

Extraction automatique d'indices géométriques pour la préhension d'outils en ergonomie virtuelle

par

Alexandre MACLOUD

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE

M.Sc.A.

MONTRÉAL, LE 31 JUILLET 2019

**ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis Rivest, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Rachid Aissaoui, codirecteur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Sheldon Andrews, président du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. Éric Wagnac, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 29 JUILLET 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ces deux années de recherche au sein de groupe Dassault Systèmes ont été très enrichissantes sur le plan professionnel et personnel. Je remercie tout particulièrement Louis Rivest, mon directeur de recherche, pour ses conseils, son accompagnement et son support moral tout au long du projet. Je remercie aussi Rachid Aissaoui, mon codirecteur, pour ses regards critiques et ses conseils techniques de valeur.

Je remercie également Pierre Olivier Lemieux, Quentin Bourret, Ali Zeighami, tous ces acteurs du Smart Posturing Engine de Dassault Systèmes, qui ont su m'apporter leur aide, m'éclairer sur certains problèmes, me communiquer leur bonne humeur, leur gentillesse, leur énergie, leur support moral durant l'intégralité de mon projet, ainsi que leur patience face à mes innombrables questions.

Je tiens également à remercier Julie Charland ainsi que David Brouillette pour leur accueil chaleureux au sein de l'équipe de Dassault Systèmes Montréal.

Je tiens finalement à témoigner ma reconnaissance à tous ces experts pour leur confiance et leur support dont j'ai pu bénéficier durant toute la durée de mon mémoire. Ces personnes m'ont permis de faire un premier pas dans le monde de la recherche qui m'était initialement inconnu. Merci aussi pour leur disponibilité inconditionnelle.

Un grand merci à mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Extraction automatique d'indices géométriques pour la préhension d'outils en ergonomie virtuelle

Alexandre MACLOUD

RÉSUMÉ

DELMIA est une brand de Dassault Systèmes spécialisé dans la simulation des procédés industriels. Ce module permet notamment la modélisation de tâches de travail dans des environnements manufacturiers simulés en 3D afin d'en analyser l'ergonomie. Cependant, la manipulation du mannequin virtuel se fait manuellement par des utilisateurs experts du domaine. Afin de démocratiser l'accès à l'ergonomie virtuelle, Dassault Systèmes a lancé un programme visant à positionner automatiquement le mannequin au sein de la maquette virtuelle à l'aide d'un nouveau moteur de positionnement nommé « Smart Posturing Engine (SPE) ». Le placement automatique des mains sur des outils constitue un des enjeux de ce projet.

L'objectif général poursuivi dans ce mémoire consiste à proposer une méthode d'extraction automatique d'indices de préhension, servant de guide pour la saisie des outils, à partir de leurs modèles géométriques tridimensionnels. Cette méthode est basée sur l'affordance naturelle des outils disponibles de manière usuelle dans un environnement manufacturier. La méthode empirique présentée dans cette étude s'intéresse donc aux outils usuels tenus à une seule main. La méthode suppose que l'appartenance à une famille (maillets, pinces, etc.) de l'outil à analyser est initialement connue, ce qui permet de présumer de l'affordance de la géométrie à analyser.

La méthode proposée comporte plusieurs étapes. Dans un premier temps, un balayage est mené sur la géométrie 3D de l'outil afin d'en extraire une série de sections. Des propriétés sont alors extraites pour chaque section de manière à reconstruire un modèle d'étude simplifié. Basé sur les variations des propriétés, l'outil est segmenté successivement en tronçons, segments et régions. Des indices de préhension sont finalement extraits des régions identifiées, y compris la tête de l'outil qui fournit une direction de travail liée à la tâche, de même que le manche ou la gâchette, le cas échéant. Ces indices de préhension sont finalement transmis au SPE afin de générer des préhensions orientées tâches.

La solution proposée a été testée sur une cinquantaine d'outils tenus à une main appartenant aux familles des maillets, tournevis, pinces, visseuses droites et visseuses pistolets. Les modèles 3D des outils ont été récupérés du site en ligne « Part Supply » de Dassault Systèmes. La méthode proposée devrait être aisément transposable à d'autres familles d'outils.

