites issues de la norme [56] :

$$[\mu_{m,n} \pm 3 \cdot \sigma_{m,n}]$$

Pareillement, si plus de 5% des points d'un scan sont détectés comme aberrants, le scan entier est supprimé. De nouvelles valeurs de  $\mu_{m,n}$  et  $\sigma_{m,n}$  sont calculées à partir des valeurs restantes et cette procédure se répète. Les  $\mu$  et  $\sigma$  finaux sont choisis quand il n'y a plus de points aberrants détectés.

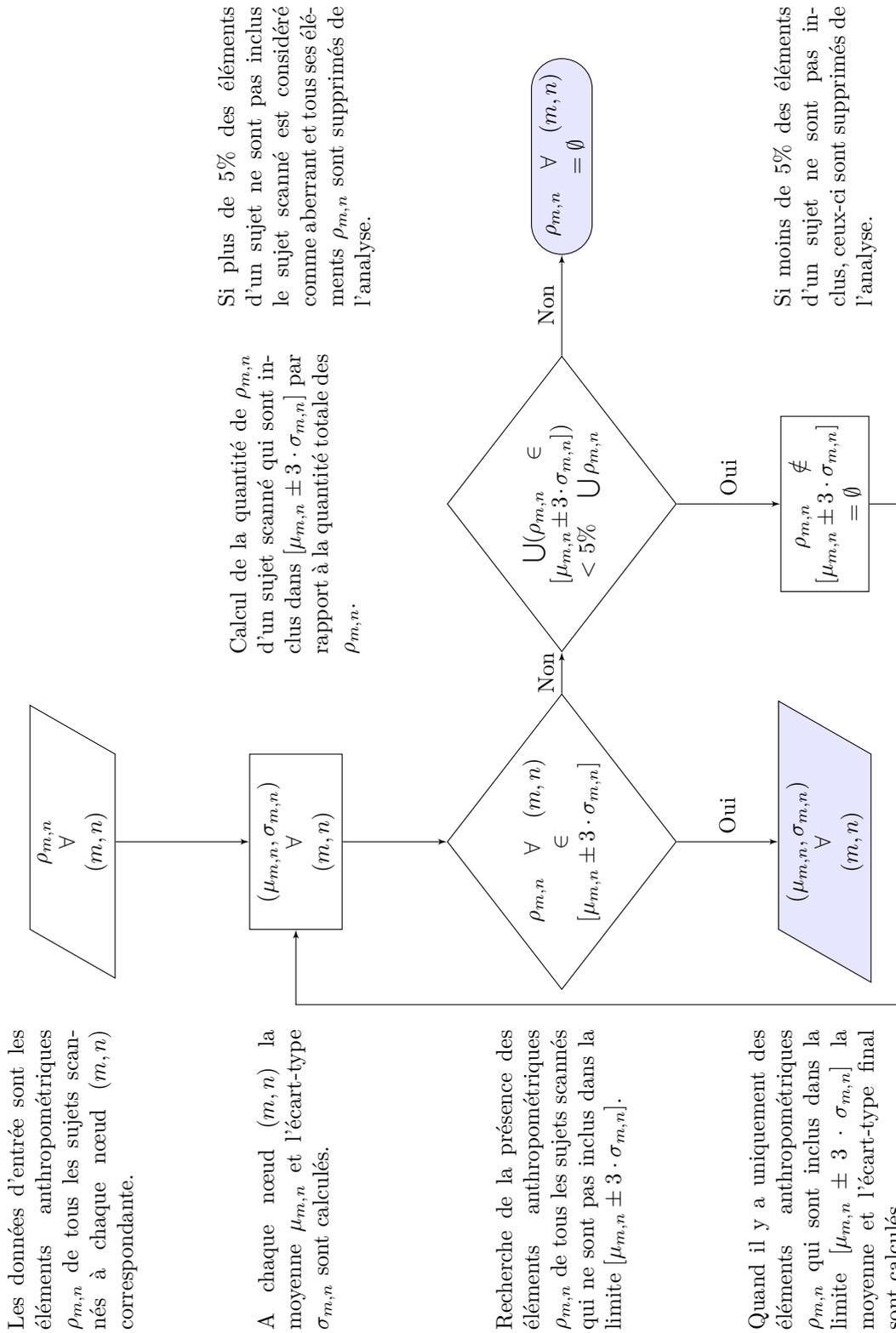


FIGURE 6.1 – Procédure d'obtention de la morphologie moyenne.

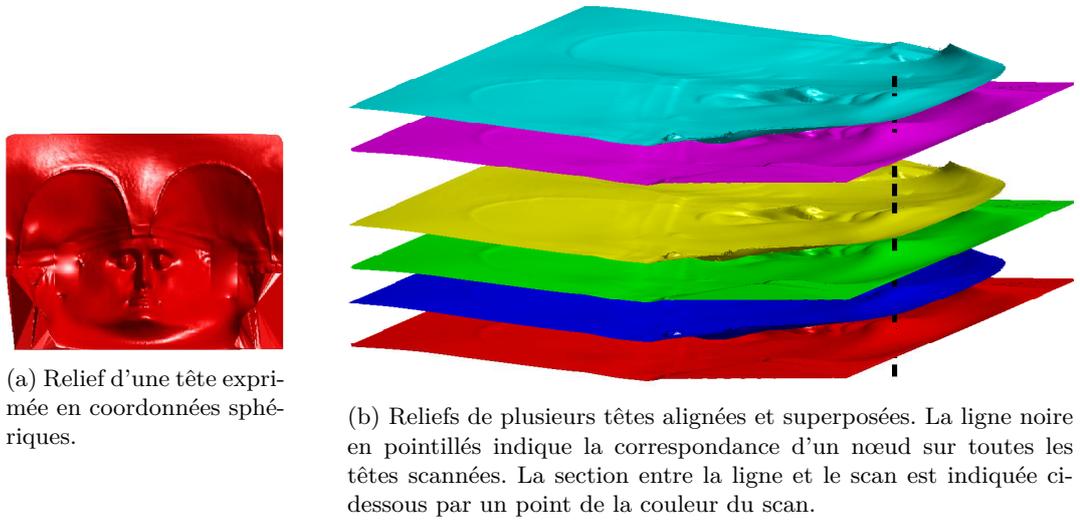


FIGURE 6.2 – Élimination des points aberrants pour l'obtention de la morphologie moyenne.

## 6.2 Analyse statistique à plusieurs degrés

### 6.2.1 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode de réduction de dimensions pour l'exploration statistique de données quantitatives multidimensionnelles. Les données sont interprétées de manière à maximiser leur explication en minimisant leurs dimensions. En d'autres termes les axes de données sont transformés linéairement pour obtenir un maximum d'inertie [32]. La méthode est largement utilisée dans la littérature : plus de 10000 articles scientifiques incluent le terme "principal component analysis" dans leur titre. L'ACP a été utilisée pour la première fois par Pearson en 1901 [80].

Si  $P$  est le nombre de données  $\alpha$  à étudier pour chaque sujet et  $N$  le nombre des sujets, la matrice  $M$  qui rassemble les informations est :

$$M = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \cdots & \alpha_{1,P} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{N,1} & \cdots & \alpha_{N,P} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Pour l'interprétation statistique cette matrice va être centrée et potentiellement réduite. La matrice centrée est :

$$\overline{M}_{centrée} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} - \overline{\alpha_1} & \cdots & \alpha_{1,P} - \overline{\alpha_P} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{N,1} - \overline{\alpha_1} & \cdots & \alpha_{N,P} - \overline{\alpha_P} \end{bmatrix}$$

ou  $\overline{\alpha_1}$  est la valeur moyenne du premier élément. La matrice centrée et réduite est :

$$\overline{M}_{centrée,réduite} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_{1,1} - \overline{\alpha_1}}{\sigma(\alpha_1)} & \cdots & \frac{\alpha_{1,P} - \overline{\alpha_P}}{\sigma(\alpha_P)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\alpha_{N,1} - \overline{\alpha_1}}{\sigma(\alpha_1)} & \cdots & \frac{\alpha_{N,P} - \overline{\alpha_P}}{\sigma(\alpha_P)} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

ou  $\sigma(\alpha_1)$  est l'écart-type du premier élément. Par la suite, les éléments  $\alpha$  correspondent à chaque mesure 1D si on étudie la morphologie uniquement avec des mesures 1D, ou à chaque point 3D de la morphologie si on étudie l'anthropométrie en trois dimensions. Dans ce cas, les  $\alpha$  sont les éléments  $\rho_{m,n}$  présentés dans la section 6.1 et  $P = m \times n$ .

Pour les applications de cette thèse les analyses vont être faites en utilisant la matrice centrée et réduite 6.2. Ce choix a été fait car tous les éléments ont la même nature (éléments anthropométriques) et les mêmes unités de mesure. En utilisant la matrice centrée, une variable dont l'écart-type est important aura plus de poids qu'une variable dont l'écart-type est faible. Cela pourrait créer des composantes principales fortement influencées par les régions d'artefacts des scans.

La matrice des coefficients de corrélation entre toutes les données peut maintenant être calculée :

$$R_{i,j} = \overline{M}^T \times \overline{M} \quad (6.3)$$

### Vecteurs et valeurs propres

En diagonalisant la matrice  $R_{i,j}$  on obtient la matrice des vecteurs propres  $V$  et des valeurs propres  $D$ . La quantité des valeurs propres indique l'explication relative d'inertie du nuage de points.

### Coordonnées des individus

Les coordonnées des individus sur les repères obtenus sont ensuite calculées :

$$C_{N,v} = \overline{M} \times V \quad (6.4)$$

ou  $V$  est la matrice des vecteurs propres. Les coordonnées des individus indiquent la position de chaque individu sur les axes des facteurs principaux. Autrement dit, chaque individu affecte chaque facteur d'une quantité définie par les valeurs relatives des coordonnées de l'ensemble des individus.

### Coordonnées des variables

Les coordonnées des variables indiquent la corrélation de chaque variable avec chaque facteur. Elles sont calculées comme suit :

$$F_{P,v} = R_{i,j} \times V \times \sqrt{D} \quad (6.5)$$

ou  $R_{i,j}$  est la matrice de corrélations,  $V$  la matrice des vecteurs propres et  $D$  la matrice des valeurs propres.

## 6.2.2 Choix des éléments à analyser - points dé-corrélés

Comme il a été vu dans les sections précédentes, l'analyse statistique des éléments anthropométriques peut être appliquée aux points des sujets scannés. Pour avoir des correspondances entre les scans, les points tridimensionnels ont été transformés en image et ont été projetés sur un maillage commun (sections 5.1 et 5.2 aux pages 49 et 51). Pour l'image ainsi créée, les pixels (nœuds du maillage commun) sont équidistants ainsi que les points correspondants (obtenues par les équations 5.1 et 5.2).

En revenant au repère cartésien, il pourra y avoir des régions dans lesquelles un ensemble de points correspond à une seule région. Par exemple en appliquant un maillage sphérique pour la tête on se retrouve au sommet de la tête avec une densité de points forcément plus élevée (figure 6.3a). A cause de la complexité morphologique aucun système de coordonnées discrètes ne pourra avoir des points distribués de manière homogène. Par exemple, sur la région du visage il y aura plus de points sur la partie plate pour la même surface que sur le nez qui est fortement courbé (figure 6.3b).

Pour éviter de biaiser les résultats des analyses statistiques sur les points (le sommet de la tête aurait un poids important par rapport aux autres régions) un tri peut être effectué. Ce choix est basé sur la corrélation des points. Plus précisément, si

- $R_{i,j}$  est la matrice des coefficients de corrélation entre tous les points  $(i, j)$  calculé en utilisant l'équation 6.3,
- $f$  un seuil défini pour les coefficients de corrélation (avec  $0 < f < 1$ ),
- $S$  l'ensemble des points qui vont être retenir pour l'analyse,

les points qui sont moins corrélés entre eux et qui rentreront dans l'analyse statistique, sont calculés par une procédure itérative (donnée également au diagramme de la figure 6.4).

En détectant dans la matrice des coefficients de corrélation la valeur la moins élevée, les deux points qui sont le moins corrélés sont détectés. Si le coefficient est moins élevé que le seuil  $f$ , ces deux points sont retenus pour l'analyse car ils présentent des différences qui ne sont pas prédictives en étudiant uniquement un des deux points. Autrement dit, si le coefficient de corrélation n'est pas élevé, l'équation-modèle qui va définir la valeur du deuxième point à partir du premier implique une valeur importante des résidus. De ce fait, la possibilité que la prédiction

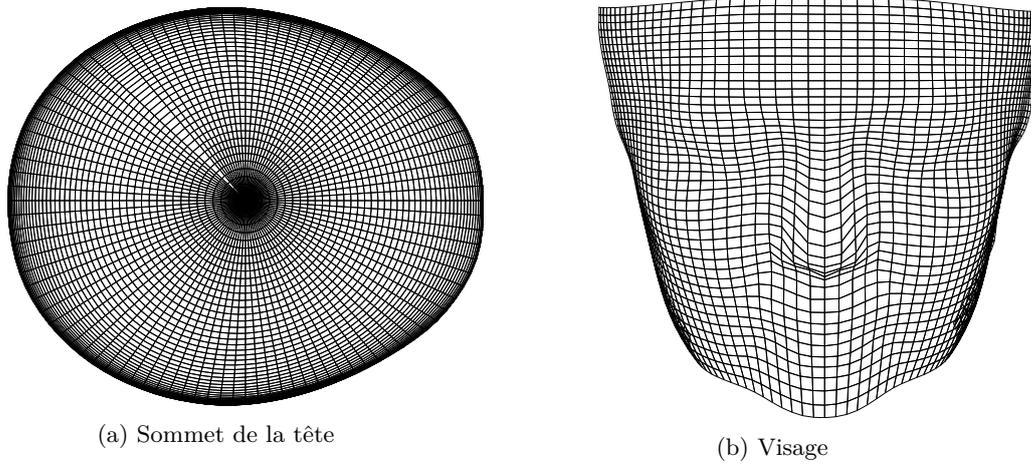


FIGURE 6.3 – Maillage sphérique au sommet et sur le visage d'une tête.

ne soit pas correcte, est élevée. Ces deux points étant retenus pour l'analyse, tous les autres qui sont corrélés avec ces deux ne vont pas être retenus. La procédure se répète jusqu'à ce que le minimum de coefficient de corrélation détecté  $R$  soit plus grand que le seuil  $f$ . Pour la définition du seuil  $f$  différents éléments devront être pris en compte. Ces éléments sont discutés dans la partie III (section 10.2.8, figures 10.11 et 10.12).

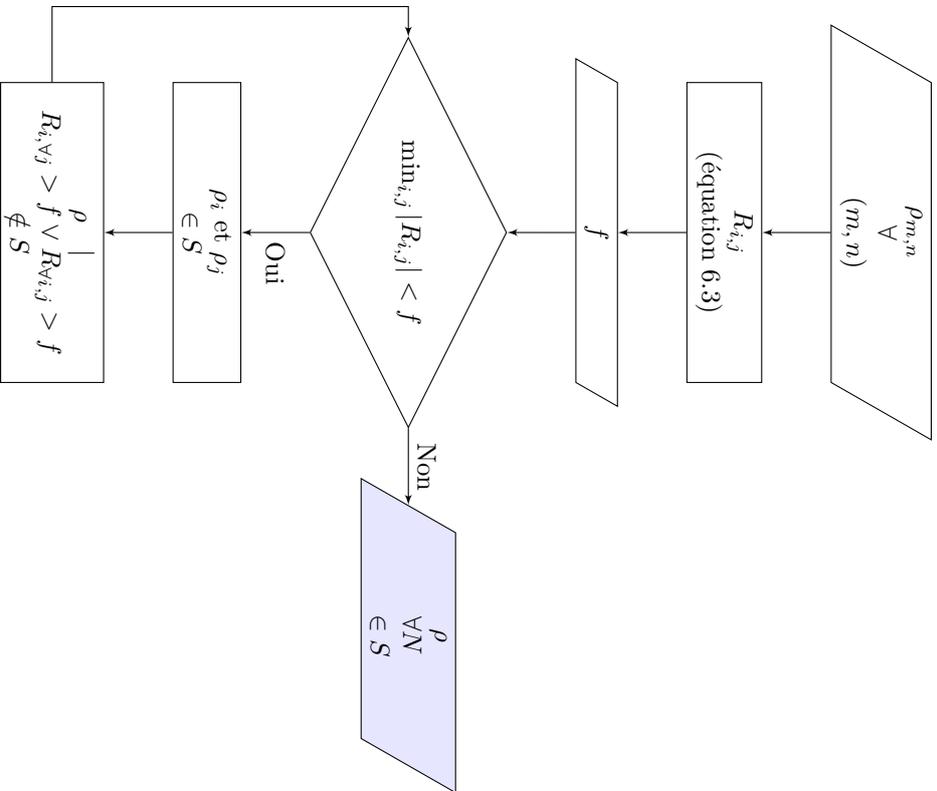


FIGURE 6.4 – Procédure d'obtention des points dé-corrélés.

Les données d'entrée sont les éléments anthropométriques  $\rho_{m,n}$  de tous les sujets scannés à chaque nœud  $(m, n)$  correspondant.

Pour l'ensemble des données la matrice des coefficients de corrélation est calculée par l'équation 6.3.

Définition du seuil  $f$  des coefficients de corrélation. Les éléments qui sont prises en compte sont expliqués dans la partie des applications (section 10.2.8, figures 10.11 et 10.12).

Détection de la valeur *minimum* des coefficients de corrélation et comparaison avec le seuil  $f$ .

Si la valeur *minimum* de coefficient de corrélation est plus élevée que le seuil  $f$  tous les éléments retenus pour l'analyse sont déjà détectés.

Si la valeur *minimum* est moins élevée que le seuil  $f$  les deux éléments anthropométriques qui définissent le coefficient de corrélation *minimum* sont retenus pour l'analyse.

Tous les éléments qui sont corrélés avec ces deux ne sont pas retenus pour l'analyse.

### 6.2.3 Prédiction des morphologies à partir des résultats statistiques

#### Introduction

L'analyse factorielle projette les données morphologiques dans un système de coordonnées optimisé. Pour prédire des morphologies optimisées, les résultats de cette analyse vont s'inverser. Pour calculer alors une morphologie à partir des coordonnées des individus, il faut passer des repères de l'analyse en composantes principales aux repères des éléments anthropométriques. Si  $\mathbf{C}_x$  sont les coordonnées statistiques d'un individu  $x$ , ses coordonnées morphologiques sont calculées en inversant l'équation 6.4 :

$$\overline{\mathbf{M}}_x = [\tilde{\alpha}_1 \quad \tilde{\alpha}_2 \quad \cdots \quad \tilde{\alpha}_P] = \mathbf{C}_x \times V^{-1} \quad (6.6)$$

avec

- $V$  les vecteurs propres,
- $\overline{\mathbf{M}}_x$  les coordonnées centrées et réduites de la morphologie pour chaque élément anthropométrique - point  $\alpha$  (de la matrice 6.2).

Les coordonnées utilisables de la morphologie modèle sont obtenues en décentrant et réduisant  $\overline{\mathbf{M}}_x$  :

$$\mathbf{M}_x = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_P] = \overline{\mathbf{M}}_x \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\mu} \quad (6.7)$$

avec

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \cdots \quad \sigma_P]$$

et

$$\boldsymbol{\mu} = [\mu_1 \quad \mu_2 \quad \cdots \quad \mu_P]$$

l'écart-type et la moyenne respectivement de l'élément anthropométrique  $\alpha$  (de la matrice  $M$  de l'équation 6.1).

#### Définition des coordonnées statistiques $\mathbf{C}_x$ d'un individu $x$

Les coordonnées des individus existants sont calculées à l'aide de l'équation 6.4 pour tous les facteurs de l'analyse factorielle (exemple sur la figure 6.5a). Leur distribution sur chaque facteur peut être affichée (figure 6.5b) et la normalité peut être vérifiée. Pour créer une morphologie type il faut définir les coordonnées théoriques de l'individu.

Pour la première définition de l'individu théorique, les individus existants peuvent être séparés selon leurs coordonnées sur les axes factoriels. Cette séparation peut être considérée comme une séparation en tailles factorielles et elle va être expliquée de manière détaillée au chapitre 7. En prenant en compte le fait que cette séparation ne se réalisera que sur les premiers axes, les variabilités sur les autres axes sont éliminées. De ce fait, les coordonnées des individus sur les facteurs étudiés changent, mais, les coordonnées sur les autres axes restent identiques (égales à zéro). La matrice des vecteurs propres est la même pour toutes les séparations et par conséquent la morphologie finale dépend aussi des zéros sur les axes restants.

En général, si  $\lambda$  est le nombre de facteurs à partir desquelles la base de données va être séparée et  $j$  le nombre total des facteurs, les coordonnées de l'individu théorique pour chaque taille sont :

$$\mathbf{C}_{x,th} = [1 \times j] = [c_1 \quad c_2 \quad \cdots \quad c_\lambda \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \quad (6.8)$$

Cette équation va être utilisée dans la partie III afin de séparer la poitrine en tailles factorielles (section 11.3.5) comme elles vont être définies dans la section 7.1.

En essayant maintenant de créer des individus virtuels à partir des données des individus existantes, les coordonnées des individus vont être définies de manière différente. Notre motivation

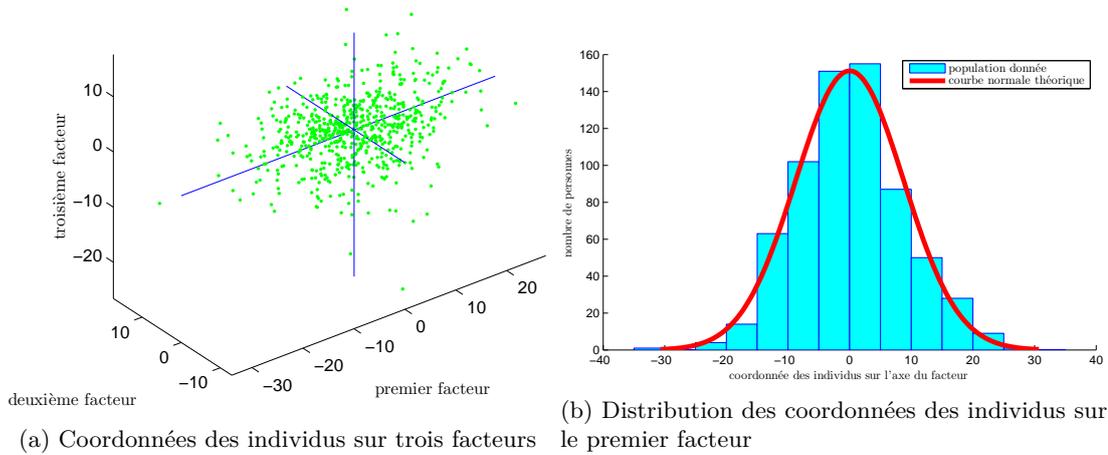


FIGURE 6.5 – Coordonnées des individus suite à l’analyse en composantes principales sur les scans de têtes féminines.

en appliquant cette méthode est d’obtenir le nombre optimal de facteurs à étudier et le nombre requis des sujets scannés. Cette procédure permettra d’analyser la sensibilité des tailles et des modèles créés en appliquant la méthode de Monte-Carlo. Cette méthode a déjà été utilisée avec des résultats sur la sensibilité des modèles [74, 24].

En calculant les coordonnées des individus existantes (équation 6.4) et en vérifiant la normalité à chaque facteur (figure 6.5b), leurs moyennes et écart-types peuvent être utilisés. Pour créer des individus virtuels, un jeu de données aléatoires est généré en prenant en compte ces données. Si  $r$  est une valeur aléatoire et

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_j \end{bmatrix}$$

la matrice des valeurs aléatoires pour les  $j$  facteurs de l’analyse factorielle, les coordonnées simulées d’un individu virtuel sont

$$\mathbf{C}_{x,\text{sim}} = R \times \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\mu}$$

avec

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \cdots \quad \sigma_j]$$

et

$$\boldsymbol{\mu} = [\mu_1 \quad \mu_2 \quad \cdots \quad \mu_j]$$

l’écart-type et la moyenne respectivement des coordonnées des individus existantes pour chaque facteur  $j$ .

La morphologie finale peut être créée en appliquant des valeurs aléatoires sur tout ou partie des facteurs choisis. Si  $\lambda$  est le nombre de facteurs à considérer et  $j$  le nombre total des facteurs,

la matrice  $R$  devient :

$$R = [j \times j] = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r_2 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_\lambda & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

La morphologie d'un individu virtuel est alors calculée en considérant un nombre de facteurs défini. La prochaine étape est le calcul du nombre optimal de facteurs à considérer.

Plusieurs individus virtuels vont être calculés par la définition de plusieurs matrices  $R$ . Une application de cette étape pourrait être la définition du nombre de personnes requis pour calculer une forme moyenne anthropométrique représentative, une question qui se pose souvent dans la littérature. Celui-ci est utilisable également lors de l'organisation de campagnes de mensuration afin de définir leur durée par rapport au nombre de personnes total requis.

Chaque individu virtuel est créé à partir d'une matrice associée  $R$  (matrice 6.9). Cette matrice dépend également du nombre de facteurs  $\lambda$  à considérer. Ensuite, la morphologie moyenne est calculée à partir d'un nombre différent d'individus virtuels.

### Différences liées aux nombres de facteurs et de morphologies virtuelles

Supposons la matrice  $\Xi_{\kappa,\lambda}$  de  $\kappa$  lignes et  $\lambda$  colonnes. Dans chacune des positions  $(\kappa, \lambda)$  on retrouve une morphologie moyenne. Les lignes correspondent au nombre d'individus virtuels qui ont contribué à la morphologie moyenne. Les colonnes correspondent au nombre de facteurs dont les coordonnées des individus sont aléatoires. Afin d'étudier la morphologie moyenne de chaque  $\kappa$  et  $\lambda$  elle va être comparée avec la morphologie moyenne d'un nombre important de personnes et d'un nombre important de facteurs. Cette morphologie est appelée pour le reste du document "morphologie de base".

Définissons alors la "morphologie de base"  $m^b$ . La différence entre  $m^b$  et les autres composantes de la matrice  $\Xi$  peut être calculée à chaque élément anthropométrique  $\alpha$  de la morphologie et va être quantifiée par :

$$\Delta_{\kappa,\lambda} = \sqrt{\sum_{\alpha} (\Xi_{\kappa,\lambda,\alpha} - m_{\alpha}^b)^2} \quad (6.10)$$

A chaque ligne  $\kappa$  et colonne  $\lambda$ , cette différence est calculée. Afin d'étudier le nombre de facteurs à étudier et le nombre d'individus à simuler, le jeu de données test est constitué des têtes tridimensionnelles féminines (issues des bases de données qui vont être présentées à la section 10.2.2). Les résultats de l'ACP tridimensionnelle (qui vont être présentés à la section 10.3.2), sont utilisés afin de simuler les individus virtuels.

Pour une première approche 1 à 1000 individus ont été simulés. Plus précisément, la morphologie moyenne de chaque ligne  $\kappa$  est issue de  $\kappa$  individus. Concernant le nombre de facteurs  $\lambda$  et en se basant sur les résultats de l'ACP, il était possible d'étudier moins de 10 facteurs. Cependant pour cet essai 45 facteurs ont été étudiés. Si la morphologie de base est définie comme celle qui est issue de 1000 individus et 45 facteurs, sa différence avec les autres morphologies moyennes est montré dans la figure 6.6.

Les différences pour 100 individus simulés sont moins élevées que les différences pour moins d'individus. Cependant ceci est uniquement une comparaison. Afin d'avoir une réponse absolue

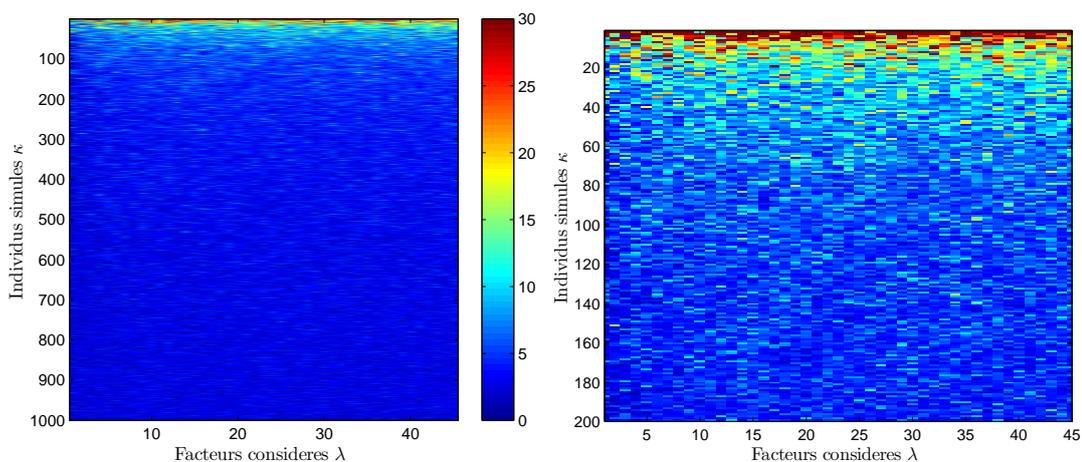


FIGURE 6.6 – Différence entre la morphologie moyenne issues de 1000 individus et de 45 facteurs considérés et les morphologies moyennes issues de  $\kappa$  individus et  $\lambda$  facteurs considérés. L'image est agrandi sur la droite pour les 200 premières lignes  $\kappa$ . La différence est présentée en  $mm$  et calculée suivant l'équation 6.10.

sur le nombre d'individus requis pour avoir une forme représentative, il faut prendre en compte les valeurs de la différence. Par exemple, de 100 à 200 individus la différence sur la forme moyenne atteint des valeurs de  $10mm$ . Cette différence correspond à 172 points tridimensionnels et donc en moyenne à chaque point il y a moins de  $0.1mm$  de différence. L'adaptation des produits au corps est beaucoup plus élevée que cette valeur. Concernant le nombre de facteurs à étudier il n'y a pas de résultat suivant cette méthode qui puisse évaluer cet effet.

Ces résultats sont obtenus à partir d'un jeu de données de têtes féminines et dépendront des morphologies des différents parties du corps ainsi que des différents populations. Cependant pour cette thèse l'analyse est effectuée uniquement pour ces données. Selon les résultats, pour les applications de cette thèse le nombre de facteurs à étudier est défini par les résultats de l'ACP. Concernant le nombre de sujets afin de calculer des formes représentatives, la limite est mise à 30 individus par forme ce qui correspond en moyenne à  $15mm$  de différence totale avec la morphologie de base.

### 6.3 Autres méthodes statistiques pour l'analyse et la comparaison des résultats

Dans cette section, la description de différents tests statistiques utilisés dans les analyses est faite.

#### 6.3.1 Coefficient de variation

Le coefficient de variation est le rapport de l'écart-type à la moyenne. Plus la valeur du coefficient de variation est élevée, plus la dispersion autour de la moyenne est grande. Il est généralement exprimé en pourcentage.

### 6.3.2 T - test

Le "t de Student" est un test de différence des moyennes utilisé lorsque l'on cherche à comparer deux jeux de données entre eux. Plus précisément, il permet de mesurer la significativité statistique des différences entre deux moyennes. Le t-test analyse la distribution de Student et les degrés de liberté pour déterminer la valeur de p (probabilité). Le p peut être utilisé pour déterminer si les deux populations sont significativement différentes.

## 6.4 Synthèse

Les méthodes statistiques ont été adaptées afin de servir les particularités d'un nuage de points et de la morphologie tridimensionnelle.

Premièrement, la forme moyenne d'un ensemble de sujets a été calculée. Pour éviter sa déformation, les points aberrants ont été éliminés.

Ensuite, différentes analyses statistiques multidimensionnelles ont été étudiées. En se basant sur leurs résultats, le développement des morphologies représentatives des populations a été analysé. Cette morphologie peut correspondre à un individu théorique qui possède des coordonnées statistiques choisies. Elle peut correspondre également à un individu simulé à partir des sujets existants et à leurs propriétés statistiques.



# Chapitre 7

## Systèmes de tailles

Dans les chapitres précédents, la création des morphologies modèles et l'analyse statistique a été présentée. Afin de calculer les morphologies modèles à partir d'une population cible, il faut définir initialement la population cible. Si celle-ci est un sous-ensemble d'une population globale, elle sera extraite par sa séparation pertinente. Il convient ensuite de calculer le taux de couverture des tailles conçues et de communiquer la séparation des tailles à la population cible.

### 7.1 Séparation des populations

La séparation et la définition des tailles dépendent de chaque produit et de la différence morphologique pour un segment corporel donné. La maximisation du taux de couverture par rapport au nombre de tailles est souhaitable. Plusieurs critères de séparation peuvent être appliqués. Les mesures unidimensionnelles, les données tridimensionnelles ou encore des coordonnées factorielles sont quelques-uns de ces critères. En addition à ces critères, la séparation peut aussi dépendre de la région géographique, du sexe et de l'âge. Par exemple une base de données mondiale peut être séparée par :

- région géographique : différents produits pour les Chinois, Européens, Africains etc.,
- sexe : séparations des femmes et des hommes,
- âge : une offre différente pour les enfants et les adultes,
- une mesure : des tailles par rapport au poids des personnes par exemple,
- deux mesures : des tailles par rapport au poids et la taille des personnes par exemple,
- la morphologie 3D ou les résultats de l'analyse factorielle,
- la combinaison de ces critères.

Les cinq premiers critères sont faciles à appliquer en projetant la base de données sur une ou deux dimensions. Pour la séparation par rapport à la morphologie 3D ou l'analyse factorielle la séparation doit être interprétée différemment.

Il est évident que la séparation d'une base de données ne peut pas être faite par rapport à un seul point de la morphologie 3D. En considérant qu'il y existe une centaine de points choisis suivant la méthodologie de la section 6.2.2<sup>1</sup>, la séparation par rapport aux points n'est pas appropriée pour créer un nombre limité de tailles. Cependant la morphologie tridimensionnelle peut être utilisée après l'application d'une analyse statistique à plusieurs degrés.

L'analyse statistique factorielle peut être appliquée aux points de la morphologie tridimensionnelle et aussi à plusieurs mesures unidimensionnelles. Selon les résultats et l'explication de

---

1. Dans la partie des applications ces points sont choisis à la section 10.2.8 et au tableau 10.5.

chaque facteur la base de données pourra être séparée en différents nombres d'axes factoriels. Il est possible de voir sur les figures 7.1, 7.2 et 7.3 trois séparations différentes selon différents nombres d'axes.

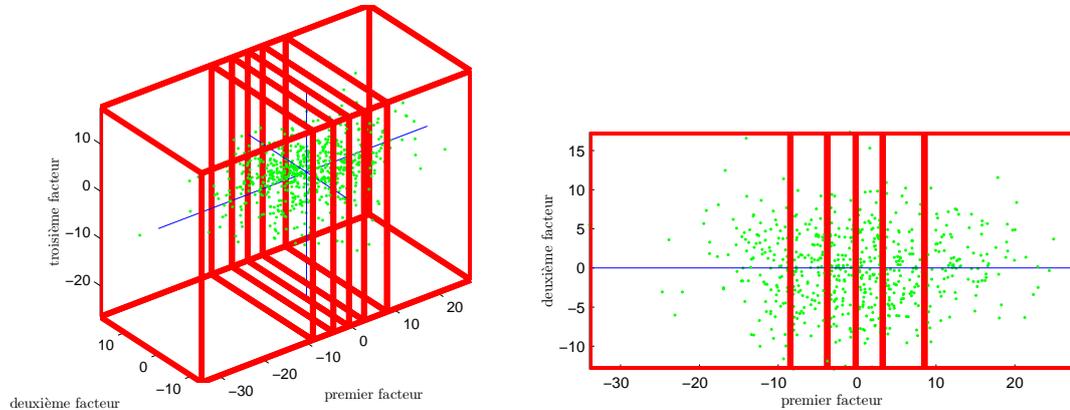


FIGURE 7.1 – Séparation en tailles factorielles sur un facteur (exemple avec 6 tailles créées).

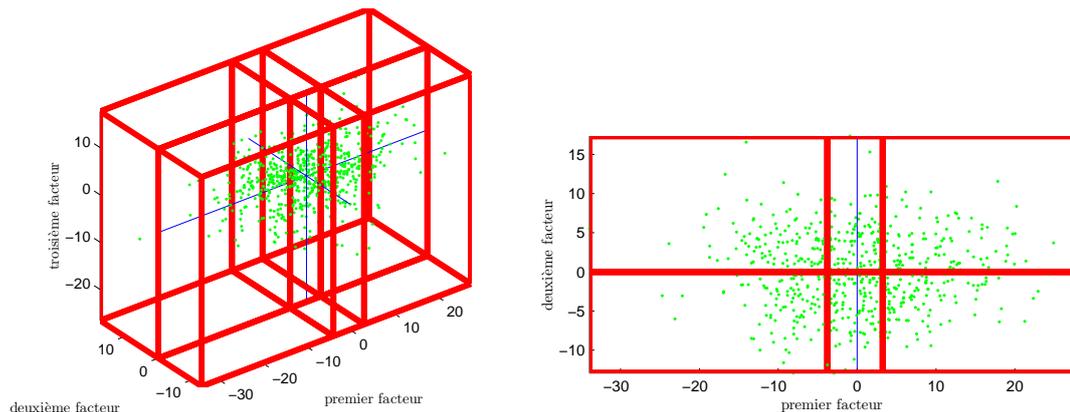


FIGURE 7.2 – Séparation en tailles factorielles sur deux facteurs (exemple avec 6 tailles créées).

Ces séparations ont été faites pour que chaque partie ait un nombre égal d'individus. Toutefois, la séparation avec les valeurs d'axes équidistantes est aussi envisagée. La problématique sur la création des tailles factorielles est pour l'instant le manque de visibilité directe sur les résultats morphologiques applicables aux produits. Cependant, en appliquant les équations 6.8, 6.6 et finalement l'équation 6.7 la morphologie modèle peut être obtenue.

Pour définir les coordonnées d'individu de la morphologie modèle, l'utilisation de la médiane ou de la moyenne peut être envisagée. Par exemple sur la figure 7.1 les coordonnées d'individu modèle de chaque taille factorielle sont définies par la médiane (figure 7.4a) ou la moyenne (figure 7.4b) de la population uniquement sur le premier axe. Sur une séparation à deux facteurs les coordonnées des tailles factorielles sont présentées à la figure 7.4c et 7.4d.

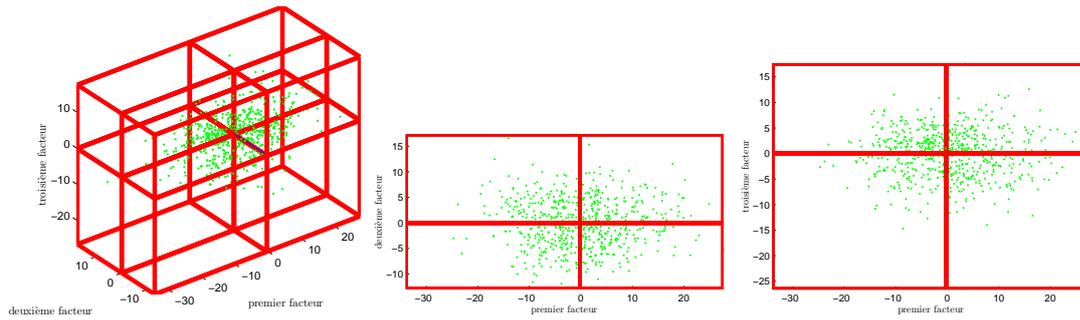
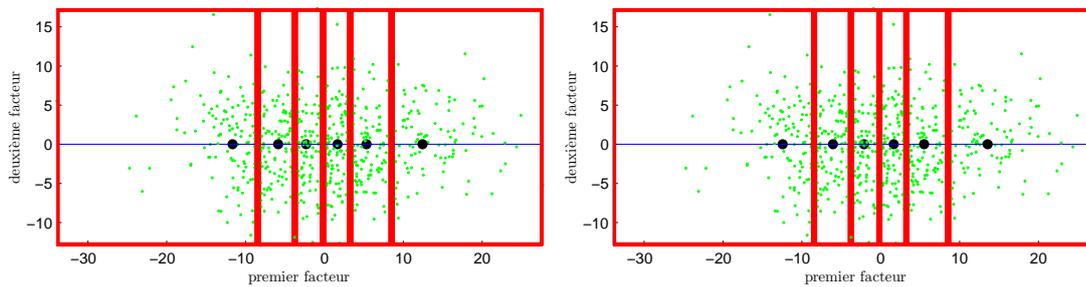
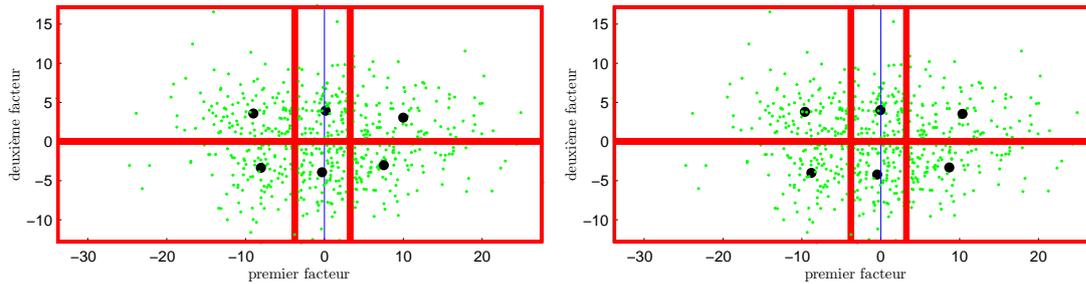


FIGURE 7.3 – Séparation en tailles factorielles sur trois facteurs (exemple avec 8 tailles créées).



(a) Basée sur la médiane en séparant sur un facteur (b) Basée sur la moyenne en séparant sur un facteur



(c) Basée sur la médiane en séparant sur deux facteurs (d) Basée sur la moyenne en séparant sur deux facteurs

FIGURE 7.4 – Coordonnées d’individu modèle pour chaque taille factorielle

## 7.2 Taux de couverture

Le taux de couverture d’un produit, est l’estimation du pourcentage de population qui pourra utiliser ce produit. En raison de la diversité morphologique, il y a rarement dans la conception massive, des systèmes de tailles couvrant 100% de la population cible. Le taux de couverture est alors essentiel afin de construire une offre de tailles optimale.

Le taux peut être calculé de différentes manières. Une première estimation peut être le taux de couverture basé sur les mesures unidimensionnelles. Supposons que la dimension d’un t-shirt est décrite seulement par le tour de poitrine. La population qui ne pourra pas porter ce t-shirt aura un tour de poitrine plus petit que le tour de poitrine de la plus petite taille de t-shirt et plus grand que le tour de la plus grande taille. Si il y a  $\alpha\%$  de population en dessous de la petite

taille et  $\beta\%$  de population en dessus de la grande taille le taux de couverture est :

$$\mathbf{T}_1 = 100 - \alpha - \beta \quad (7.1)$$

Un taux calculé en ne prenant en compte qu'une mesure unidimensionnelle sera toujours le plus surévalué. Supposons que le taux de couverture d'un t-shirt n'est calculé qu'à partir du tour de poitrine à  $\mathbf{T}_1\%$ . Ce taux ne prend pas en considération les différences de la forme. Par exemple en calculant aussi le tour de taille et en éliminant les personnes dont le tour de taille est plus grand que celui du t-shirt le taux de couverture sera  $\mathbf{T}_2\% < \mathbf{T}_1\%$ . En excluant ensuite les personnes dont le t-shirt sera trop court ce pourcentage diminuera encore plus. Finalement si cette procédure est extrapolée à plusieurs mesures ou aussi à trois dimensions, il est possible d'estimer le taux de couverture en analysant les points 3D correspondant à chaque sujet.

Pour des produits considérés non déformables comme les lunettes ou les casques, le taux de couverture en trois dimensions est à calculer en considérant la distance entre le produit et le corps à chaque point. Examinons l'exemple d'un casque. La morphologie est décrite par  $n$  points (supposons  $n$  rayons sphériques d'un casque et d'une tête). Il faut que le rayon sphérique de la tête à chaque point correspondant, soit plus petit que le rayon sphérique du casque. Si  $\rho_n$  est le rayon de  $n$ -point, il faut alors :

$$\rho_{n,tête} \leq \rho_{n,casque} \quad \forall \quad n \quad (7.2)$$

En parallèle, s'il est souhaitable que le casque soit adapté à la tête de l'utilisateur, l'hypothèse qu'ils sont en contact à chaque point est faite :

$$\rho_{n,tête} = \rho_{n,casque} \quad \forall \quad n \quad (7.3)$$

Comme la morphologie des personnes est différente, cette équation conduit à un taux de couverture qui tend vers zéro. Supposons alors d'un casque avec des mousses de confort à chaque point, d'épaisseur de  $m_{ep}$ . La combinaison des équations 7.2 et 7.3 dévient :

$$0 \leq \rho_{n,casque} - \rho_{n,tête} \leq m_{ep} \quad \forall \quad n$$

Cette équation change ainsi avec chaque élément qui est ajouté au casque pour son réglage à la tête (par exemple une molette pour régler le tour de tête). Le taux de couverture se calcule comme le pourcentage des morphologies qui vont respecter cette équation pour l'une des tailles données.

Pour les produits déformables comme les pantalons ou les blousons, cette procédure nécessite de prendre en compte l'adaptation du tissu au corps. Considérons le corps humain comme un corps rigide. Pour une première approche d'un t-shirt supposons un tissu non-élastique et une relation entre le tour de poitrine et la hauteur du t-shirt : si le tour de poitrine augmente, sa hauteur diminue. C'est le résultat de l'état du tissu non-vertical à la région de la poitrine. Supposons une relation entre les deux mesures du type :

$$hauteur_{t-shirt} = \kappa \times tour_{t-shirt} + \lambda^1$$

Si le taux de couverture est calculé uniquement par rapport à ces deux mesures et les modélistes autorisent la différence de hauteur jusqu'à  $x$  unités de mesure il faut :

$$hauteur_{tronc} - x \leq hauteur_{t-shirt} \leq hauteur_{tronc} + x$$

---

1. Cette relation n'est pas forcément réaliste. Pour créer des relations réalistes il faut considérer différents paramètres et entrer dans le domaine des déformations de textiles.

et

$$tour_{tronc} \leq tour_{t-shirt}$$

ou

$$\kappa \times tour_{tronc} + \lambda \leq hauteur_{t-shirt}$$

Même si le corps humain a été considéré dans les deux cas comme un corps rigide, dans une approche plus détaillée, l'adaptation des masses molles du corps devra être considérée.

### 7.3 Industrialisation et communication à la population cible

La démarche de transfert des résultats de cette thèse est déjà très avancée. Avec la séparation en tailles basée sur les morphologies tridimensionnelles, les formes du corps ont été comprises de manière plus détaillée par l'ensemble des métiers de conception. Quelques produits sont conçus sur la base des morphologies représentatives mais la communication au client est restée simple. Il faut qu'il puisse choisir sa taille sans essayer le produit en prenant de simples mesures anthropométriques et/ou en trouvant lui-même sa taille dans les morphologies données. Les morphologies et les analyses qui vont suivre dans la partie des applications sont à disposition de l'entreprise qui va les utiliser. Cela nécessite en amont une démarche marketing adaptée qui va démarrer.

### 7.4 Synthèse

Dans la conception, les différences morphologiques du corps sont traduites au produit par les tailles différentes. La séparation des tailles peut être basée sur des critères divers et une nouvelle approche de création de systèmes de tailles a été montrée. Cette approche prend en compte la morphologie tridimensionnelle du corps humain.

Le taux de couverture de chaque taille a été ensuite calculé. Ces données peuvent être utilisées pour l'optimisation de l'offre de tailles. A la fin, la communication de la séparation est importante afin d'aider le client à choisir facilement sa taille.



## Chapitre 8

# Conclusion

La méthodologie présentée permet d'obtenir et d'analyser les données morphologiques d'un scan en trois dimensions. Ses différentes composantes consistent en des outils classiques des mathématiques.

Dans un premier temps, l'algèbre linéaire a été appliquée pour aligner tous les sujets scannés. Ensuite, le nuage de points a été manipulé afin d'extraire les informations concernant les éléments d'intérêt du corps humain. À cette fin, des techniques géométriques ont été utilisées. Pour comparer efficacement les scans 3D, ils ont été transformés en images, et ils ont été exploités avec des méthodes d'analyse d'images. Afin d'analyser les résultats, des méthodes statistiques ont été adaptées pour le traitement des caractéristiques d'un nuage de points. Enfin, pour la création des systèmes de tailles, des séparations ordinaires des populations se basant sur la morphologie tridimensionnelle ont été étudiées.

Toute la théorie a été présentée de manière détaillée. Cependant, pour qu'elle soit évaluée, il faut l'appliquer sur des cas concrets. Ainsi, les potentiels avantages et désavantages apparaîtront. Également, cette thèse a été financée par une entreprise spécialisée dans la conception des produits sportifs à l'internationale. De ce fait, l'utilité de ces méthodes sera mise en évidence par les applications.

Pour ces raisons, la prochaine partie, utilise la méthodologie présentée et analyse les résultats obtenus. Trois parties du corps ont été étudiées : le pied, la tête et la poitrine. Chacun des trois montre différents aspects de cette méthodologie.

Concernant le pied, la procédure allant de l'acquisition des nuages de points bruts, jusqu'à l'extraction des mesures unidimensionnelles est analysée. Ces mesures sont étudiées ensuite pour trouver les différences morphologiques entre deux populations. Pour la tête, après l'obtention des mesures, la morphologie tridimensionnelle est exploitée. Les résultats obtenus à l'aide des données unidimensionnelles et tridimensionnelles sont analysés et comparés. À propos de la poitrine, des morphologies tridimensionnelles représentatives ont été également calculées.

Dans les trois applications, la méthodologie est discutée et les points forts mais également les points à améliorer sont fournis. Les résultats de chaque partie sont aujourd'hui appliqués à la conception de produits morphologiquement adaptés.



## Troisième partie

# Application de la méthodologie aux trois parties du corps



## Chapitre 9

# Analyse des pieds scannés

### 9.1 Introduction

Le rôle du pied est primordial. Il est l'un des premiers maillons de la chaîne du mouvement chez l'être humain et supporte le poids du corps entier. Ses 26 os et 20 muscles contribuent à son rôle afin de maintenir l'équilibre et provoquer le mouvement. Ses éléments anatomiques définissent également sa forme en statique et en dynamique.

Le pied est couvert depuis la nuit des temps. En Espagne, des dessins de plus de 15000 ans montrent des personnes avec des peaux d'animaux ou de fourrures enroulées autour de leurs pieds [65]. La plus ancienne chaussure trouvée date des alentours de 3000 avant J.C. et elle était ajustée à la forme du pied de la personne qui la portait [82].

Initialement, les chaussures se fabriquaient à la forme du pied. Au fil du temps elles ont évolué vers des objets de mode et symboles de prestige. Alors que leur forme a changé, elles peuvent déformer le pied et devenir source de douleur [65]. Un ajustement incorrect de la chaussure peut aussi conduire à une limitation fonctionnelle et à la chute des personnes âgées [72].

Pour avoir une chaussure confortable, le facteur primordial est son ajustement à la morphologie [73]. Par exemple, les propriétés indispensables d'une chaussure pour les joueurs de tennis sont d'être ajustées et confortables [93]. L'ajustement est aussi importante pour améliorer la performance de la marche [28].

Afin de concevoir des chaussures qui sont ajustées correctement, l'analyse de la morphologie du pied est requise. Dans la littérature, sa diversité morphologique est étudiée. Par exemple, pour le même longueur, les populations mongoliques ont des pieds plus larges que les Caucasiens [63]. Toutefois, dans cette étude les populations mongoliques sont représentées uniquement par les Japonais et Indonésiens, et les Caucasiens par les Français et Australiens. Entre les sexes les différences ont été également étudiées et les pieds des hommes sont plus hauts et plus larges que ceux des femmes [64].

Afin de comparer différentes bases de données du pied, il est nécessaire que les mesures étudiées soient prises de manière identique. Cependant, dans la littérature, la définition des mesures du pied diffère selon les études [90]. Par exemple sa hauteur est définie comme la hauteur à 54% [62] ou à 50% [22] de sa longueur. Dans les normes ISO pour la confection des vêtements [56] et la conception technologique [55], il existe uniquement deux mesures définies sur le pied (longueur et largeur).

L'objectif de cette étude est d'analyser et de comparer la morphologie des différentes populations afin de concevoir des chaussures morphologiquement adaptées. De ce fait, des données 3D ont été acquises dans différents pays à travers le monde. La morphologie de plus de 15000 pieds

a été analysée. Afin d'assurer une bonne reproductibilité d'extraction des mesures anthropométriques, des algorithmes automatiques ont été développés. Les caractéristiques demandées pour ces algorithmes sont la précision et la rapidité du traitement du grand nombre de données.

## 9.2 Matériels et méthodes

### 9.2.1 Campagnes de mensuration du pied

Pour obtenir la morphologie tridimensionnelle du pied, DECATHLON a réalisé deux campagnes de mensuration. La première a été réalisée en Europe en 2009<sup>1</sup> et la deuxième en Chine, Russie et Inde en 2013-2015<sup>2</sup>. Deux scanners ont été utilisés, associés avec deux méthodes différentes d'acquisition de mesure.

#### Campagne européenne 2009

Le scanner utilisé pour la campagne européenne est le Infoot (figure 9.1a). Ce scanner est sensible à la lumière, de ce fait, il est très important que son couvercle soit bien fermé pendant la procédure du scan. En outre, il est nécessaire d'utiliser une chaussette de couleur clair. Par conséquent, tous les sujets sont scannés avec une chaussette fine à usage unique (figure 9.1b). La calibration du matériel est également nécessaire après chaque déplacement. Le logiciel du scanner a la possibilité de calculer ensuite des mesures 1D suivant des points anatomiques qui sont détectés automatiquement. Si ces points ne sont pas détectés correctement, l'utilisateur peut intervenir pour les déplacer. Sur les essais qui ont été réalisés, 90% des scans nécessitaient la redéfinition de manière manuelle des points anatomiques. Afin d'assurer la calibration et l'utilisation correcte du scanner, des ressources humaines dédiées à cette campagne de mensuration ont été mises en place.

#### Campagne chinoise, russe et indienne 2013-2015

Du fait de l'ancienneté du scanner Infoot, qui le rend très sensible lors de ses déplacements, un nouveau scanner a été utilisé pour la campagne de mensuration en Chine, Russie et Inde. Nous avons choisi ce scanner (Footin3D, figure 9.1c) car il n'est pas sensible à la lumière et le pied peut être scanné nu. Également, le scanner est simple à utiliser et la campagne est réalisée par le personnel des magasins DECATHLON dans les différents pays. A cette fin, nous avons créé et mis en place des guides et des vidéos d'utilisation afin que tous les opérateurs soient formés à utiliser correctement les outils mis à disposition. Le logiciel associé peut calculer des mesures 1D mais les informations sur le calcul de ces mesures ne sont pas accessibles par le fournisseur.

Le passage type d'un sujet est :

- le sujet est informé de la procédure du test par l'opérateur du scanner,
- l'opérateur obtient les informations concernant le sexe, l'âge, la taille, le poids et l'origine du sujet,
- le sujet se met pieds nus, debout, avec un pied dans le scanner et l'autre pied à l'extérieur (les deux pieds sont à la même hauteur),
- il reste immobile pendant le scan du premier pied ( $\approx 8sec$ ),
- le test est fini quand son deuxième pied est également scanné.

---

1. La campagne Européenne a été réalisée avant le début de cette thèse dans le cadre du projet européen de recherche "Footwear gets a 21st century refit".

2. Nous avons choisi ces trois pays pour des raisons incluant le développement de DECATHLON dans ces pays.



(a) Scanner Infot pour la campagne européenne. (b) Chaussette pour la campagne européenne. (c) Scanner Footin3D pour la campagne en Chine, Russie et Inde.

FIGURE 9.1 – Équipement pour les campagnes de mensuration du pied.

### Comparaison des deux campagnes

Pour pouvoir analyser les deux campagnes de mensuration ensemble, il est indispensable de comparer les deux méthodes utilisées (diagramme de la figure 9.2). Les méthodes utilisées par le logiciel de chaque scanner n'étant pas accessibles, les mesures extraites ne sont pas directement comparables.

Afin d'être en mesure de réaliser une comparaison des deux scanners, un nouvel algorithme d'extraction est développé pour analyser les différences. Une fois cette nouvelle méthode d'extraction mise au point, 18 sujets ont eu les pieds scannés avec les deux outils.

#### 9.2.2 Détection du bruit sur les scans

Afin d'extraire les mesures anthropométriques qui vont être présentées dans les prochaines sections, le nuage de points du pied est à traiter. La première opération est la détection et la suppression du bruit. Il y a deux principaux modes de bruits qui sont présents sur un pied scanné. Le premier est l'effet de la lumière aux bords hauts du scanner (figure 9.3a). Il apparaît à cause de la sensibilité des scanners dans les endroits les plus illuminés. Le deuxième est l'effet de la vitre après le passage de plusieurs personnes. Il disparaît quand la vitre est nettoyée. Ce second bruit est visible au niveau de la vitre dans la partie basse du pied scanné. Il peut être présent dans les 5 premiers  $mm$  sur  $z$  (figure 9.3b).

En incluant dans l'analyse uniquement les 150 $mm$  de bas du pied ( $z < 150mm$ ), le premier bruit est souvent éliminé. Cependant, ce bruit est également contrôlé pendant l'extraction des mesures. Dans ce cas, le bruit est détecté quand le nuage de points est divisé en deux. Les points sont triés selon leurs coordonnées, et ensuite, la distance entre les points successifs est calculée. Le bruit est détecté et éliminé dans le cas où la plus grande distance entre les points est beaucoup plus grande que les autres distances.

Concernant le deuxième bruit, les premiers 5 $mm$  verticaux de l'extérieur du volume du pied sont à éliminer. Le polygone convexe des points du pied avec  $5mm < z < 25mm$  est alors détecté. Les points avec  $z < 5mm$  qui se trouvent à l'extérieur de ce polygone sont supprimés.

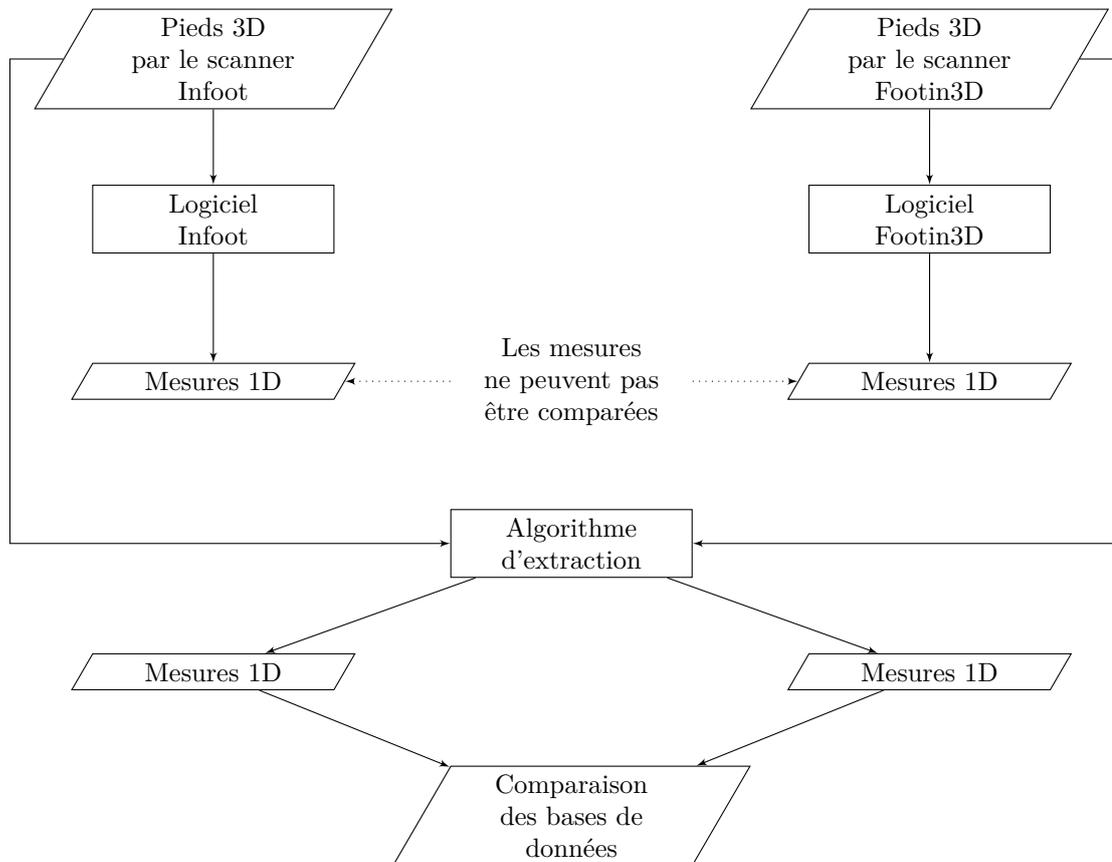
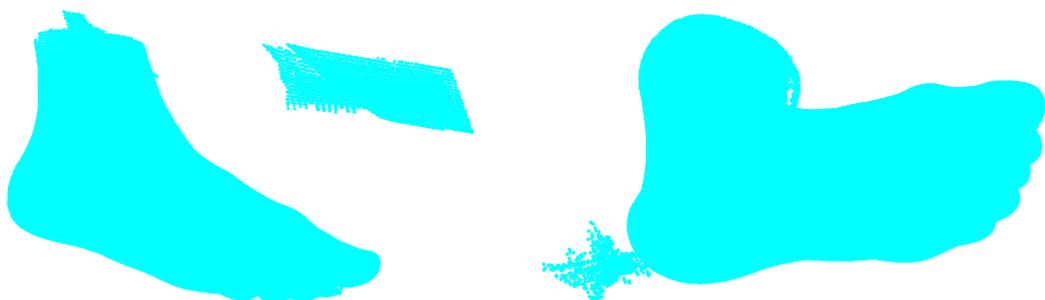


FIGURE 9.2 – Comparaison des deux campagnes de mensuration du pied.



(a) Bruit à cause de la sensibilité à la lumière. (b) Bruit au niveau de la vitre basse du scanner.

FIGURE 9.3 – Principaux modes de bruit sur un pied scanné.

### 9.2.3 Alignement des pieds scannés

L'étape suivante avant l'extraction des mesures est l'orientation correcte du pied scanné. Le protocole existant chez DECATHLON pour l'évaluation du confort du pied [2] définit l'orientation du pied de manière spécifique<sup>1</sup>.

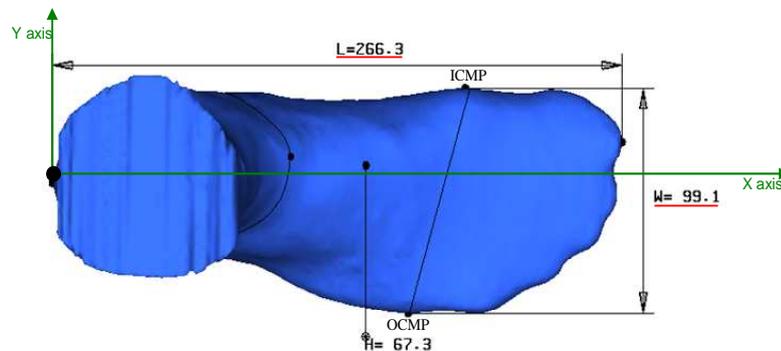


FIGURE 9.4 – Orientation du pied suivant le protocole DECATHLON [2].

L'axe longitudinal  $x$  (figure 9.4) traverse le pied en passant par le talon et le milieu des deux grands orteils. L'axe vertical est perpendiculaire au sol et l'axe transversal est perpendiculaire aux deux précédentes. Étant donné que le scanner possède un repère fixe, l'axe  $z$  est toujours vertical au sol. Aussi, comme le pied est orienté vers l'avant, les orteils ont des coordonnées en  $x$  plus grandes que les coordonnées en  $x$  du talon. En se basant uniquement sur ces deux éléments, le pied est à orienter comme à la figure 9.4. De ce fait les points du talon et des deux orteils sont à localiser. Pour que la position de la jambe n'influe pas sur la détection du talon, uniquement les 40mm bas du pied sont examinés. Les algorithmes sont expliqués par la suite pour un pied droit. Afin de les appliquer aux deux pieds, l'image du pied gauche est réfléchié par rapport à l'axe  $x$ .

Afin de localiser les orteils, l'enveloppe convexe est utilisée. Sur la plupart des pieds, les deux orteils sont détectés grâce à leur distance. La projection de cette distance à l'axe  $y$  est la distance maximale projetée de l'avant pied (figure 9.5a). Cependant, il y a des pieds pour lesquels la distance maximale est détectée entre le deuxième et les petits orteils (figure 9.5b) ou en général entre de grands et de petits orteils (figure 9.5c). Afin que la détection soit correcte, différents contrôles ont été mis en place. Si  $d_{max}$  est la distance maximale détectée, et donc les deux points qui la définissent sont les deux grands orteils, ces contrôles sont :

- Afin d'éviter les cas similaires à la figure 9.5b, si le deuxième orteil détecté ne se situe pas dans les deux tiers intérieurs du pied, alors  $d_{max}$  devient la deuxième plus grande distance.
- Le pied est retourné pour un contrôle manuel quand le milieu des deux orteils est détecté dans la moitié extérieure du pied. Il y a approximativement 10% des scans qui sont renvoyés pour validation manuelle.

Concernant la détection du talon, sa position initiale est le point *minimum* sur l'axe  $x$ . Une fois que les orteils sont détectés et le pied est orienté par rapport à la position initiale du talon, ce point est re-détecté.

Suivant les sections 4.2.1 et 4.2.2, l'origine du repère est déplacée :

- dans le plan horizontal au talon

1. Afin d'utiliser les mêmes protocoles à travers des procédures de conception et de fabrication d'une chaussure, ce protocole a été utilisé également pour l'analyse morphologique du pied.

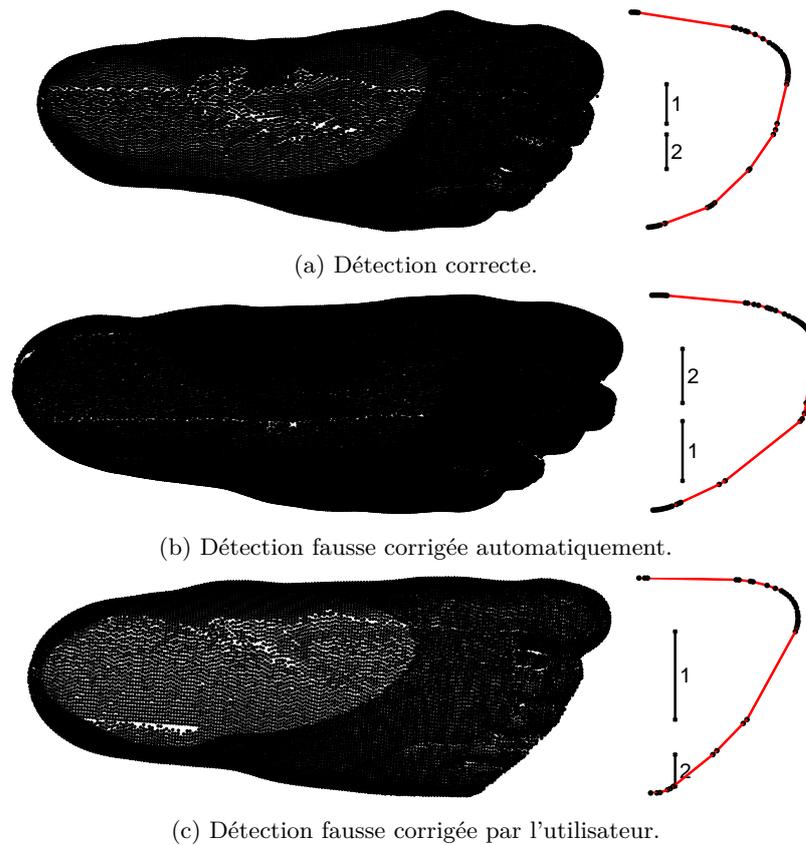


FIGURE 9.5 – Détection des orteils pour l'alignement du pied par son enveloppe convexe (ligne rouge). Les deux plus grandes distances détectées sont numérotées 1 et 2 respectivement.

– et dans l'axe vertical à la plus petite coordonnée en  $z$ .  
 En connaissant les trois points (talon et deux orteils), et en gardant l'axe  $z$  avec la même orientation verticale, les trois axes de la matrice de rotation sont :

$$x_{axe} = \frac{[x'_{ort}, y'_{ort}, 0]}{|[x'_{ort}, y'_{ort}, 0]|}$$

$$z_{axe} = [0, 0, 1]$$

$$y_{axe} = \frac{z_{axe} \wedge x_{axe}}{|z_{axe} \wedge x_{axe}|}$$

ou  $x'_{ort}, y'_{ort}$  sont les coordonnées  $x$  et  $y$  du point entre les deux orteils. La matrice de rotation est :

$$M = [\overrightarrow{x_{axe}} \quad \overrightarrow{y_{axe}} \quad \overrightarrow{z_{axe}}]$$

### 9.2.4 Mesures unidimensionnelles

Suivant le protocole existant [2] six mesures anatomiques sont définies. Ces six mesures sont la longueur, la largeur, la hauteur, le périmètre métatarsal, le périmètre d'entrée et le périmètre cou-de-pied (tableaux 9.1 et 9.2).

Mesure	Explication	Pictogramme
Longueur	Distance maximale parallèle à l'axe $x$ ( $L$ ) entre le point <i>minimum</i> du talon et le point <i>maximum</i> des orteils (premier ou deuxième orteil).	
Largeur	Distance parallèle à l'axe $y$ ( $W$ ) entre les deux points extrêmes au niveau des métatarses.	
Hauteur	Distance maximale du pied sur l'axe $z$ .	

TABLE 9.1 – Mesures 1D du pied [2].

Le pied est retourné suivant la section 9.2.3 et tous les pieds sont alignés de même manière. Le calcul de toutes les mesures a été réalisé selon la méthode présentée dans la section 4.4 et l'équation 4.1.

### Longueur

Après la détection des deux points extrêmes sur l'axe longitudinal  $x$  (*minimum* et *maximum* des coordonnées sur l'axe  $x$ ), la longueur est calculée :

$$longueur = x_{max} - x_{min}$$

### Largeur

Pour calculer la largeur du pied, les métatarses sont d'abord détectés. Le métatarse de la première tête métatarsale (côté intérieur du pied) est détecté comme le point ayant la coordonnée maximale à l'axe  $y$  dans la partie avant du pied (entre 65 et 80% de la longueur du pied [2]). Respectivement, le métatarse de la cinquième tête métatarsale (côté extérieur du pied) est détecté dans la partie entre 60 et 75% de la longueur du pied [2].

$$largeur = y_{meta,max} - y_{meta,min}$$

### Hauteur

A 55% de la longueur du pied le nuage de point est obtenu. Sa valeur maximale sur l'axe vertical  $z$  correspond à la hauteur du pied :

$$hauteur = z_{max,55\%}$$

### Périmètres

Afin de calculer les périmètres du pied (tableau 9.2) le nuage de points du plan correspondant est obtenu. Pour le périmètre métatarsal par exemple, le plan traverse verticalement le pied et passe par les têtes métatarsales détectées lors de calcul de la largeur. Les points appartenant à ce plan sont ensuite ordonnés et la somme de leur distances est la circonférence calculée (comme il a été expliqué dans la section 4.4). Le plan du périmètre d'entrée lie les deux points définissant la distance *minimum* diagonale et il est parallèle à l'axe latérale du pied. Le périmètre cou-de-pied est incliné 12 degrés du plan vertical et traverse le pied au point haute à 50% de sa longueur.

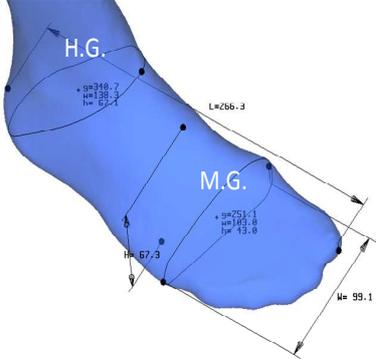
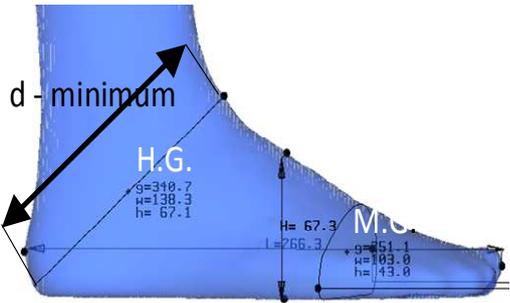
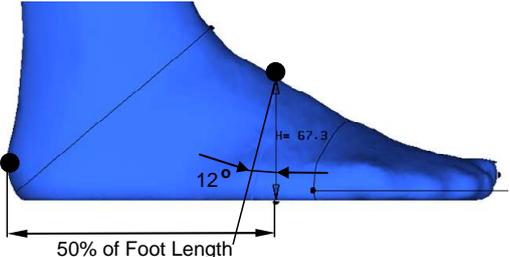
Mesure	Explication	Pictogramme
Périmètre métatarsal	Périmètre qui passe par la première et la cinquième tête métatarsale (M.G.)	 <p>Diagramme illustrant le périmètre métatarsal sur un pied. Le périmètre est tracé en passant par les têtes métatarsales première (M.G.) et cinquième (M.G.). Les dimensions indiquées sont : g=348.7, w=138.3, h=67.3, l=266.3, et H=99.1.</p>
Périmètre d'entrée	Périmètre diagonal qui passe par le talon et la partie avant de la jambe (H.G.)	 <p>Diagramme illustrant le périmètre d'entrée diagonal sur un pied. Le périmètre passe par le talon et la partie avant de la jambe (H.G.). Les dimensions indiquées sont : g=348.7, w=138.3, h=67.1, H=67.3, l=266.3, g=251.1, w=103.0, et h=43.0.</p>
Périmètre cou-de-pied	Périmètre qui passe par l'intermédiaire os cunéiforme	 <p>Diagramme illustrant le périmètre cou-de-pied sur un pied. Le périmètre passe par l'intermédiaire os cunéiforme. Les dimensions indiquées sont : H=67.3, un angle de 12°, et une longueur de 50% of Foot Length.</p>

TABLE 9.2 – Mesures 1D du pied (périmètres) [2].

## 9.3 Résultats

### 9.3.1 Incertitude d'extraction des mesures

Afin d'évaluer la robustesse des algorithmes présentés, deux contrôles ont été réalisés. Premièrement, les mesures extraites des pieds scannés d'orientations différentes ont été comparées. Ensuite, la différence entre les mesures par les algorithmes et les mesures par des points manuellement piqués, a été calculée.

Pour le premier contrôle, le même pied a été scanné cinq fois avec des orientations différentes sur chaque scan. Cette procédure a été lancée deux fois (pour deux pieds). Afin de respecter la méthode utilisée pour chaque scanner, une chaussette a été utilisée pour le scanner INFOOT. Dans les tableaux 9.3 et 9.4 les six mesures extraites et le coefficient de variation sont présentées. Les coefficients de variation varient entre 0 et 3% selon les mesures.

Mesure	Valeurs mesurées ( <i>mm</i> )					Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation (%)
Pied n°1, scanner Infoot								
Longueur	239.3	237.7	237.4	238.1	238.2	238.2	0.7	0.30
Largeur	93.1	93.6	92.0	93.1	92.1	92.8	0.7	0.77
Hauteur	60.8	60.2	61.0	60.2	61.0	60.6	0.4	0.65
Périmètre métatarsal	234.2	234.4	233.7	233.1	225.9	232.3	3.6	1.54
Périmètre d'entrée	442.6*	395.5*	316.9	317.3	317.6	317.3	0.3	0.10
Périmètre cou-de-pied	234.3	234.1	234.3	234.7	234.5	234.4	0.2	0.10
Pied n°2, scanner Infoot								
Longueur	238.9	237.5	238.3	237.4	238.8	238.2	0.7	0.29
Largeur	94.3	93.2	93.1	93.5	93.4	93.5	0.5	0.50
Hauteur	62.9	63.8	63.3	63.1	63.1	63.2	0.4	0.57
Périmètre métatarsal	238.6	236.9	235.5	236.9	237.2	237.0	1.1	0.48
Périmètre d'entrée	666.6*	318.2	316.8	317.3	319.4	317.9	1.1	0.36
Périmètre cou-de-pied	236.6	236.4	237.6	236.9	235.2	236.6	0.9	0.38

\*Valeurs aberrantes détectables

TABLE 9.3 – Calcul de l'incertitude des algorithmes d'extraction des mesures 1D sur le pied pour le scanner Infoot.

Mesure	Valeurs mesurées (mm)					Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation (%)
Pied n°1, scanner Footin3D								
Longueur	238.4	237.7	0	239.4	238.4	238.5	0.7	0.30
Largeur	92.1	92.4	0	92.3	92.0	92.2	0.2	0.17
Hauteur	57.7	58.1	0	57.6	58.4	58.0	0.4	0.67
Périmètre métatarsal	230.5	232.0	0	231.0	232.2	231.4	0.8	0.34
Périmètre d'entrée	316.5	315.2	0	315.2	318.5	316.3	1.6	0.50
Périmètre cou-de-pied	228.7	229.6	0	228.8	230.1	229.3	0.6	0.27
Pied n°2, scanner Footin3D								
Longueur	238.9	238.0	239.0	238.0	236.4	238.0	1.1	0.44
Largeur	94.3	93.9	92.2	93.7	94.5	93.8	0.9	0.96
Hauteur	60.7	60.1	56.8	60.7	60.6	59.8	1.7	2.84
Périmètre métatarsal	236.2	233.3	230.3	235.2	237.0	234.4	2.7	1.15
Périmètre d'entrée	316.5	316.7	313.3	318.3	317.6	316.5	1.9	0.61
Périmètre cou-de-pied	231.4	230.5	228.5	231.5	230.6	230.5	1.2	0.52

TABLE 9.4 – Calcul de l'incertitude des algorithmes d'extraction des mesures 1D sur le pied pour le scanner Footin3D.

Pour le deuxième contrôle, la base de données européenne a été utilisée. Pendant la campagne de mensuration en 2009, les mesures du pied étaient extraites avec des points manuellement piqués à l'aide du logiciel du scanner Infoot. Pour tous les sujets, les différences entre ces mesures et les mesures extraites par les algorithmes, ont été calculées. Leur comparaison a été effectuée par la moyenne et l'écart-type des valeurs absolues (tableau 9.5).

### 9.3.2 Différence entre les scanners sur les mesures extraites

Afin de pouvoir comparer les deux campagnes de mensuration, la correspondance entre les deux méthodes à scanner est à déterminer. 18 sujets ont été scannés avec ces deux méthodes. Les mesures pour chaque sujet et chaque scanner ont été ensuite extraites en appliquant les algorithmes présentés.

Concernant la mesure de longueur, la différence entre les deux méthodes n'est pas significative. Pour les autres mesures, les deux méthodes sont significativement différentes ( $p < 0.001$ ). Afin de

Mesure	Moyenne des différences absolues ( <i>mm</i> )	Écart-type des différences absolues ( <i>mm</i> )
Longueur	1.9	1.5
Largeur	0.7	0.8
Hauteur	0.5	0.7
Périmètre métatarsal	3.4	3.0
Périmètre d'entrée	4.0	2.8
Périmètre cou-de-pied	5.2	3.0

TABLE 9.5 – Différences entre les mesures issues du logiciel du scanner Infoot et des mesures extraites automatiquement pour toute la base de données européenne.

pouvoir comparer les deux méthodes, leurs coefficients de corrélation ont été également calculés. Les coefficients de corrélation de toutes les mesures sont supérieurs à 95% ce qui signifie que les résultats extraits des deux méthodes sont fortement corrélés.

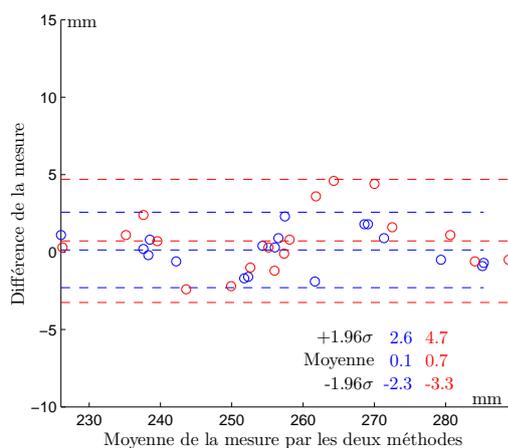
Pour comparer deux méthodes de mesures, [16] proposent d'étudier graphiquement la différence entre les mesures ainsi que leur moyenne. Ce type de graphique porte leurs noms (graphique Bland-Altman). En abscisse est représentée la moyenne des deux mesures (la moyenne de la mesure extraite par le scanner Infoot et par le scanner Footin3D). En ordonnées est représentée leur différence. Les graphiques Bland-Altman pour toutes les mesures sont présentés dans les figures 9.6 et 9.7. La comparaison a été réalisée pour les deux pieds séparément afin d'avoir deux ensembles de données.

Suivant ces comparaisons graphiques, la différence des mesures entre les deux méthodes ne dépend pas de la taille du pied. En éliminant ensuite les différences aberrantes ( $\notin [-1.96\sigma, +1.96\sigma]^1$ ), en recalculant leur moyenne et en répétant cette procédure, la différence entre les deux méthodes apparaît aux tableaux des figures 9.6 et 9.7.

Selon les résultats, les mesures de la campagne européenne ont été diminuées de  $1.2mm$  pour la largeur,  $1.75mm$  pour la hauteur et  $4.2$ ,  $2.3$  et  $4.7mm$  pour les périmètres métatarsal, d'entrée et de cou-de-pied respectivement. La longueur n'a pas été diminuée parce que sa différence n'est pas significative.

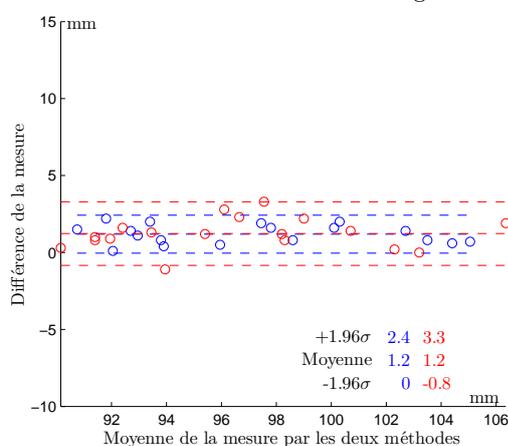
---

1. Ces limites sont définies par les auteurs de la méthode Bland-Altman [16] considérant la loi normale. 95% d'une population qui suive la loi normale est incluse dans ces limites.



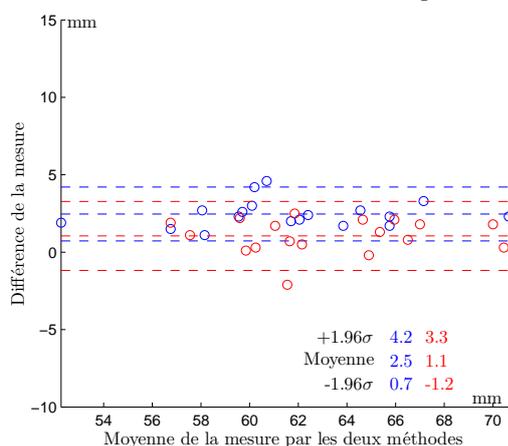
Pied	Différence moyenne entre les méthodes (mm)
gauche	0.1
droit	0.7

Longueur du pied gauche et droit



Pied	Différence moyenne entre les méthodes (mm)
gauche	1.2
droit	1.2

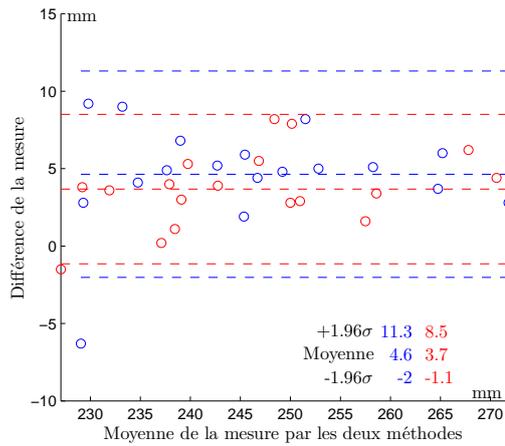
Largeur du pied gauche et droit



Pied	Différence moyenne entre les méthodes (mm)
gauche	2.2
droit	1.2

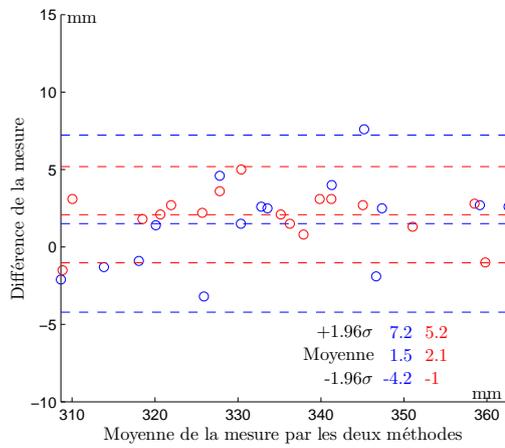
Hauteur du pied gauche et droit

FIGURE 9.6 – Comparaison des méthodes des deux campagnes de mesure de pied par les graphiques Bland-Altman et différences moyennes après l'élimination des points aberrants (longueur, largeur et hauteur du pied).