Mots-clés : préhension, indices, outils, sections, mannequin virtuel, segmentation

Automatic extraction of grasping cues from one-handed tools geometry for virtual ergonomics

Alexandre MACLOUD

ABSTRACT

Advancements in digital technology are reshaping society by offering products and services designed to support and assist people in their daily and professional tasks. Replicating human behaviour is therefore a crucial challenge in robotics and virtual ergonomics.

DELMIA is a brand from Dassault Systèmes that is specialized in industrial process simulation. The module enables work tasks to be modelled in 3D simulated manufacturing environments in order to analyze their ergonomics, with the virtual dummy manipulated manually by an expert user. In order to democratize access to virtual ergonomics, Dassault Systèmes has introduced a program that automatically positions the dummy in the virtual environment using a new positioning engine called “Smart Posturing Engine” (SPE). The automatic placement of the dummy’s hands on tools is one of the challenges of this project.

The general objective of this thesis is to propose a method for automatically extracting grasping cues, to serve as a guide for tool grasping, based on the tools’ 3D geometric models. This method relies on the natural affordance of the tools that are generally available in a manufacturing environment. The empirical method presented in this study therefore focuses on standard one-handed tools. The method assumes that the tool’s family (mallets, pliers, etc.) is initially known, which makes it possible to assume the affordance of the geometry to be analyzed.

The proposed method consists of several steps. First, a section scan is performed on the 3D geometry of the tool. The properties of each section are then extracted to reconstruct a simplified study model. Based on the variation of the properties, the tool is successively segmented into zones, segments and regions. Grasping cues are extracted from the identified regions, including the head of the tool, which provides a task-specific working direction, and the handle or trigger, as the case may be. These grasping cues are finally fed to the SPE to generate task-specific manners of grasping.

The proposed solution was tested on fifty one-handed tools belonging to different tool families, such as mallets, screwdrivers, pliers, straight-handle screwdrivers and screw guns. The 3D tool models were retrieved from Dassault Systèmes’s online “Part Supply” site. The proposed method should be easily transferable to other tool families.

Keywords : grasp , grasping cues, tools, sections, virtual manikin, segmentation

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE	5
1.1 Définition de la préhension.....	5
1.2 Les approches analytiques	5
1.3 Les approches empiriques.....	8
1.4 Les approches hybrides.....	12
1.5 Squelettisation sur géométrie tridimensionnelle.....	14
1.6 Synthèse	16
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET METHODOLOGIE.....	19
2.1 Objectifs	19
2.2 Démarche méthodologique	19
2.2.1 Sélection des outils de l'étude.....	19
2.2.2 Développement de la méthode.....	20
2.2.3 Validation.....	21
2.2.4 Les ressources de l'étude	21
CHAPITRE 3 DÉMARCHE D'EXTRACTION DES INDICES DE PRÉHENSION	23
3.1 Format des données d'entrée	23
3.2 Étape 1 : Balayage de sections.....	24
3.3 Étape 2 : Extraction des propriétés des sections	28
3.3.1 Propriétés des faces.....	28
3.3.2 Organisation des faces	32
3.3.3 Synthèse	35
3.4 Étape 3 : Segmentation	35
3.4.1 Création de tronçons et de segments.....	36
3.4.2 Génération de régions	37
3.4.3 Synthèse	41
3.5 Étape 4 : Classification des régions	42
3.5.1 Trois types de régions utiles : tête, manche et gâchette.....	42
3.5.2 Propriétés géométriques des régions à classer.	45
3.5.3 Classification des régions	45
3.5.4 Séquence de recherche de régions selon les familles d'outils	47
3.5.5 Identification de régions spécifiques	50
3.5.5.1 Gâchettes poussoir	50
3.5.5.2 Têtes de visseuses à renvoi d'angle	53
3.5.6 Synthèse	54
3.6 Étape 5 : Extraction des indices de préhension.....	55
3.6.1 Principe de traitement d'un manche	55
3.6.2 Principe de traitement d'une gâchette de type poussoir.....	57

3.6.3	Principe de traitement d'une gâchette de type levier	59
3.6.4	Principe de traitement des têtes d'outils	60
3.6.4.1	Les têtes de tournevis et de visseuses droites régulières.....	60
3.6.4.2	Les têtes à renvoi d'angle	61
3.6.4.3	Les têtes de maillets	62
3.6.4.4	Les têtes de pinces	62
3.7	Étape de détermination de l'axe de balayage pour les outils à multiples directions principales	63
CHAPITRE 4 EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS		69
4.1	Expérimentation sur les familles d'outils à 'unique direction principale'	69
4.1.1	Résultats de la génération d'indices de préhension sur les maillets	69
4.1.2	Résultats de la génération d'indices de préhension sur les tournevis	73
4.1.3	Résultats de la génération d'indices de préhension sur les pinces.....	77
4.1.4	Résultats de la génération d'indices de préhension sur les visseuses droites à gâchette levier	81
4.1.5	Résultats de la génération d'indices de préhension sur les visseuses droites à gâchette pousoir et renvoi d'angle.....	86
4.2	Expérimentation sur les familles d'outils à 'multiples directions principales'	90
4.2.1	Résultats de la génération d'indices de préhension sur les visseuses pistolets	91
CHAPITRE 5 DISCUSSION		99
5.1	Originalité de la démarche	99
5.2	Limitations	100
5.3	Réflexion sur la validité de la démarche	102
CONCLUSION		103
ANNEXE I Résultats de l'extraction d'indices de préhension		107
BIBLIOGRAPHIE		117

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Exemple de tableau de sections réorganisées34
Tableau 3.2	Évolution des propriétés extraites par face38
Tableau 3.3	Critères de classification selon le type de région recherchée46
Tableau 3.4	Séquence de recherche des régions selon les familles d'outils.....48
Tableau 3.5	Critères d'identification d'un manche approximatif.....65
Tableau 3.6	Critères d'identification du corps de la visseuse.....66
Tableau 4.1	Caractéristiques du maillet d'étude.....69
Tableau 4.2	Propriétés des régions du maillet72
Tableau 4.3	Caractéristiques du tournevis d'étude.....73
Tableau 4.4	Propriétés des régions du tournevis76
Tableau 4.5	Caractéristiques de la pince d'étude77
Tableau 4.6	Propriétés des régions de la pince80
Tableau 4.7	Caractéristiques de la visseuse droite à gâchette levier d'étude82
Tableau 4.8	Propriétés des régions de la visseuse droite à gâchette levier.....85
Tableau 4.9	Caractéristiques de la visseuse droite à gâchette pousoir et renvoi d'angle d'étude.....86
Tableau 4.10	Propriétés des régions de la visseuse droite à gâchette pousoir89
Tableau 4.11	Caractéristiques de la visseuse pistolet d'étude91
Tableau A 1	Fiche de résultats pour les maillets108
Tableau A 2	Fiche de résultats pour les tournevis.....109
Tableau A 3	Fiche de résultats pour les pinces.....110
Tableau A 4	Fiche de résultats pour les visseuses droites à gâchette levier.....111

Tableau A 5	Fiche de résultats pour les visseuses droites à gâchette levier et renvoi d'angle.....	112
Tableau A 6	Fiche de résultats pour les visseuses droites à gâchette pousoir	113
Tableau A 7	Fiche de résultats pour visseuses droites à gâchette pousoir et renvoi d'angle.....	114
Tableau A 8	Fiche de résultats pour les visseuses de forme pistolet 1	115
Tableau A 9	Fiche de résultats pour les visseuses de forme pistolet 2.....	116

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Différents modèles de contact (A-hard-finger sans friction, B-hard-finger avec friction, C-soft-finger), tirée de V.-D. Nguyen (1987)	7
Figure 1.2	Recherche de contacts en opposition de force sur un polygone 2D, tirée de V.-D. Nguyen (1988)	7
Figure 1.3	Principe de simplification d'un modèle de tasse en formes géométriques élémentaires, tirée de Miller et al. (2003)	9
Figure 1.4	Comparaison de la viabilité de la forme de la main avec la géométrie extérieure d'une souris, tirée de Li et Pollard (2005)	10
Figure 1.5	Exemple de vecteurs d'approche générés pour un flacon pulvérisateur, tirée de Bohg et al. (2011).....	11
Figure 1.6	Segmentation d'un maillage en différentes régions, tirée de Sahar El Khoury (2008).....	13
Figure 1.7	Approximation des régions en superquadrics, tirée de Sahar El Khoury (2008).....	13
Figure 1.8	Principe de recherche d'affordance avec vision par ordinateur, tiré de Myers et Al (2015).....	14
Figure 1.9	Génération de squelettes sur géométries 3D, tiré de Natraj Iyer et al. (2005).....	16
Figure 2.1	Contextualisation du développement de la méthode	20
Figure 3.1	Les étapes de génération automatique d'indices de préhension	24
Figure 3.2	Représentation de la boite englobante et des repères associés	25
Figure 3.3	Observation des directions principales selon les familles d'outils	26
Figure 3.4	Repère d'inertie associé à la boite englobante orientée	26
Figure 3.5	Définition d'un plan.....	27
Figure 3.6	Détermination d'une limite de translation de balayage selon la boîte englobante	28
Figure 3.7	Génération d'une face à partir d'une courbe fermée	29