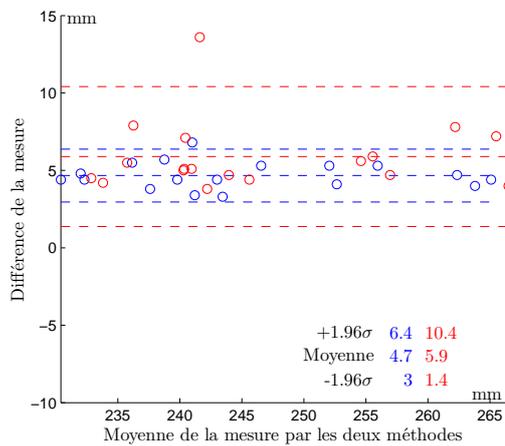
Pied	Différence moyenne entre les méthodes (mm)
gauche	4.8
droit	3.7

Périmètre métatarsal du pied gauche et droit



Pied	Différence moyenne entre les méthodes (mm)
gauche	2.0
droit	2.5

Périmètre d'entrée du pied gauche et droit



Pied	Différence moyenne entre les méthodes (mm)
gauche	4.5
droit	5.1

Périmètre cou-de-pied du pied gauche et droit

FIGURE 9.7 – Comparaison des méthodes des deux campagnes de mesure de pied par les graphiques Bland-Altman et différences moyennes après l'élimination des points aberrants (périmètres métatarsal, d'entrée et cou-de-pied).

### 9.3.3 Anthropométrie du pied

En appliquant la méthodologie aux pieds scannés, les principales mesures anthropométriques ont été extraites. *Dans cette étude seulement l'anthropométrie du pied européen et chinois est concernée. Également, sont présentés seulement les résultats des mesures de longueur, largeur et hauteur du pied.*

La distribution de la longueur ainsi que la dispersion sur la largeur et la hauteur sont présentées sur la figure 9.8. Six sous-populations ont été étudiées : deux sous-groupes selon la région géographique, chacun de ces sous-groupes répartis en enfants, femmes et hommes.

Le groupe des enfants est défini comme l'ensemble des individus de moins de 15 ans. Cette séparation prend en compte l'évolution du pied d'un enfant. Les pieds des filles arrêtent de grandir à l'âge de 12-13 ans et ceux de garçons à 14-15 ans. Aussi, la stabilité mécanique des tendons et des ligaments du pied des personnes de 15 ans, est similaire à celle des adultes [97].

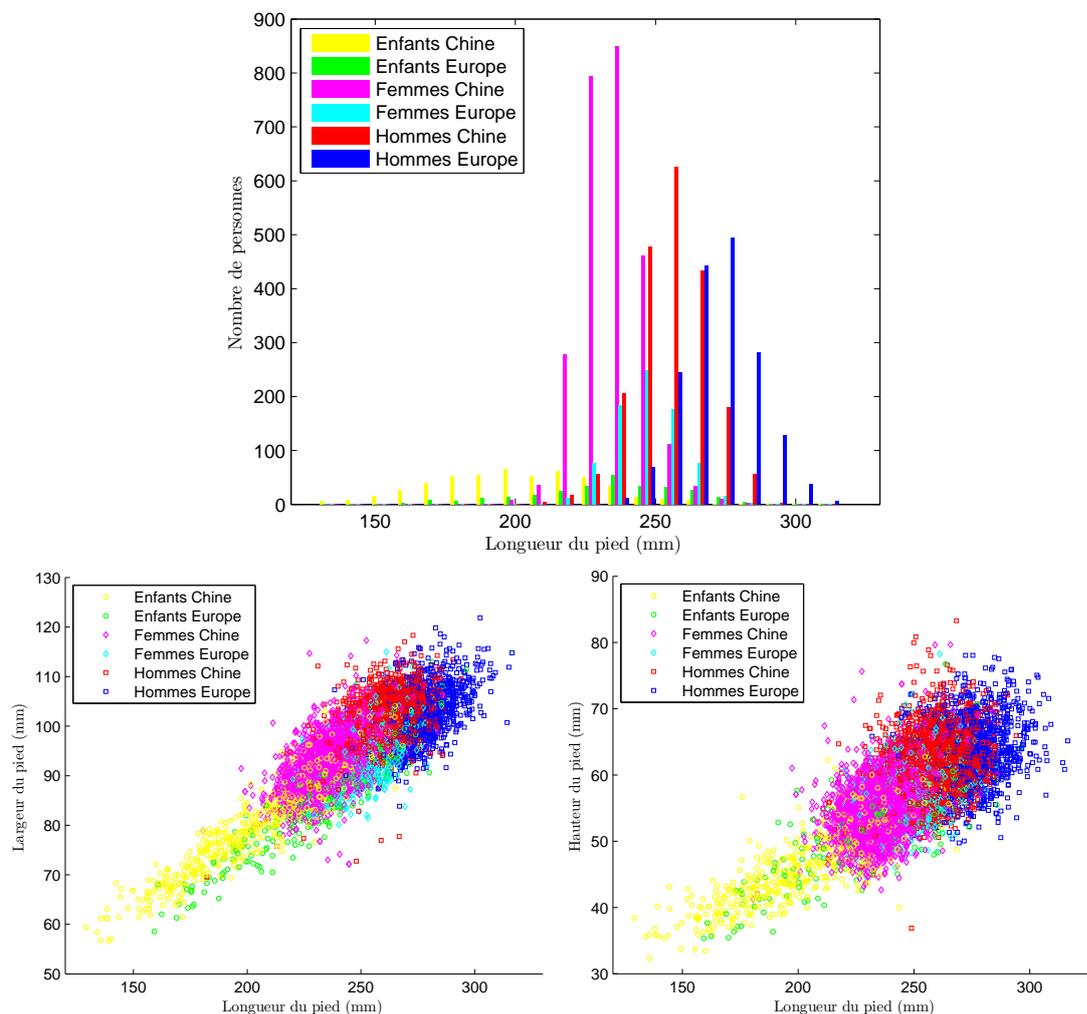


FIGURE 9.8 – Distribution de la longueur et dispersion de largeur et hauteur du pied.

Le système actuel de tailles de chaussures sépare les tailles tous les  $6.67\text{mm}$ . Quelques unes

des tailles actuelles, sont portées par plusieurs populations.

Entre ces populations il y a des différences significatives et selon les tailles :

- les pieds des adultes chinois sont plus larges que les pieds des adultes européens de 2 à 3mm ( $p < 0.001$ ) mais il n'y pas de différence significative sur la hauteur <sup>1</sup>,
- les pieds des enfants chinois sont plus larges que les pieds des enfants européens de 3 à 5mm ( $p < 0.001$ ) mais il n'y pas de différence significative sur la hauteur,
- les pieds des hommes sont plus larges que les pieds des femmes de 2 à 3mm ( $p < 0.001$ ) et plus hauts de 3 à 5mm ( $p < 0.001$ ) <sup>2</sup>,
- les pieds des adultes sont plus larges que les pieds des enfants (pour les tailles communes) de 3 à 5mm. Ils sont également plus hauts de 2 à 4mm pour les femmes et de 5 à 7mm pour les hommes ( $p < 0.001$ ) <sup>3</sup>.

Cependant, la différence intra-population est beaucoup plus élevée que la différence inter-population. Entre les sujets, dans les sous-populations, la différence atteint 19mm sur la largeur et 19mm sur la hauteur pour la même taille. Par exemple, pour les pieds d'hommes de longueur 269.4 - 276.1mm (taille 43) la différence sur la largeur est présentée sur la figure 9.9.

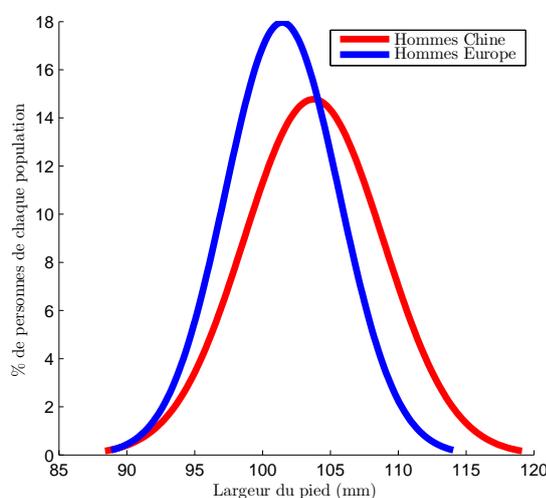


FIGURE 9.9 – Distribution de la largeur pour la population masculine de taille 43 (basé sur 20 classes).

1. Résultat de test T de Student pour des échantillons indépendants. L'analyse est faite séparément pour les hommes et les femmes avec des résultats identiques pour les deux sexes.

2. Résultat de test T de Student pour des échantillons indépendants. L'analyse est faite séparément pour les Chinois et les Européens avec des résultats identiques pour les deux populations.

3. Résultat de test T de Student pour des échantillons indépendants. L'analyse est faite séparément pour les Chinois et les Européens avec des résultats identiques pour les deux populations.

## 9.4 Discussion

Sur cette étude, des méthodes automatiques et robustes ont été utilisées afin d'extraire les principales caractéristiques morphologiques du pied.

La première orientation du pied scanné était connue :

- l'axe vertical est connu par rapport au pied,
- l'axe longitudinal initial est identique pour tous les sujets et
- l'origine du pied scanné par rapport à l'axe vertical correspond aux points du bas du pied et il n'y a pas de possibilité de bruit en dessous de ce niveau.

De ce fait, il était possible de détecter rapidement et automatiquement les points d'intérêt du pied pour son orientation finale. Les bruits principaux ont également été détectés et éliminés automatiquement.

Si ces éléments n'étaient pas disponibles, le nuage de points aurait dû être initialement traité afin que l'orientation initiale du pied soit identique pour tous les sujets. Celle-ci est possible en appliquant différents algorithmes dont le plus utilisé dans la littérature est le "iterative closest point" [14, 20]. Cet algorithme a été cependant testé. Les résultats ont montré que le temps nécessaire pour l'alignement d'un pied était approximativement 2.5 minutes. Il se pourrait qu'un algorithme plus optimisé réduise ce temps. Néanmoins, le résultat de l'alignement n'était pas pertinent pour l'application au pied (figure 9.10) pour cause de positions différentes dans la chaussure des deux pieds. Plus précisément, le pied doit être aligné avec le produit fini afin d'aider à la conception mais également avec les autres pieds afin d'utiliser des algorithmes automatiques pour calculer les mesures anatomiques. Le résultat illustré à la figure 9.10 ne peut pas être utilisé pour la conception ni pour obtenir des mesures automatiquement. Concernant le temps de calcul, l'alignement et l'extraction de mesures de 200 pieds scannés avec les algorithmes que nous avons développés prend moins de 5 minutes (diminution de 99% du temps par rapport aux méthodes précédentes) sur un ordinateur portable (qui n'a pas de caractéristiques spécifiques).

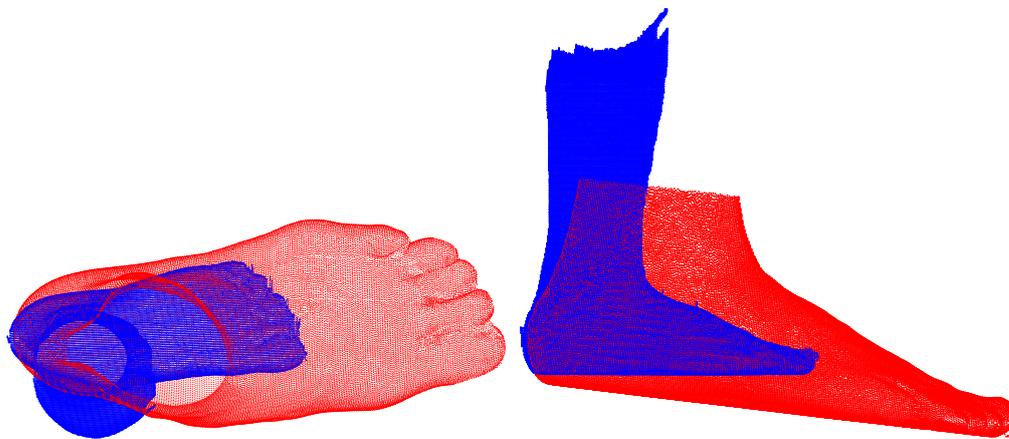


FIGURE 9.10 – Alignement effectué avec l'algorithme ICP. Deux vues sont montrés. Pour cause de la position du pied dans la chaussure ce résultats ne peut pas être utilisé.

Une fois que les éléments d'intérêt ont été détectés, le déplacement et l'orientation du nuage de points ont été effectués en le considérant comme un corps rigide. Par conséquent, une correspondance pour tous les sujets est obtenue et cette correspondance est utilisée afin d'extraire les mesures anatomiques de chaque pied. La robustesse de l'extraction a été évaluée pour des orientations différentes du même pied.

Concernant les mesures extraites, en les comparant avec les mesures basées sur les points manuellement piqués des pieds européens, leurs différences ont été évaluées. L'orientation du pied ou la définition des mesures peuvent causer ces différences. Pour la campagne européenne, il n'y a pas d'étude sur la répétabilité et la reproductibilité de la méthode d'extraction des mesures. Les différences trouvées entre les deux extractions, sont du même ordre de grandeur que l'incertitude des algorithmes de traitement.

Pour les périmètres, la différence est plus grande que pour les autres mesures. Une explication réside peut-être dans la taille des périmètres : le périmètre métatarsal est deux à trois fois plus grand que la largeur du pied. De ce fait, la différence est *a priori* plus grande. Une autre explication est qu'un pied scanné avec le scanner Infoot a souvent des points intérieurs supplémentaires dû aux effets de la lumière. Pour le calcul des périmètres tous les points sont utilisés et un filtre est appliqué (section 4.4, page 45). Ce filtre peut détecter l'apparition d'un point à l'intérieur du pied et l'éliminer. Cependant, si plusieurs points apparaissent, ce filtre n'est pas efficace.

Pour éviter la détérioration des mesures de périmètres il est possible de calculer le périmètre convexe. En comparant les deux mesures, leur différence pourrait être un élément de détection des anomalies sur le calcul (exemple pour le périmètre d'entrée à la figure 9.11).

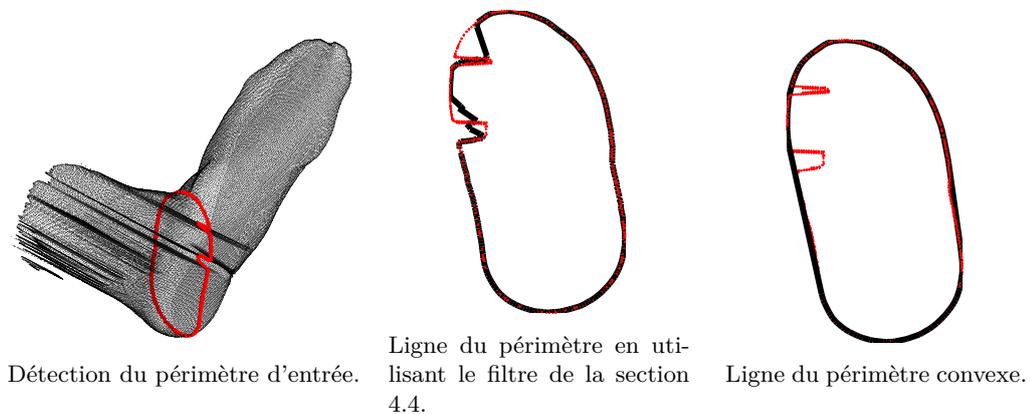


FIGURE 9.11 – Calcul du périmètre d'entrée sur un pied scanné avec bruit.

Les méthodes appliquées ont permis la comparaison de deux campagnes de mensuration utilisant deux méthodes différentes. Une comparaison par rapport aux mesures manuellement prises serait aussi souhaitable afin d'établir la relation entre toutes les méthodes. Les deux campagnes se sont déroulées avec une différence chronologique importante (cinq ans). Manquant de données scientifiques sur les évolutions de la taille et de la forme du pied des populations, l'hypothèse est faite que : durant cinq années, il n'y a pas eu d'évolution significative du pied qui puisse influencer les résultats de comparaison des populations des deux campagnes.

Un des grands avantages de l'application des méthodes d'extraction automatiques est la diminution du temps par rapport aux méthodes traditionnelles. Effectivement, l'extraction de mesures de 200 pieds scannés prend moins de 5min sur un ordinateur portable (qui n'a pas de caractéristiques spécifiques). Pour pointer 200 pieds scannés manuellement, une journée entière est nécessaire.

Les différences morphologiques ont été étudiées uniquement en position statique. Une analyse de la variation morphologique pendant le mouvement pourrait donner des résultats intéressants pour la conception de la chaussure.

Sur cette étude l'analyse morphologique est limitée aux mesures unidimensionnelles. Ces

mesures ont montré des résultats similaires à la littérature. Une analyse plus profonde est souhaitable afin de comparer les populations. Premièrement, l'application de l'analyse statistique multidimensionnelle aux mesures unidimensionnelles peut donner des détails sur l'évolution de la morphologie du pied.

Même si deux pieds ont des mesures identiques, ils n'ont pas forcément la même forme. En ne connaissant pas entièrement la morphologie et ses détails, des problèmes d'adaptation de la chaussure peuvent exister. Une autre analyse peut alors comprendre l'extraction de plusieurs mesures, l'analyse des courbures ou aussi l'étude des formes tridimensionnelles. En analysant directement le nuage de points, cette analyse est appliquée dans les prochains chapitres de cette thèse.

## 9.5 Conclusion

L'application de la méthodologie aux pieds scannés a montré l'intérêt de l'extraction des données anthropométriques par des procédures rapides et automatiques. Le nuage de points de chaque pied scanné a été traité afin d'avoir une correspondance anatomique pour tous les sujets.

Il a été prouvé que les algorithmes sont robustes et peuvent être utilisés afin d'analyser l'une des plus grandes bases de données qui existent dans la littérature. Il a été également possible de comparer deux campagnes de mensuration qui se sont déroulées en utilisant deux méthodes différentes.

Comme la diversité de la morphologie des pieds tridimensionnels est très importante, les erreurs dues à la main d'œuvre ont été limitées dans les cas où les potentiels erreurs d'extraction sont détectés. Les populations ont ensuite été comparées afin d'appliquer les résultats à la production de chaussures.



## Chapitre 10

# Anthropométrie des têtes

### 10.1 Introduction

La tête est l'unité principale du corps humain. Elle contient les éléments pour son bon fonctionnement, pour contrôler ses mouvements et ses sentiments. Lors d'un choc, elle est très fragile et ses blessures demeurent les plus graves blessures en contribuant à la mortalité et à la morbidité traumatique [38].

Pour la protéger, les casques ont été inventés premièrement pour un usage militaire. Sur la figure 10.1 apparaît un casque de la Grèce antique. Dès cette époque-là, il existe différents formes des casques (figure 10.2). "Les armes défensives ont été conçues pour être adaptées à l'anatomie du corps, pour assurer la liberté des mouvements et pour être faciles à utiliser et sécuritaires. Les armures ont été doublées à l'intérieur avec du cuir, du tissu ou de l'éponge afin de mieux s'ajuster au corps" <sup>1</sup>.

Même si le casque ajoute un élément de beauté et de style (voir aussi les bandes d'or à la figure 10.1), la raison principale pour le porter est la sécurité. Son efficacité est montrée dans des études épidémiologiques [6, 34] et biomécaniques [25]. Pour assurer cette fonction il faut qu'il soit adapté à la morphologie de la tête [83]. Cette morphologie est donnée dans les normes de sécurité de casques de protection. Cependant, dans la littérature il y a un grand intérêt pour des méthodes avancées pour la définition des dimensions de casques [42, 36].

Des différences entre les données anthropométriques des populations sont reportées dans la littérature [11, 87, 86]. Également, les normes des différents pays définissent des morphologies différentes pour tester les casques de protection. Néanmoins, à notre époque, la mobilité des personnes a augmenté. De ce fait, dans un même endroit vivent des personnes de différentes origines et morphologies.

Le premier but de ce chapitre est d'analyser l'anthropométrie des têtes pour concevoir des casques adaptés à la morphologie des personnes à l'international. Comme les mêmes bases de données et méthodes pourraient être utilisées pour analyser la morphologie de la face, deux



FIGURE 10.1 – Casque trouvé au nord de la Grèce antique. Vers 540 avant J.C. Musée archéologique de Thessalonique, Grèce.

1. Citation au musée archéologique de Thessalonique, Grèce.



FIGURE 10.2 – Casques de morphologie différente en Grèce antique. Vers 500 avant J.C. Musée archéologique de Thessalonique, Grèce.

nouvelles applications ont été créées : les masques et les lunettes. Pour garantir le confort, le maintien et l'étanchéité de ces produits, l'analyse morphologique a été conduite finalement aussi bien sur le haut du crâne que sur le visage.

À part la différence morphologique des personnes une autre problématique existe. Les casques, masques et lunettes, étant des produits rigides, ils sont difficilement adaptables à la morphologie de la tête dont les masses molles sont presque inexistantes. L'analyse en trois dimensions est alors indispensable pour cette application. Cependant, actuellement les systèmes de tailles et les formes de ces produits se créent en extrapolant des mesures unidimensionnelles.

Les objectifs de ce chapitre sont de

- qualifier et quantifier les différences anthropométriques de la tête entre les zones géographiques,
- les comparer avec la morphologie donnée sur les normes de sécurité,
- extraire les informations morphologiques pour la conception des produits adaptés à la majorité des personnes à l'international.

## 10.2 Base de données et Méthodes

### 10.2.1 Données normatives

La morphologie des têtes est mentionnée sur les normes concernant les casques de sécurité. Deux documents ont été analysés : la norme européenne EN 960 : 2006 [26] et la norme chinoise GB 24429 : 2009 [78]. Les deux définissent la morphologie des têtes. Cependant, la base de leurs morphologies n'a pas été trouvée dans la littérature. Pour qu'un casque puisse être mis en vente il faut que les tests normatifs soient respectés. La morphologie normative est à utiliser pour ces tests.

#### Norme européenne EN 960 : 2006

Dans la norme européenne la morphologie des têtes est donnée en trois dimensions (figure 10.4a). La tête est représentée comme une sphère et à chaque angle  $\theta$  et  $\phi$  le rayon sphérique est communiqué (figure 10.3). Les tailles sont séparées par tour de tête tous les centimètres de 44,5cm à 64,5cm (soit 21 tailles au total).

Tableau A.18 — Coordonnées polaires de fausse tête complète — tour de tête : 615

1 - 615	Angle H														
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180		
90	108,8	108,8	108,8	108,8	108,8	108,8	108,8	108,8	108,8	108,8	108,8	108,8	108,8		
80	107,7	107,6	107,6	107,4	107,6	107,8	108,1	108,5	109,3	109,3	108,5	109,2	109,2		
70	106,9	106,8	106,9	107,1	107,0	106,9	107,0	107,7	110,5	110,5	111,3	111,6	111,6		
60	107,6	107,6	107,7	107,1	105,8	104,8	104,9	106,1	110,7	110,7	112,8	112,9	112,8		
50	108,9	109,0	108,9	108,6	103,6	102,0	102,1	103,7	109,8	109,8	112,6	112,7	112,7		
40	109,6	109,6	109,3	105,1	100,8	98,5	98,6	100,6	108,1	108,1	111,5	111,8	111,8		
30	109,0	108,9	108,2	102,6	97,3	94,7	94,7	97,1	105,7	105,7	110,0	110,6	110,9		
20	107,7	107,2	105,9	99,3	93,7	90,8	90,6	93,2	102,7	102,7	108,0	109,3	109,7		
10	106,7	105,7	103,6	96,3	90,4	87,4	86,9	89,7	99,5	99,5	105,2	107,7	108,4		
<b>Plan de référence</b>	0	107,3	102,4	94,6	88,8	85,9	85,5	88,2	92,4	97,8	103,5	106,4	107,3		
10	108,9	107,8	101,9	91,5	83,7	80,9	81,1	83,6	87,5	93,6	98,5	101,9	102,5		
20	114,1	115,0	104,6	93,6	84,9	81,1	77,9	80,7	84,3	89,5	94,1	97,2	97,9		
30	123,8	125,0	109,1	96,5	89,0	85,4	78,1	80,2	83,8	88,9	93,2	95,3	94,4		
40	139,9	141,2	119,8	105,1	95,9	88,3	83,3	84,5	87,1	91,1	93,9	95,3	93,9		
46	154,3	155,7	127,0	112,7	103,1	93,2	89,6	90,7	92,3	95,3	97,1	98,2	97,6		
50	147,6	146,9	131,8	117,7	109,8	99,1	95,7	97,1	98,1	100,4	101,6	102,8	103,1		
52	143,4	142,6	131,7	119,9	113,8	102,7	99,5	101,0	101,9	104,0	104,9	106,3	106,9		
55	137,9	136,9	129,7	119,4	113,5	108,0	106,4	108,2	109,0	110,8	111,6	113,3	114,4		
60	130,2	128,9	127,2	118,3	120,1	120,9	121,8	124,2	125,3	127,1	128,1	130,3	131,8		
65	134,2	132,8	135,5	137,1	141,8	142,7	144,3	147,2	148,5	150,8	152,0	154,4	155,8		

V = Angle vertical au-dessus ou au-dessous du plan de référence.

H = Angle de la tranche verticale, mesuré dans le plan horizontal, depuis l'avant du plan sagittal médian. La ligne de la mâchoire doit être arrondie sur sa longueur d'un rayon nominal de 5 mm.

Angles en degrés, à mesurer avec une incertitude de mesure ne dépassant pas  $\pm 0,2^\circ$ .

Rayons en mm, avec une tolérance de  $\pm 0,5\%$  et mesurés avec une incertitude de mesure ne dépassant pas 0,1 mm. La base du cou doit être positionnée perpendiculairement à l'axe vertical.

NOTE La surface correspondant aux rayons indiqués en italique se situe au-dessous de la ligne de la mâchoire.

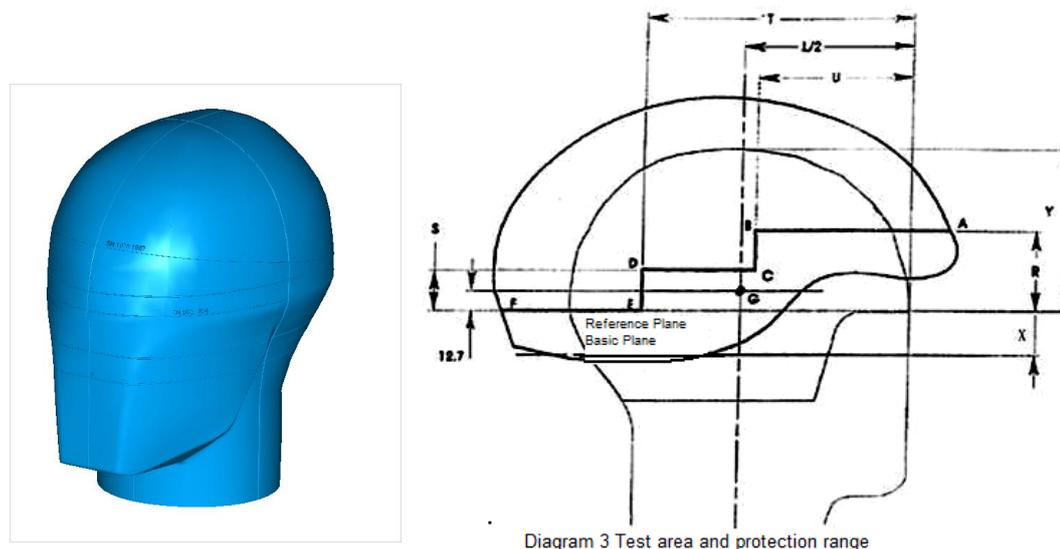
FIGURE 10.3 – Coordonnées polaires de fausse tête complète (exemple pour la fausse tête 615 mm) [26].

### Norme chinoise GB 24429 : 2009

Sur cette norme uniquement quelques mesures unidimensionnelles sont données pour décrire la morphologie de la tête (figure 10.4b). Quatre tailles sont mentionnées en séparant la population par tour de tête également (tableau 10.1).

Taille	Dimensions de tour de tête (mm)
Extra small	500-540
Small	540-560
Medium	560-580
Large	580-600

TABLE 10.1 – Tailles de casques dans la norme chinoise [78].



(a) Fausse tête donnée à la norme européenne [26].

(b) Dimensions de têtes données dans la norme chinoise [78].

FIGURE 10.4 – Morphologie des têtes dans les normes de sécurité.

### 10.2.2 Bases de données anthropométriques

Pour comparer les morphologies normatives avec les données anthropométriques des populations et pour définir les différences morphologiques entre les zones géographiques, deux bases de données tridimensionnelles ont été examinées.

La base de données chinoise a été achetée à SizeChina [1] et elle a été réalisée en Chine en 2008, sur des sujets adultes (à partir de 17 ans). Pour l'Europe, la base de données a été réalisée en 2010 dans des magasins DÉCATHLON en France, Espagne et Italie [15]. Les sujets sont des hommes, femmes et enfants à partir de 4 ans. Pour correspondre à la base de données chinoise, les enfants européens ont été séparés des adultes pour un âge inférieur à 17 ans.

Dans les deux campagnes de mensuration, les sujets portent un bonnet de bain qui écrase le volume des cheveux. Le nombre de sujets pour les deux bases de données est présenté dans le tableau 10.2.

Sexe	Base de données chinoise	Base de données européenne
Femmes	757	389
Hommes	743	408
Enfants de 4 à 16 ans	-	371

TABLE 10.2 – Nombre de sujets scannés.

Les deux bases de données ont été traitées manuellement [15] pour

- nettoyer le bruit dû à la lumière du scanner,
- sélectionner les principaux points anatomiques (figure 10.5).

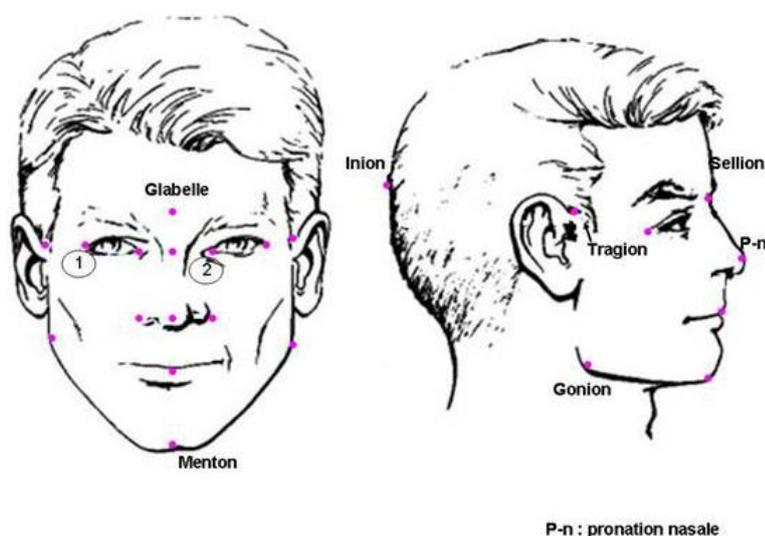


FIGURE 10.5 – Points anatomiques manuellement piqués [15].

### 10.2.3 Alignement des sujets scannés aux points anatomiques

La définition de l'origine des axes est très importante pour assurer le passage correct aux coordonnées sphériques. Ainsi, le centre devra être positionné au milieu de la tête.

#### Casques

Pour les casques, où le haut du crâne est la région intéressante, le centre de la sphère et l'origine des axes sont positionnés au milieu du segment glabèle - opisthocranion (figure 10.6).

Le premier alignement de la tête est fait manuellement (pendant la procédure de nettoyage du bruit) et assure l'horizontalité du scan (l'horizontalité du niveau de la figure 10.7a).

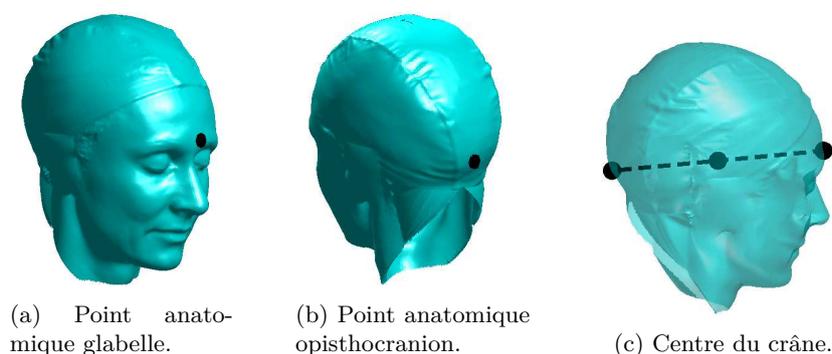


FIGURE 10.6 – Définition de l'origine des repères pour l'application aux casques.

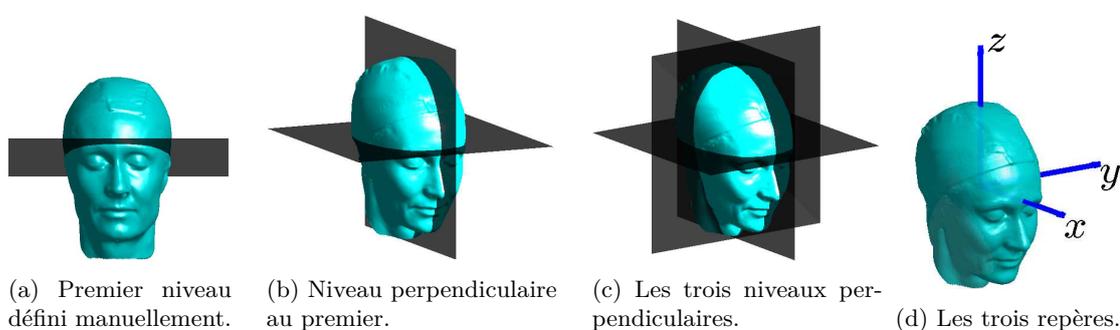


FIGURE 10.7 – Orientation de la tête.

Le deuxième niveau passera par les points de glabelle et opisthocranion et il est perpendiculaire au premier (figure 10.7b). Le troisième, est par défaut perpendiculaire aux deux autres (figure 10.7c).

Les trois axes de la matrice de rotation sont (figure 10.7d) :

$$x_{axe} = \frac{[x'_{gl} - x'_{op}, y'_{gl} - y'_{op}, z'_{gl} - z'_{op}]}{|[x'_{gl} - x'_{op}, y'_{gl} - y'_{op}, z'_{gl} - z'_{op}]|}$$

$$z_{axe} = \frac{x_{axe} \wedge [0, 1, 0]}{|x_{axe} \wedge [0, 1, 0]|}$$

$$y_{axe} = \frac{z_{axe} \wedge x_{axe}}{|z_{axe} \wedge x_{axe}|}$$

et la matrice de rotation est :

$$M = [\overrightarrow{x_{axe}} \quad \overrightarrow{y_{axe}} \quad \overrightarrow{z_{axe}}]$$

### Masques et lunettes

La même orientation de tête pour les casques a été appliquée pour la conception des masques et lunettes. Pour minimiser les écarts de la partie avant de la tête, l'origine a été déplacée derrière la glabelle en restant sur l'axe glabelle - opisthocranion. Ce déplacement a été identique pour tous les sujets et de ce fait, le point de la glabelle et donc la région intéressante pour ces produits là, sont restés fixes. Ce déplacement a été réalisé pour pouvoir appliquer correctement des coordonnées sphériques. Après une première analyse des dimensions de la tête, le déplacement a été défini à  $10\text{cm}$  pour assurer une représentation correcte du visage projeté sur une sphère, pour les différentes tailles de tête.

#### 10.2.4 Mesures unidimensionnelles

Une fois que les têtes ont été alignées, le calcul de toutes les mesures a été réalisé selon la méthode présentée dans la section 4.4 et l'équation 4.1.

### Casques

Six mesures ont été extraites automatiquement pour les casques (tableau 10.3). Ces mesures ont été calculées pour donner les premières informations sur la géométrie du crâne.

Suivant la norme [56] le tour de tête est "le périmètre horizontal maximal du crâne, relevé au-dessus des oreilles". De manière automatique ce tour a été calculé à partir des points qui se trouvent à une distance de  $1\text{cm}$  au-dessus du niveau horizontal qui est défini à la figure 10.7. La distance de  $1\text{cm}$  a été choisie après différents essais pour obtenir le périmètre maximal en évitant la zone des oreilles.

### Masques et lunettes

Pour les masques et lunettes les mesures unidimensionnelles (tableau 10.4) sont obtenues par la distance des points manuellement piqués. Ces mesures donnent des informations sur la morphologie du visage et sont indispensables pour la conception des produits.

La largeur de la tête est la mesure principale pour les lunettes car elles se posent au-dessus des oreilles. Pour les masques ordinaires, c'est la distance entre les ectocanthions qui définit la largeur du masque et le positionnement correct de sa jupe sur le visage. Pour le cas spécifique du masque intégral, le positionnement de la jupe est aussi lié à la hauteur de la face.

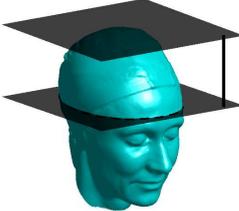
Mesure 1D	Explication	Pictogramme
Tour de tête	Périmètre horizontal maximal du crâne [56]	
Longueur	Distance dans le plan sagittal entre la glabellle et le point le plus postérieur du crâne [55]	
Largeur	Largeur maximale de la tête au-dessus des oreilles, mesurée perpendiculairement au plan sagittal [55]	
Hauteur du crâne	Hauteur maximale de la tête à partir du plan du tour de tête mesurée perpendiculairement au plan horizontal	
Arc longitudinal	Longueur de l'arc allant de la glabellle à l'opisthocranion	
Arc transversal	Longueur de l'arc traversant l'axe latéral au-dessus des oreilles	

TABLE 10.3 – Mesures 1D pour application aux casques.

Mesure 1D	Explication	Pictogramme
Largeur	Largeur maximale de la tête au-dessus des oreilles, mesurée perpendiculairement au plan sagittal [55]	
Distance entre les ectocanthions	Distance entre les points où les extrémités externes des paupières supérieure et inférieure se rencontrent	
Hauteur de la face	Distance entre le nasion et le sellion, sujet bouche fermée	

TABLE 10.4 – Mesures 1D pour application aux masques et lunettes.

### 10.2.5 Sélection des sujets

Une base de données est compatible sur le plan international si elle respecte la norme ISO 20685 [54]. Ce document mentionne l'erreur maximale admissible entre la valeur obtenue par numérisation et la valeur mesurée de manière traditionnelle. Pour les dimensions de la tête avec les cheveux, l'erreur maximale est de  $2mm$ . Sur les sujets chinois, la différence pour le tour de tête est montrée dans la figure 10.8. Cette différence arrive jusqu'à  $60mm$ . Le même type de distribution est obtenu également pour la différence sur la largeur et la longueur de tête.

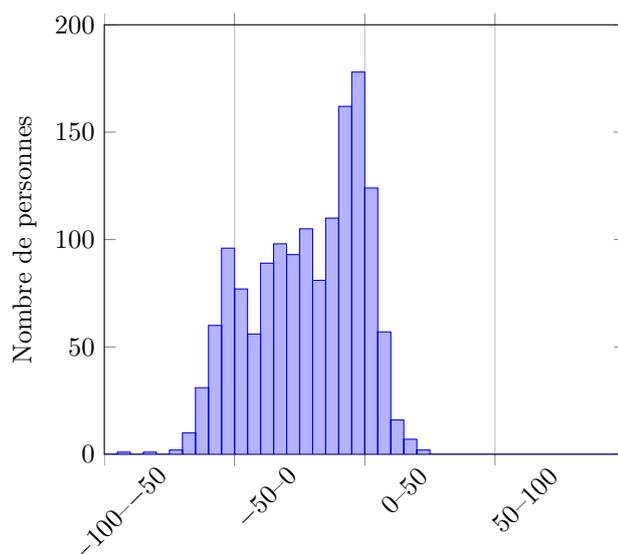


FIGURE 10.8 – Différence de tour de tête manuellement mesuré et le tour de tête obtenue par numérisation des sujets chinois (en millimètres).

Après une analyse plus profonde cette différence dépend de la ville où le sujet a été scanné. En considérant que

- les détenteurs de la base de données ne sont pas en mesure de donner une réponse pour cette différence,
- les valeurs d'erreur de cette norme [54] sont souvent discutées dans la littérature [45],
- les sujets sont scannés avec un bonnet fin,

il a été décidé d'utiliser seulement les sujets de quatre villes sur six ( $3/5$  des sujets scannés) qui ont un écart maximal de  $30mm$ . Sur ces villes, la différence de 90% des sujets est de moins de  $26mm$ . Cette valeur correspond à l'épaisseur du bonnet ( $2mm$ ) avec les cheveux écrasés ( $2mm$ ) et aussi à l'erreur maximale admissible ( $2mm$ ) :

$$\begin{aligned}
 \text{tour} &= 2\pi R + \text{erreur} = 2\pi(r_{\text{tête}} + r_{\text{bonnet}} + r_{\text{cheveux}}) + \text{erreur} = 2\pi r_{\text{tête}} + 2\pi \cdot 2 + 2\pi \cdot 2 + 2 \\
 &\approx \text{Tour de tête} + 26mm
 \end{aligned}$$

Le tour de tête manuel n'a pas été pris pendant la campagne de mensuration de la base de données européenne. Cependant, les mesures suivent une distribution normale et les tailles des têtes sont cohérentes avec les ventes de casques dans les magasins DÉCATHLON. Aussi, le scanner a été vérifié avant et après la campagne de mensuration.