Figure 3.8	Extraction de l'aire et du CG d'une face quelconque	29
Figure 3.9	Principe de récupération des points extremums en longueur et largeur de la face	30
Figure 3.10	Notion d'asymétrie d'une face.....	31
Figure 3.11	Méthode d'extraction des propriétés des sections	32
Figure 3.12	Reconnaissance des faces confondues	33
Figure 3.13	Principe de spatialisation des faces.....	34
Figure 3.14	Identification des tronçons sur une pince.....	36
Figure 3.15	Principe de décomposition des tronçons en segments	37
Figure 3.16	Décomposition en segments d'une pince.....	37
Figure 3.17	Évolution des propriétés d'aire ou de CG selon les sections pour un cas arbitraire	38
Figure 3.18	Identification des points divergents selon l'évolution des propriétés d'aire ou de CG	39
Figure 3.19	Identification des nouvelles régions selon l'évolution des propriétés d'aire ou de CG	40
Figure 3.20	Représentation visuelle de l'intérêt de l'évolution de l'aire des faces sur les résultats de la segmentation.....	41
Figure 3.21	Intérêt des indices de préhension des têtes pour la préhension de l'outil .	43
Figure 3.22	Intérêt des indices géométriques du manche pour la préhension de l'outil	43
Figure 3.23	Intérêt des indices géométriques de la gâchette pour la préhension de l'outil.....	44
Figure 3.24	Principe de réalisation des tests de reconnaissance des régions	47
Figure 3.25	Séquence d'identification des régions utiles.....	49
Figure 3.26	Principe d'identification de la partie fonctionnelle de la gâchette pousoir	51
Figure 3.27	Scénarios possibles de segmentation sur le manche et la gâchette.....	51

Figure 3.28	Principe de recherche du côté fonctionnel de la tête à renvoi d'angle.....	54
Figure 3.29	Squelettes des différentes familles d'outils selon leurs régions utiles.....	55
Figure 3.30	Expression de l'ensemble d'étude autour d'un repère centré	56
Figure 3.31	Application du SVD sur un ensemble quelconque de points.....	57
Figure 3.32	Recherche du côté fonctionnel de la gâchette poussoir par distance de projection des points extremums	58
Figure 3.33	Calcul du point d'application de l'index sur la gâchette.....	58
Figure 3.34	Indice de préhension associé à une gâchette poussoir.	59
Figure 3.35	Projection des points limites de la gâchette levier sur l'axe du manche...	60
Figure 3.36	Indice de préhension pour une tête de tournevis.....	61
Figure 3.37	Indice de préhension pour une tête à renvoi d'angle	61
Figure 3.38	Indices de préhension pour une tête de maillet.....	62
Figure 3.39	Indices de préhension pour des têtes de pinces.....	62
Figure 3.40	Boites englobantes pour des visseuses de forme pistolet.....	63
Figure 3.41	Les sous-étapes pour la recherche de l'axe optimal de balayage.....	64
Figure 3.42	Premier balayage pour la recherche d'un manche approximatif	65
Figure 3.43	Second balayage pour la recherche du corps de la visseuse	66
Figure 3.44	Balayage optimal d'une visseuse pistolet	67
Figure 4.1	Boite englobante du maillet et balayage de sections	70
Figure 4.2	Courbe de l'évolution des aires de faces.....	71
Figure 4.3	Segmentation en deux régions du maillet	71
Figure 4.4	SVD pour l'obtention de l'axe de préhension et représentation visuelle des indices de préhension du maillet.....	73
Figure 4.5	Boîte englobante du tournevis et balayage de sections.....	74
Figure 4.6	Evolution des aires des faces selon les sections.....	75