### 10.2.6 Coordonnées d'image et digitalisation

Comme présenté dans les sections 5.1 et 5.2 les coordonnées cartésiennes des têtes ont été transformées en coordonnées sphériques. Pour le maillage commun il a été choisi la résolution  $[100 \times 100]$  *points* pour les casques et  $[400 \times 400]$  *points* pour les masques et lunettes. Pour les casques la résolution était suffisante pour la représentation de sa surface. Pour les masques et lunettes la résolution a été choisie plus élevée pour représenter de manière détaillée les éléments du visage (figure 10.9).

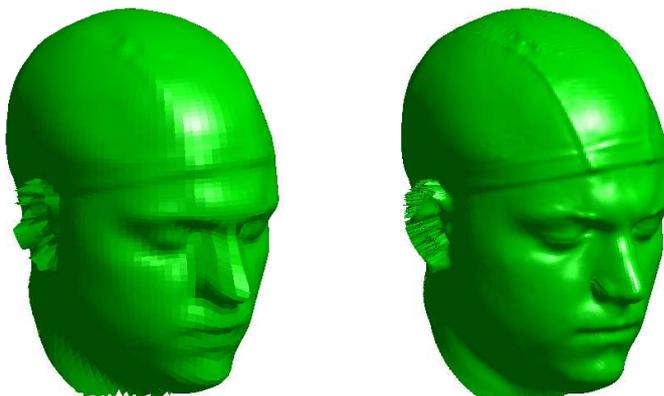


FIGURE 10.9 – Coordonnées discrétisées pour la même tête pour l'application aux casques (à gauche) et aux masques et lunettes (à droite).

### 10.2.7 Optimisation de la position relative des sujets

Comme il a été expliqué à la section 5.3, la position relative des sujets est optimisée pour améliorer la superposition correcte de tous les sujets. La région d'intérêt qui est sélectionnée pour l'application aux casques est montrée à la figure 10.10. Pour cette application les deux points anatomiques qui définissent les repères de l'orientation (glabelle et opisthocranion) sont optimaux pour la conception d'un casque. Cependant l'étape de corrélation est appliquée pour éliminer des erreurs potentielles dans la procédure du pointage manuel. Ainsi, la corrélation assurera la symétrie du visage et également la position des yeux au même endroit pour tous les sujets. C'est pourquoi la région sélectionnée couvre le nez et une partie des deux yeux.

Pour l'application des masques et des lunettes il existe une autre problématique. Le point d'appui sur le visage est primordial. La région alors sélectionnée est recentrée autour de ce point (figure 10.10). Ce point anatomique (sellion), sélectionné initialement pour la définition de l'origine du repère, est abandonné à cause de la grande variabilité inter-individu de sa profondeur. Pour le masque intégral, tout le visage a été choisi pour optimiser la position relative des sujets.

### 10.2.8 Analyse en composantes principales

Pour analyser l'anthropométrie des têtes, la méthode d'ACP (présentée à la section 6.2.1) a été appliquée. Elle a été mise en place sur les mesures unidimensionnelles ainsi que sur les points tridimensionnels.

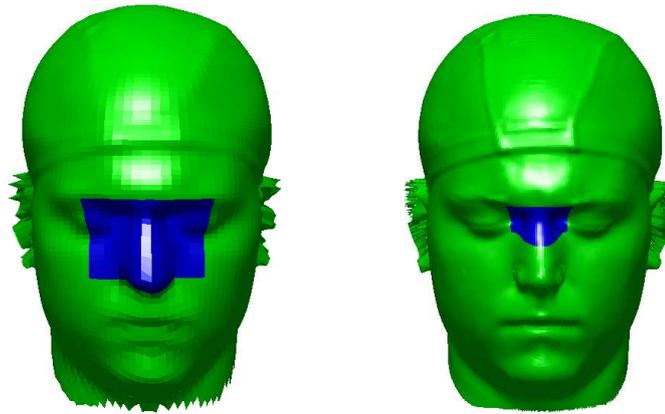


FIGURE 10.10 – Région d'intérêt sur la tête pour l'optimisation de la position relative des sujets pour l'application aux casques (à gauche) et aux masques et lunettes (à droite).

### Sur les mesures unidimensionnelles

Sur les mesures unidimensionnelles elle a été mise en place pour examiner les relations entre les mesures qui sont utilisées pour la conception des casques. Une analyse a été réalisée pour chacune des populations suivantes :

- population de la base de données européenne,
- population de la base de données chinoise,
- population "mondiale" (combinaison des deux bases de données).

Pour les masques et lunettes, seulement trois mesures ont été examinées, donc l'ACP n'a pas été mise en place.

### Sur la morphologie tridimensionnelle

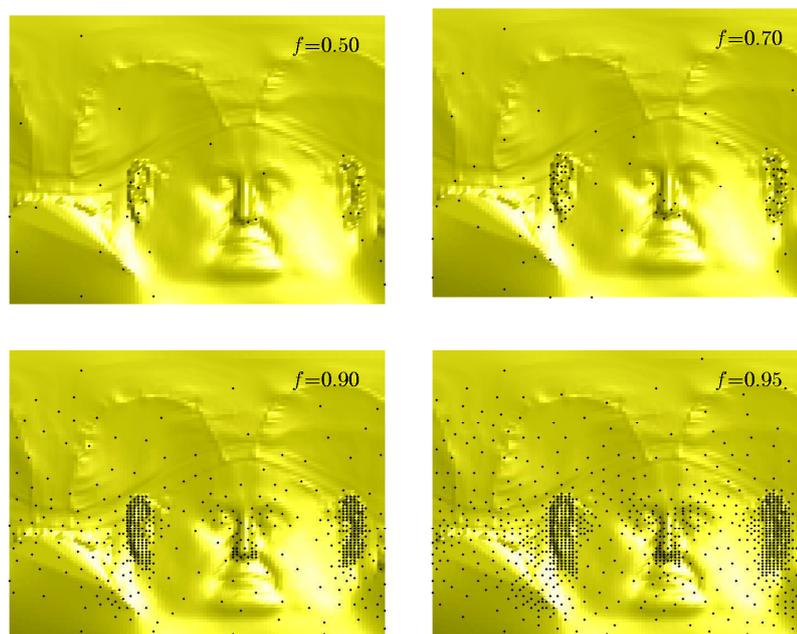
Pour développer la méthode d'application de l'ACP aux données tridimensionnelles, seulement la population féminine a été analysée pour la partie tête et seulement pour l'application aux casques. Les sujets ont été alignés et l'analyse a été appliquée sur les points correspondants des sujets sur le maillage commun.

Dans la section 6.2.2, le besoin de choisir les points à analyser a été présenté (choix des points dé-corrélés). Pour le cas des casques, la procédure du schéma 6.4 a été premièrement appliquée sur toute la tête. Les résultats de cette étape sont présentés à la figure 10.11. A première vue, la plupart des points appartiennent aux régions du bruit des têtes projetées (oreilles, cou et bords). Comme attendu, plus de points ont été calculés dé-corrélés avec un seuil  $f$  plus élevé.

En analysant la morphologie de la tête pour l'appliquer aux casques, uniquement la partie qui touche le casque est intéressante. Il est alors plus pertinent de sélectionner les points dé-corrélés de la partie haute et arrière du crâne. Pour cela, l'algorithme du schéma 6.4 pour l'obtention des points dé-corrélés a été appliqué finalement uniquement sur cette partie (figure 10.12). Le nombre de points calculés dé-corrélés par rapport au seuil  $f$  est donné au tableau 10.5.

Pour choisir le seuil  $f$  à utiliser, l'ACP a été appliquée sur les points de différents  $f$ . Pour des coefficients qui sont inférieurs à 0.8 ( $f < 0.8$ ) le nombre de points n'est pas suffisant avec des zones non-homogènes sur la tête (figure 10.13a).

Pour le coefficient 0.8 l'explication de la première valeur propre était de 41.5%. Pour  $f = 0.95$  et  $f = 0.98$  cette valeur était de 44.6% et 45.4% respectivement. La différence sur l'explication

FIGURE 10.11 – Points dé-corrélés de différents seuils  $f$  sur toute la tête.

de la première valeur propre est alors élevée entre  $f = 0.8$  et  $f = 0.95$ . Elle est moins élevée entre  $f = 0.95$  et  $f = 0.98$ . Étant donné que pour  $f = 0.98$  le nombre de points dé-corrélés est plus que double, il a été choisi  $f = 0.95$  (figure 10.13b) pour

- optimiser le temps de calcul,
- pouvoir parcourir l'analyse sur un ordinateur type "Intel Core i5, 3.16Go de RAM" (ordinateur typique),
- garantir un niveau de précision suffisant.

$f$	nombre de points dé-corrélés
0.5	8
0.6	10
0.7	18
0.8	30
0.9	74
0.95	172
0.98	472

TABLE 10.5 – Nombre des points dé-corrélés par rapport au seuil  $f$  sur la partie de casque.

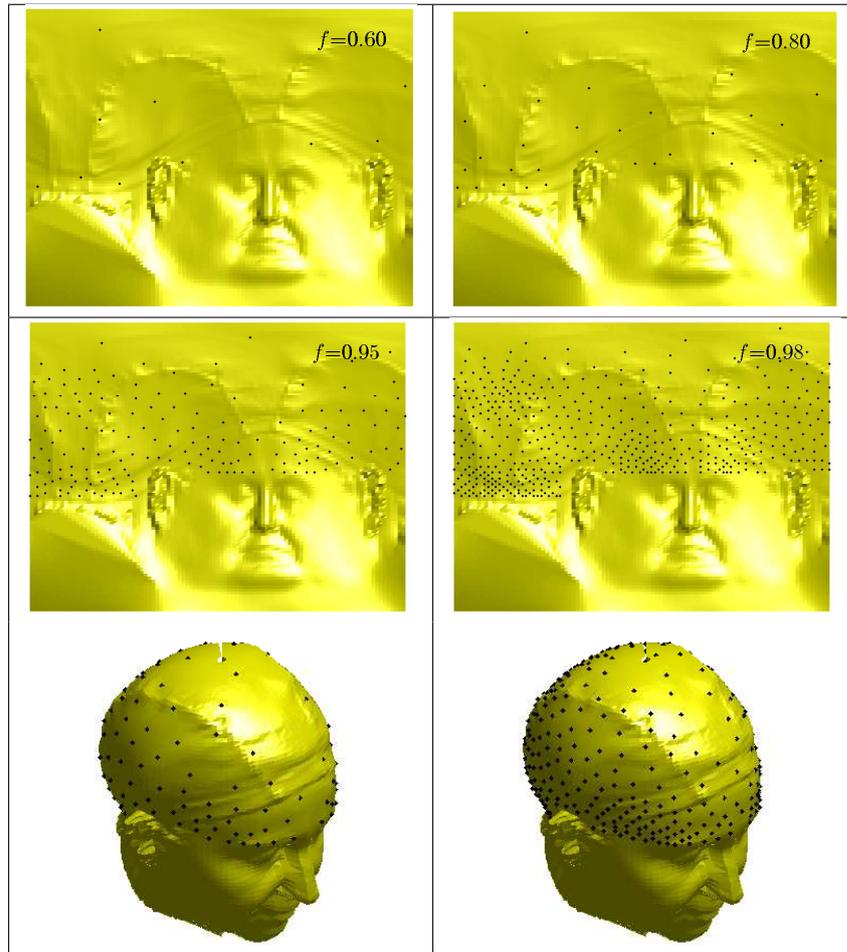


FIGURE 10.12 – Points dé-corrélés de différents seuils  $f$  sur la zone d'intérêt.



(a) Non-homogènes avec  $f = 0.8$



(b) Homogènes avec  $f = 0.95$

FIGURE 10.13 – Régions des coordonnées des variables sur la zone du crâne.

## 10.3 Résultats

### 10.3.1 Mesures unidimensionnelles

#### Casques

Les mesures présentées à la section 10.2.4 et au tableau 10.3 ont été étudiées. La corrélation de ces mesures est montrée au tableau 10.6. Afin d'étudier les mesures les plus représentatives sur la dispersion des résultats, les mesures les plus dé-corrélées sont à analyser. Aussi, le tour de tête devra être utilisé car il est l'élément fondamental pour la séparation normative. La mesure la plus dé-corrélée est la hauteur du crâne. Seulement, la hauteur présente une différence absorbée par la matière des casques et la position du casque sur la tête : le casque peut être posé sur le front de la tête à différentes hauteurs sans gêner la vision ou le confort. Les prochaines mesures dé-corrélées avec le tour de tête sont les arcs longitudinal et transversal. Cependant, en étant fortement corrélés avec la hauteur, ils ne vont pas être étudiés. La mesure la moins corrélée qui va être étudiée est alors la largeur.

	Tour de tête	Longueur	Largeur	Hauteur	Arc longitudinal	Arc transversal
Tour de tête	1					
Longueur	0.85	1				
Largeur	0.61	0.17	1			
Hauteur	0.34	0.45	-0.04	1		
Arc longitudinal	0.57	0.73	0.01	0.89	1	
Arc transversal	0.52	0.53	0.20	0.93	0.89	1

TABLE 10.6 – Coefficients de corrélation entre les mesures unidimensionnelles pour les casques.

La distribution du tour de tête et la dispersion de la largeur sont présentées sur la figure 10.14. A titre d'information, la hauteur est également présentée. Dans ces graphiques, la différence entre les sexes est confirmée concernant la taille. Les hommes ont significativement des têtes plus grandes que les femmes ( $p < 0.001$ ). Cependant, il n'y a pas une séparation des deux sexes et les tailles sont continues.

Concernant la largeur, pour le même tour de tête, elle peut différer de  $20mm$ . Néanmoins, si les deux populations sont examinées séparément, cette différence diminue à  $10mm$ . Le rapport de la largeur par tour de tête des adultes des deux populations, est montré sur la figure 10.15. Leur différence est significative ( $p < 0.001$ ). Une deuxième analyse entre les hommes et les femmes a montré des différences significatives mais beaucoup moins élevées par rapport aux différences des personnes du même sexe : moins de 1% de différence entre les sexes contre environ 7% de différence à l'intérieur du même sexe.

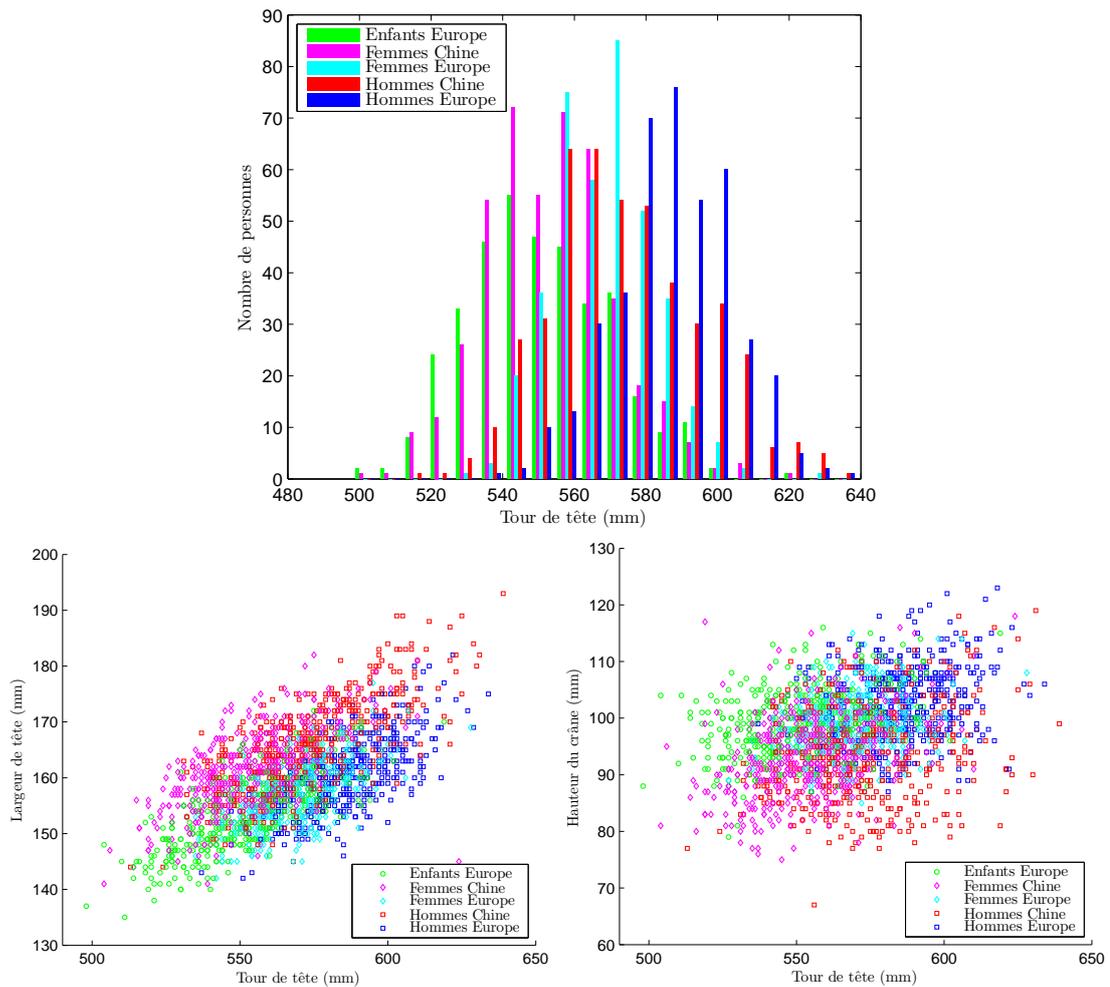


FIGURE 10.14 – Distribution du tour de tête et dispersion de largeur et hauteur du crâne.

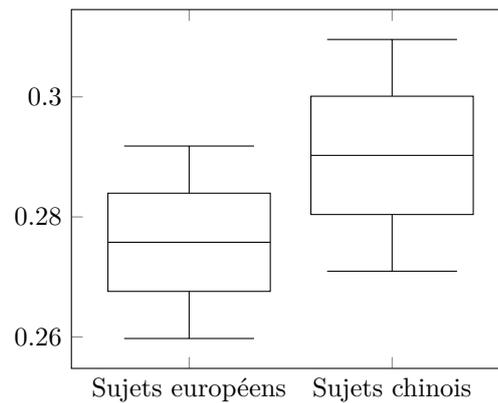


FIGURE 10.15 – Rapport de largeur par tour de tête pour les sujets adultes. Les sujets européens sont significativement moins larges que les sujets chinois (t-test avec  $p < 0.001$ )

### Comparaison avec les données normatives

La morphologie normative européenne n'a pas de différence significative en la comparant avec la base de données européenne (concernant la largeur par tour de tête). Son placement relatif avec les morphologies scannées apparaît sur le premier graphique de la figure 10.16. Sur le deuxième graphique de cette figure apparaissent les données de la morphologie chinoise. Les trois petites tailles normatives sont significativement moins larges que les sujets scannés ( $p < 0.001$ ). La quatrième taille est significativement plus large que les sujets scannés ( $p < 0.001$ ). Ces résultats ont été obtenus par le test d'homogénéité qui compare un échantillon avec les caractéristiques de la population (ici, la norme est définie comme la population).

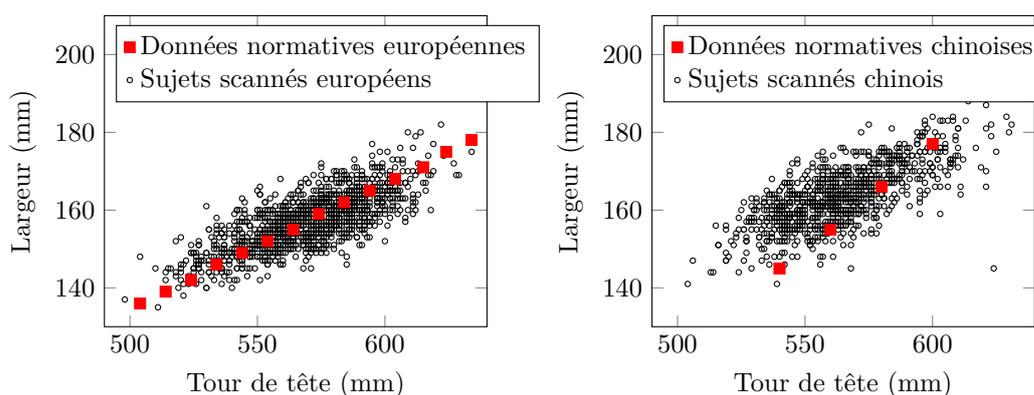


FIGURE 10.16 – Morphologie des données normatives et des sujets scannés.

### Masques et lunettes

Les dispersions des mesures du tableau 10.4 sont montrées sur la figure 10.17. La corrélation de ces mesures n'est pas élevée ( $r_{max} = 0.46$ , tableau 10.7). De ce fait, l'analyse tridimensionnelle est à étudier de manière détaillée.

	Largueur	Distance entre les ectocanthions	Hauteur de la face
Largueur	1		
Distance entre les ectocanthions	0.21	1	
Hauteur de la face	0.46	0.05	1

TABLE 10.7 – Coefficients de corrélation entre les mesures unidimensionnelles pour les masques et lunettes.

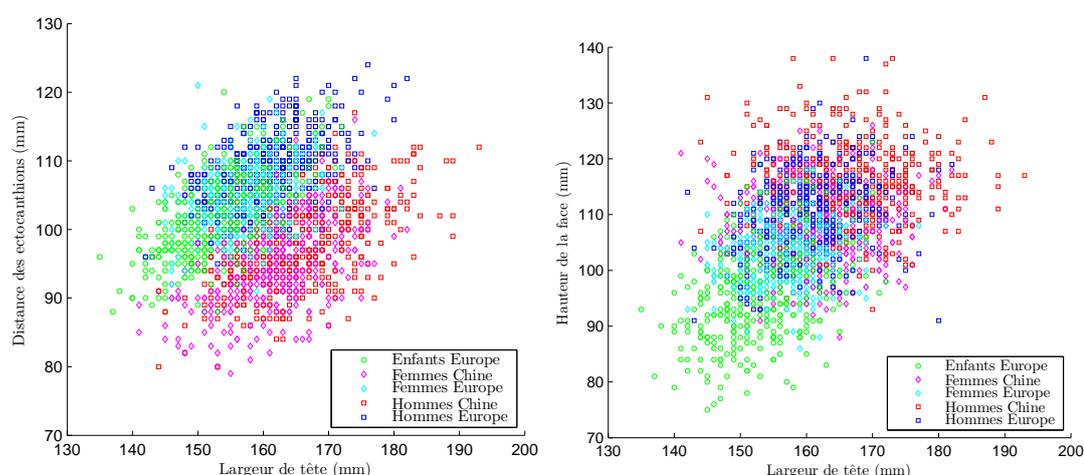


FIGURE 10.17 – Dispersion de la distance entre les ectocanthions et de la hauteur de la face.

### 10.3.2 Analyse en composantes principales

#### Aux mesures unidimensionnelles

L'ACP a été appliquée aux mesures unidimensionnelles sur les trois populations (européenne, chinoise, combinaison des deux). Les vecteurs et valeurs propres, et les coordonnées des individus et des variables sont calculés selon la méthodologie présentée dans la section 6.2.1. Les résultats des trois cas sont similaires :

- la première valeur propre explique plus de 60% la morphologie des sujets (figure 10.18),
- en utilisant deux valeurs propres l'explication atteint  $\approx 85\%$ ,
- sur le premier facteur calculé, toutes les variables ont le même signe (figure 10.19).

Le même signe des variables sur un axe, signifie l'effet de la taille : si une mesure augmente, les autres mesures suivent cette augmentation. Plus simple, pour une grande tête, toutes les mesures seront plus grandes que les mesures d'une petite tête. Cependant la deuxième valeur propre, qui explique plus de 20% les résultats, a un effet de forme (variables de différent signe). Sur ce facteur, la hauteur et la largeur sont des variables écartées dans ses deux limites. Par conséquent, autant la largeur augmente, la hauteur diminue et inversement.

Par les coordonnées des individus (figure 10.19) il est obtenu que :

- les enfants ont une tendance d'avoir des têtes de plus petite taille que des adultes (leurs coordonnées influent négativement le premier facteur),
- leur crâne est relativement plus haut (leurs coordonnées sont du même signe que la variable hauteur sur le deuxième facteur),
- cette différence est significative (t-test sur les coordonnées du deuxième facteur avec  $p < 0.001$ ),
- les têtes chinoises sont plus petites que les têtes européennes (t-test sur les coordonnées du premier facteur avec  $p < 0.001$ ),
- les têtes chinoises sont plus larges et moins hautes que les têtes européennes (t-test sur les coordonnées du deuxième facteur avec  $p < 0.001$ ),
- les femmes ont des têtes de plus petite taille que les hommes ( $p < 0.001$ ),
- il n'y a pas des différences significatives entre les hommes et les femmes européennes sur leur forme (t-test sur les coordonnées du deuxième facteur),
- entre les hommes et les femmes chinoises il y a une différence significative sur le deuxième

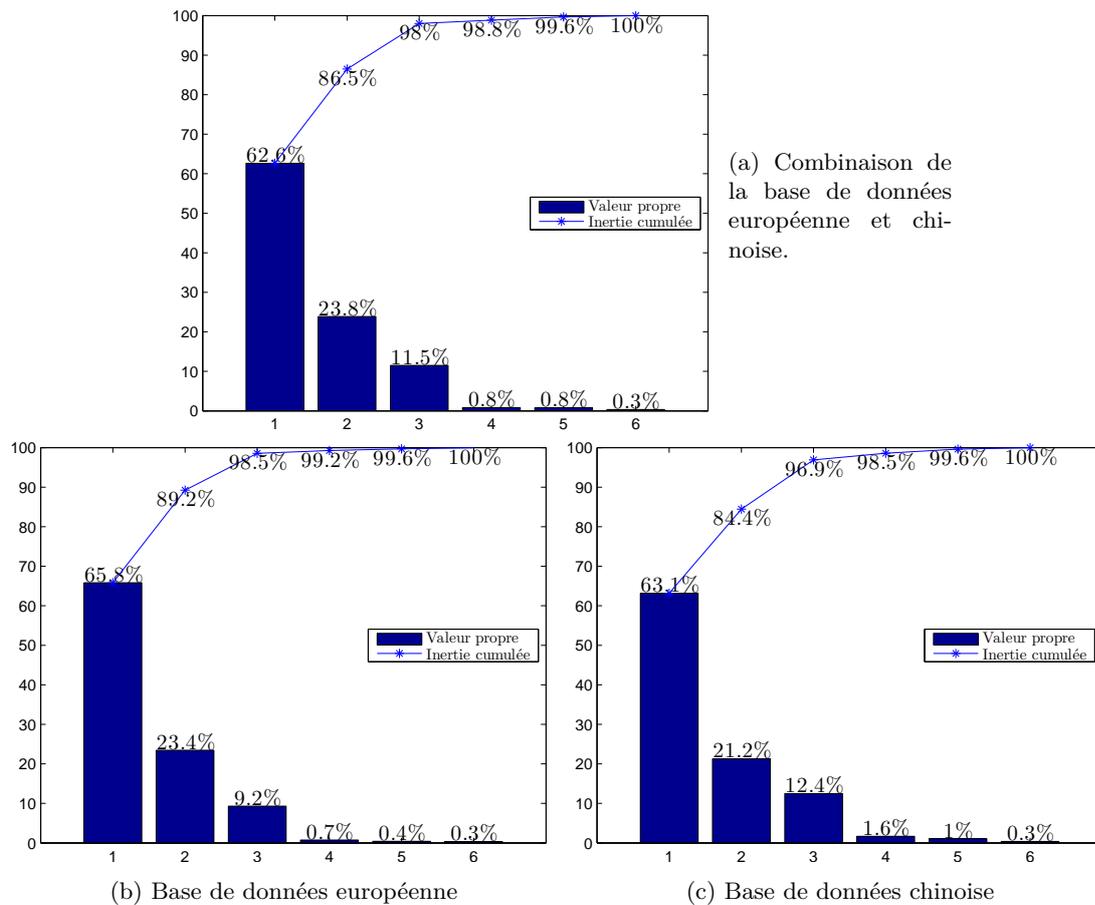
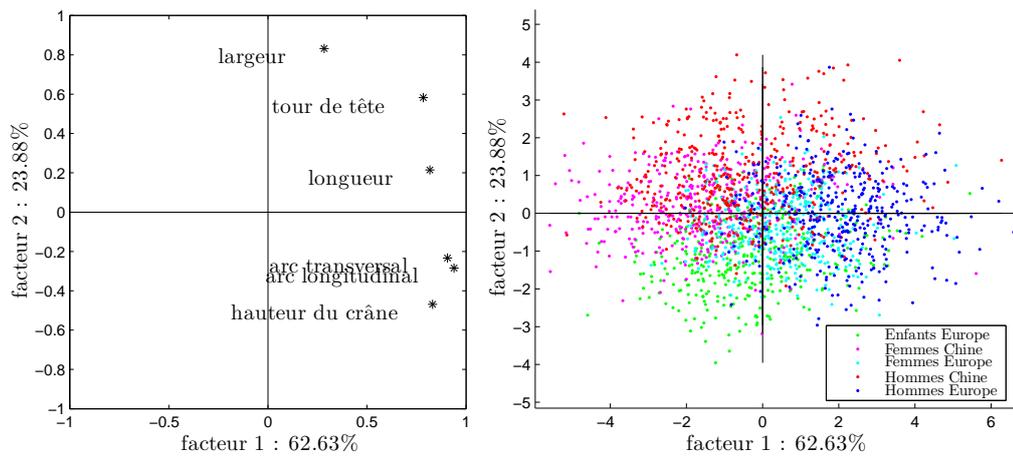


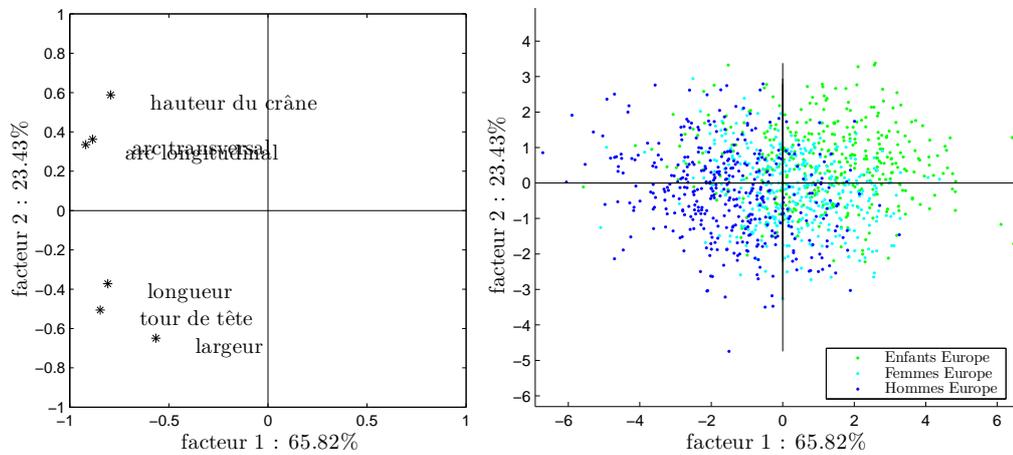
FIGURE 10.18 – Valeurs propres de l’analyse en composantes principales des mesures unidimensionnelle de la tête.

facteur ( $p < 0.001$ ).

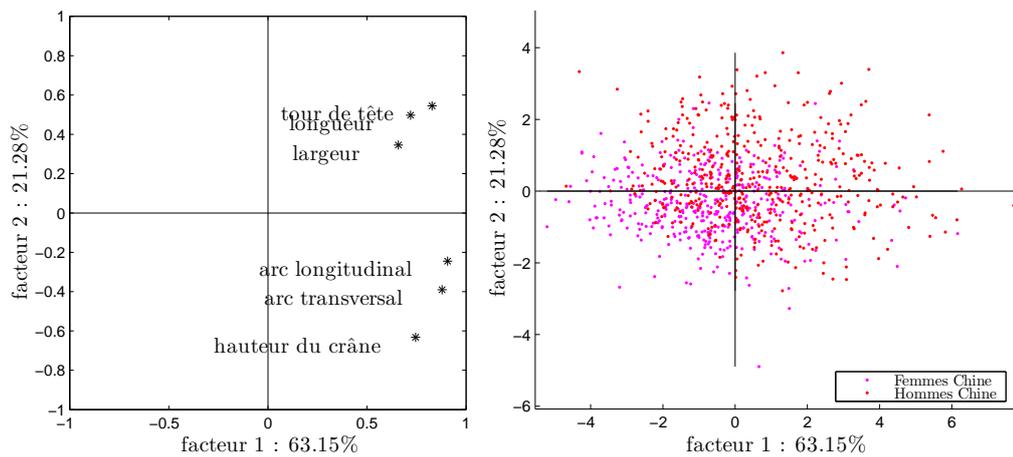
En étudiant les rapports de la largeur et de la hauteur par tour de tête, cette différence est environ  $2mm$  pour le même tour de tête. Les femmes chinoises ont, par conséquent, des têtes plus larges de  $2mm$  et plus hautes de  $2mm$  par rapport aux hommes chinois du même tour de tête. Les femmes européennes ont également des têtes plus larges de  $1mm$  par rapport aux hommes européens du même tour de tête. Cependant, il n’y a pas de différence significative pour la population européenne concernant le rapport de la hauteur par tour de tête. C’est probablement la raison de non-apparition des différences significatives sur le deuxième facteur.



(a) Combinaison de la base de données européenne et chinoise.



(b) Base de données européenne.



(c) Base de données chinoise.

FIGURE 10.19 – Coordonnées des variables et des individus de l'analyse en composantes principales des mesures unidimensionnelles de la tête.

### À la morphologie tridimensionnelle

Contrairement à l'analyse sur les mesures unidimensionnelles, pour atteindre 85% d'explication en analysant les points tridimensionnels, il faut utiliser plus de cinq facteurs (figure 10.20). Aussi, le premier facteur explique moins de 50% la morphologie des sujets.

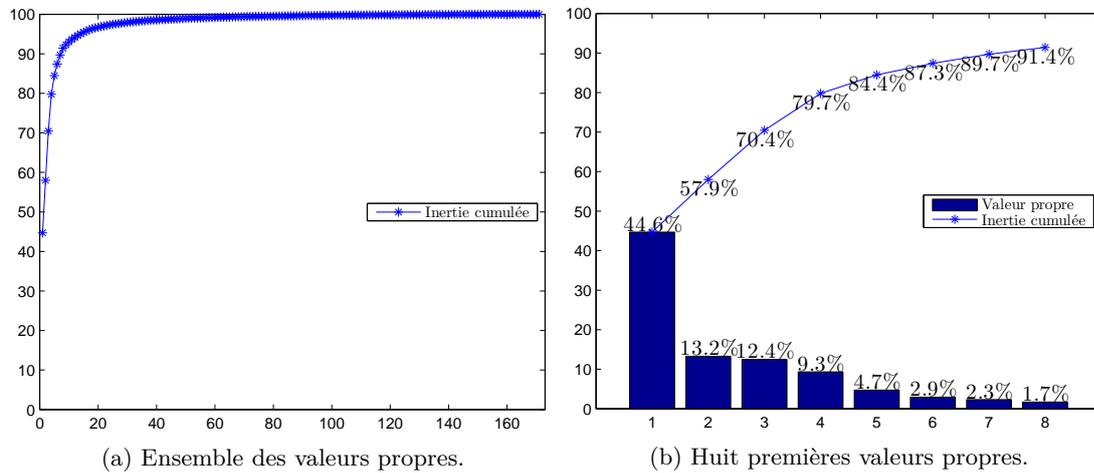


FIGURE 10.20 – Valeurs propres de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la tête.

Sur le premier facteur calculé, toutes les variables ont le même signe (figure 10.21) qui indique l'effet de la taille. En observant les variables sur chaque région de la tête (figure 10.22), la région de la largeur est moins affectée par ce premier facteur : quand la taille globale de la tête augmente, la région de la largeur augmente également, mais moins fort que les autres régions.

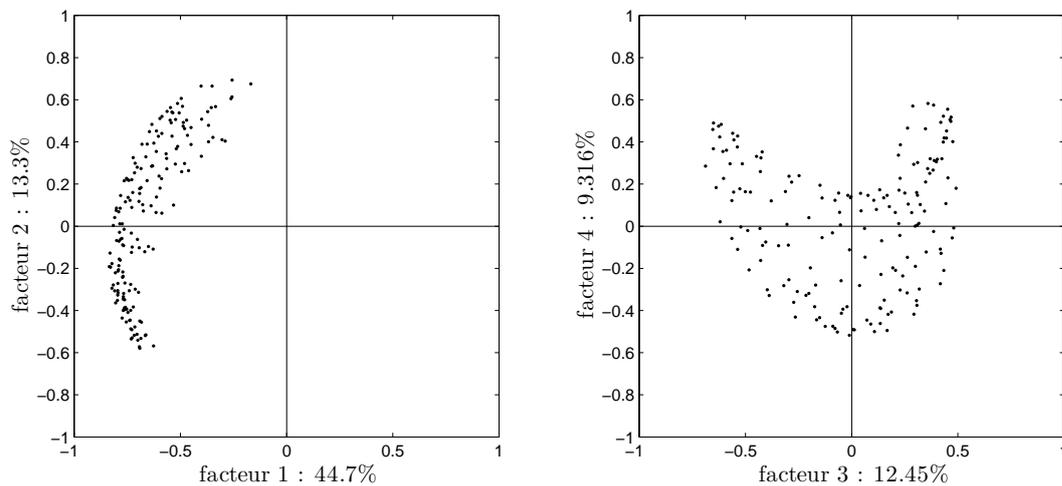


FIGURE 10.21 – Coordonnées des variables de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la tête sur les quatre premiers facteurs projetés sur les axes.

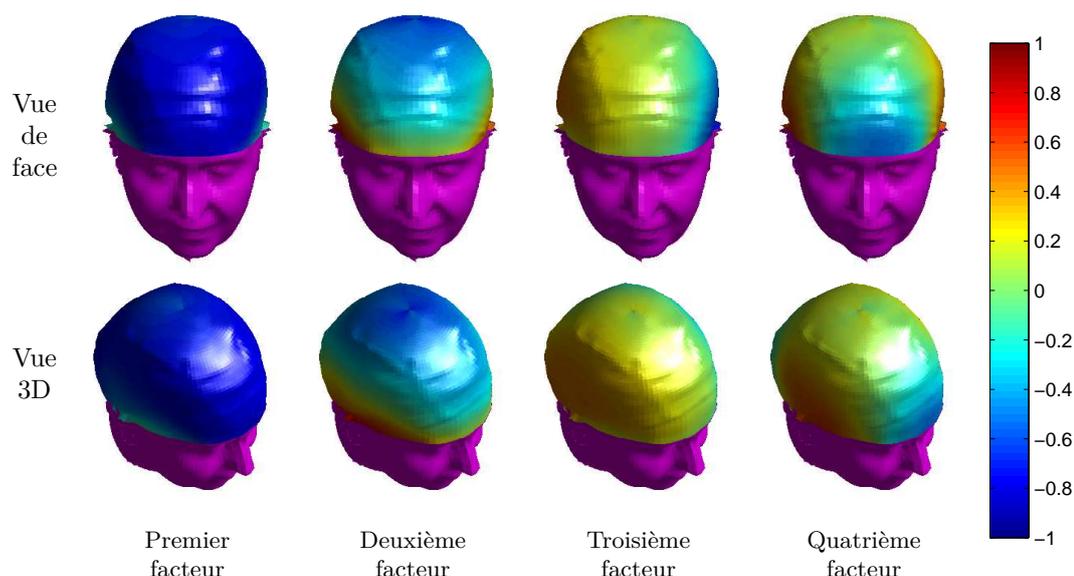


FIGURE 10.22 – Coordonnées des variables de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la tête projetés sur la tête. Pour chaque facteur, les régions colorées proche du **bleu** suivent une morphologie différente des régions colorées proche du **rouge**. Par exemple, le résultat du deuxième facteur est l'élargissement de la partie haute du crâne quand les parties latérales s'amoindrissent.

Les facteurs suivants montrent un effet de forme. Avec le deuxième facteur il est montré que la région haute de la tête suit une morphologie différente de la région autour du tour de tête. Cette différence de morphologie est plus nette sur les côtés que sur le front de la tête. Ce résultat est obtenu aussi par l'analyse des mesures unidimensionnelles.

Sur le troisième facteur, une asymétrie de la tête est visible. Les points de la tête qui influent fortement cet axe (figure 10.23) ont été examinés pour tous les sujets. La coordonnée de la troisième variable de ces points appartient au cinquième et quatre-vingt cinquième centile des coordonnées.

Supposons que les points de la figure 10.23 sont distribués de manière équilibrée dans les deux côtés de la tête. À chaque côté, la moyenne des rayons sphériques de ces points est calculée. Les coefficients de corrélation, entre eux et les coordonnées des individus sur le troisième axe sont :

- $r = -0.97$  entre le rapport des moyennes des deux côtés et les coordonnées des individus,
- $r = -0.97$  entre la différence des deux côtés et les coordonnées des individus,
- $r = -0.15$  entre la somme des moyennes des deux côtés et les coordonnées des individus.

Le troisième facteur n'est pas influencé par la "largeur" de la tête. Les coefficients de corrélation sont élevés pour la différence des deux côtés. Les caractéristiques statistiques de cette différence sont :

- médiane =  $-8.0mm$ ,
- 5<sup>e</sup>centile =  $-15.2mm$ ,
- 95<sup>e</sup>centile =  $0.3mm$ .

Le troisième facteur explique alors le degré d'asymétrie latérale de la tête, cependant, en général, le côté droit est plus développé que le côté gauche.

Le quatrième facteur a une forme ressemblant au deuxième facteur avec plus de similarité



FIGURE 10.23 – Effet de l’asymétrie de la tête obtenue pour le troisième facteur. Points du maillage commun sur la tête (côté droite et côté gauche de la tête) qui influent fortement le troisième facteur.

entre les côtés et la partie haute de la tête.

Les résultats obtenus par les coordonnées des individus (figure 10.24) concernant les populations, sont similaires aux résultats de l’analyse des mesures unidimensionnelles :

- les Chinoises ont des têtes plus petites que les Européennes,
- les Chinoises ont des têtes plus larges et moins hautes que les Européennes.

Concernant la morphologie tridimensionnelle

- les Européennes sont plus asymétriques que les Chinoises.

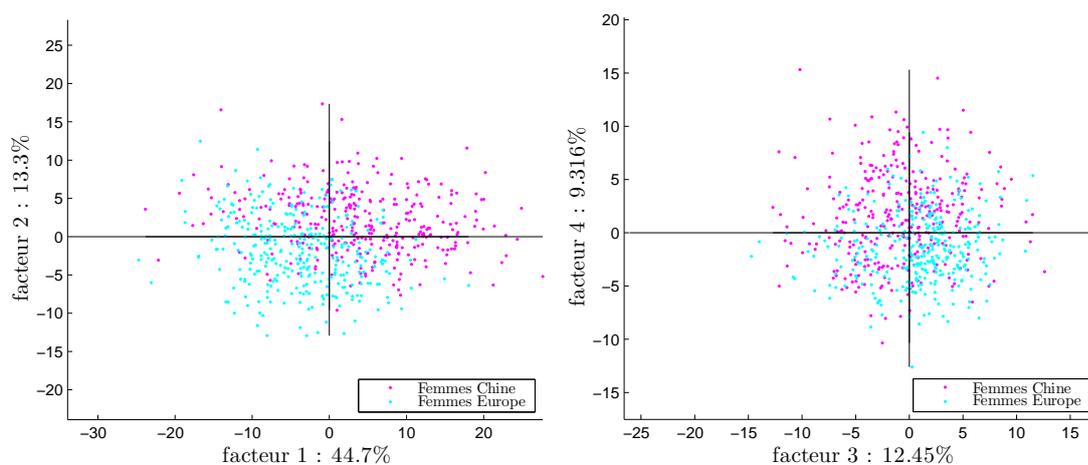


FIGURE 10.24 – Coordonnées des individus de l’analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la tête. Sur les quatre facteurs présentés la morphologie des femmes chinoises affecte les facteurs de manière différente de la morphologie des femmes européennes.

### 10.3.3 Systèmes de tailles et morphologie moyenne 3D

#### Casques

Pour respecter la séparation normative, les têtes ont été séparées par tour de tête tous les  $10mm$ . Différentes morphologies ont été obtenues en moyennant les têtes de la base de données européenne, chinoise ou la combinaison des deux. Une forme moyenne est calculée pour chaque taille en appliquant la méthodologie présentée à la section 6.1. La tête moyenne des personnes de taille  $550mm$ - $560mm$  ainsi que la morphologie normative de taille  $555mm$  sont présentées dans la figure 10.25.

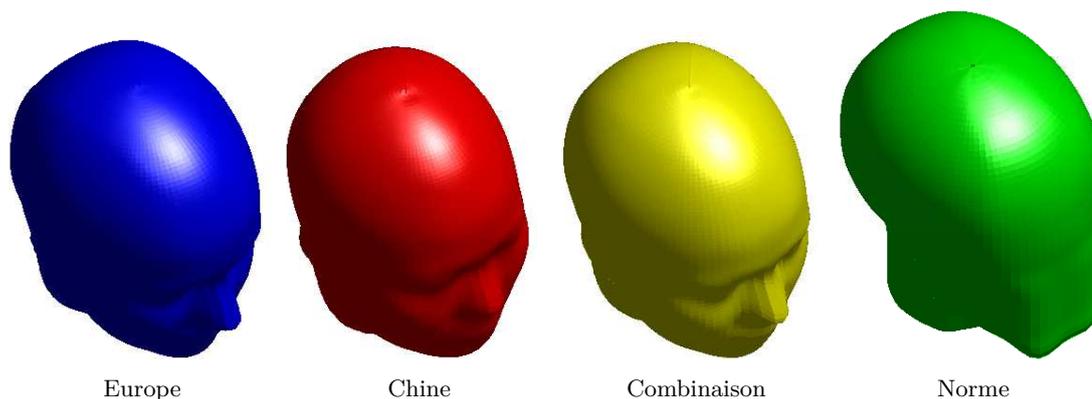


FIGURE 10.25 – Formes moyennes pour la taille  $555mm$  de casques.

#### Masques et lunettes

Trois systèmes de tailles ont été étudiés suivant les trois mesures présentées à la section 10.2.4. Pour chaque taille de chaque système, une forme moyenne est définie en appliquant la méthodologie de la section 6.1 (exemple sur la figure 10.26). Sur ces produits, un choix est fait de n'étudier que les sujets européens. Cependant, un système de tailles chinois a été créé pour les masques ordinaires, afin d'étudier les différences de visages des deux populations.

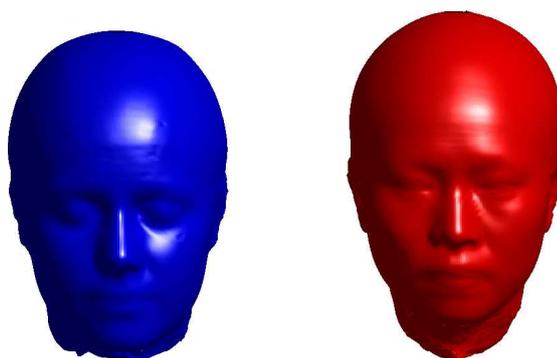


FIGURE 10.26 – Formes moyennes pour la taille  $995mm$  (distance entre les ectocanthions) de masques (Europe, Chine).

Pour les lunettes, une seule taille adulte a été choisie grâce à la souplesse des branches qui peuvent couvrir toute la population. Ensuite deux tailles enfants ont été créées, une pour les enfants de 4 à 6 ans et une pour les enfants de 7 à 10 ans. Pour les masques et lunettes de natation, trois tailles (en incluant les adultes et les enfants) ont été créées. Deux tailles adultes et une taille enfant ont été créées pour le masque intégral.

Même si les tailles ont été séparées par rapport aux mesures unidimensionnelles, le nombre de tailles pour chaque système a été optimisé de manière à ce que les écarts tridimensionnels entre les personnes soient absorbés par les produits.

### 10.3.4 Comparaison des morphologies moyennes 3D

#### À l'intérieur d'une population donnée

Avec la morphologie moyenne, son écart-type est également calculé. Pour la conception des casques, les morphologies moyennes de taille  $555mm$  et leur écart-type, sont présentés sur la figure 10.27.

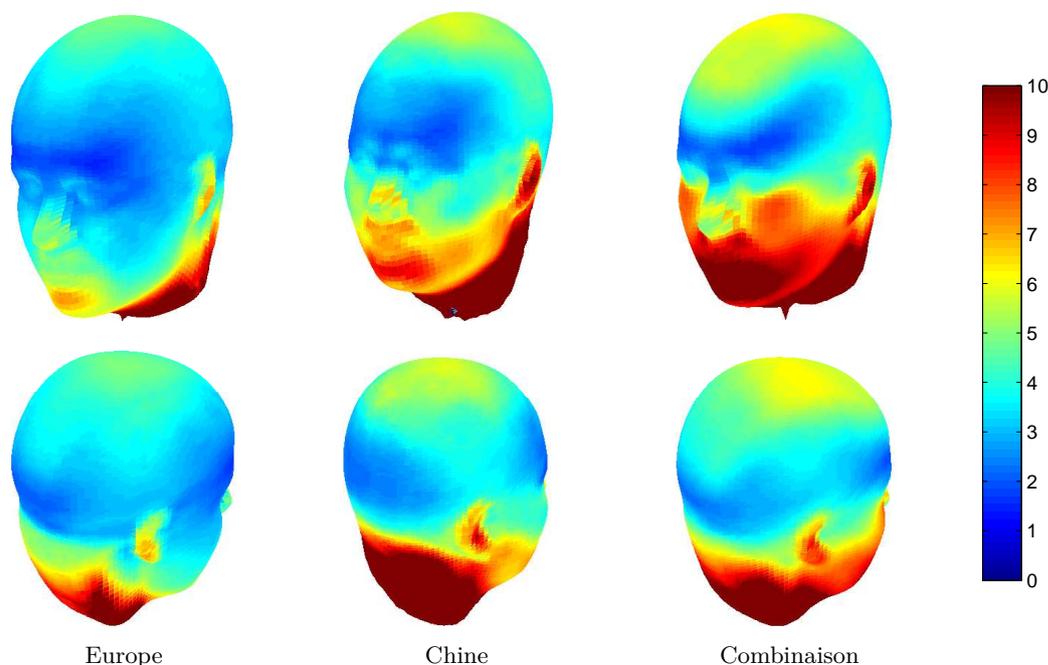


FIGURE 10.27 – Formes moyennes avec leur écart-type en  $mm$  pour la taille  $555mm$  pour la conception des casques.

La répartition de l'écart-type est similaire pour toutes les tailles. Dans la région avant et arrière de la tête l'écart-type est moins fort que dans les côtés ou le haut du crâne. A la région du haut du crâne l'écart-type est plus élevé que dans les côtés. Sur toute la tête, les valeurs les plus élevées apparaissent à la partie basse de la tête et aux oreilles.

Concernant la morphologie des masques (figure 10.28), pour toutes les tailles, l'écart-type suit également le même motif. Sur la région de la glabelle il atteint zéro et augmente en général vers la partie basse du visage.

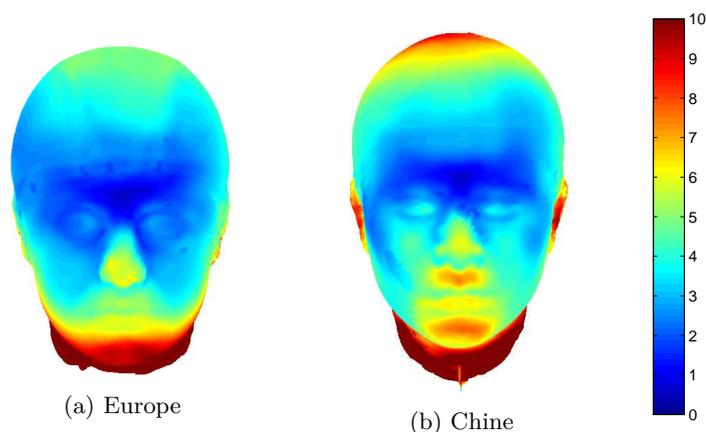


FIGURE 10.28 – Formes moyennes avec leur écart-type en  $mm$  pour la taille  $995mm$  pour la conception des masques.

### Entre la population chinoise et européenne

En superposant les morphologies moyennes chinoise et européenne, les premiers éléments de comparaison sont disponibles (figure 10.29a). Pour les casques, les sujets européens sont plus longs, plus hauts et moins larges que les sujets chinois. La valeur de la différence à chaque région de la tête peut être aussi obtenue en comparant les rayons sphériques. Le résultat de la soustraction des rayons sphériques aux points correspondants des têtes (même  $\theta$  et  $\phi$ ) est montré pour la taille  $555mm$  sur la figure 10.29b.

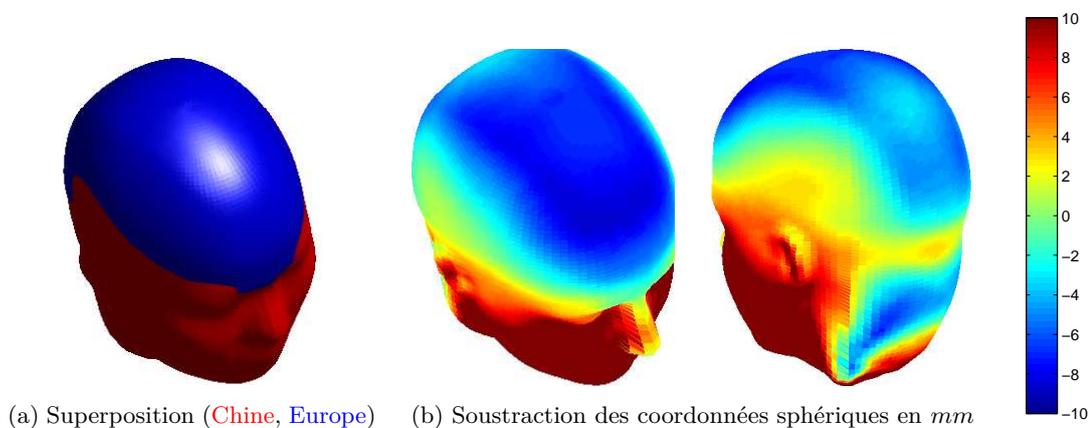


FIGURE 10.29 – Comparaison des têtes moyennes de la Chine et de l'Europe de la taille  $555mm$  de casque.

Par exemple, d'après cette figure, la différence entre les crânes moyens est moins élevée à la partie arrière haute qu'à la partie avant haute de la tête. La même répartition des différences est obtenue pour toutes les tailles.

Concernant le visage et la conception pour les masques et les lunettes, la différence apparaît sur la figure 10.30. Les visages européens ont des courbures fortes sur le visage avec le nez qui sort du cadre moyen et des yeux qui rentrent vers l'intérieur. Au contraire, les visages chinois

sont plus homogènes au niveau de la profondeur. Les différences sont minimisées autour de la glabella (point d'alignement des sujets) mais également autour du nez des sujets. Les points du nez et des yeux ont des différences plus fortes que le reste du visage.

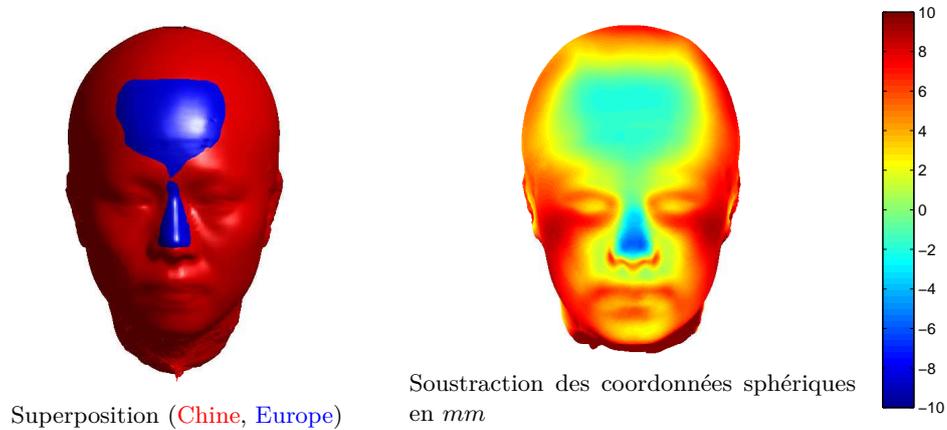


FIGURE 10.30 – Comparaison des têtes moyennes de la Chine et de l'Europe de la taille  $995\text{mm}$  de masque.

### Comparaison normative

La fausse tête normative [26] a été comparée avec la tête moyenne européenne pour chaque taille (figure 10.31). Vu les différences aux différents régions de la tête, la tête moyenne européenne est relativement plus circulaire que la tête normative. Elle est également plus haute. Les deux têtes ont été alignées au niveau du tour de tête. La bande où la tête moyenne européenne est moins grande que la tête normative (au niveau bas du tour de tête) correspond au bord du bonnet que les sujets portent quand ils sont scannés.

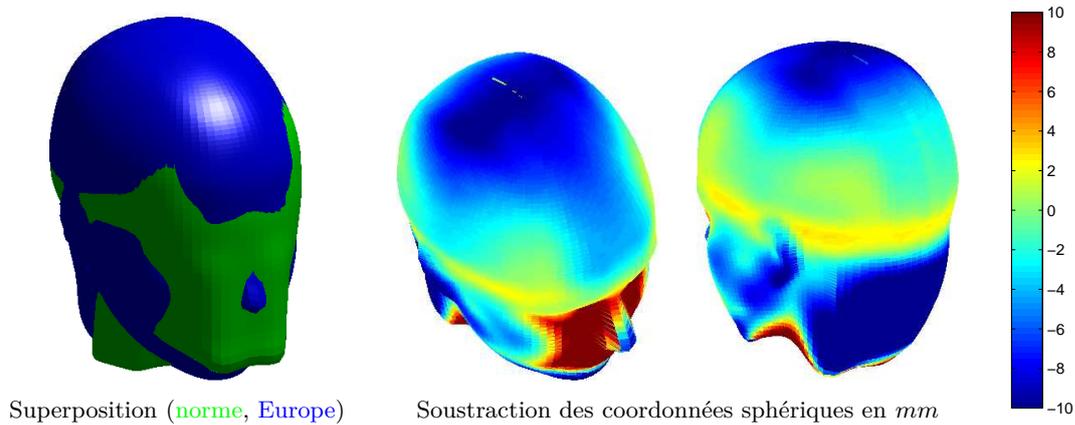


FIGURE 10.31 – Comparaison des têtes moyennes de l'Europe avec les fausses têtes normales [26] (exemple sur la taille  $555\text{mm}$ ).

### 10.3.5 Position relative des sujets

En appliquant la procédure pour optimiser la position relative des sujets, l'écart-type diminue dans la région ciblée. Le résultat est plus visible au niveau vertical qu'au niveau latéral du visage de la figure 10.32. Les sujets sont alignés de manière plus homogène aux niveaux des yeux, du nez et des joues. La somme des écarts-types est plus petite sur le visage corrélé.

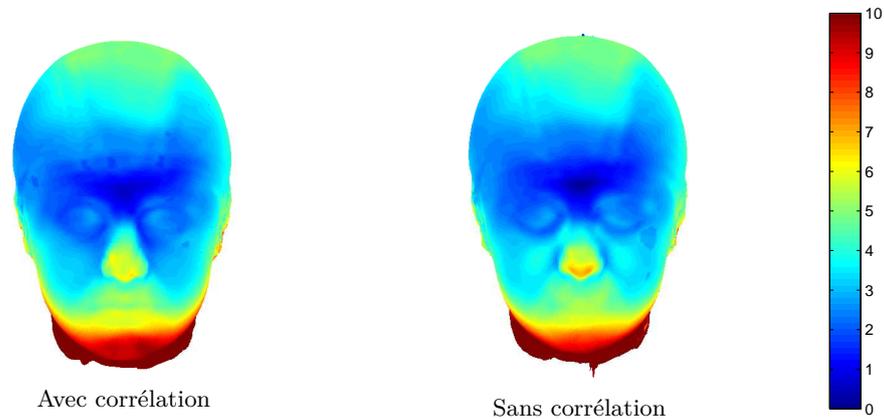


FIGURE 10.32 – Formes moyennes avec leur écart-type en  $mm$  pour la taille  $995mm$  pour la conception des masques.

La tête moyenne change également avec l'alignement différent des sujets [17]. La différence entre la tête moyenne avec corrélation et la tête moyenne sans corrélation est présentée sur la figure 10.33. L'échelle de couleur est le résultat de soustraction des rayons sphériques en  $mm$ .

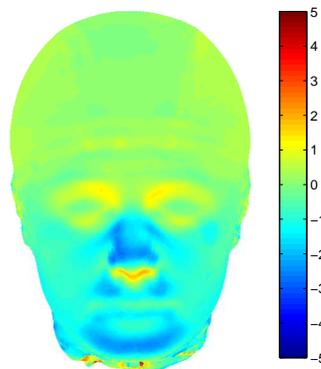


FIGURE 10.33 – Différences en  $mm$  entre les rayons sphériques de la tête moyenne calculée avec et sans corrélation pour la taille  $995mm$  pour la conception des masques.

### 10.3.6 Incertitudes des calculs

Les méthodes appliquées pour étudier la morphologie de la tête sont évaluées dans cette section. Uniquement les valeurs numériques pour chaque source d'incertitude sont présentées. Ces valeurs sont discutées dans la section de la discussion.

#### Projection sur maillage discret

Quand un point du sujet scanné est projeté sur un maillage discret, il se déplace dans l'espace. Ce déplacement peut être quantifié pour les différentes résolutions du maillage discret. Par la définition des coordonnées sphériques, le déplacement maximal est détecté pour  $\phi = 0$ . Le périmètre horizontal à cet endroit est  $2\pi R$ . Le périmètre vertical est également  $2\pi R$ . Pour la résolution  $100 \times 100$  points le périmètre horizontal est divisé en 100 parties et le périmètre vertical en 200. Pour un rayon moyen de  $100\text{mm}$  (chiffre représentatif d'une tête) l'écart entre deux nœuds est alors  $\frac{2\pi 100}{100}\text{mm}$  en horizontal et  $\frac{2\pi 100}{200}\text{mm}$  en vertical. Un point peut se déplacer jusqu'à la moitié de cette distance :

$$\Delta = \sqrt{3.14^2 + 1.57^2} = 3.5\text{mm}.$$

Pour la résolution  $400 \times 400$  pixels ce déplacement est évalué à  $0.88\text{mm}$ .

Après le déplacement aux nœuds du maillage, les rayons sphériques du même nœud sont moyennés. Aux régions de grandes courbures, le moyennage se comporte comme un filtre. Ceci résulte de la diminution de la courbure à l'intérieur de chaque *pixel*. Cependant les courbures existantes sur le visage sont représentées pour l'application aux masques avec le même nombre de points qu'il existe sur le sujet scanné.

Pour le même  $\theta$  et  $\phi$ , le point moyenné appartient à sa surface d'origine. S'il existe des surfaces superposées, le point moyenné appartient à une surface inexistante. Par exemple, sur la région des oreilles, il y a souvent les points du crâne et les points de derrière les oreilles qui ont le même  $\theta$  et  $\phi$  sur le maillage discret. De ce fait, le rayon sphérique projeté à cet endroit n'est pas pertinent pour être utilisé pour la morphologie de la tête. Pour cette problématique, le centre de la sphère doit être bien situé au centre de la tête.

#### Optimisation de la position relative des sujets

Pour optimiser la position relative des sujets, le nuage de points est manipulé en coordonnées sphériques. En appliquant des déplacements aux coordonnées sphériques il peut y avoir des différences entre la tête scannée et la tête utilisée pour le moyennage.

Sur cette application, le déplacement latéral n'impacte pas la morphologie de la tête. Il en résulte une rotation latérale (par définition des coordonnées sphériques). Néanmoins, le déplacement vertical peut impacter la morphologie. Deux pixels alignés verticalement en coordonnées sphériques, n'ont pas la même surface en coordonnées cartésiennes (figure 10.34a). Sur le cas extrême d'un visage qui, en le corrélant dans l'image, est déplacé vers le haut de plusieurs pixels, sa déformation est montrée sur la figure 10.34b. Toutefois, dans les applications présentées, le déplacement est limitée à  $20$  pixels. De plus, les résultats ont montré qu'il n'y a pas de têtes scannées qui sont déplacées de plus de  $8$  pixels.

La déformation de la tête est calculée par rapport à la déformation de la surface des pixels en coordonnées cartésiennes. La surface d'un élément sphérique est :

$$dA = \rho^2 \sin \phi \, d\theta \, d\phi$$

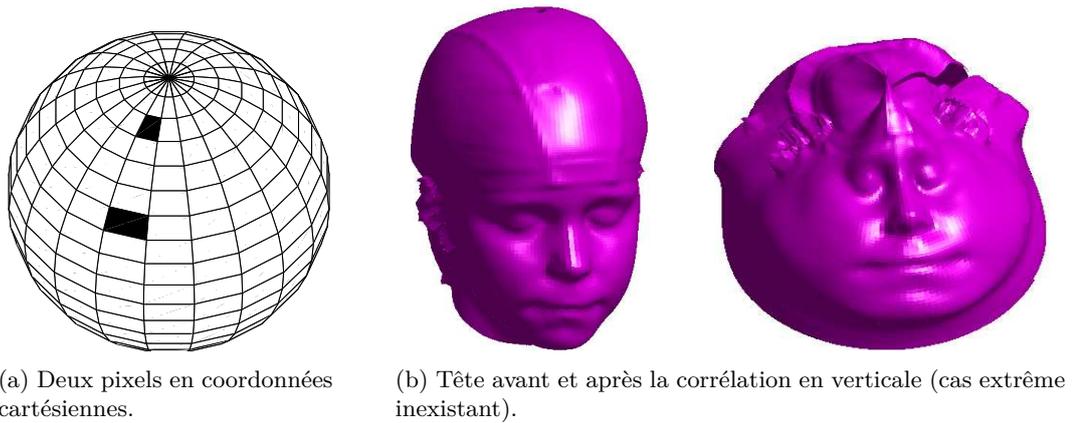


FIGURE 10.34 – Déformation due à l'optimisation de la position relative des sujets.

et la différence de surfaces de deux éléments est :

$$\Delta A = \rho^2 \, d\theta \, d\phi \, (\sin \phi_2 - \sin \phi_1)$$

Sur une sphère de rayon  $100\text{mm}$  et si  $d\theta = 2\pi/100$  et  $d\phi = \pi/100$  (cas de maillage de casques) la différence sur un déplacement de  $8\text{pixels}$  atteint  $5\text{mm}^2$ . Cependant la valeur moyenne de déplacement vertical est de moins de  $1\text{pixel}$ . La différence pour ce cas est  $0.6\text{mm}^2$ . Pour le cas des masques, la différence maximale est  $1.2\text{mm}^2$  et la moyenne  $0.008\text{mm}^2$ .

### Précision de l'équipement

Le fournisseur du scanner utilisé pour la campagne de mensuration européenne déclare sa précision du point à  $0.15\text{mm}$ . La résolution du scanner est déclarée à  $1\text{mm}$ .

## 10.4 Discussion

### 10.4.1 Traitement de scans

Sur cette étude, des méthodes de traitement de scans ont été appliquées dans les grandes bases de données. Le passage aux coordonnées sphériques a permis la projection de toute la tête sur un maillage discret afin d'obtenir des correspondances entre les sujets scannés.

Pour la même raison, Zhuang et al. [104] ont essayé et comparés d'autres méthodes. La méthode optimisée était l'application d'un maillage générique modèle. L'erreur de la projection au maillage est montrée à la figure 10.35. Pour l'application au maillage, différents points anatomiques du visage sont nécessaires.

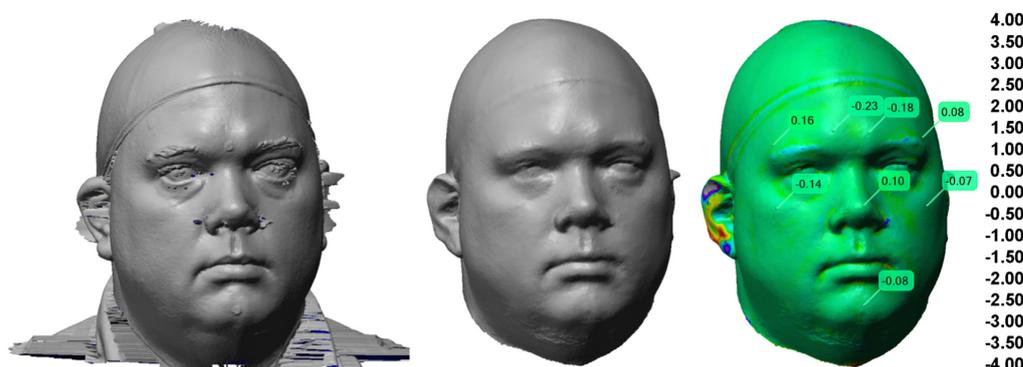


FIGURE 10.35 – Erreur sur la tête entre le scan et le maillage générique avec la méthode de Zhuang et al. [104].

Dans le cas de la méthode utilisée dans cette étude, l'erreur maximale de la projection calculée pour les masques est de  $0.88mm$ . De plus, les points anatomiques ne sont pas utilisés. Le moyennage de points à chaque nœud peut créer d'autres erreurs et notamment aux régions des oreilles. Concernant cette erreur, il n'est pas référencé dans la littérature de méthodes adaptées pour une application aux grandes bases de données. Cependant, cette erreur ne s'applique pas pour la conception de masques et de casques.

L'alignement des sujets aux deux points anatomiques disponibles (glabellum et opisthocranion) était une première étape, mais l'optimisation de la position relative des sujets a été appliquée pour diminuer les écarts entre les sujets. Pour cette procédure, les points anatomiques du visage (points caractéristiques des yeux, du nez et de la bouche) ne sont pas utilisés même si leur position est disponible par des études précédentes [15], car :

- pour l'application aux produits sportifs, une région du visage est intéressante et pas seulement quelques points,
- les points anatomiques - caractéristiques du visage sont situés différemment pour chaque sujet ce qui conduit à une position différente à la portée du produit.

Cependant, il peut être envisagé dans les prochaines études d'utiliser les points anatomiques et de comparer les résultats des deux méthodes.

### 10.4.2 Têtes modèles

Les têtes modèles ont été créées pour chaque taille en moyennant les rayons sphériques des sujets alignés. En appliquant la corrélation à une région du visage l'écart-type a diminué. La

déformation moyenne du visage due à cette procédure est quantifiée pour un pixel à  $0.6mm^2$ . La différence entre les deux têtes moyennes (avec et sans corrélation) peut atteindre  $4mm$  dans le région du nez. Les différences de têtes sont expliquées par la différence de l'alignement des sujets [17].

Contrairement aux méthodes mentionnées dans la littérature, la taille a été prise en compte. Les têtes moyennes calculées peuvent également être utilisées pour une analyse quantitative et qualitative. Dans la littérature, des méthodes similaires sont utilisées pour la détection des anomalies faciales et des troubles génétiques [88, 95]. Des inconvénients par rapport à ces méthodes n'ont pas été détectés. De ce fait, la méthode présentée peut être appliquée au domaine de la santé. Un autre modèle qui est utilisé pour la conception des masques à oxygène des enfants est le modèle SAINT [57]. Sa morphologie est définie uniquement par rapport à une morphologie individuelle. En moyennant plusieurs visages scannés, cette morphologie pourrait être plus représentative de la population infantine.

La comparaison des têtes modèles de différentes populations, a été effectuée en superposant les têtes ou par soustraction des rayons sphériques. Leur différence a été qualifiée et quantifiée. Les résultats obtenus étaient similaires aux résultats unidimensionnels aux régions où les mesures sont appliquées : par exemple, les têtes chinoises sont plus larges en général que les têtes européennes. Également ces résultats étaient similaires à la littérature [11]. Néanmoins, des résultats qui ne sont pas visibles par les mesures unidimensionnelles ont été également extraits : la différence en chaque point de la tête qui, par exemple, a montré la circularité des têtes moyennes européennes par rapport aux têtes normatives.

L'écart-type des têtes modèles aux régions des mesures unidimensionnelles est cohérent avec les coefficients de corrélation entre les mesures. L'écart-type était plus élevé dans la partie basse du visage, ce qui est attendu par la définition de l'alignement des sujets aux points et régions qui appartiennent aux parties hautes de la tête. Cependant cette région n'est pas utilisée pour la conception des casques et des masques ordinaires.

La tête modèle n'est pas une morphologie existante. Elle est une morphologie potentiellement représentative de la population. Afin de la calculer il faut respecter les spécificités de chaque étape de la méthode. Pour l'utiliser correctement, son écart-type devra être prise en compte.

Pour les casques, les tailles ont été séparées par une seule dimension à cause des contraintes normatives. Probablement, la séparation en tailles factorielles serait plus pertinente et les têtes modèles représentatives de plus de personnes. Cette séparation est présentée de manière expérimentale pour la définition du système de taille de la poitrine sur le prochain chapitre de cette thèse.

### 10.4.3 Analyse factorielle à trois dimensions

L'utilisation de l'ACP en trois dimensions, a montré des résultats qui ne sont pas visibles par des analyses unidimensionnelles (exemple de l'asymétrie de la tête). Les détails à chaque point de la tête ont été extraits. L'asymétrie de tête est montrée aussi dans la littérature concernant les volumes corticaux [35, 40]. Il se trouve que la morphologie du crâne est adaptable à la morphologie du cerveau ou que la morphologie du cerveau est adaptable à la morphologie du crâne.

Pour évaluer l'impact d'une analyse uniquement aux points dé-corrélées, l'ACP a été aussi appliquée sur tous les points (sans application de coefficient  $f$ ). Les résultats ont montré que la région du haut du crâne avait un poids plus élevé sur la définition des facteurs. Ce résultat était attendu d'après la section 6.2.2 et la figure 6.3a.

#### 10.4.4 Application aux produits

Les têtes moyennes sont déjà utilisées pour la conception des produits sportifs. Par exemple, le masque intégral a été conçu en environnement CAO pour être ajusté au visage moyen calculé pour cette application. Pour les lunettes de soleil, le visage moyen associé est imprimé en 3D et est utilisé lors des tests de pression. Ce test est également numérique, en modélisant les lunettes en éléments finis et en utilisant la géométrie du visage imprimé. Pour l'application aux casques, un test de fitting a été mis en place pour évaluer la différence au confort. Les résultats ont montré une préférence de plus de 20% aux nouvelles formes intérieures de casques.

Pour chaque produit il faut prendre en compte ses spécificités. Par exemple un casque qui est conçu sur une tête moyenne de  $555mm$  : les sujets qui ont participé pour son calcul ont un tour de tête de  $550$  à  $560mm$ . Vu que le casque n'est pas extensible, il va être petit pour les sujets de  $555$  à  $560mm$ . Cependant, comme les têtes moyennes ont une forme similaire entre les tailles il va aller aux personnes de  $545$  à  $550mm$ . Le bien allé dépend aussi de la morphologie tridimensionnelle.

Concernant la différence des deux populations, et étant donné que les casques existants ont des éléments pour amortir jusqu'à  $10mm$  de largeur ( $5mm$  à chaque côté), il est recommandé pour couvrir les différences existantes

- d'ajouter des matériaux et des réglages différents sur les casques, et/ou
- de séparer les deux populations pour la conception.

### 10.5 Conclusion

Les méthodes développées ont été appliquées aux grandes bases de données. Avec l'extraction automatique, un gain du temps et une diminution de l'erreur due à la main d'œuvre sont obtenus.

Les différences anthropométriques entre les populations ont été étudiées avec des données unidimensionnelles et tridimensionnelles. Il a été montré qu'avec les données tridimensionnelles, plus d'éléments sont disponibles pour analyser les caractéristiques morphologiques.

La méthode a été comparée avec les méthodes pratiquées dans la littérature et elle peut être utilisée dans les domaines de la santé et de l'ergonomie. Les têtes modèles calculées ont déjà été utilisées pour la conception de produits.



# Chapitre 11

## Poitrine féminine

### 11.1 Introduction

Durant de sport, la poitrine des femmes subit des forts déplacements et accélérations. Par exemple, lors de la course à pied, les seins peuvent subir des accélérations importantes, et se déplacer de 10 centimètres voire plus [71]. De ce fait, les soutiens-gorge de sport sont apparus. L'adaptation correcte d'un soutien-gorge est un élément très important afin qu'il soit efficace [79]. La morphologie complexe des seins est alors à analyser afin d'apporter les informations nécessaires pour la conception d'un soutien-gorge.

Afin de l'étudier, de données tridimensionnelles sont utilisés. Avec l'extraction des données unidimensionnelles à partir des scanners tridimensionnels un système de tailles pour la poitrine chinoise a été proposé [102]. Afin de séparer les tailles les deux mesures principales du corps ont été détectées par l'application de l'ACP aux données extraites. Cependant, avec l'extraction des données unidimensionnelles la perte de données morphologiques est évidente (comme il a été mentionné à la section 1.2.6). De plus, afin d'extraire les données unidimensionnelles plusieurs logiciels ont été utilisés ce qui signifie également l'intervention humaine pour tous les sujets scannés. Les données tridimensionnelles ont été étudiées afin d'évaluer des différences asymétriques entre les seins [68]. Pour ce faire, les surfaces tridimensionnelles ont été superposées. Néanmoins, la différence entre les sujets n'a pas été étudiée. La différence de chaque sujet a été évalué uniquement par la différence moyenne entre les deux seins et non par une différence sur leur forme.

DECATHLON produit des soutiens-gorge depuis le début des années 2000. Le système de tailles utilisé sépare les tailles en se basant sur la mesure du tour de poitrine et du tour de dessous poitrine. Récemment, un nouveau process est introduit. Il s'agit d'un soutien-gorge entièrement moulé et sans couture. Avec la nouvelle approche, les mesures unidimensionnelles (tour de poitrine, tour de dessous de poitrine) n'ont pas été modifiées. Cependant la forme du soutien-gorge pour accueillir les seins a changé. De ce fait, les retours et expériences concernant la forme et les tailles n'étaient pas au niveau des attentes.

Les retours des clientes concernaient uniquement de tailles de bonnet A et B (faible rapport entre les deux tours). Le choix de l'entreprise<sup>1</sup> était d'étudier uniquement la série de tailles non adaptées. Pour avoir un ajustement correct du produit sur le corps, et notamment sur la morphologie complexe de la poitrine, il est indispensable d'utiliser des données tridimensionnelles. Afin d'adapter au mieux les produits, des bases de données en poitrine nue ont été utilisées.

---

1. Le système de tailles de sous-vêtements est actuellement en phase de re-conception.

Il est noté que pour cette étude, le temps était un limite important à respecter. Une urgence en production affecte rapidement l'approvisionnement des produits dans les magasins. De plus, les bases de données en poitrine nue n'existent pas dans la littérature. L'objectif de cette étude était alors de

- obtenir une base de données de la poitrine nue des bonnets A et B dans un temps limité,
- analyser la morphologie de la poitrine,
- calculer les modèles représentatives de chaque taille afin d'adapter les nouvelles approches de production.

Ensuite une analyse morphologique factorielle a été effectuée et une séparation de tailles différentes de l'actuelle a été étudiée.

## 11.2 Matériels et méthodes

### 11.2.1 Campagne de mensuration

Afin d'obtenir la morphologie tridimensionnelle de la poitrine nue rapidement, une campagne de mensuration a été réalisée. 180 sujets ont été scannés avec le scanner NX16 de  $TC^2$  (scanner du corps entier à projection de la lumière blanche). Le passage type d'un sujet est :

- elle est informée de la procédure du test,
- se mesure elle-même avec un mètre ruban son tour de dessous poitrine et de poitrine devant un miroir pour s'assurer de l'horizontalité du mètre ruban <sup>1</sup>,
- se met poitrine nue en position normative (figure 4.2 [54]),
- elle reste immobile pendant le scan ( $\approx 12sec$ ).

### 11.2.2 Mesures unidimensionnelles

La partie du tronc est la seule partie du corps qui est intéressante lors de l'étude de la poitrine. Elle a été séparée de la tête, des jambes et des bras avec la procédure décrite à la section 4.3.

Deux mesures sont requises afin de séparer les sujets en tailles existantes. Le tour de poitrine et le tour de dessous de poitrine. Le tour de poitrine est le tour qui passe par les deux tétons et est le plus développé au niveau des seins. Le tour de dessous de poitrine est le tour horizontal qui passe par le pli sous-mammaire. Afin de détecter leur position, la morphologie du tronc a été étudiée.

#### Propriétés générales de la morphologie du tronc

La morphologie du tronc a des caractéristiques communes pour la plupart des sujets. Afin de les repérer, trois paramètres de quatre-vingt sujets (les premiers quatre-vingt sujets qui ont été scannés) s'affichent à la figure 11.1. Le paramètre qui a été choisi pour la première séparation du tronc et celle de la périmètre convexe parce qu'elle peut être simulée correctement pour la plupart des cas avec un polynôme à quatre degrés. Le tronc peut être divisé maintenant en deux parties au point *minimum* qui se trouve entre la première et la dernière racine de la dérivé du polynôme (figure 11.2).

#### Tour de poitrine

Pour trouver l'endroit du tour de poitrine, le profil avant de la partie haute du tronc est aussi simulé avec un polynôme de quatre degrés (figure 11.3). Le tour de poitrine se trouve au point

1. Ces mesures sont réalisées afin de s'assurer que les clientes peuvent prendre leur mesures facilement afin de choisir leur tailles.

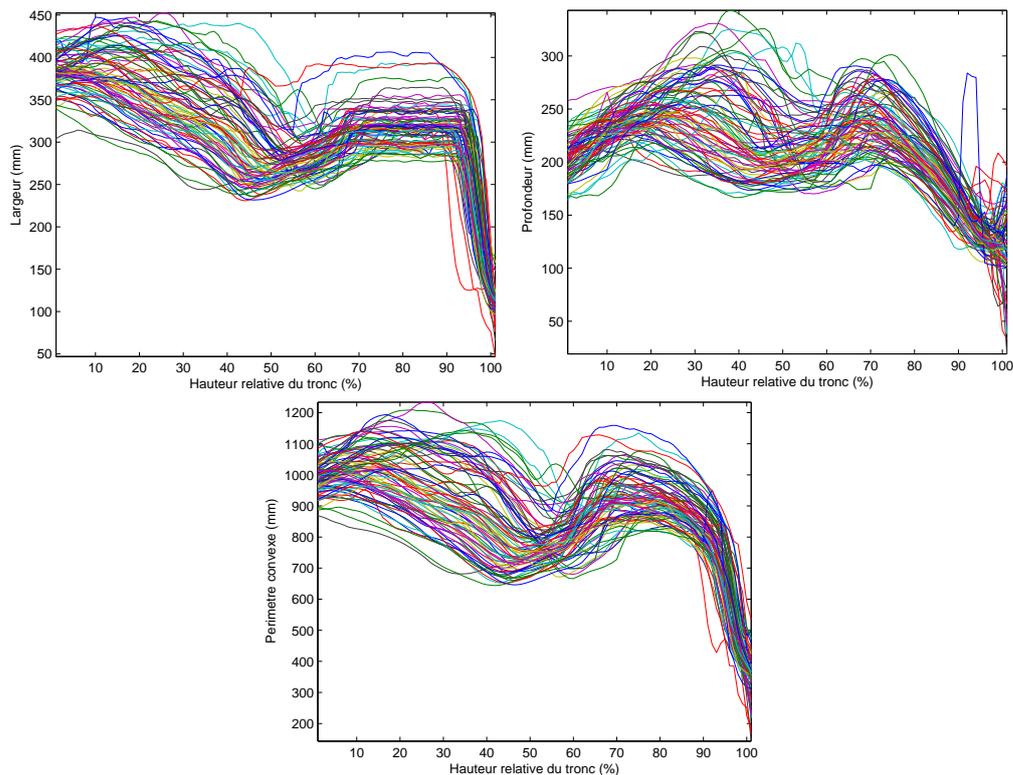


FIGURE 11.1 – Largeur, profondeur et périmètre convexe pour quatre-vingt sujets au long du tronc

maximum entre la première et la dernière racine de la dérivé du polynôme. Il a été initialement testé de détecter le périmètre *maximum* convexe de la partie haute pour détecter le tour de poitrine. Mais le périmètre *maximum* se localise souvent autour du niveau des aisselles. Il a été testé également de détecter le tour de poitrine à l'endroit du point maximale à l'axe frontal. Mais ce point est localiser dans 20% des cas au niveau de l'estomac en partie bas du haut du tronc.