Figure 4.7	Segmentation en régions du tournevis	75
Figure 4.8	SVD pour l'obtention de l'axe de préhension et représentation visuelle des indices de préhension du tournevis.....	77
Figure 4.9	Boîte englobante de la pince et balayage de sections	78
Figure 4.10	Segmentation de la pince en tronçons et en segments	79
Figure 4.11	Segmentation en régions de la pince.....	79
Figure 4.12	Evolution des aires des faces selon les sections pour les segments 4 et 5.80	
Figure 4.13	SVD pour l'obtention des axes de préhension et de travail, et représentation visuelle des indices de préhension de la pince	81
Figure 4.14	Boîte englobante de la visseuse droite à gâchette levier et balayage de sections.....	82
Figure 4.15	Segmentation en segments de la visseuse droite à gâchette levier	83
Figure 4.16	Evolution des aires des faces selon les sections pour le segment 1	84
Figure 4.17	Segmentation en régions de la visseuse droite à gâchette levier	84
Figure 4.18	SVD pour l'obtention de l'axe de préhension et représentation visuelle des indices de préhension de la visseuse droite à gâchette levier	86
Figure 4.19	Boîte englobante de la visseuse droite à renvoi d'angle et balayage de sections.....	87
Figure 4.20	Evolution des aires des faces selon les sections.....	88
Figure 4.21	Segmentation en régions de la visseuse droite à renvoi d'angle et gâchette pousoir.....	88
Figure 4.22	SVD pour l'obtention de l'axe de préhension et représentation visuelle des indices de préhension de la visseuse droite à renvoi d'angle et gâchette pousoir.....	90
Figure 4.23	Segmentation en régions de la visseuse pistolet selon le premier balayage.	92
Figure 4.24	SVD pour l'obtention d'un axe approximatif du manche.....	93
Figure 4.25	Segmentation en régions de la visseuse pistolet selon le second balayage	94

Figure 4.26	SVD pour l'obtention de l'axe de la tête de la visseuse	95
Figure 4.27	Segmentation en régions de la visseuse pistolet selon la direction optimale de balayage.....	96
Figure 4.28	SVD pour l'obtention de l'axe de préhension de la visseuse pistolet.....	97
Figure 4.29	Indices de préhension pour la visseuse pistolet	97
Figure 5.1	Génération de préhensions par le SPE à partir d'indices	100
Figure 5.2	Comportement de l'évolution de l'aire des faces selon l'échantillonnage	101
Figure 5.3	Boite englobante pour une visseuse à embrayage carré.....	101

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

SPE

Smart Posturing Engine

BEO

Boite Englobante Orientée

CG

Centre géométrique

SVD

Singular Value Decomposition

INTRODUCTION

Dassault Systèmes est un des acteurs principaux du marché des éditeurs de logiciels tournés vers le PLM (Product Lifecycle Management) et le développement de produits. Parmi les solutions proposées par cette compagnie, le logiciel Delmia permet de simuler des usines de fabrication industrielle au sein desquels des opérateurs virtuels sont amenés à interagir avec leur environnement. Pourtant la manipulation de ces mannequins virtuels par des non-experts s'avère difficile en raison d'un grand nombre d'étapes manuelles et devient rapidement couteuse en temps. En effet, le temps sollicité pour positionner le mannequin se fait alors au détriment de la fonction principale du logiciel consistant à évaluer l'ergonomie des postes de travail.

Pour remédier à ce problème, l'équipe d'ergonomie virtuelle de Dassault Systèmes Montréal s'attache à développer un moteur de positionnement pour le mannequin de Delmia, intitulé 'Smart Posturing Engine' (SPE), dans l'objectif d'automatiser les étapes de positionnement habituellement confiées à un utilisateur. Parmi l'ensemble des défis associés à ce projet SPE se trouve la définition automatique de la préhension des objets, qui conditionne le positionnement global du mannequin. La présente étude se focalise sur le problème de détermination de la préhension des outils usuels tenus à une main.

On retrouve dans la littérature deux grandes approches de détermination automatique de la préhension: les approches analytiques et empiriques. Les approches analytiques s'attachent à caractériser le comportement mécanique de la main et souffrent d'une complexité de calcul limitant fortement leur utilisation. Les approches empiriques s'affranchissent de ces contraintes en optant pour une analyse de la géométrie de l'objet. Les objets sont catégorisés en trois classes : les objets connus, les objets familiers et les objets inconnus. Les objets connus sont ceux pour lesquels une préhension a déjà été enregistrée et peut être réutilisée au besoin. Les objets familiers sont des objets pour lesquels certaines propriétés sont reconnues et exploitables. La préhension est inconnue, mais son appartenance à une famille permet de guider la définition de la préhension. Les objets inconnus correspondent quant à eux à des

objets pour lesquels aucun paramètre n'est reconnu. Le système ne possède alors aucune information préliminaire pour générer une préhension.

Malgré la diversité de travaux analytiques et empiriques, aucun d'entre eux ne permet de couvrir l'ensemble des cas possibles. En effet, la génération de préhensions étant directement liée à la géométrie des objets, traiter la préhension d'une infinité d'objets inconnus, comme une portière de voiture, est difficile. Ainsi, de manière pragmatique, plutôt que de vouloir répondre à la question générale de la préhension d'objets inconnus, la stratégie adoptée au sein du projet de développement du SPE consiste à limiter le problème aux outils manufacturiers tenus à une main dont la nature est initialement connue. Le positionnement de l'étude est illustré dans la figure 0.1.

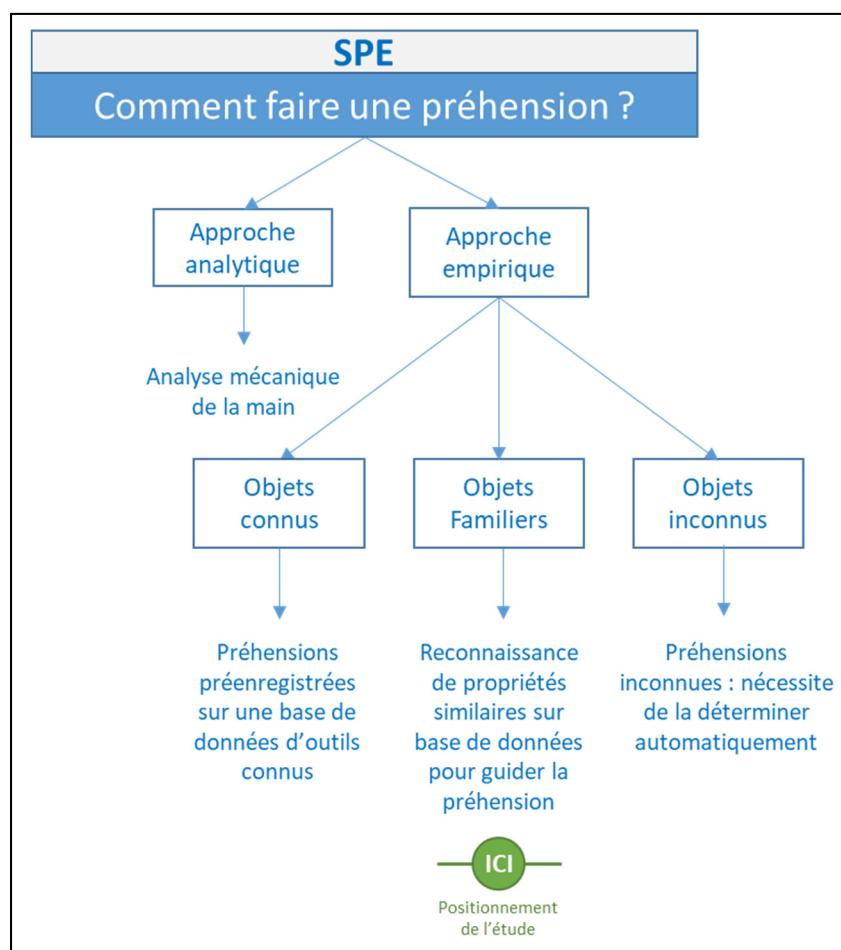


Figure 0.1 : Positionnement de l'étude

L'outil est donc considéré comme ‘familier’. Au sein du Smart Posturing Engine (SPE) la démarche de détermination d'une préhension s'effectue en deux grandes étapes :

- Déterminer les indices de préhension à partir de la géométrie des objets
- Générer la posture à partir des indices de préhension.

L'objectif de ce mémoire est de déterminer une méthode d'extraction automatique d'indices géométriques pour la préhension en s'appuyant sur l'affordance des outils tenus à une main et sur la géométrie 3D de chacun de ces outils afin d'y reconnaître les caractéristiques propres à cette affordance. Cette démarche est rendue possible à travers un processus en cinq étapes.