#### Tour de dessous de poitrine

En ayant le profil au dessous du tour de poitrine, le tour de dessous de poitrine peut être détecté au point de rebroussement (minimisation du tour convexe).

En ayant détecté la position des deux tours, les points correspondantes ont été extraits et les mesures ont été calculées suivant la section 4.4 et l'équation 4.1.

### 11.2.3 Alignement des sujets scannés

La définition de l'origine des axes est très important pour éviter la détérioration de la forme du corps. Afin d'assurer le passage correct aux coordonnées cylindriques il faut que l'axe longitudinal passe à l'intérieur du tronc et idéalement en son milieu. Aussi, c'est la partie avant du tronc qui est la plus intéressante pour cette étude. Afin de minimiser les écarts de la partie avant sur les formes moyennes il a été définie après plusieurs essais que le centre devra passer 10cm derrière le point frontal du tour de dessous de poitrine. De ce fait, le passage de l'axe du cylindre à

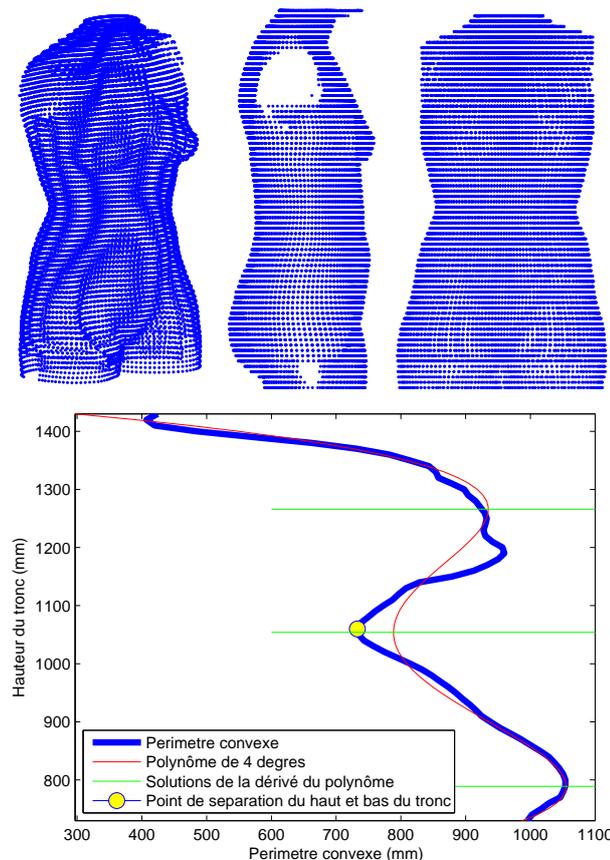


FIGURE 11.2 – Séparation du tronc

l'intérieur du tronc et la minimisation des écarts dans la partie avant est assuré, vue que l'axe passe à une distance fixe pour tous les sujets. La coordonnée d'origine à l'axe latéral est déplacée de manière équidistante des points extrêmes droit et gauche du dessous de poitrine. Sur l'axe longitudinal, l'origine est définie à la hauteur du dessous de poitrine. Pour cette partie du corps aucune rotation a été effectué durant la première alignement.

#### 11.2.4 Coordonnées d'image et digitalisation

La morphologie du tronc peut être présenté sous la forme générale d'un cylindre et donc en coordonnées cylindriques. Le passage a été effectué avec les équations du tableau 4.1. Pour le maillage commun il a été choisi la résolution  $1^\circ \times 5mm$ . Cette résolution était suffisante pour la représentation de la surface du tronc.

#### 11.2.5 Optimisation de la position relative des sujets

Comme il a été expliqué à la section 5.3, la position relative des sujets est optimisée pour améliorer la superposition correcte de tous les sujets. La région d'intérêt qui est sélectionnée pour l'application aux soutiens-gorge est montrée à la figure 11.4. Cette région est la région

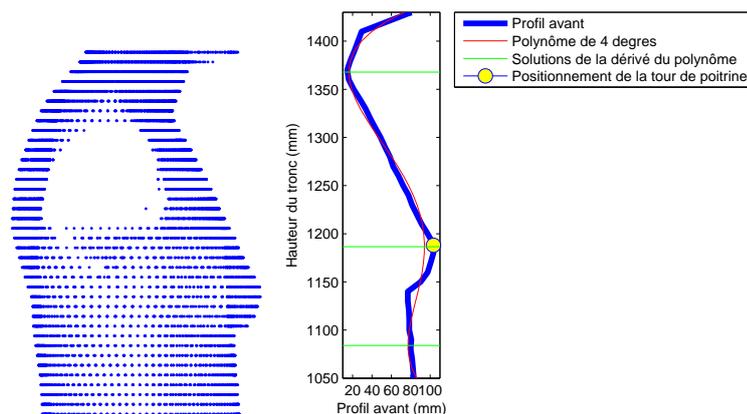


FIGURE 11.3 – Endroit du tour de poitrine

intéressante pour la conception et sa correspondance aidera à la meilleure compréhension des résultats morphologiques.

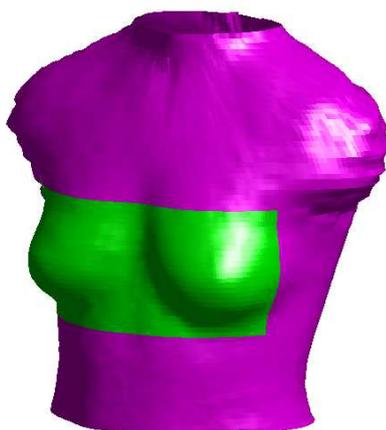


FIGURE 11.4 – Région d'intérêt pour l'optimisation relative des sujets sur la poitrine.

### 11.2.6 Élimination des points aberrants et formes moyennes

La procédure du diagramme de la figure 6.1 (page 59) a été appliquée sur les sujets de chaque taille afin d'obtenir sa forme moyenne et d'éliminer les points aberrants.

### 11.2.7 Analyse en composantes principales

Afin d'étudier la morphologie de la région des seins, l'analyse en composantes principales a été appliquée sur toutes les points du maillage commun au niveau des seins.

## 11.3 Résultats

### 11.3.1 Formes moyennes

La forme moyenne de chaque taille a été calculée afin d'être utilisée pour la conception et production de nouveaux types de soutiens-gorge. Dans la figure 11.5, la forme moyenne de la taille 90B<sup>1</sup> et son écart-type est montré. La répartition de l'écart-type est similaire pour toutes les tailles. Dans la région de dessous de poitrine, l'écart-type est moins fort que dans la région des tétons. Sur toute la forme, les valeurs les plus élevées apparaissent à la partie des épaules.

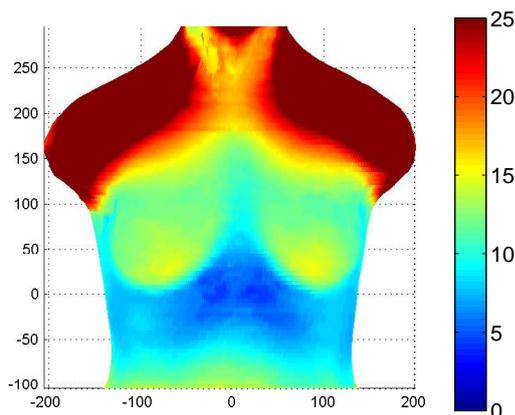


FIGURE 11.5 – Forme moyenne et son écart-type en *mm* pour la taille 90B.

### 11.3.2 Position relative des sujets

En appliquant la procédure pour optimiser la position relative des sujets, l'écart-type diminue dans la région ciblée. Le résultat est plus visible au niveau des tétons (figure 11.6). La somme des écarts-types diminue de 28% dans la région d'intérêt.

La forme moyenne change également avec l'alignement différent des sujets [17]. La différence entre la forme moyenne avec corrélation et la forme moyenne sans corrélation est présentée sur la figure 11.7. L'échelle de couleur est le résultat de soustraction des rayons cylindriques en *mm*.

---

1. 90B est la taille des sujets avec tour de dessous de poitrine 73-77mm et tour de poitrine 88-90mm.

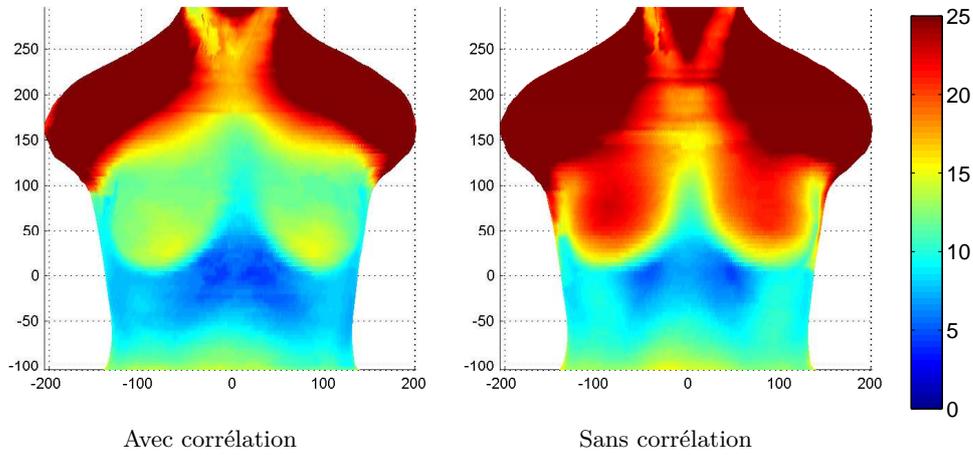


FIGURE 11.6 – Formes moyennes avec leur écart-type en  $mm$  pour la taille 90B avec et sans optimisation de la position relative des sujets.

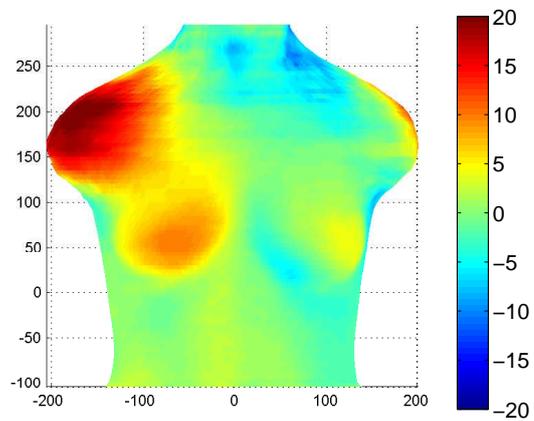


FIGURE 11.7 – Différences en  $mm$  entre les rayons cylindriques de la poitrine moyenne calculée avec et sans corrélation pour la taille 90B.

### 11.3.3 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales a été appliquée aux points tridimensionnels correspondants. Afin d'atteindre 85% d'explication en analysant ces points, il faut utiliser six facteurs (figure 11.8). Aussi, le premier facteur explique moins de 50% de la morphologie des sujets comme pour le cas des têtes.

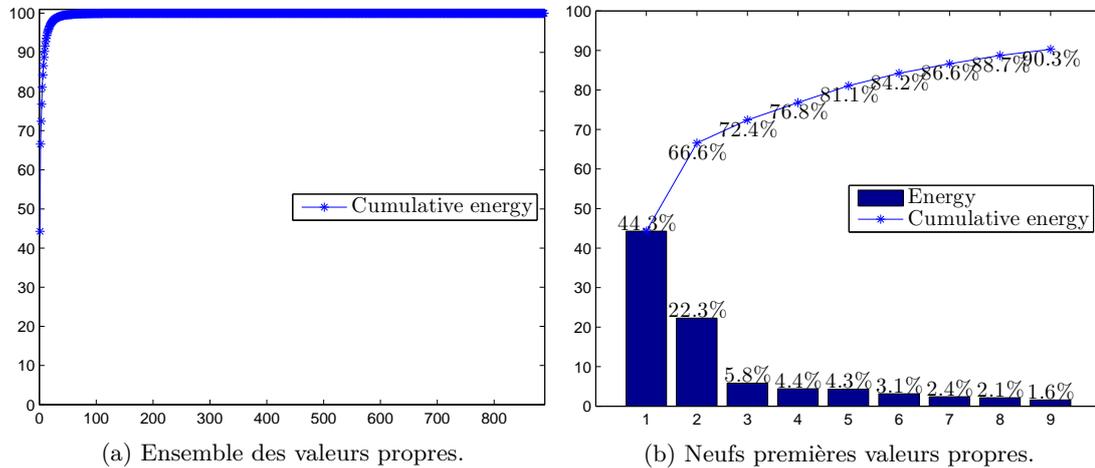


FIGURE 11.8 – Valeurs propres de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la poitrine.

Sur le premier facteur calculé, toutes les variables ont le même signe (figure 11.9) qui indique l'effet de la taille. En observant les variables sur chaque région de la poitrine (figure 11.10), la région de dessous de poitrine est moins affectée par ce premier facteur : quand la taille globale de la poitrine augmente, la région de dessous de poitrine augmente également, mais moins rapidement que les autres régions.

Les facteurs suivants montrent un effet de forme. Le deuxième facteur résulte des seins centralisés ou pas vu que la partie intérieure a des coordonnées opposées de la partie extérieure. Le troisième facteur montre l'augmentation de dessous de poitrine quand la poitrine diminue et *vice versa*. L'asymétrie de la poitrine est montrée par le quatrième et cinquième facteur. Le sixième facteur augmente la partie basse de la poitrine quand la partie haute diminue.

Ces résultats peuvent également être vus par la reconstruction des formes en inversant les résultats de l'ACP (section 6.2.3). En utilisant les coordonnées extrêmes des individus à chacun de ces facteurs leur morphologie est montrée à la figure 11.11.

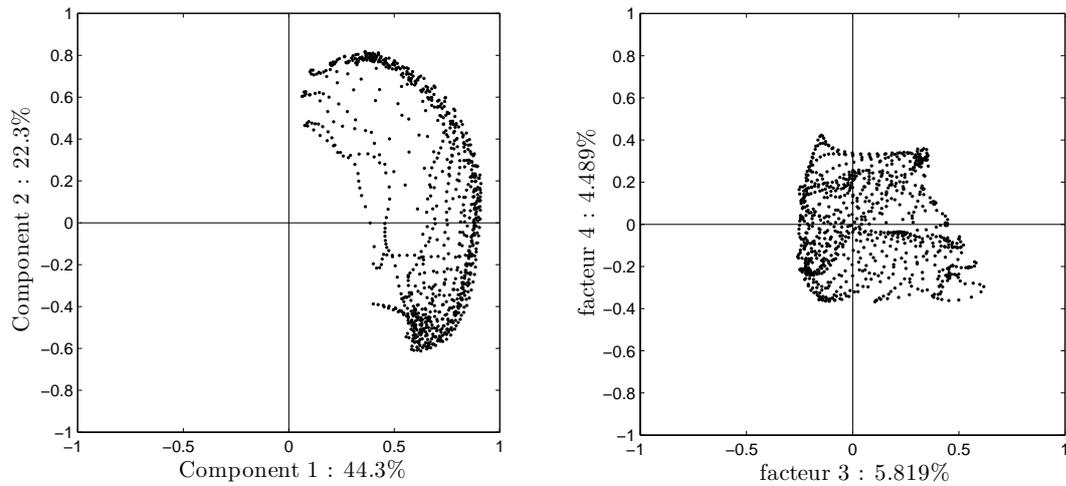


FIGURE 11.9 – Coordonnées des variables de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la poitrine sur les quatre premiers facteurs projetés sur les axes.

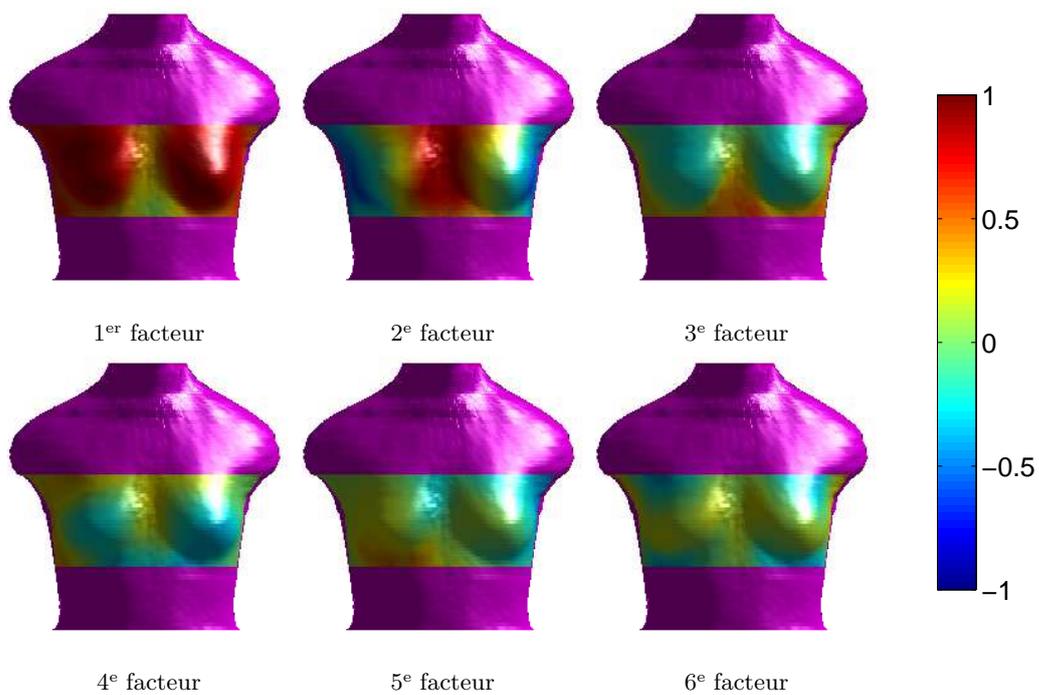


FIGURE 11.10 – Coordonnées des variables de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la poitrine projetés sur la poitrine. A chaque facteur, les régions colorées proche du **bleu** suivent une morphologie différente des régions colorées proche du **rouge**. Par exemple, le résultat du deuxième facteur est l'élargissement de la partie intérieure des seins quand la partie extérieure amoindrisse.

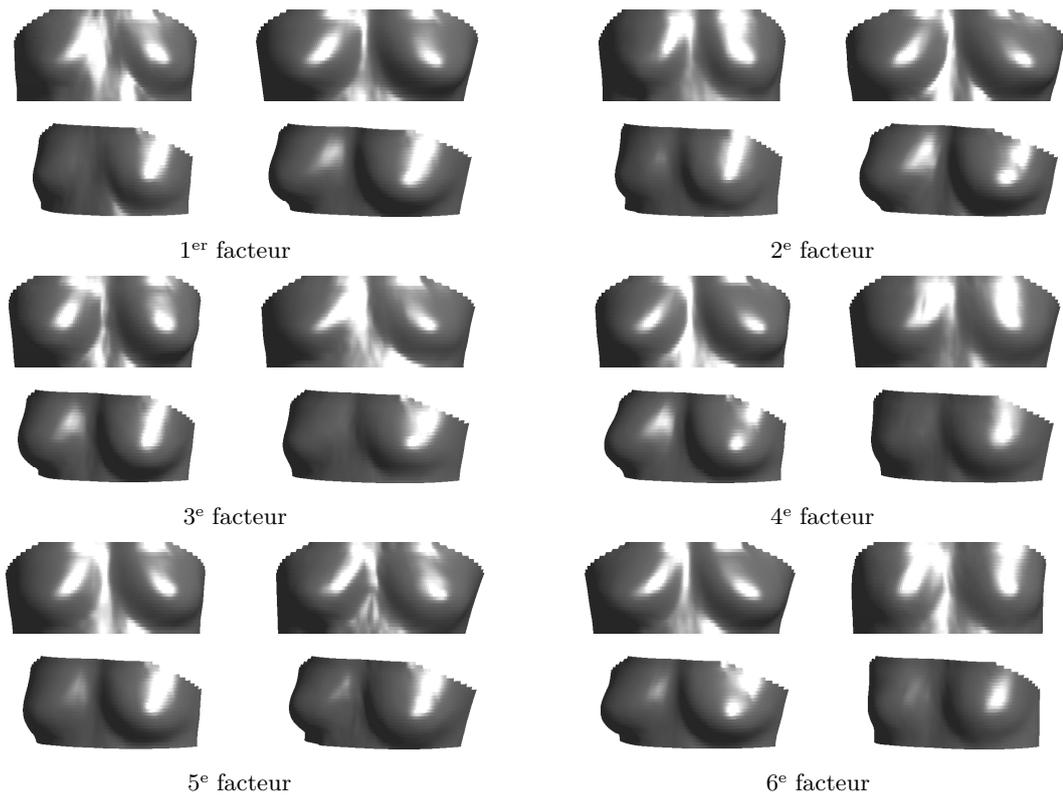


FIGURE 11.11 – Morphologies extrême pour les six premiers facteurs. Ces morphologies sont obtenues en inversant les résultats de l'ACP en utilisant les coordonnées extrêmes des individus : coordonnée moins élevée en première colonne et coordonnée plus élevée en deuxième colonne. Deux vues de chaque morphologie sont disponibles sur cette figure.

### 11.3.4 Asymétrie de la poitrine

Afin d'étudier l'effet de l'asymétrie des seins, les coordonnées des variables des côtés gauche et droit ont été soustraites. Les différences pour les six premiers facteurs sont montrées dans la figure 11.12. L'effet de l'asymétrie est plus visible au cinquième facteur. Pour les autres facteurs il existe et il est localisé autour des bords des seins. Il peut expliquer alors des différences asymétriques de leur position.

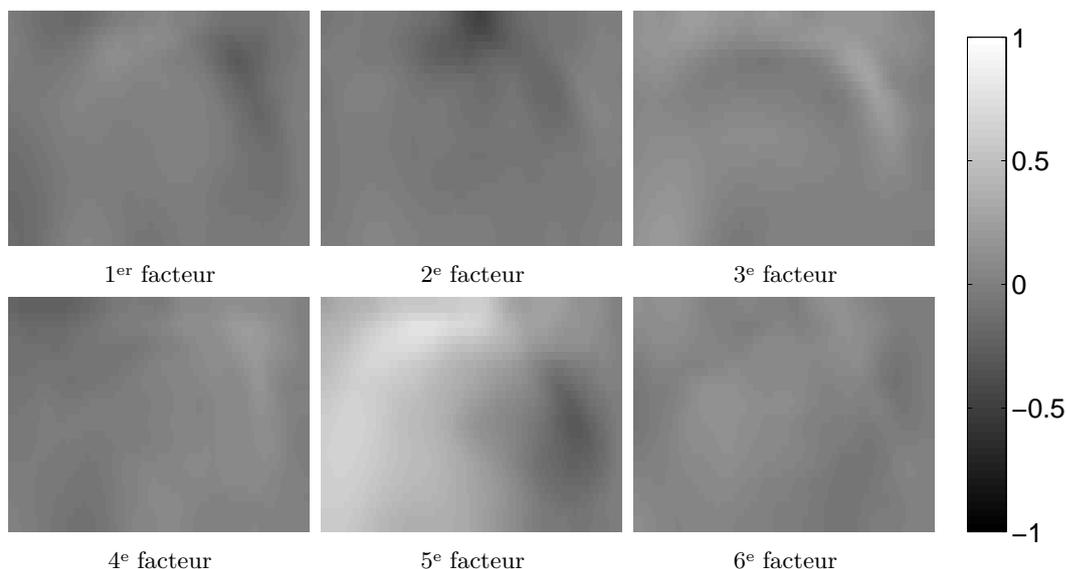


FIGURE 11.12 – Asymétrie des coordonnées des variables obtenues par soustraction des côtés gauche et droite.

La côte gauche et droite sont aussi superposées en utilisant la corrélation d'images. Il a été constaté que le sein droit est significativement plus proche du centre du tronc (t-test avec  $p < 0.001$ ) que le sein gauche. Sa position est également plus basse (t-test avec  $p < 0.05$ ).

### 11.3.5 Séparation en tailles factorielles

En se basant sur le chapitre 7 les sujets de six tailles actuelles ont été séparés en six tailles factorielles. La séparation a été effectuée sur deux facteurs (figure 11.13). Les coordonnées des individus utilisés afin de créer les modèles tridimensionnels sont les médianes des individus de chaque taille.

Sur la figure 11.14 les morphologies factorielles sont montrées. Deux par deux ont des tours de poitrine similaires mais avec des différences sur la forme des seins.

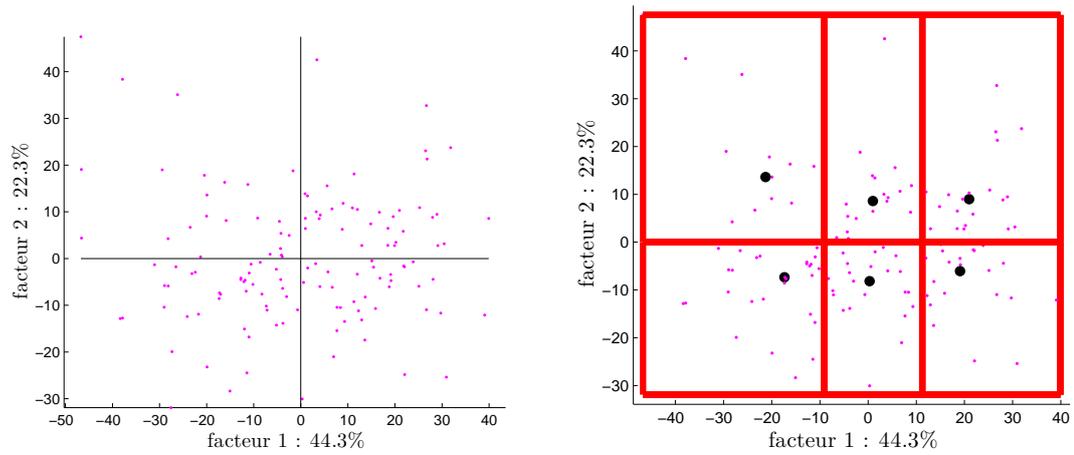


FIGURE 11.13 – Coordonnées des individus et séparation en tailles factorielles. Les points noirs correspondent aux coordonnées médianes pour chaque taille factorielle.

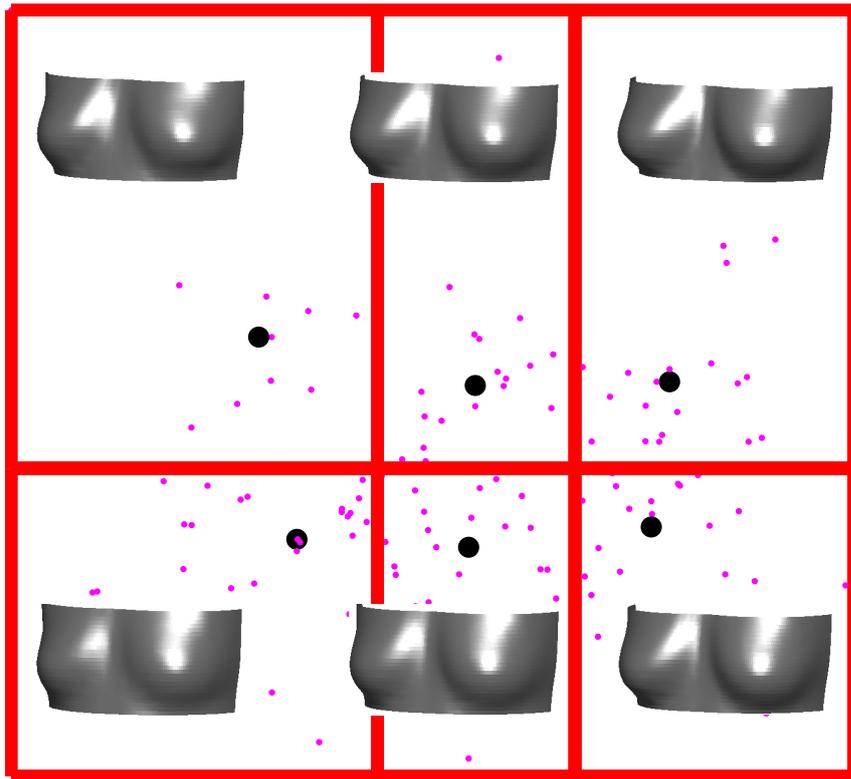


FIGURE 11.14 – Formes des poitrines à partir de la coordonnée d'individu médian pour chaque taille factorielle.

### 11.3.6 Incertitude des calculs

Les méthodes appliquées pour étudier la morphologie de la poitrine sont évaluées dans cette section. Uniquement les valeurs numériques pour chaque source d'incertitude sont présentées. Ces valeurs sont discutées dans la section de la discussion.

#### Projection sur maillage discret

Quand un point du sujet scanné est projeté sur un maillage discret, il se déplace dans l'espace. Ce déplacement peut être quantifié pour les différentes résolutions du maillage discret. Pour les coordonnées cylindriques le périmètre horizontal est  $2\pi R$  à toutes les hauteurs. Pour la résolution  $1^\circ \times 5mm$  le périmètre horizontal est divisé en 360 parties. Pour un rayon moyen de  $150mm$  (chiffre représentatif du tour de dessous de poitrine) l'écart entre deux nœuds est alors  $\frac{2\pi 150}{360}mm$ . L'écart vertical entre les points est fixe à  $5mm$ . Un point peut se déplacer jusqu'à la moitié de distance :

$$\Delta = \sqrt{1.3^2 + 2.5^2} = 2.8mm.$$

Après le déplacement aux nœuds du maillage, les rayons cylindriques du même nœud sont moyennés. Sur la poitrine, où il n'y a pas des fortes courbures, la densité des points est similaire à toutes les régions. Il a été également choisi de conserver approximativement le même nombre de points qu'existait sur le sujet scanné.

#### Optimisation de la position relative des sujets

Pour optimiser la position relative des sujets, le nuage de points est manipulé en coordonnées cylindriques. La corrélation d'images sur les coordonnées cylindriques résultent des déplacements verticaux ou des rotations autour de l'axe longitudinal du tronc. De ce fait les sujets s'alignent afin de diminuer les écarts entre eux. Ces déplacements n'impactent pas alors la morphologie de la poitrine. Ils en résultent uniquement une rotation latérale et un déplacement vertical (par définition des coordonnées cylindriques).

#### Précision de l'équipement

Le fournisseur du scanner NX16 déclare sa précision du point à  $1mm$ . La résolution du scanner est déclarée à 600.000 à 800.000 points pour le corps entier.

## 11.4 Discussion

### 11.4.1 Traitement des scans

Dans cette étude les scans du corps entier ont été utilisés. Ces scans ont une orientation initiale donnée. Afin d'utiliser uniquement la partie de la poitrine, le tronc a été séparé du reste du corps avec les méthodes décrites. Ces méthodes sont actuellement utilisées également dans un scanner développé chez DECATHLON.

En passant en coordonnées cylindriques, les morphologies ont été traitées comme des images. Le déplacement *maximum* des points est évalué  $2.8mm$  au niveau du maillage. Cependant le rayon cylindrique n'est pas modifié. Les outils mathématiques classiques ont été appliqués afin d'aligner les sujets scannés.

Pour 180 sujets, le temps de calcul pour transformer les sujets scannés en coordonnées cylindriques jusqu'à l'obtention des formes moyennes et des résultats de l'ACP était moins de  $10min$ . Dans ce temps aucune interaction humaine est nécessaire. L'ordinateur portable utilisé est un Intel(R) Core(TM) avec CPU à  $2.50GHz$ . Cette méthode peut alors être appliquée dans des ordinateurs communs et son temps de calcul peut diminué si l'ordinateur utilisé est plus puissant.

### 11.4.2 Formes moyennes

Les formes moyennes ont été créées en éliminant les points aberrants. De ce fait, leur détérioration a été évitée. 10% des scans ont été vérifié avant et après l'élimination. Les points qui étaient supprimés appartenaient à du bruit dû à la lumière blanche du scanner.

Les formes moyennes des poitrines ont été créés pour chaque taille en moyennant les rayons cylindriques des sujets alignés. En appliquant la corrélation à la région des seins l'écart-type a diminué. La différence entre les deux formes (avec et sans corrélation) peut atteindre  $10mm$ . Ces différences sont expliquées par la différence d'alignement des sujets [17].

L'écart-type était plus élevé dans la région des seins par rapport à la région de dessous de poitrine. Ceci peut être expliqué par des différences existantes dans la forme des seins [102]. L'écart-type était plus élevé également dans la partie des épaules, ce qui est attendu par la définition de l'alignement des sujets aux points et régions qui appartiennent aux seins. Ceci peut être expliqué aussi par les différences de posture ou de morphologie du tronc. Cependant cette région n'est pas utilisée pour la conception des soutiens-gorge.

La poitrine moyenne n'est pas une morphologie existante. Elle est une morphologie potentiellement représentative de la population. Afin de la calculer il faut respecter les spécificités de chaque étape de la méthode. Pour l'utiliser correctement, son écart-type devra être prise en compte. Les formes moyennes ont été créées pour chaque taille suivant le système de tailles actuel.

### 11.4.3 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales a été appliquée à tous les points de la poitrine. Pour cette application les points dé-corrélés n'ont pas été choisi parce qu'avec les coordonnées cylindriques la taille des pixels cylindriques reste identique à la taille cartésienne. Un autre élément pour ce choix est l'absence des régions fortement denses avec l'absence des grandes courbures. Cependant pour l'étude de plusieurs tailles et également de poitrines fortes le choix des points dé-corrélés devra être appliqué avant l'analyse.

Les résultats ont été similaires aux résultats de la tête concernant l'explication de la morphologie par les valeurs propres. Il se trouve que, afin d'étudier la morphologie tridimensionnelle des segments anthropométriques, au moins cinq facteurs devront être étudiés.

Les résultats du premier facteur ont montré son influence sur la taille général de la forme. Ce résultat est montré dans la littérature pour la tête [11] et le corps entier [12] mais également dans les analyses de cette thèse dans la section 10.3.2.

#### 11.4.4 Tailles factorielles

La séparation en tailles factorielles étaient une première étape sur ce type d'analyse. Plusieurs sujets de différentes tailles sont à utiliser afin d'offrir un système de tailles complet. La médiane a été utilisée pour inverser les résultats de l'ACP.

Les six tailles ont donné des formes différentes de seins. Cet élément devra être étudié en prenant en compte également les caractéristiques du produit afin d'avoir un taux de couverture optimal.

#### 11.4.5 Application aux produits

Les résultats de cette application ont été utilisées pour améliorer la conception des soutiens-gorge. Les solutions facilement adaptables pour la production ont été préconisées. Les soutiens-gorge de nouvelle forme sont vendus actuellement dans les magasins.

### 11.5 Conclusion

Dans un temps limité, cette étude a amélioré l'adaptation des soutiens-gorge à la poitrine féminine. La campagne de mensuration est réalisée et les méthodes automatiques ont été appliquées afin de respecter les urgences industrielles.

Concernant l'analyse morphologique, les résultats ont montré les modifications des formes à tous les points de la poitrine. L'analyse peut de ce fait aider à la re-conception d'un système de tailles adapté.



# Discussion



# Conclusion générale

## Discussion des méthodes appliquées

L'objectif de cette thèse était d'explorer les différences morphologiques entre les populations afin de concevoir des équipements sportifs. De ce fait des données tridimensionnelles ont été utilisées afin de conserver tous les détails morphologiques du corps humain. Ces données sont traitées avec des méthodes développées dans ce manuscrit. Souvent dans la littérature uniquement l'analyse des mesures extraites est étudiée. Pour les besoins spécifiques de données tridimensionnelles, plusieurs adaptations des méthodes existantes ont été faites et d'autres méthodes ont été développées.

Le bruit et les artefacts ont été éliminés automatiquement soit avant tout traitement soit dans la procédure de moyennisation. La détérioration des résultats est alors évitée. Dans la littérature, le choix des scans de haute qualité est fait avant les analyses [11]. Pour de grandes bases de données, cette procédure est chronophage. L'application de notre méthode peut alors minimiser la perte de temps et éviter la dégradation des formes représentatives.

Ensuite, les principales mesures unidimensionnelles ont été extraites afin de réaliser les premières comparaisons sur la morphologie des populations. En utilisant des algorithmes automatiques pour l'extraction des mesures, les potentielles erreurs dues à la main d'œuvre sur les points manuellement choisis sont minimisées. Pour les longues campagnes de mensuration, pour lesquelles différentes personnes travaillent à la sélection des endroits du corps, l'erreur de reproductibilité est élevée également. Il a été prouvé que les algorithmes d'extraction sont robustes et répétables. Des adaptations peuvent rendre ces algorithmes encore plus robustes et capables d'extraire des mesures différentes de celles présentées dans ce manuscrit.

Les sujets scannés ont été représentés comme des modèles individuels de manière plus précise que les modèles existants (tableaux 1.2 et 1.3, aux pages 13 et 14). Il est devenu alors possible d'identifier et de faire correspondre chacun des points de chaque sujet afin d'appliquer correctement les méthodes statistiques.

Pour la simplification des calculs, les données tridimensionnelles ont été transformées en données bidimensionnelles avec une perte d'information et de détails morphologiques contrôlée. De ce fait, des méthodes de traitement d'images ont été appliquées pour augmenter le degré de correspondance entre les sujets. Les méthodes existantes de moyennisation et d'analyse des formes utilisent uniquement des points anatomiques afin d'aligner les sujets scannés [95, 11, 21]. Cependant, afin d'adapter des produits au corps humain, l'intérêt porte sur une région entière et pas uniquement sur quelques points anatomiques. Les résultats d'alignement sur une région ont montré une diminution de l'écart-type sur la forme moyenne. Les modèles créés sont conséquemment plus représentatifs des populations que les modèles utilisés dans la littérature [23, 21]. La région d'intérêt est modifiable et dépend de l'usage finale de la forme. Cependant le choix de la région est également une limite de notre méthodologie. Comme des formes différentes seront créées à partir d'alignement différents [17], cette région doit être choisie précautionneusement.

Un autre avantage de la méthodologie présentée est sa potentielle utilisation pour l'analyse de différentes campagnes de mensuration. Même si différents scanners sont utilisés, les algorithmes sont appliqués directement au nuage de points.

Le calcul des modèles est réalisé soit par moyennisation de la population cible, soit par application des analyses factorielles en trois dimensions. L'adaptation de ces méthodes statistiques est une étape importante de cette thèse qui a contribué à l'analyse morphologique et la description des différences entre les populations. La taille a été également prise en compte, contrairement à la littérature. Avec ces méthodes, l'analyse des formes est possible en chaque point et non seulement pour quelques mesures unidimensionnelles. En obtenant des formes représentatives de plusieurs populations ou tailles, leur comparaison peut être effectuée. De plus, comme la forme et son écart-type sont visibles il est facile de comprendre les variations entre et au sein des populations.

La construction d'un système de tailles différent de l'actuel a été testé en utilisant les résultats de l'analyse factorielle. Cependant, uniquement quelques sujets issus des tailles actuelles ont été utilisés dans cette partie. Pour une offre de tailles complète il faut étudier un nombre représentatif de sujets. Ensuite, après la création de modèles par taille le taux de couverture devra être étudié.

Le temps de calcul a été optimisé par rapport au calcul 3D, car par la méthode, si l'on veut éviter de perdre des informations sur les caractéristiques morphologiques de la forme, les données 3D sont réduites à des données 1D de profondeur. Dans la littérature, il n'y a pas de données de temps de calcul pour appliquer des modèles aux données surfaciques [11], les représenter de manière volumétrique [13] ou appliquer des transformations Lagrangiennes [21].

L'extraction des caractéristiques morphologiques a été optimisée et plusieurs futures analyses peuvent se réaliser rapidement. Cependant, même si les algorithmes sont présentés de manière détaillée, il est souhaitable de créer une interface facile à utiliser pour simplifier l'extraction par d'autres utilisateurs non spécialistes.

Toutes les analyses faites dans cette thèse impliquent uniquement des sujets immobiles, dans une pose spécifique. Les mêmes méthodes peuvent être utilisées pour analyser la morphologie d'une personne pendant le mouvement. En effet, en considérant chaque pose scannée comme un sujet, les différences morphologiques peuvent être extraites de manière identique à l'analyse des populations. Cette application peut donner des éléments intéressants sur la déformation du corps humain pendant le mouvement, applicables à la conception des produits sportifs.

Certaines parties de la méthodologie n'ont pas été utilisées dans les applications. Ces parties pourraient permettre d'extraire des éléments intéressants pour les prochaines études. Par exemple, l'application d'une analyse en composantes indépendantes (présentée dans les annexes à la section 11.5), sur les nuages de points tridimensionnels, peut éventuellement détecter un bruit qui est souvent présent. Également, la création des morphologies modèles basée sur des individus virtuels (section 6.2.3), peut être utilisée dans le cas où la base de données n'a pas suffisamment de sujets.

## Applications

L'extraction des éléments d'intérêt d'un sujet scanné par des algorithmes automatiques a été utilisée afin d'obtenir de manière rapide et précise les caractéristiques morphologiques. Une partie de ces algorithmes est utilisée également sur le logiciel d'un scanner développé chez DECATHLON.

La morphologie des populations a été étudiée et leurs différences sont calculées. Concernant les mesures unidimensionnelles, les différences ont été similaires à celles de la littérature dans les cas où des données existaient.

Cependant, les personnes qui ont les mêmes mesures unidimensionnelles n'ont pas forcément

la même forme. De ce fait, la morphologie tridimensionnelle a été étudiée. Les formes représentatives, peuvent être utilisées pour différentes applications par exemple pour créer des atlas anatomiques [48] ou des patronages de vêtements [61].

Avec les méthodes présentées et avec l'analyse des résultats statistiques les différences entre les populations sont désormais un acquis et sont déjà utilisées pour le développement de plusieurs produits adaptés à leurs utilisateurs. Les formes représentatives sont également utilisées afin d'aider ce développement. Des exemples de ces produits sont présentés sur la figure D.1. Le masque de plongée par exemple a gagné un prix interne (Innovation Awards by Decathlon), il a été élu la meilleure innovation de l'année 2014. Les travaux de cette thèse ont fortement contribué à son développement et à son succès commercial.