Le chapitre 1 propose une revue de la littérature nécessaire pour atteindre l'objectif proposé. Le chapitre 2 décrit l'objectif de recherche et la méthodologie proposée. Le chapitre 3 propose une méthode d'extraction automatique d'indices géométriques sur des outils tenus à une main, dits familiers, afin de guider la préhension de la main pour une saisie prenant en compte la tâche de l'outil. Les résultats obtenus sont détaillés dans le chapitre 4. Le chapitre 5 discute les résultats obtenus. Le chapitre 6 apporte une synthèse des travaux tout en proposant de futurs travaux.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTERATURE

A travers la revue de littérature, nous tenterons d'exposer notre vision du projet en s'appuyant sur une révision élargie des précédentes recherches menées sur la préhension. Dans un premier temps, la notion de préhension est définie. Deux grandes approches de détermination de la préhension sont présentées (analytiques et empiriques) ainsi que des méthodes hybrides plus récentes. Par ailleurs, certains outils comme les algorithmes de squelettisation apportant de nouvelles possibilités sont finalement mentionnés.

1.1 Définition de la préhension

La saisie d'objet est un défi important en ergonomie virtuelle. Selon Kapandji (Kapandji, 1980), la préhension se définit comme une faculté exercée par l'intermédiaire d'un organe approprié dans l'objectif d'assurer le maintien d'un objet.

La configuration de la main, de l'objet et des contacts s'exerçant entre ces deux entités ont un effet sur les propriétés de la préhension. On retrouve un grand nombre d'approches permettant de réaliser des saisies fermes d'objet. Néanmoins, lorsqu'il s'agit de déterminer des préhensions prenant en compte la tâche de l'objet, il persiste de nombreuses contraintes rendant la définition automatique de la préhension plus difficile.

Une première réflexion menée par Cutkosky et al. (Cutkosky & Howe, 1990) a permis de classifier deux approches principales dans la recherche de préhensions : analytiques ou empiriques.

1.2 Les approches analytiques

Les approches analytiques font référence aux méthodes qui construisent des préhensions en calculant des équations cinématiques et dynamiques des positions de la main et des doigts sur

l'objet. La complexité de ces approches provient du nombre de conditions qui doivent être satisfaites pour assurer une préhension stable. Ainsi, ces approches sont généralement basées sur des hypothèses telles que des modèles de contact simplifiés, la friction de Coulomb et la modélisation des corps rigides. La validation des approches analytiques consiste à évaluer la stabilité de la préhension à partir des mesures de stabilité sur des fermetures de forme ou de force de la main. Selon Bicchi (Bicchi, 1995):

- Une fermeture de force consiste à intégralement contraindre l'objet uniquement à partir de la force de fermeture des doigts sur l'objet.
- Une fermeture de forme est définie comme la capacité à contraindre et empêcher les mouvements de l'objet saisi en s'appuyant uniquement sur des contraintes de contact unilatérales et sans frottement, quelle que soit l'amplitude de la force de contact.

Nguyen (V-D Nguyen, 1987) classe les contacts 3D entre les doigts et l'objet saisi en deux grandes catégories : contacts *hard-finger* et contacts *soft-finger*

- *Hard-finger*: Le modèle correspond à un point de contact avec frottement (figure 1.1). Le cône de frottement définit l'espace des forces qui peuvent être appliquées par la main sur l'objet. Le cône est défini par le coefficient de frottement. Le doigt peut exercer n'importe quelle force contenue dans le cône de frottement. La force est appliquée sur le point de contact. L'ensemble des cônes de frottement décrit les espaces des torseurs mécaniques (*wrench space*) et se retrouve généralement approximé par une convexité polyédrique.

Soft-finger : Le frottement sur la zone de contact permet au doigt d'exercer des couples purs en plus des forces pures pointées dans le cône de frottement (figure 1.1). La combinaison des forces et des moments exercés par le doigt décrit les espaces des torseurs mécaniques (*wrench-space*).