FIGURE D.1 – Exemples des produits où l'analyse morphologique issue de cette thèse est déjà utilisée (chaussures, masques, sous-vêtements).

Des informations qui influent sur la conception des produits ont été alors extraites. Ces informations sont comparées également avec les données normatives. La tête normative, par exemple, est plus carrée que la tête moyenne Européenne. Cette différence peut influencer l'adaptation d'un casque à la tête et diminuer son efficacité.

En étudiant la morphologie tridimensionnelle des populations, il est possible de calculer quel produit est adapté à quelle population. En connaissant également leurs différences, des solutions techniques pour les prendre en compte peuvent être étudiées. En combinant les caractéristiques morphologiques et les caractéristiques des produits, la séparation de systèmes de tailles est faite de manière plus contrôlée.

## Conclusion

En conclusion, les méthodes proposées dans cette thèse sont originales pour l'analyse de formes dans les bases de données tridimensionnelles. Elles permettent la création automatique des formes représentatives en utilisant directement les données tridimensionnelles. Pour un ensemble de sujets, la morphologie représentative peut être extraite et utilisée dans la conception des produits adaptés. Pour différents ensembles, la diversité morphologique peut être également étudiée de manière quantitative. La méthode est adaptable aux différentes parties du corps. Elle est également facile à utiliser.

Les résultats issus de l'application de la méthode se sont révélés être des informations précieuses pour l'industrie. Elles sont précises et elles sont contrôlées à chaque étape afin d'éliminer les aberrations présentes sur un nuage de points. Les analyses morphologiques ont été utilisées pour la conception des produits sportifs pour les différentes populations. Les formes moyennes tri-

dimensionnelles sont imprimées en 3D et s'utilisent également comme support pour la réalisation et la projection des produits en environnement CAO.

Comme il a été mentionné ci-dessus, les perspectives de cette thèse sont nombreuses. D'un point de vue scientifique, différentes adaptations à de nouvelles parties du corps ainsi que l'amélioration des méthodes développées vont contribuer à la meilleure compréhension de la morphologie humaine. D'un point de vue industriel, la connaissance acquise (méthodologique et morphologique) sera appliquée progressivement à l'ensemble des produits sportifs développés par l'entreprise afin d'améliorer l'adaptation de ces derniers au corps du sportif, et d'augmenter leur performance en terme de sécurité.

# Annexes



# Liste des publications

## Article soumis

A 3D morphological analysis approach for anthropometric applications  
A. Kollia, L. Navarro, L. Bouten and S. Avril  
IEEE Transactions on Image Processing

## Présentation orale

Evaluation of 3D Chinese, European and standards head morphology for helmet dimensions definition  
A. Kollia, L. Navarro, L. Bouten, J. Cornolo and S. Avril  
5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, Krakow, 2014

## Poster

Morphologie 3D : Création de modèles de visages par moyennage de scanners tridimensionnels  
A. Kollia, L. Navarro, L. Bouten, J. Cornolo and S. Avril  
Rencontres Ingénierie Santé, Saint Etienne, 2014

**L'article et le poster sont présentées ci-après.**

# A 3D morphological analysis approach for anthropometric applications

Aikaterini Kollia\*, Laurent Navarro, Laura Bouten, Stephane Avril

**Abstract**—In this paper we present a new methodology based on image statistical analysis to estimate the most representative morphological shapes in a population using 3D data. 3D scan databases are used in anthropometric applications and the case of bust morphology is developed as an example. Even today, anthropometrists commonly use 3D scans to extract 1D measurements. In this paper the use of raw 3D scanned data is proposed. The 3D principal component analysis and the creation of true 3D average shapes that are more representative of actual morphologies is developed. Algorithms were tested on a database of 180 female scans. After 3D shape analysis, reconstructed busts were created, permitting to obtain representative busts and average forms for specific sizes and to highlight asymmetry differences.

The described method is computationally efficient compared to direct 3D analyses. Scan alignment is performed automatically using image correlation without manually picked control points. Finally, 3D shape variations, including average and standard deviation values, can be originally obtained for any body part, which represents a major interest in ergonomics and product development.

**Index Terms**—Representative morphology, anthropometry, 3D statistics, principal component analysis (PCA), image correlation.

## I. INTRODUCTION

Anthropometry is the discipline that studies human body measurements. Some of its applications are population morphology analysis as well as ergonomics and product design. Although 3D scanners are used nowadays to obtain the 3D morphology, researchers commonly extract 1D measurement information to evaluate differences in morphology [1] or to create sizing systems [2], [3]. Considering that different protocols to extract 1D measurements are available [4], [5] and that 3D information is more complete for shape analysis of the human body, we aim in this paper at creating a new method for evaluating human morphology using 3D information directly.

Representative and average models were commonly employed in the literature to this purpose. For instance, 3D average shapes were reconstructed for the human face to identify genetic disorders [6]. To shift from qualitative to quantitative applications, the authors also created average faces using parametric surfaces [7]. However the average face was too perfect and appeared to be artificial [8]. Another example is from [9] who calculated 3D representative models of the

cornea. Individual corneas were expressed as topographic maps on a grid. After size normalization, their average, median, standard deviation and percentiles were calculated. But all these methods do not maintain size information. Indeed, to obtain correspondence between subjects, the 3D morphologies were scaled to a specified size. For product conception or for ergonomic design, size information is indispensable.

A method to obtain average anatomical shapes was proposed by [10]. After aligning the subjects with two anatomical landmarks, the average shape was calculated by deriving the average Lagrangian transformation from the population to a template. Their work is complementary with the work presented in [11].

Further shape statistical analyses for anthropometric applications was studied by applying Principal Component Analysis (PCA) to 3D models [12], [13]. The PCA method is widely used in many fields in the literature to compress data and extract their characteristics.

To create average models and to apply PCA on 3D data, correspondence between subjects is necessary. For the analysis of head shape of two populations [12], the model used to obtain correspondence of all scans requires anatomical landmarks to be defined [14]. In [13] whole human body scans are aligned in their center of gravity in order to apply PCA. The choice of alignment in 3D anthropometry is an essential parameter. Significant differences may result from the use of various alignment methods [15]. All averaging and analyzing methods found in the literature concern only point alignment on some landmarks. Furthermore, for the case of the whole human body, PCA results have shown 9.53% of shape variability to be a misalignment artifact [13].

For the case of bra design, it is important to have a good fit to be effective [16]. Thus, to study the complex morphology of breast, authors started to use 3D data. In [2] a Chinese bra sizing system is proposed by extracting information from 3D scans. To define size separation, they found the two principal body measurements by performing PCA to the extracted data. However, extracted data remain 1D information. To extract 1D information, various software was used that implies human work on all scans. 3D data have been studied by [17], that superimposed the 3D surfaces of the bust region to assess differences in symmetry. Nevertheless, inter-subject comparison had not been processed and the intra-subject difference was quantified only by the global root mean square difference.

The objective of this study was to assess 3D shape analysis and create 3D representative models from 3D scans databases, for use in anthropometric applications. An original analyzing

A.Kollia is with the Center for Biomedical and Healthcare Engineering, Mines Saint Etienne, France, and with Decathlon SportsLab, Villeneuve d'Acsq, France (e-mail: kkollia1@gmail.com).

L.Navarro and S.Avril are with the Center for Biomedical and Healthcare Engineering, Mines Saint Etienne, France.

L.Bouten is with Decathlon SportsLab, Villeneuve d'Acsq, France.

and averaging method is proposed. Following data collection, 3D scans are automatically processed taking into account size information and considering alignment in an entire region. We present experimental results of population variability minimization if alignment is done on a region and not only on feature lines of the human body. In this paper, this method was applied in the bust region from 3D scanned data.

Firstly, basic information of whole body scans collection will be presented. Then, emphasis will be put on several image processing procedures required for 3D analysis. Then 3D representative bust shapes will be described.

## II. PROPOSED APPROACH

### A. Subjects and data collection

For the purpose of this study, the example of shape analysis of nude female bust is given. In order to obtain its complete 3D morphology, 180 subjects were scanned with a NX16 (TC<sup>2</sup>) white light scanner. According to the standards [18], the subjects stood with their feet 200 mm apart, and the arms extended to form an angle of 20° with respect to the bust. The point cloud of the whole body was exported and used so as to avoid disadvantages of surface reconstruction [19].

### B. Algorithm implementation

The entire algorithm was developed on the MATLAB platform (MATLAB R2012a, The MathWorks Inc., Natick, MA, 2012). No special characteristics for the PC were required.

### C. Measurements extraction

To identify the bust region, the whole body scan was segmented into six parts: torso, head, two arms and two legs. The first segment removed was the head by analyzing the 2D silhouette of the frontal plane. By fitting a convex hull to the silhouette, the neck's reference point was located at the greatest perpendicular distance between the silhouette and the convex hull [20]. The armpits and the crotch points were then extracted. The frontal plane of the 3D point cloud was projected in a 2D image and the contour edges were detected. Meeting points of contour edges corresponded on armpits and crotch position [21].

Current bust sizing systems use bust and under-bust measurements to define each size. To extract the two measurements, the unorganized point cloud was organized in slices along the vertical axis. For every slice, the convex perimeter was calculated [22]. General morphological characteristics of female torso allows for the simulating of the profile of convex perimeters with a four-degree polynomial. The theoretical point of torsos separation was located on the minimum convex perimeter between the first and the last root of this polynomial. To obtain the position of the bust perimeter, the front profile of upper torso was also simulated with a four-degree polynomial. This perimeter was located in the maximum profile point between first and last root of the polynomial.

### D. First alignment of scans

To ensure the coordinate correspondence of scans, the origin in the vertical axis was located at the height of the under-bust. For the lateral axis, the origin was located on the centroid of the under-bust points. The third coordinate of the origin was located on the torso's front part (bust region) with lateral and vertical coordinate as defined.

### E. From 3D data to image coordinates

The point cloud can be represented as a 2D depth map [23] using cylindrical coordinates. If  $(m, n)$  are the image coordinates of the depth map and  $\rho$  the depth information:

$$\begin{aligned} (\rho, m, n) &\in P, P \in \mathfrak{P}(\mathbb{R}^3) \\ (m, n) &\rightarrow f(m, n) = \rho \\ f : \mathbb{R}^2 &\rightarrow \mathbb{R} \end{aligned}$$

Now  $f(m, n)$  can be digitalized to be treated as an image. Its digitalization is the result of averaging  $f(m, n)$  values that corresponds to the same pixel location. This operation leads to a relative loss of information which is proportional to the resolution of the final image. The resolution needs to be chosen taking into account the precision needed for the application. For the application presented in this paper the resolution for the depth map expressed in cylindrical coordinates was  $1^\circ \times 5mm$ .

Morphological information of all subjects can be evaluated with image processing tools. In addition, as the images are aligned at the under-bust height, the procedure of analyzing 3D data could be started. But firstly, relative position of subjects will be optimized.

### F. Optimization of subjects' relative position

The aim of this study was to obtain an average shape that has the minimum standard deviation in bust area. Also, the object shape resulting from statistical analysis of 3D data will depend on the selection of the alignment reference points [15]. As the interest was a region and not anatomical landmarks, average shape should result from aligning the entire region.

The depth map gives information of the entire torso segment. The region of interest was the breast region that is illustrated in figure 1. This image has been used to obtain its optimized position on every scan when the correlation coefficient  $r$  is maximized.

The correlation coefficient of two images  $A$  and  $B$  in the relative position  $(s, t)$  is given by:

$$r_{s,t} = \frac{\sum_m \sum_n (\rho_{m,n}^A - \bar{\rho}^A)(\rho_{m,n}^B - \bar{\rho}^B)}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (\rho_{m,n}^A - \bar{\rho}^A)^2\right) \left(\sum_m \sum_n (\rho_{m,n}^B - \bar{\rho}^B)^2\right)}}$$

where  $\rho$  is the depth information,

$$\bar{\rho}^A = \frac{1}{m \cdot n} \sum_m \sum_n \rho_{m,n}^A$$

and  $m \times n$  are the dimensions of images to correlate.

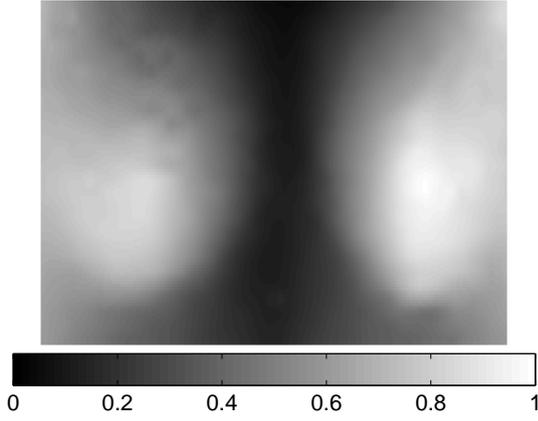


Fig. 1: Normalized depth map of breasts' region in which differences between subjects are minimized.

By calculating the  $r_{s,t}$  of all possible relative positions, a matrix of dimension  $(s, t)$  is created. The best relative position of the scan and the base image is the position

$$s, t \mid \arg \max (r_{s,t}).$$

When all scans are aligned with the reference image, their deviation in the region of interest is minimized.

The same procedure was applied also to align left and right breast to study breast's asymmetry. To this end, the bust region was separated in the middle and the left side was mirrored.

#### G. Averaging with elimination of aberrant points

All scans then have corresponding points (on each pixel) that can be treated as landmarks. For each pixel  $(m, n)$ , the mean depth value  $\mu_{m,n}$  and its standard deviation  $\sigma_{m,n}$  have been calculated. To avoid deterioration of the mean value due to aberrant points, a repeated procedure was applied (figure 2). Specifically, when a value exceeded a determined limit, it was deleted and new  $\mu_{m,n}$  and  $\sigma_{m,n}$  were calculated. This procedure took place until no aberrant points were detected. Furthermore, when there were more than 5% of aberrant points for one subject, the entire scan was deleted.

For anthropometric applications a non-aberrant value is included in the limits of  $[\mu_{m,n} \pm 3 \cdot \sigma_{m,n}]$  [24].

#### H. Principal component analysis to three-dimensional data

As aberrant points are eliminated and scans are aligned, the depth of every corresponding point was considered as an anthropometric element. Thereby, a principal component analysis (PCA) was applied on the bust region for all subjects.

For each component the minimum and maximum values of individual coordinates were calculated. By inverting PCA results, the morphology from these values was extracted. To obtain information about subjects' asymmetry, the variables' coordinates of left region were mirrored and compared to the variables' coordinates of the right one.

To experiment a different size separation, females of six current sizes (total 126 subjects) were separated based on PCA individuals' coordinates. The separation was done in the

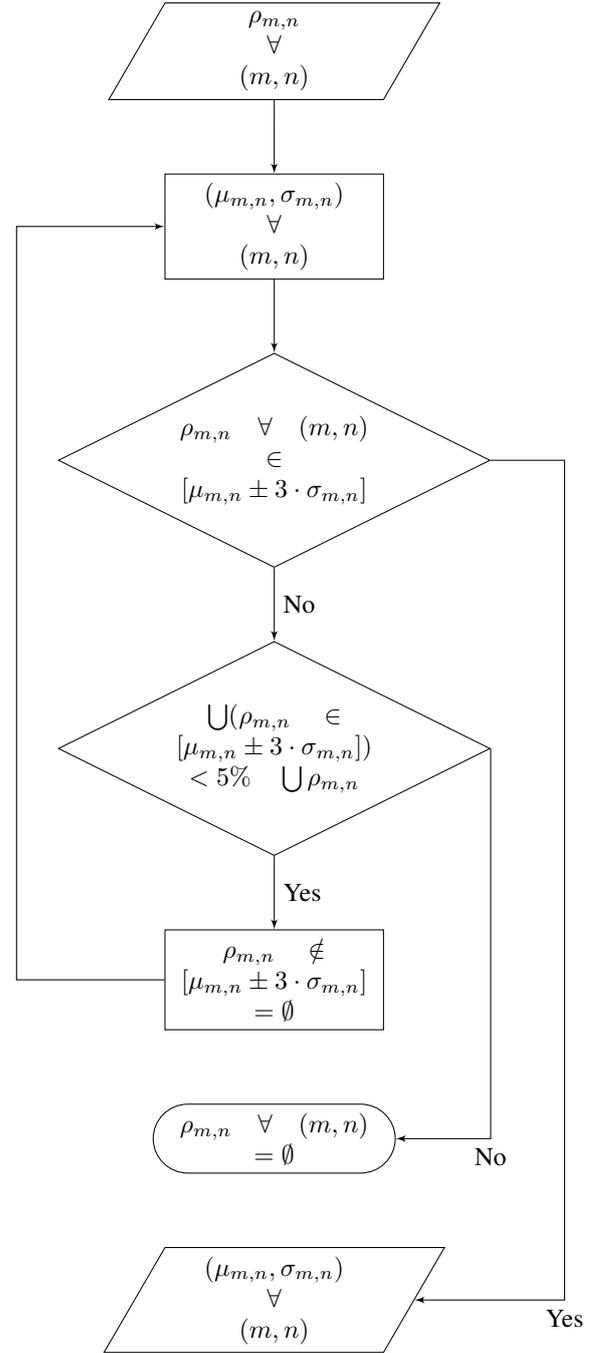


Fig. 2: Repeated procedure to eliminate aberrant points and obtain 3D average morphology.

first two components in order to create the same number of sizes as the current sizing system. Thus, the first component was separated in three and the second component in two parts (individual-equal distributed). For each size, median coordinate values were calculated to indicate the "typical" individual of the size and predict its morphology by inverting PCA results.

### III. EXPERIMENTAL RESULTS

The average shape and its standard deviation were calculated for each size of the current sizing system. Figure 3 represents the average form of size 90B (subjects with under-bust perimeter: 73-77 mm and bust perimeter: 88-90 mm). The gray scale gradation is the normalized standard deviation. Darker colors correspond to regions with less difference between subjects in comparing with lightest regions.

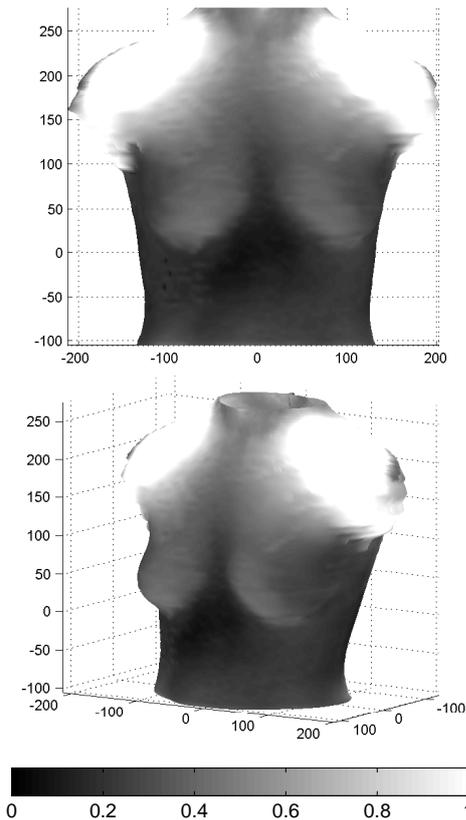
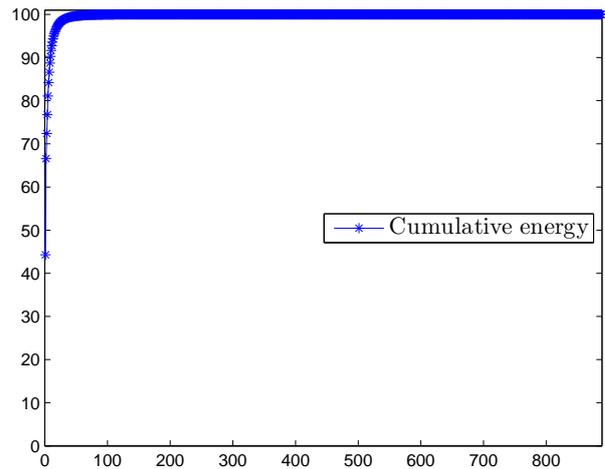


Fig. 3: 90B average form with normalized standard deviation (axes in mm).

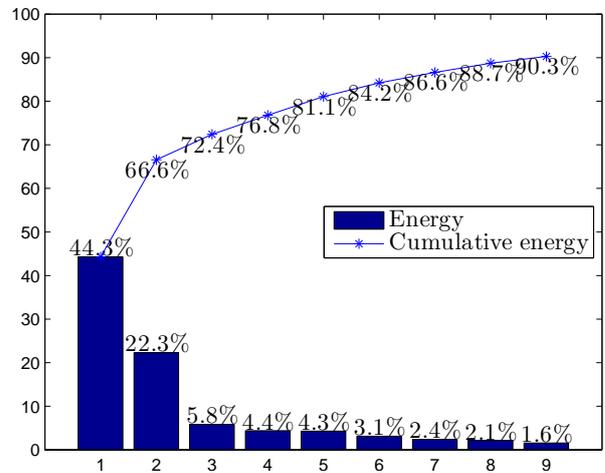
As shown in the figure, around the under-bust perimeter the differences were smaller. As could be expected, since all subjects belonging to one size had similar under-bust circumference and shape. Also the image correlation was applied in this region. In comparison, even if the bust circumference was also similar, the breast region deviation was larger. That could result from existing differences in breast shape as authors already concluded [2]. High standard deviation around the shoulder area could be explained by differences in torso morphotype as well as differences in upper posture.

Regarding PCA results, nine components are needed to explain 90% of the 3D subjects' bust morphology (figure 4). The variables' coordinates of the first three components (72.4%) are presented in figure 5. First component indicates size effect as all variables are of the same sign. Second and third components indicate shape effect.

To observe the results more easily, variables' coordinates are displayed on the average 3D bust morphology (figure 6).



(a) Cumulative energy of all components.



(b) First nine components to explain more than 90% of the 3D subjects' bust morphology.

Fig. 4: Percentage of eigenvector's energy content.

From the distribution of coordinates on the morphology, some detailed information can be extracted. The size effect of the first component is more affected by bust's points and less from under-bust's points. Therefore, one can explain that the global size increases by 44.3%, but the bust region increases more than the under-bust region. The shape effect of the second component is affected positively from the interior breast part and negatively from the exterior part. That could result in breasts centralized or not. The 3rd component indicates under-bust increase when bust decreases and vice versa. In the 4th and 5th components, breast's asymmetry can be seen. The 6th one increases the lower bust's part when the upper part decreases. All these statements are just the basic visual observations for each component. All the other details of morphological variations that each component affects can not be summarized in one sentence.

These results can also be observed by the shapes reconstructed from minimum and maximum values of individual coordinates for each component (figure 7).

To study asymmetry effect, left and right side of variables'

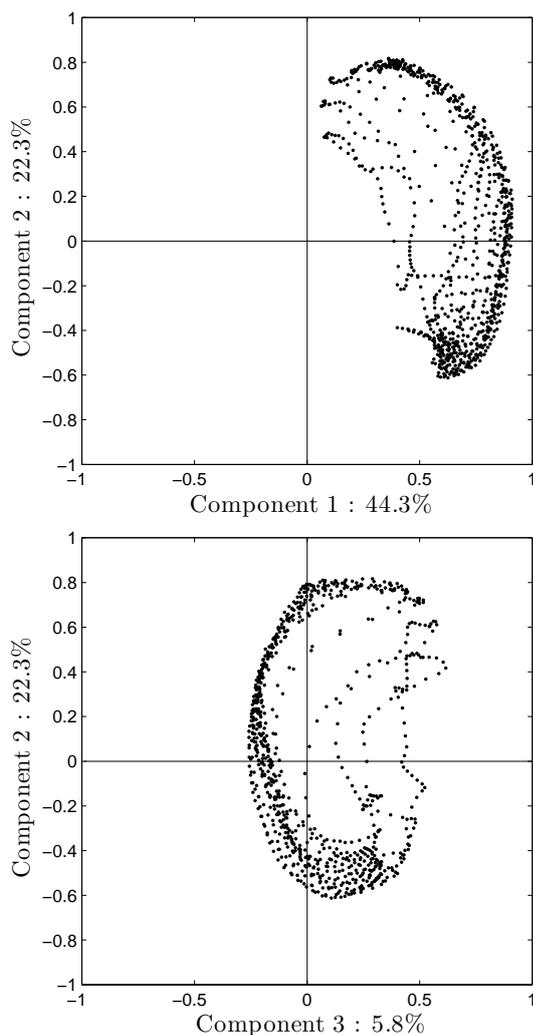


Fig. 5: Variable's coordinates of the first three components (72.4%). Each point on the plot corresponds to a point on the bust.

coordinates were subtracted. Differences for the first six components can be seen in figure 8. The effect of asymmetry is more visible on the 5th component. On other components it exists and is located around breast's edge. It can thus explain differences on breast's position.

Left and right subjects' morphologies were also superimposed using image correlation. It was found that the right breast is significantly more centralized ( $p < 0.001$ ) than the left one. Concerning vertical asymmetry, left breast is significantly higher ( $p < 0.05$ ) than the right one.

Size separation by individuals coordinates gave six sizes shapes. Two by two had similar bust perimeter but with different breast shapes.

#### IV. DISCUSSION

This study uses 3D anthropometric information and proposes a method to analyze shapes and obtain representative models from 3D scan databases. 3D information is used to

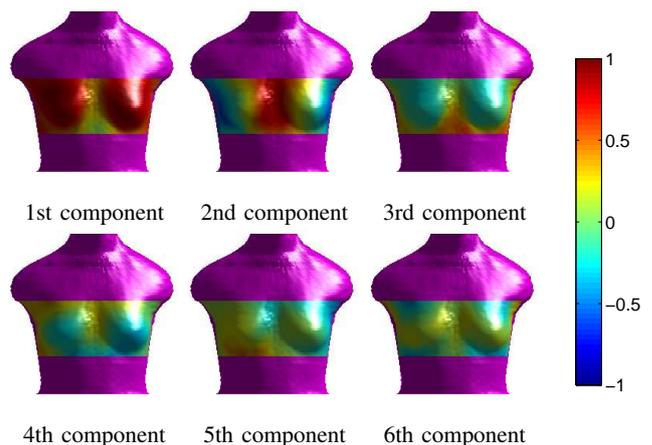


Fig. 6: Variables' coordinates of the first six components (84.2%) plotted on 3D bust morphology. The color of each point indicates the value of its coordinate.

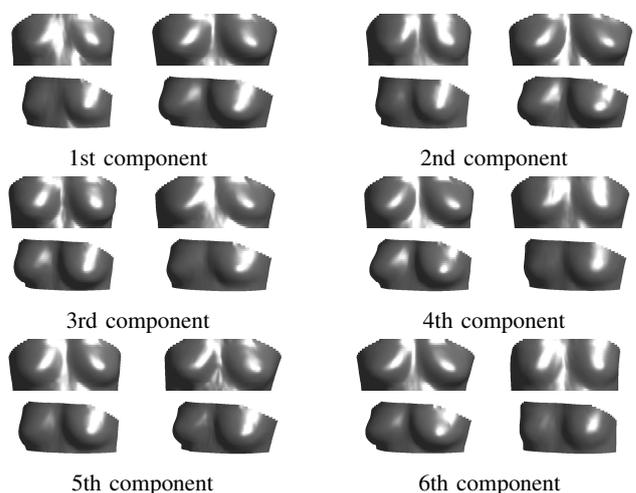


Fig. 7: "Minimum" and "maximum" morphology for the first six components. These morphologies were obtained for each component by inverting PCA results using minimum (first column) and maximum (second column) values of individual coordinates. Two views of each morphology are given.

obtain shape variation in all points of examined bust region and not on some extracting measurements [2].

By identifying automatically coincident regions of the human body, the potential repeatability error of manually picked points is eliminated. Another interest is that with automatic extraction, reproducibility error can also be removed as, during long measurement campaigns, different operators are possibly needed. However, these algorithms were created for our sample where the majority of the subjects belonged to small cup sizes. Therefore, these algorithms need to be tested for different morphologies including subjects from all sizes as well as men.

By eliminating aberrant points, deterioration of average shape is automatically avoided. 10% of the scans were examined before and after elimination. The points deleted were

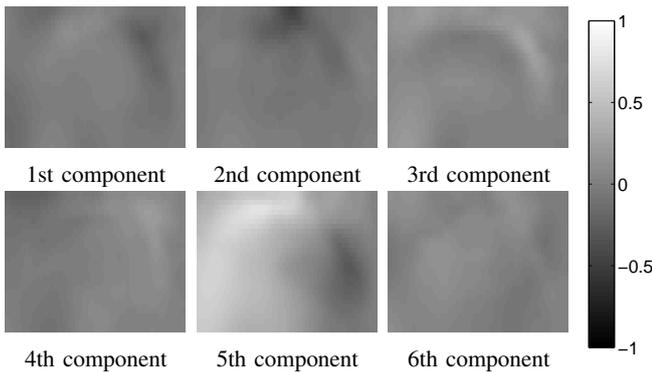


Fig. 8: Asymmetry of variables' coordinates obtained by subtraction of left and right side.

noise due to white light scanner. With this procedure, some scans are eliminated too. However, as the list of these scans is available, the reasons for elimination have been examined. It seemed that elimination was due to an incorrect saving procedure that resulted in scans with all coordinates equal to zero. In the literature, a choice of "high-quality scans" is done before analysis [12]. For large databases, where it is time consuming to control scans one by one, the presented procedure can save time and prevent average shape degradation.

Existing shape averaging and analyzing methods use only anatomical landmarks to align individual scans [7], [12], [10]. However, for a product's fit, the interest is on the region where it will be fitted and not on some anatomical landmarks. With the proposed method, as subjects are aligned by using an entire region of interest, 3D morphological deviations are minimized. The standard deviation, before and after alignment on bust region, is given in figure 9. Deviation was minimized by 28% (sum of standard deviations on region's points). The alignment region can be modified and is related to the final use of average shape. For example, if the interest was on pregnant abdomen shape, the reference image should include abdomen's region. However, this is also a limit of the method. As different average shapes will be created in the use of different alignment methods [15], this region needs to be chosen carefully.

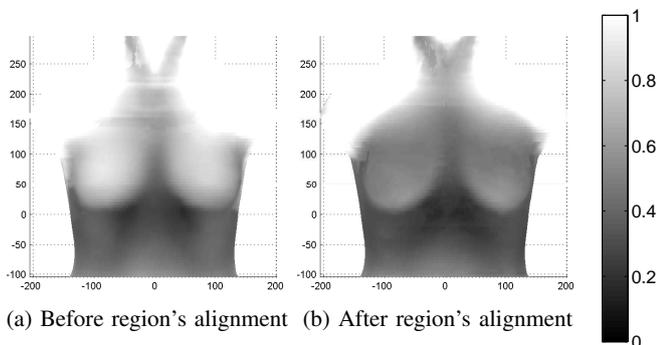


Fig. 9: Average form with normalized standard deviation before and after region's alignment (axes in mm).

Considering that aberrant points were eliminated and standard deviation was controlled, the averaging shape shows

information about representative morphology and variations between subjects of the sample. Notice that in this paper, we give normalized values of standard deviation due to confidentiality. But initial standard deviation values are of the same measure units as depth maps. This means that the population's variation is simple to understand and to use.

The method's algorithm was implemented on the MATLAB platform. It is computationally efficient compared to 3D calculus as it reduces the 3D data to 1D depth data without losing information on morphological shape characteristics. For 180 subjects, the run time from transforming scans into depth maps to obtain average shape and PCA results, was less than 10min with no human interaction needed. Considering that the computer used is a laptop Intel(R) Core(TM) with CPU at 2.50GHz this method can be applied on common computers and its time can be improved if a more powerful computer is used. In the literature no information about computational time is given, either to apply models to surface data [12], converting them to a volumetric representation [13] or preprocessing them and apply Lagrangian transformation [10].

Representative shapes can be used in different applications, from establishing statistical atlases [25] to generate garment pattern [26]. With the use of the method, one could calculate representative shapes for such applications and also analyze 3D differences between various populations or sizes. Even if different 3D scanners are used, the algorithm is directly applied on 3D point cloud. By obtaining average and standard deviation values for more than one population or size, their morphologies could be compared as [9] did for human cornea. In addition, as all scans are aligned in the region of interest, statistical analyses have been applied for each corresponding pixel-landmark.

To analyze each pixel-landmark and its affection to overall shape, PCA was applied. For its analysis, variable's coordinates were displayed on 3D morphology (figure 6). This presentation is very important as it gives detailed information about shape variation in each region. The first component is related to general size of individuals. This is also shown in the literature for head [12] and whole human body [13] shape variation.

From the analysis, principal shape results have been extracted. Yet, more results could be obtained. For example, as the first component has size effect, one could analyze differences in left and right breast size by summarizing variable's coordinates on each side. In this study the objective was to develop the method and its potentials. Shape analysis can be detailed and more specifically evaluated in future studies.

A different separation of the sizing system was also studied. This could be the first step of an analysis including subjects of all sizes. Sizes can also be separated by applying classification methods to PCA individuals' coordinates. Using PCA results, [27] clustered facial images. In our case, details obtained by also calculating sizing system coverage rate needs to be examined if the creation of a new sizing system is considered. PCA was used in order to compare our results with previous studies. Once depth maps without aberrant points are computed and aligned, different analyses can be applied. Independent component analysis [28] or nonlinear component

analysis [29] are examples of such analyses. To create sizing systems, the method presented in [3] could potentially be applied using the 3D data information.

## V. CONCLUSION

In this paper a 3D shape analysis method for statistical anthropometric applications is developed. First, 1D measurements were extracted and 3D scans were transformed into 2D depth maps. Then, scans were aligned in the bust region in order to obtain high correspondence between them. Representative shape was computed and PCA was applied on 3D morphological information. Some PCA results were analyzed to show the interest of the method.

The proposed method is original for shape analysis on 3D scans databases. It also permits automatic creation of 3D average shapes. Representative morphology can be extracted for a sample and can be used in product development. For different samples, 3D anthropometrical diversity can be studied too. With the modification of the body part-linked coordinate system and the region of interest to optimize subjects relative position, the method can be applied for other body parts. The method is easy to use as it is based on common mathematical tools.

## REFERENCES

- [1] C. Li-Xia, Z. Xin, and S. Ming-Wang, "Research on subdivision of female breasts based on 3-dimensional interactive anthropometric technology," in *Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2008. ICBBE 2008. The 2nd International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 1312–1315.
- [2] R. Zheng, W. Yu, and J. Fan, "Development of a new chinese bra sizing system based on breast anthropometric measurements," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 37, no. 8, pp. 697–705, 2007.
- [3] G. Vinué, T. León, S. Alemany, and G. Ayala, "Looking for representative fit models for apparel sizing," *Decision Support Systems*, vol. 57, pp. 22–33, 2014.
- [4] J. Patry-Parisien, M. Shields, and S. Bryan, "Comparison of waist circumference using the world health organization and national institutes of health protocols," *Health reports/Statistics Canada, Canadian Centre for Health Information= Rapports sur la sante/Statistique Canada, Centre canadien d'information sur la sante*, vol. 23, pp. 53–60, 2012.
- [5] K. P. Simmons, "Body measurement techniques: a comparison of three-dimensional body scanning and physical anthropometric methods," Ph.D. dissertation, North Carolina State University, 2001.
- [6] A. Shaweesh, C. Thomas, A. Bankier, and J. Clement, "Delineation of facial archetypes by 3d averaging," *Annals of the Royal Australasian College of Dental Surgeons*, vol. 17, p. 73, 2004.
- [7] C. Thomas, P. Claes, A. Shaweesh, and J. Clement, "Three-dimensional facial shape archetypes for identification and diagnosis," in *Biological Shape Analysis: Proceedings of the 1st International Symposium*. World Scientific, 2011.
- [8] P. Claes, M. Walters, and J. Clement, "Novel approaches in 3-dimensional facial profiling to establish facial aesthetic objectives in the treatment of facial dysmorphologies," *Annals of the Royal Australasian College of Dental Surgeons*, vol. 20, p. 56, 2010.
- [9] E. Auvinet, J. Meunier, J. Ong, G. Durr, M. Gilca, and I. Brunette, "Methodology for the construction and comparison of 3d models of the human cornea," in *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 Annual International Conference of the IEEE*. IEEE, 2012, pp. 5302–5305.
- [10] G. E. Christensen, H. J. Johnson, and M. W. Vannier, "Synthesizing average 3d anatomical shapes," *Neuroimage*, vol. 32, no. 1, pp. 146–158, 2006.
- [11] A. Guimond, J. Meunier, and J.-P. Thirion, "Average brain models: A convergence study," *Computer vision and image understanding*, vol. 77, no. 2, pp. 192–210, 2000.
- [12] R. Ball, C. Shu, P. Xi, M. Rioux, Y. Luximon, and J. Molenbroek, "A comparison between chinese and caucasian head shapes," *Applied Ergonomics*, vol. 41, no. 6, pp. 832–839, 2010.
- [13] Z. Ben Azouz, M. Rioux, C. Shu, and R. Lepage, "Characterizing human shape variation using 3d anthropometric data," *The Visual Computer*, vol. 22, no. 5, pp. 302–314, 2006.
- [14] B. Allen, B. Curless, and Z. Popović, "The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans," in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 22, no. 3. ACM, 2003, pp. 587–594.
- [15] X. Cai, Z. Li, C.-C. Chang, and P. Dempsey, "Analysis of alignment influence on 3-d anthropometric statistics," *Tsinghua Science & Technology*, vol. 10, no. 5, pp. 623–626, 2005.
- [16] K. Page and J. Steele, "Breast motion and sports brassiere design," *Sports Medicine*, vol. 27, no. 4, pp. 205–211, 1999.
- [17] A. Losken, I. Fishman, D. D. Denson, H. R. Moyer, and G. W. Carlson, "An objective evaluation of breast symmetry and shape differences using 3-dimensional images," *Annals of plastic surgery*, vol. 55, no. 6, pp. 571–575, 2005.
- [18] "3-d scanning methodologies for internationally compatible anthropometric databases," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, Norm ISO 20685, 2010.
- [19] P. N. Azariadis and N. S. Sapidis, "Drawing curves onto a cloud of points for point-based modelling," *Computer-Aided Design*, vol. 37, no. 1, pp. 109–122, 2005.
- [20] J. H. Nurre, J. Connor, E. A. Lewark, and J. S. Collier, "On segmenting the three-dimensional scan data of a human body," *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 8, pp. 787–797, 2000.
- [21] M.-J. J. Wang, W.-Y. Wu, K.-C. Lin, S.-N. Yang, and J.-M. Lu, "Automated anthropometric data collection from three-dimensional digital human models," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, no. 1-2, pp. 109–115, 2007.
- [22] J.-M. Lu and M.-J. J. Wang, "Automated anthropometric data collection using 3d whole body scanners," *Expert Systems with Applications*, vol. 35, no. 1, pp. 407–414, 2008.
- [23] I.-F. Leong, J.-J. Fang, and M.-J. Tsai, "Automatic body feature extraction from a marker-less scanned human body," *Computer-Aided Design*, vol. 39, no. 7, pp. 568–582, 2007.
- [24] "General requirements for establishing anthropometric databases," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, Norm ISO 15535, 2007.
- [25] C. Hoogendoorn, N. Duchateau, D. Sanchez-Quintana, T. Whitmarsh, F. M. Sukno, M. De Craene, K. Lekadir, and A. F. Frangi, "A high-resolution atlas and statistical model of the human heart from multislice ct," *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, vol. 32, no. 1, pp. 28–44, 2013.
- [26] S. M. Kim and T. J. Kang, "Garment pattern generation from body scan data," *Computer-Aided Design*, vol. 35, no. 7, pp. 611–618, 2003.
- [27] M. J. Lyons, J. Budynek, and S. Akamatsu, "Automatic classification of single facial images," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 21, no. 12, pp. 1357–1362, 1999.
- [28] A. Hyvarinen, "Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis," *Neural Networks, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 3, pp. 626–634, 1999.
- [29] B. Schölkopf, A. Smola, and K.-R. Müller, "Kernel principal component analysis," in *Artificial Neural Networks-ICANN'97*. Springer, 1997, pp. 583–588.

# MORPHOLOGIE 3D

## Création de modèles de visages par moyennage de scanners tridimensionnels

### Objectif

L'analyse anthropométrique est basée actuellement sur des mesures unidimensionnelles. Cependant, la complexité de la morphologie du corps humain impose une analyse tridimensionnelle. De plus, la technologie des scanners 3D a progressé, les rendant accessibles et facile à utiliser.

Dans la littérature, des méthodes pour la création des formes moyennes 3D existent, mais ces méthodes ne peuvent pas être utilisées pour une analyse quantitative [1], n'incluent pas l'information de taille, et créent des visages atypiques [2].

L'objectif de cette étude est de développer une méthode robuste pour la création des modèles anthropométriques représentatifs de la population étudiée, puis de comparer les modèles entre eux pour obtenir les écarts entre différentes populations.

### Public cible

Selon l'application, le public cible peut différer. Pour la conception des produits adaptés à la population, le public cible est l'ensemble des pratiquants. D'une manière globale, la méthode peut être appliquée à toute personne ayant fait l'objet d'un scan 3D du visage et/ou de la tête.

### Résultats

Les formes moyennes ont été calculées à partir des morphologies 3D et non par extrapolation des mesures 1D. Par conséquent, cette forme reste représentative de la population étudiée.

L'information de taille est incluse dans la procédure et ces formes peuvent être utilisées pour la conception des produits.

Sur l'exemple d'analyse quantitative, la comparaison entre la morphologie des femmes européennes et chinoises est présentée.

### Applications possibles

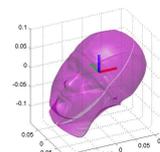
Cette méthode a été utilisée pour la conception des masques et des casques, mais il est aussi envisagé de l'utiliser pour la détection des dysmorphies faciales et des troubles génétiques.



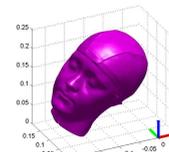
### Matériel et méthodes

**Base de données 3D :** 446 femmes chinoises (www.sizechina.com), 389 femmes européennes (campagne de mensuration « Decathlon » 2010).

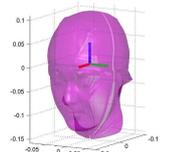
**Déplacement et rotation :** automatique, par rapport aux deux points anatomiques glabella (arrondi lisse entre les sourcilles) et opisthocranion (point le plus arrière du crâne).



a) définition du première axe



b) déplacement



c) rotation

**Superposition des sujets :** Indexation sur un maillage sphérique et optimisation de la position relative dans la région d'intérêt.

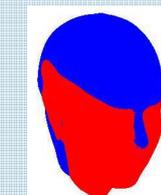


d) Coordonnées sphériques et région d'intérêt

**Formes moyennes tridimensionnelles :** Elimination des points aberrants et calcul de la moyenne à chaque nœud du maillage.



a) Forme moyenne de la population européenne (bleu) et chinoise (rouge)



b) Différence des deux populations : quantifiée en binaire (à gauche) et avec une échelle de couleur (à droite)

### Références

[1] : Three-dimensional facial shape archetypes for identification and diagnosis, Thomas et al, 2011, Proceedings of the 1st International Symposium on Biological Shape Analysis

[2] : Novel approaches in 3-dimensional facial profiling to establish facial aesthetic objectives in the treatment of facial dysmorphologies, Claes et al, 2010, Annals of the Royal Australasian College of Dental Surgeons



# Méthodologie étudiée et non utilisée

Ce chapitre présente les travaux qui ont été réalisés et qui n'ont pas abouties à des résultats interprétables lors de cette thèse.

## Analyse en composantes indépendantes

### Description de la méthodologie

L'analyse en composantes indépendantes (ACI) est une méthode d'analyse statistique multidimensionnelle comme l'ACP (présentée à la section 6.2.1). Les composantes linéaires sont recherchées de manière à être aussi indépendantes que possible. Cette méthode a été testée afin d'étudier la possibilité d'obtenir des composantes statistiques différentes de celles d'ACP. Pour comprendre mieux l'ACI elle va être comparée avec l'ACP. Les principaux points de la comparaison sont [51, 19, 9] :

- L'algorithmique de l'ACP est simple à comprendre et à mettre en œuvre (section 6.2.1). Par contre, il n'y a pas d'algorithme d'ACI universel car il n'est pas direct ni de définir des versions empiriques du critère d'indépendance ni de les optimiser. Cependant, il a été montré que la plupart des critères d'optimisation des différents algorithmes ACI conduisent à des résultats similaires, voire identiques [52, 18].
- Pour appliquer l'ACI il faut que les données soient non-gaussiennes puisque l'indépendance se réduit alors à la dé-corrélation. On pourrait dire que l'ACI est l'art d'intégrer l'information non gaussienne dans la recherche de composantes.
- Contrairement à l'ACP, les vecteurs de l'ACI ne sont ni orthogonaux ni en ordre. Par ailleurs l'orthogonalité n'est pas physique (il n'y a pas de raison de supposer une orthogonalité géométrique de deux composantes).
- Alors que l'ACP est toujours possible, une ACI "réussie" n'est possible que s'il existe des composantes sous-jacentes. L'objectif implicite de l'ACI est souvent de trouver des composantes physiquement significatives. C'est à la fois une force et une faiblesse : les objectifs de l'ACP sont plus modestes, mais ils sont toujours atteints car l'analyse ne cherche pas de composante ayant une réalité physique.

### Mise en place et résultats

L'algorithme utilisé est le *fastICA* (version 2.5) [37] disponible sur internet. Cet algorithme est un des plus connues dans la littérature. Les données tests sont les points tridimensionnels des têtes scannées féminines des deux campagnes de mensuration (Europe et Chine). Après avoir

appliquer l'algorithme, les coordonnées des individus sur les deux premiers composants ont été séparées en quatre parties afin de créer des tailles factoriels (la procédure est expliquée dans la section 7.1). En moyennant les têtes appartenant à chaque taille, il n'y avait pas des différences facilement visibles. Cependant les points extrêmes sur les axes appartenaient à des têtes avec des caractéristiques spécifiques (par exemple un tête fortement développé dans le front et dans une des cotés).

## **Discussion**

Pour cette thèse, l'ACI a été testé afin de détecter d'autres méthodes statistiques que l'ACP pour analyser la morphologie tridimensionnelle des populations. Comme ses résultats étaient difficilement interprétables, elle n'a pas été retenue pour cause de priorités différentes de la thèse. Il se trouve également que la morphologie humaine ne pourrait pas être décrite par des composantes indépendantes à cause de sa nature (par exemple la limite biologique sphérique des os du crâne). Cependant cette méthodologie pourrait faire l'objet d'une étude séparée afin de détecter ses principaux défauts pour son adaptation à l'analyse de la morphologie tridimensionnelle.

# Bibliographie

- [1] Asian ergonomic lab. [www.sizechina.com](http://www.sizechina.com).
- [2] Méthodologie de mesure de confort d'accueil (basé sur les méthodes et résultats du projet européen de recherche "footwear gets a 21st century refit"). Protocole interne, Decathlon.
- [3] Muhammad H Al-Haboubi. Anthropometry for a mix of different populations. *Applied Ergonomics*, 23(3) :191–196, 1992.
- [4] Marc Alexa, Johannes Behr, Daniel Cohen-Or, Shachar Fleishman, David Levin, and Claudio T Silva. Computing and rendering point set surfaces. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 9(1) :3–15, 2003.
- [5] Nina Amenta and Yong Joo Kil. Defining point-set surfaces. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 23, pages 264–270. ACM, 2004.
- [6] Emmanuelle AMOROS, Mireille Chiron, Bertrand THELOT, Jean-Louis Martin, Bernard Laumon, et al. Bicycle helmet efficacy : first case-control study in france. In *15th European Congress of Trauma and Emergency Surgery*, 2013.
- [7] Phillip N Azariadis and Nickolas S Sapidis. Drawing curves onto a cloud of points for point-based modelling. *Computer-Aided Design*, 37(1) :109–122, 2005.
- [8] Arnold Baca. Precise determination of anthropometric dimensions by means of image processing methods for estimating human body segment parameter values. *Journal of biomechanics*, 29(4) :563–567, 1996.
- [9] Kyungim Baek, Bruce A Draper, J Ross Beveridge, and Kai She. Pca vs. ica : A comparison on the feret data set. In *JCIS*, pages 824–827, 2002.
- [10] Li Bai and Yi Song. Parametric 3d object representation and applications. In *Computer Graphics, Imaging and Visualisation, 2007. CGIV'07*, pages 169–176. IEEE, 2007.
- [11] Roger Ball, Chang Shu, Pengcheng Xi, Marc Rioux, Yan Luximon, and Johan Molenbroek. A comparison between chinese and caucasian head shapes. *Applied Ergonomics*, 41(6) :832–839, 2010.
- [12] Zouhour Ben Azouz, Marc Rioux, Chang Shu, and R Lepage. Analysis of human shape variation using volumetric techniques. 2004.
- [13] Zouhour Ben Azouz, Marc Rioux, Chang Shu, and Richard Lepage. Characterizing human shape variation using 3d anthropometric data. *The Visual Computer*, 22(5) :302–314, 2006.
- [14] Paul J Besl and Neil D McKay. Method for registration of 3-d shapes. In *Robotics-DL tentative*, pages 586–606. International Society for Optics and Photonics, 1992.
- [15] Elodie Billard. Campagne de mensuration : Validation outils de mesure et analyse morphologique. Rapport d'étude, Oxylane Research - Faculté des sciences du sport, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, 2010.

- [16] Martin J Bland and Douglas G Altman. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The lancet*, 327(8476) :307–310, 1986.
- [17] Xiuwen Cai, Zhizhong Li, Chien-Chi Chang, and Patrick Dempsey. Analysis of alignment influence on 3-d anthropometric statistics. *Tsinghua Science & Technology*, 10(5) :623–626, 2005.
- [18] Jean-François Cardoso. Infomax and maximum likelihood for blind source separation. 1997.
- [19] Jean-François Cardoso. Analyse en composantes indépendantes. *Proc. of XXXIV Journées de Statistique, Bruxelles*, 2002.
- [20] Dmitry Chetverikov, Dmitry Stepanov, and Pavel Krsek. Robust euclidean alignment of 3d point sets : the trimmed iterative closest point algorithm. *Image and Vision Computing*, 23(3) :299–309, 2005.
- [21] Gary E Christensen, Hans J Johnson, and Michael W Vannier. Synthesizing average 3d anatomical shapes. *Neuroimage*, 32(1) :146–158, 2006.
- [22] Bavornrit Chuckpaiwong, James A Nunley, and Robin M Queen. Correlation between static foot type measurements and clinical assessments. *Foot & ankle international*, 30(3) :205–212, 2009.
- [23] Peter Claes, Mark Walters, and John Clement. Novel approaches in 3-dimensional facial profiling to establish facial aesthetic objectives in the treatment of facial dysmorphologies. *Annals of the Royal Australasian College of Dental Surgeons*, 20 :56, 2010.
- [24] Aurélien Crida and Konstantin Batygin. Spin-orbit angle distribution and the origin of (mis) aligned hot jupiters. *arXiv preprint arXiv :1405.0960*, 2014.
- [25] Peter A Cripton, Daniel M Dressler, Cameron A Stuart, Christopher R Dennison, and Darrin Richards. Bicycle helmets are highly effective at preventing head injury during head impact : Head-form accelerations and injury criteria for helmeted and unhelmeted impacts. *Accident Analysis & Prevention*, 70 :1–7, 2014.
- [26] Association Française de Normalisation. Paris. Fausses têtes à utiliser lors des essais de casques de protection. 2006.
- [27] Laura Dekker, Ioannis Douros, BF Buston, and P Treleaven. Building symbolic information for 3d human body modeling from range data. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 1999. Proceedings. Second International Conference on*, pages 388–397. IEEE, 1999.
- [28] Takehiko Doi, Ryota Yamaguchi, Tsuyoshi Asai, Minoru Komatsu, Daisuke Makiura, Masanori Shimamura, Soichiro Hirata, Hiroshi Ando, and Masahiro Kurosaka. The effects of shoe fit on gait in community-dwelling older adults. *Gait & posture*, 32(2) :274–278, 2010.
- [29] Ioannis Douros, Laura Dekker, and Bernard F Buxton. Reconstruction of the surface of the human body from 3d scanner data using b-splines. In *Electronic Imaging'99*, pages 234–245. International Society for Optics and Photonics, 1999.
- [30] Hassen Drira, B Ben Amor, Anuj Srivastava, and Mohamed Daoudi. A riemannian analysis of 3d nose shapes for partial human biometrics. In *Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on*, pages 2050–2057. IEEE, 2009.
- [31] Ian L Dryden and Kanti V Mardia. *Statistical Shape Analysis*. Wiley, 1998.
- [32] C Duby and S Robin. Analyse en composantes principales. *Institut National Agronomique, Paris-Grignon*, 80, 2006.
- [33] Reid B Durtschi, Dongjun Chung, Lindell R Gentry, Moo K Chung, and Hourii K Vorperian. Developmental craniofacial anthropometry : Assessment of race effects. *Clinical Anatomy*, 22(7) :800–808, 2009.

- [34] Rune Elvik. Corrigendum to : "publication bias and time-trend bias in meta-analysis of bicycle helmet efficacy : A re-analysis of attewell, glase and mcfadden, 2001" [accid. anal. prev. 43 (2011) 1245–1251]. *Accident Analysis & Prevention*, 60 :245–253, 2013.
- [35] Lingzhong Fan, Yuchun Tang, Bo Sun, Gaolang Gong, Zhang J Chen, Xiangtao Lin, Taifei Yu, Zhenping Li, Alan C Evans, and Shuwei Liu. Sexual dimorphism and asymmetry in human cerebellum : an mri-based morphometric study. *Brain research*, 1353 :60–73, 2010.
- [36] Martin Friess and Bruce Bradtmiller. 3d head models for protective helmet development. Technical report, SAE Technical Paper, 2003.
- [37] Hugo Gävert, Jarmo Hurri, Jaakko Särelä, and Aapo Hyvärinen. Fastica for matlab 7.x and 6.x, version 2.5, october 19 2005, copyright (c).
- [38] Thomas A Gennarelli, Howard R Champion, Wayne S Copes, and William J Sacco. Comparison of mortality, morbidity, and severity of 59,713 head injured patients with 114,447 patients with extracranial injuries. *Journal of Trauma-Injury, Infection, and Critical Care*, 37(6) :962–968, 1994.
- [39] Marianne JR Gittoes, Ian N Bezodis, and Cassie Wilson. An image-based approach to obtaining anthropometric measurements for inertia modeling. *Journal of applied biomechanics*, 25(3) :265–270, 2009.
- [40] Elkhonon Goldberg, Donovan Roediger, N Erkut Kucukboyaci, Chad Carlson, Orrin Devinsky, Ruben Kuzniecky, Eric Halgren, and Thomas Thesen. Hemispheric asymmetries of cortical volume in the human brain. *cortex*, 49(1) :200–210, 2013.
- [41] Claire C Gordon, Thomas Churchill, Charles E Clauser, Bruce Bradtmiller, and John T McConville. Anthropometric survey of us army personnel : methods and summary statistics 1988. Technical report, DTIC Document, 1989.
- [42] Mary E Gross and Bruce Bradtmiller. Us navy head anthropometry for helmet design. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 43, pages 1070–1074. SAGE Publications, 1999.
- [43] Peter Hammond. The use of 3d face shape modelling in dysmorphology. *Archives of disease in childhood*, 92(12) :1120, 2007.
- [44] Hyunsook Han and Yunja Nam. Automatic body landmark identification for various body figures. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(6) :592–606, 2011.
- [45] Hyunsook Han, Yunja Nam, and Kyungmi Choi. Comparative analysis of 3d body scan measurements and manual measurements of size korea adult females. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40(5) :530–540, 2010.
- [46] Ernest P Hanavan Jr. A mathematical model of the human body. Technical report, DTIC Document, 1964.
- [47] Herbert Hatze. A mathematical model for the computational determination of parameter values of anthropomorphic segments. *Journal of Biomechanics*, 13(10) :833–843, 1980.
- [48] Corné Hoogendoorn, Nicolas Duchateau, Damian Sanchez-Quintana, Tristan Whitmarsh, Federico M Sukno, Mathieu De Craene, Karim Lekadir, and Alejandro F Frangi. A high-resolution atlas and statistical model of the human heart from multislice ct. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 32(1) :28–44, 2013.
- [49] Haitao Hu, Zhizhong Li, Jingbin Yan, Xiaofang Wang, Hui Xiao, Jiyang Duan, and Li Zheng. Anthropometric measurement of the chinese elderly living in the beijing area. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37(4) :303–311, 2007.

- [50] Tim J Hutton, Bernard F Buxton, Peter Hammond, and Henry WW Potts. Estimating average growth trajectories in shape-space using kernel smoothing. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 22(6) :747–753, 2003.
- [51] Aapo Hyvarinen. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 10(3) :626–634, 1999.
- [52] Aapo Hyvärinen. The fixed-point algorithm and maximum likelihood estimation for independent component analysis. *Neural Processing Letters*, 10(1) :1–5, 1999.
- [53] General requirements for establishing anthropometric databases. Norm ISO 15535, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2007.
- [54] 3-d scanning methodologies for internationally compatible anthropometric databases. Norm ISO 20685, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010.
- [55] Basic human body measurements for technological design - part 1 : Body measurement definitions and landmarks. Norm ISO 7250-1, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2008.
- [56] Garment construction and anthropometric surveys - body dimensions. Norm ISO 8559, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1989.
- [57] Hettie M Janssens, Johan C de Jongste, Wytse J Fokkens, Simon GF Robben, Kris Wouters, and Harm AWM Tiddens. The sophia anatomical infant nose-throat (saint) model : a valuable tool to study aerosol deposition in infants. *Journal of aerosol medicine*, 14(4) :433–441, 2001.
- [58] Yasas SN Jayaratne, Curtis K Deutsch, Colman PJ McGrath, and Roger A Zwahlen. Are neoclassical canons valid for southern chinese faces? *PloS one*, 7(12) :e52593, 2012.
- [59] Robert K Jensen. Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method. *Journal of Biomechanics*, 11(8) :349–358, 1978.
- [60] Masaharu Kagawa, Nuala M Byrne, Neil A King, Sebely Pal, and Andrew P Hills. Ethnic differences in body composition and anthropometric characteristics in australian caucasian and urban indigenous children. *British journal of nutrition*, 102(06) :938–946, 2009.
- [61] Sung Min Kim and Tae Jin Kang. Garment pattern generation from body scan data. *Computer-Aided Design*, 35(7) :611–618, 2003.
- [62] Makiko Kouchi. Analysis of foot shape variation based on the medial axis of foot outline. *Ergonomics*, 38(9) :1911–1920, 1995.
- [63] Makiko Kouchi. Foot dimensions and foot shape : differences due to growth, generation and ethnic origin. *Anthropological Science*, 106(Supplement) :161–188, 1998.
- [64] I Krauss, S Grau, M Mauch, C Maiwald, and T Horstmann. Sex-related differences in foot shape. *Ergonomics*, 51(11) :1693–1709, 2008.
- [65] HV Kurup, CIM Clark, and RK Dega. Footwear and orthopaedics. *Foot and Ankle Surgery*, 18(2) :79–83, 2012.
- [66] Iat-Fai Leong, Jing-Jing Fang, and Ming-June Tsai. Automatic body feature extraction from a marker-less scanned human body. *Computer-Aided Design*, 39(7) :568–582, 2007.
- [67] Yu-Cheng Lin, Mao-Jiun J Wang, and Eric M Wang. The comparisons of anthropometric characteristics among four peoples in east asia. *Applied Ergonomics*, 35(2) :173–178, 2004.
- [68] Albert Losken, Inessa Fishman, Donald D Denson, Hunter R Moyer, and Grant W Carlson. An objective evaluation of breast symmetry and shape differences using 3-dimensional images. *Annals of plastic surgery*, 55(6) :571–575, 2005.

- [69] Jun-Ming Lu and Mao-Jiun J Wang. Automated anthropometric data collection using 3d whole body scanners. *Expert Systems with Applications*, 35(1) :407–414, 2008.
- [70] Pamela L Lutsey, Mark A Pereira, Alain G Bertoni, Namratha R Kandula, and David R Jacobs. Interactions between race/ethnicity and anthropometry in risk of incident diabetes the multi-ethnic study of atherosclerosis. *American journal of epidemiology*, 172(2) :197–204, 2010.
- [71] Bruce R Mason, Kelly-Ann Page, and Keiran Fallon. An analysis of movement and discomfort of the female breast during exercise and the effects of breast support in three cases. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2(2) :134–144, 1999.
- [72] Hylton B Menz and Stephen R Lord. Footwear and postural stability in older people. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 89(7) :346–357, 1999.
- [73] Janice E Miller, Benno M Nigg, Wen Liu, Darren J Stefanyshyn, and Matthew A Nurse. Influence of foot, leg and shoe characteristics on subjective comfort. *Foot & Ankle International*, 21(9) :759–767, 2000.
- [74] Jérôme Molimard and Laurent Navarro. Uncertainty on fringe projection technique : a monte-carlo-based approach. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(7) :840–847, 2013.
- [75] Lynn L Moore, Martha R Singer, M Mustafa Qureshi, and M Loring Bradlee. Dairy intake and anthropometric measures of body fat among children and adolescents in nhanes. *Journal of the American College of Nutrition*, 27(6) :702–710, 2008.
- [76] Matthew F Najjar and Robert J Kuczmarski. Anthropometric data and prevalence of overweight for hispanics : 1982-84. *Vital and health statistics. Series 11, Data from the national health survey*, (239) :1, 1989.
- [77] Joseph H Nurre, Jeffery Connor, Erick A Lewark, and Jeffery S Collier. On segmenting the three-dimensional scan data of a human body. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 19(8) :787–797, 2000.
- [78] Standardization Administration of the People’s Republic of China. Sports helmets - safety requirements for sports helmets for cyclists and users of skateboards and roller skates. 2009.
- [79] K.A. Page and J.R. Steele. Breast motion and sports brassiere design. *Sports Medicine*, 27(4) :205–211, 1999.
- [80] Karl Pearson. Liii. on lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11) :559–572, 1901.
- [81] Hélène Pillet, Xavier Bonnet, François Lavaste, and Wafa Skalli. Evaluation of force plate-less estimation of the trajectory of the centre of pressure during gait. comparison of two anthropometric models. *Gait & posture*, 31(2) :147–152, 2010.
- [82] Ron Pinhasi, Boris Gasparian, Gregory Areshian, Diana Zardaryan, Alexia Smith, Guy Bar-Oz, and Thomas Higham. First direct evidence of chalcolithic footwear from the near eastern highlands. *PloS one*, 5(6) :e10984, 2010.
- [83] Frederick P Rivara, Susan J Astley, Sterling K Clarren, Diane C Thompson, and Robert S Thompson. Fit of bicycle safety helmets and risk of head injuries in children. *Injury Prevention*, 5(3) :194–197, 1999.
- [84] Kathleen M Robinette, Sherri Blackwell, Hein Daanen, Mark Boehmer, and Scott Fleming. Civilian american and european surface anthropometry resource (caesar), final report. volume 1. summary. Technical report, DTIC Document, 2002.

- [85] MY Rosnah, SAR Sharifah\_Norazizan, et al. Anthropometry dimensions of older malaysians : comparison of age, gender and ethnicity. *Asian Social Science*, 5(6) :P133, 2009.
- [86] Darshan S Shah, Rupesh Ghyar, Bhallamudi Ravi, Chintan Hegde, and Vijay Shetty. Morphological measurements of knee joints in indian population : Comparison to current knee prostheses. *Open Journal of Rheumatology and Autoimmune Diseases*, 4(02) :75, 2014.
- [87] Gongbing Shan and Christiane Bohn. Anthropometrical data and coefficients of regression related to gender and race. *Applied ergonomics*, 34(4) :327–337, 2003.
- [88] AI Shaweesh, CD Thomas, A Bankier, and JG Clement. Delineation of facial archetypes by 3d averaging. *Annals of the Royal Australasian College of Dental Surgeons*, 17 :73, 2004.
- [89] Karla Peavy Simmons. *Body measurement techniques : a comparison of three-dimensional body scanning and physical anthropometric methods*. PhD thesis, North Carolina State University, 2001.
- [90] André Siqueira Salles. *The specification and evaluation of personalised footwear for additive manufacturing*. PhD thesis, Loughborough University, 2011.
- [91] Irwin Sobel. History and definition of the sobel operator. 2014.
- [92] Irwin Sobel and Gary Feldman. A 3x3 isotropic gradient operator for image processing. *a talk at the Stanford Artificial Project in*, pages 271–272, 1968.
- [93] Thorsten Sterzing, Shannon Barnes, Katharina Althoff, Lisa Determan, Hui Liu, and Jason Tak-Man Cheung. Tennis shoe requirements in china, usa, and germany. *Footwear Science*, 6(3) :165–176, 2014.
- [94] Rob Suikerbuik, Hans Tangelder, Hein Daanen, and Aernout Oudenhuijzen. Automatic feature detection in 3d human body scans. In *Proceedings of SAE Digital Human Modeling Conference*, 2004.
- [95] CD Thomas, P Claes, AI Shaweesh, and JG Clement. Three-dimensional facial shape archetypes for identification and diagnosis. In *Biological Shape Analysis : Proceedings of the 1st International Symposium*. World Scientific, 2011.
- [96] Anita N Vasavada, Jonathan Danaraj, and Gunter P Siegmund. Head and neck anthropometry, vertebral geometry and neck strength in height-matched men and women. *Journal of biomechanics*, 41(1) :114–121, 2008.
- [97] Markus Walther, Dirk Herold, Angela Sinderhauf, and Robert Morrison. Children sport shoes-a systematic review of current literature. *Foot and Ankle Surgery*, 14(4) :180–189, 2008.
- [98] Mao-Jiun J Wang, Wen-Yen Wu, Kuo-Chao Lin, Shi-Nine Yang, and Jun-Ming Lu. Automated anthropometric data collection from three-dimensional digital human models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(1-2) :109–115, 2007.
- [99] Yijun Xiao, Paul Siebert, and Naoufel Werghi. A discrete reeb graph approach for the segmentation of human body scans. In *3-D Digital Imaging and Modeling, 2003. 3DIM 2003. Proceedings. Fourth International Conference on*, pages 378–385. IEEE, 2003.
- [100] Maurice R Yeadon. The simulation of aerial movement—ii. a mathematical inertia model of the human body. *Journal of Biomechanics*, 23(1) :67–74, 1990.
- [101] Bing Yue, Kartik M Varadarajan, Songtao Ai, Tingting Tang, Harry E Rubash, and Guoan Li. Differences of knee anthropometry between chinese and white men and women. *The Journal of arthroplasty*, 26(1) :124–130, 2011.
- [102] Rong Zheng, Winnie Yu, and Jintu Fan. Development of a new chinese bra sizing system based on breast anthropometric measurements. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37(8) :697–705, 2007.

- 
- [103] Ziqing Zhuang and Bruce Bradtmiller. Head-and-face anthropometric survey of us respirator users. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2(11) :567–576, 2005.
- [104] Ziqing Zhuang, Chang Shu, Pengcheng Xi, Michael Bergman, and Michael Joseph. Head-and-face shape variations of us civilian workers. *Applied ergonomics*, 44(5) :775–784, 2013.



# Table des figures

1.1	Descriptions anthropométriques par des données unidimensionnelles [56]. . . . .	9
1.2	Descriptions anthropométriques par des données bidimensionnelles. . . . .	10
1.3	Descriptions anthropométriques par des données tridimensionnelles. . . . .	10
1.4	Plan du tour de tête montrant des différences morphologiques entre les têtes <b>chi-noises</b> et <b>caucasiennes</b> . Le tour de tête est identique pour tous les sujets [11]. . .	16
1.5	Différences possibles entre les mesures traditionnelles et celles extraites de 3D : chemins de mesures traditionnelles (oblique path) et mesures extrait de 3D (horizontal path) [45]. . . . .	17
2.1	Position des sujets scannés [54]. . . . .	22
2.2	Définition de l'entrejambe et des aisselles au points de séparation au plan frontal.	23
2.3	Coupes transversales à côté des points d'intérêt et méthode pour la séparation des segments. . . . .	23
2.4	Séparation de la tête au plan frontal [77]. . . . .	23
2.5	Analyse statistique multiparamétrique de la forme de la poitrine et de la tête. . .	27
2.6	Points anatomiques sur le crâne et plan de Francfort ( <a href="http://crime-expertise.org/">http://crime-expertise.org/</a> )	29
3.1	Résumé des objectifs de la thèse. . . . .	34
4.1	Alignement des axes sur les scans de tête (axes en mètres). . . . .	40
4.2	Position des sujets scannés [54]. . . . .	40
4.3	Nuages de points au niveau de la tête sur les scans du corps entier. . . . .	41
4.4	Définition de la position du cou. . . . .	41
4.5	Procédure d'obtention de la hauteur du cou. . . . .	42
4.6	Systèmes de deux branches à séparer sur le plan frontal. . . . .	43
4.7	Système de détection utilisant deux branches sur une image binaire. . . . .	44
4.8	Nuage de points de la tranche du tour de tête ou la circonférence est à calculer. .	45
4.9	Vue globale et vue agrandie du nuage de points et de la ligne finale de tour de tête	46
4.10	Vue agrandie de la zone d'artefacts du tour de tête. . . . .	46
5.1	Têtes de différentes tailles en coordonnées cartésiennes et sphériques. La couleur représente la valeur du rayon sphérique en mètres. . . . .	50
5.2	Maillage commun pour tous les sujets avec résolution $15 \times 10$ . . . . .	51
5.3	Projection de deux ensembles de coordonnées ( $\theta$ et $\phi$ ) d'un scan sur le maillage commun. La troisième coordonnée se déplace afin de créer une correspondance pour tous les sujets. . . . .	52
5.4	Région d'intérêt pour optimiser la position relative des sujets. La couleur du visage représente le rayon sphérique en mètres. . . . .	53

5.5	Différentes régions des visages. La couleur du visage représente le rayon sphérique en mètres. . . . .	53
5.6	Positions relatives de deux visages et coefficient de corrélation $r$ associé. La couleur du visage représente le rayon sphérique en mètres. . . . .	55
6.1	Procédure d'obtention de la morphologie moyenne. . . . .	59
6.2	Élimination des points aberrants pour l'obtention de la morphologie moyenne. . . . .	60
6.3	Maillage sphérique au sommet et sur le visage d'une tête. . . . .	63
6.4	Procédure d'obtention des points dé-corrélés. . . . .	64
6.5	Coordonnées des individus suite à l'analyse en composantes principales sur les scans de têtes féminines. . . . .	66
6.6	Différence entre la morphologie moyenne issues de 1000 individus et de 45 facteurs considérés et les morphologies moyennes issues de $\kappa$ individus et $\lambda$ facteurs considérés. L'image est agrandi sur la droite pour les 200 premiers lignes $\kappa$ . La différence est présentée en $mm$ et calculée suivant l'équation 6.10. . . . .	68
7.1	Séparation en tailles factorielles sur un facteur (exemple avec 6 tailles créées). . . . .	72
7.2	Séparation en tailles factorielles sur deux facteurs (exemple avec 6 tailles créées). . . . .	72
7.3	Séparation en tailles factorielles sur trois facteurs (exemple avec 8 tailles créées). . . . .	73
7.4	Coordonnées d'individu modèle pour chaque taille factorielle . . . . .	73
9.1	Équipement pour les campagnes de mensuration du pied. . . . .	83
9.2	Comparaison des deux campagnes de mensuration du pied. . . . .	84
9.3	Principaux modes de bruit sur un pied scanné. . . . .	84
9.4	Orientation du pied suivant le protocole DECATHLON [2]. . . . .	85
9.5	Détection des orteils pour l'alignement du pied par son enveloppe convexe (ligne rouge). Les deux plus grandes distances détectées sont numérotées 1 et 2 respectivement. . . . .	86
9.6	Comparaison des méthodes des deux campagnes de mensuration de pied par les graphiques Bland-Altman et différences moyennes après l'élimination des points aberrants (longueur, largeur et hauteur du pied). . . . .	93
9.7	Comparaison des méthodes des deux campagnes de mensuration de pied par les graphiques Bland-Altman et différences moyennes après l'élimination des points aberrants (périmètres métatarsal, d'entrée et cou-de-pied). . . . .	94
9.8	Distribution de la longueur et dispersion de largeur et hauteur du pied. . . . .	95
9.9	Distribution de la largeur pour la population masculine de taille 43 (basé sur 20 classes). . . . .	96
9.10	Alignement effectué avec l'algorithme ICP. Deux vues sont montrés. Pour cause de la position du pied dans la chaussure ce résultats ne peut pas être utilisé. . . . .	97
9.11	Calcul du périmètre d'entrée sur un pied scanné avec bruit. . . . .	98
10.1	Casque trouvé au nord de la Grèce antique. Vers 540 avant J.C. Musée archéologique de Thessalonique, Grèce. . . . .	101
10.2	Casques de morphologie différente en Grèce antique. Vers 500 avant J.C. Musée archéologique de Thessalonique, Grèce. . . . .	102
10.3	Coordonnées polaires de fausse tête complète (exemple pour la fausse tête 615 $mm$ ) [26]. . . . .	103
10.4	Morphologie des têtes dans les normes de sécurité. . . . .	104
10.5	Points anatomiques manuellement piqués [15]. . . . .	105
10.6	Définition de l'origine des repères pour l'application aux casques. . . . .	106

10.7	Orientation de la tête. . . . .	106
10.8	Différence de tour de tête manuellement mesuré et le tour de tête obtenue par numérisation des sujets chinois (en millimètres). . . . .	110
10.9	Coordonnées discrétisées pour la même tête pour l'application aux casques (à gauche) et aux masques et lunettes (à droite). . . . .	111
10.10	Région d'intérêt sur la tête pour l'optimisation de la position relative des sujets pour l'application aux casques (à gauche) et aux masques et lunettes (à droite). . . . .	112
10.11	Points dé-corrélés de différents seuils $f$ <b>sur toute la tête</b> . . . . .	113
10.12	Points dé-corrélés de différents seuils $f$ <b>sur la zone d'intérêt</b> . . . . .	114
10.13	Régions des coordonnées des variables sur la zone du crâne. . . . .	114
10.14	Distribution du tour de tête et dispersion de largeur et hauteur du crâne. . . . .	116
10.15	Rapport de largeur par tour de tête pour les sujets adultes. Les sujets européens sont significativement moins larges que les sujets chinois (t-test avec $p < 0.001$ ) . . . . .	116
10.16	Morphologie des données normatives et des sujets scannées. . . . .	117
10.17	Dispersion de la distance entre les ectocantions et de la hauteur de la face. . . . .	118
10.18	Valeurs propres de l'analyse en composantes principales des mesures unidimensionnelle de la tête. . . . .	119
10.19	Coordonnées des variables et des individus de l'analyse en composantes principales des mesures unidimensionnelles de la tête. . . . .	120
10.20	Valeurs propres de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la tête. . . . .	121
10.21	Coordonnées des variables de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la tête sur les quatre premiers facteurs projetés sur les axes. . . . .	121
10.22	Coordonnées des variables de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la tête projetés sur la tête. Pour chaque facteur, les régions colorées proche du <b>bleu</b> suivent une morphologie différente des régions colorées proche du <b>rouge</b> . Par exemple, le résultat du deuxième facteur est l'élargissement de la partie haute du crâne quand les parties latérales s'amoindrissent. . . . .	122
10.23	Effet de l'asymétrie de la tête obtenue pour le troisième facteur. Points du maillage commun sur la tête ( <b>côté droite</b> et <b>côté gauche</b> de la tête) qui influent fortement le troisième facteur. . . . .	123
10.24	Coordonnées des individus de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la tête. Sur les quatre facteurs présentés la morphologie des femmes chinoises affecte les facteurs de manière différente de la morphologie des femmes européennes. . . . .	123
10.25	Formes moyennes pour la taille $555mm$ de casques. . . . .	124
10.26	Formes moyennes pour la taille $995mm$ (distance entre les ectocanthions) de masques ( <b>Europe</b> , <b>Chine</b> ). . . . .	124
10.27	Formes moyennes avec leur écart-type en $mm$ pour la taille $555mm$ pour la conception des casques. . . . .	125
10.28	Formes moyennes avec leur écart-type en $mm$ pour la taille $995mm$ pour la conception des masques. . . . .	126
10.29	Comparaison des têtes moyennes de la Chine et de l'Europe de la taille $555mm$ de casque. . . . .	126
10.30	Comparaison des têtes moyennes de la Chine et de l'Europe de la taille $995mm$ de masque. . . . .	127
10.31	Comparaison des têtes moyennes de l'Europe avec les fausses têtes normatives [26] (exemple sur la taille $555mm$ ). . . . .	127

10.32	Formes moyennes avec leur écart-type en <i>mm</i> pour la taille 995 <i>mm</i> pour la conception des masques. . . . .	128
10.33	Différences en <i>mm</i> entre les rayons sphériques de la tête moyenne calculée avec et sans corrélation pour la taille 995 <i>mm</i> pour la conception des masques. . . . .	128
10.34	Déformation due à l'optimisation de la position relative des sujets. . . . .	130
10.35	Erreur sur la tête entre le scan et le maillage générique avec la méthode de Zhuang et al. [104]. . . . .	131
11.1	Largeur, profondeur et périmètre convexe pour quatre-vingt sujets au long du tronc	137
11.2	Séparation du tronc . . . . .	138
11.3	Endroit du tour de poitrine . . . . .	139
11.4	Région d'intérêt pour l'optimisation relative des sujets sur la poitrine. . . . .	139
11.5	Forme moyenne et son écart-type en <i>mm</i> pour la taille 90B. . . . .	140
11.6	Formes moyennes avec leur écart-type en <i>mm</i> pour la taille 90B avec et sans optimisation de la position relative des sujets. . . . .	141
11.7	Différences en <i>mm</i> entre les rayons cylindriques de la poitrine moyenne calculée avec et sans corrélation pour la taille 90B. . . . .	141
11.8	Valeurs propres de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la poitrine. . . . .	142
11.9	Coordonnées des variables de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la poitrine sur les quatre premiers facteurs projetés sur les axes.	143
11.10	Coordonnées des variables de l'analyse en composantes principales aux points tridimensionnels de la poitrine projetés sur la poitrine. A chaque facteur, les régions colorées proche du <b>bleu</b> suivent une morphologie différente des régions colorées proche du <b>rouge</b> . Par exemple, le résultat du deuxième facteur est l'élargissement de la partie intérieure des seins quand la partie extérieure amoindrisse. . . . .	143
11.11	Morphologies extrême pour les six premiers facteurs. Ces morphologies sont obtenues en inversant les résultats de l'ACP en utilisant les coordonnées extrêmes des individus : coordonnée moins élevée en première colonne et coordonnée plus élevée en deuxième colonne. Deux vues de chaque morphologie sont disponibles sur cette figure. . . . .	144
11.12	Asymétrie des coordonnées des variables obtenues par soustraction des côtés gauche et droite. . . . .	145
11.13	Coordonnées des individus et séparation en tailles factorielles. Les points noirs correspondent aux coordonnées médianes pour chaque taille factorielle. . . . .	146
11.14	Formes des poitrines à partir de la coordonnée d'individu médian pour chaque taille factorielle. . . . .	146
D.1	Exemples des produits où l'analyse morphologique issue de cette thèse est déjà utilisée (chaussures, masques, sous-vêtements). . . . .	155

# Liste des tableaux

1.1	Mesures réalisées à l'aide d'appareillages traditionnels [56, 55]. . . . .	12
1.2	Modèles 3D à partir de mesures 1D. . . . .	13
1.3	Mesures et modèles anthropométriques à partir d'images 2D. . . . .	14
1.4	Études analysant l'anthropométrie de différents populations. . . . .	20
2.1	Extraction automatique des points et des lignes d'intérêt. . . . .	25
2.2	Analyse statistique des formes anthropométriques. . . . .	28
4.1	Formules de passage aux différents systèmes de coordonnées. . . . .	38
4.2	Erreurs sur les calculs des mesures 1D. . . . .	47
9.1	Mesures 1D du pied [2]. . . . .	87
9.2	Mesures 1D du pied (périmètres) [2]. . . . .	89
9.3	Calcul de l'incertitude des algorithmes d'extraction des mesures 1D sur le pied pour le scanner Infoot. . . . .	90
9.4	Calcul de l'incertitude des algorithmes d'extraction des mesures 1D sur le pied pour le scanner Footin3D. . . . .	91
9.5	Différences entre les mesures issues du logiciel du scanner Infoot et des mesures extraites automatiquement pour toute la base de données européenne. . . . .	92
10.1	Tailles de casques dans la norme chinoise [78]. . . . .	104
10.2	Nombre de sujets scannés. . . . .	105
10.3	Mesures 1D pour application aux casques. . . . .	108
10.4	Mesures 1D pour application aux masques et lunettes. . . . .	109
10.5	Nombre des points dé-corrélés par rapport au seuil $f$ sur la partie de casque. . . . .	113
10.6	Coefficients de corrélation entre les mesures unidimensionnelles pour les casques. . . . .	115
10.7	Coefficients de corrélation entre les mesures unidimensionnelles pour les masques et lunettes. . . . .	117



NNT : 2016 EMSE 0812

Aikaterini KOLLIA

## STATISTICAL ANALYSIS OF DIVERSITY IN THREE-DIMENSIONAL ANTHROPOMETRY

Speciality: Mechanics and engineering

Keywords: Anthropometry, population, 3D model

### Abstract:

Anthropometry is the scientific field that studies human body dimensions (from the greek άνθρωπος (human) + μέτρον (measure)). Anthropometrical analysis is based actually on 1D measurements (head circumference, length, etc). However, the body's morphological complexity requires 3D analysis. This is possible due to recent progress of 3D scanners. The objective of this study is to compare population's anthropometry and use results to adapt sporting goods to user's morphology. For this purpose, 3D worldwide measurement campaigns were realized and automated treatment algorithms were created in order to analyze the subjects' point cloud. Based on image processing methods and on shape geometry, these algorithms detect anatomical landmarks, calculate 1D measurements, align subjects and create representative anthropometrical 3D models. In order to analyze morphological characteristics, different statistical methods including components' analysis, were adapted for use in 3D space. The methods were applied in three body parts: the foot, the head and the bust. The morphological differences between and inside the populations were studied. For example, the difference in each point of the head, between Chinese and European head, was calculated. The statistics in three dimensions, permitted also to show the asymmetry of the head. The method to create anthropometrical models is more adapted to our applications than the methods used in the literature. The analysis in three dimensions, can give results that they are not visible from 1D analyses. The knowledge of this thesis is used for the conception of different products that they are sold in DECATHLON stores around the world.

NNT : 2016 EMSE 0812

Aikaterini KOLLIA

## ANALYSE STATISTIQUE DE LA DIVERSITE EN ANTHROPOMETRIE TRIDIMENSIONNELLE

Spécialité: Mécanique et ingénierie

Mots clefs : Anthropométrie, population, modèle 3D

### Résumé :

L'anthropométrie est le domaine scientifique qui étudie les dimensions du corps humain (du grec *άνθρωπος* (l'humain) + *μέτρον* (mesure)). L'analyse anthropométrique est basée actuellement sur des mesures unidimensionnelles (tour de tête, longueur, etc.). Cependant, la complexité de la morphologie du corps nécessite une analyse tridimensionnelle, aujourd'hui permise par les récents progrès des scanners 3D. L'objectif de cette étude est de comparer les populations et utiliser les résultats pour mieux adapter les produits sportifs à la morphologie des utilisateurs. Des campagnes de mensuration 3D ont été réalisées à travers le monde et des algorithmes de traitement automatique ont été créés pour analyser les nuages de points des sujets scannés. Basés sur les méthodes d'images et de géométrie des formes, ces algorithmes repèrent des points anatomiques, calculent des mesures 1D, alignent les sujets scannés et créent des modèles anthropométriques 3D représentatifs des populations. Pour analyser les caractéristiques anthropométriques, des statistiques de premier ordre et des statistiques factorielles ont été adaptées pour être utilisées dans l'espace tridimensionnel. Les méthodes ont été appliquées à trois parties du corps : le pied, la tête et la poitrine. Les différences morphologiques entre les populations, mais également au sein d'une population donnée, ont été révélées. Par exemple, la différence à chaque point de la tête entre la tête chinoise et la tête européenne a été calculée. Les statistiques en trois dimensions ont aussi permis de mettre en évidence l'asymétrie de la tête. La méthode de création de modèles anthropométriques est plus adaptée à nos applications que les méthodes utilisées dans la littérature. L'analyse en trois dimensions permet d'obtenir des résultats qui ne sont pas visibles par les analyses 1D. Les connaissances acquises par cette étude sont utilisées pour la conception de différents produits vendus dans les magasins DECATHLON à travers le monde.