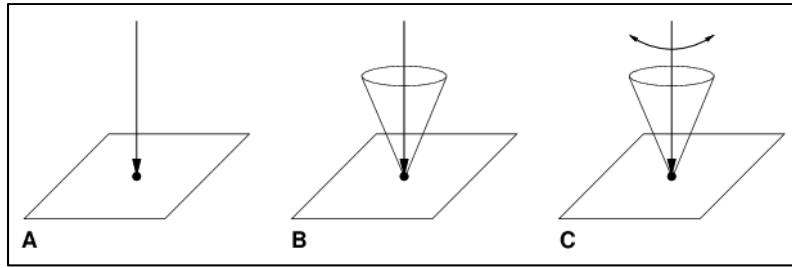


Figure 1.1 : Différents modèles de contact (A-hard-finger sans friction, B-hard-finger avec friction, C-soft-finger), tirée de V.-D. Nguyen (1987)

Nguyen (Van-Duc Nguyen, 1988) propose un premier algorithme de préhension sur différents polygones et polyèdres 2D à partir d'une fermeture de force de la main. Un polygone est défini comme un objet à nombre fini de faces planes. Pour cela, son analyse est basée sur les contacts sans frottement, entre les doigts et la surface des polygones d'étude. Selon lui, la fermeture de force se divise en deux sous problèmes : 1) « fermeture force-direction », qui vérifie que les cônes de frottement des faces de contact couvrent toutes les directions de l'espace, et 2) la « fermeture de couple » qui garantit que les forces de contact créent des couples purs selon trois axes indépendants. À partir des angles entre les faces, Nguyen recherche des contacts en opposition de forces afin d'assurer la stabilité de la saisie (figure 1.2). En se basant sur cette propriété, les auteurs ont formulé des conditions linéaires nécessaires pour les préhensions de fermeture de force à deux et trois doigts exprimées sous la forme d'un ensemble d'inégalités linéaires.

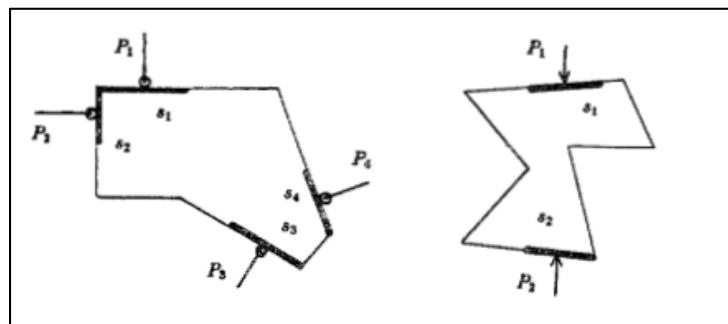


Figure 1.2 : Recherche de contacts en opposition de force sur un polygone 2D, tirée de V.-D. Nguyen (1988)

Ding et al. (Ding, Liu, & Wang, 2000) poussent la notion de fermeture de force en développant une nouvelle approche analytique pour la génération de préhensions sur des objets 3D. L'objectif est de calculer le positionnement des “n” doigts de la main dans le but d'effectuer une fermeture de force à partir d'une préhension initiale dite aléatoire. Pour cela, la première étape de la méthode consiste à déterminer arbitrairement une préhension sur les faces du polygone étudié, à partir d'une génération aléatoire des points de contact. Si la saisie n'est pas de type “fermeture de force”, autrement dit que l'origine O du “wrench space” est à l'extérieur de son enveloppe convexe intitulée “wrench primitive convex hull”, l'algorithme déplace progressivement les bouts des doigts de manière à ce que l'enveloppe convexe se déplace sur l'origine O pour former une fermeture de force.

De manière générale, ces approches analytiques présentent de bons résultats pour des prises du quotidien où la stabilité est requise. Cependant, l'interaction physique à travers la manipulation que nous effectuons, nous humains, va au-delà de la simple action de saisie. C'est pourquoi de nombreux chercheurs se sont penchés sur le problème de la préhension axée sur la tâche. Malheureusement, les approches analytiques souffrent d'une complexité de calcul qui empêche la résolution des postures de préhensions dont la tâche est prise en compte (Zhu & Ding, 2004) (Ferrari & Canny, 1992).

1.3 Les approches empiriques

Les méthodes de préhension empiriques évitent la complexité informatique des techniques analytiques en essayant d'imiter les comportements de l'homme. Ces approches empiriques utilisent généralement des algorithmes d'apprentissage pour choisir une préhension qui dépend de la tâche et de la géométrie de l'objet. Dans cette stratégie, le problème ne s'articule plus en regardant les mains, mais en observant premièrement la géométrie de l'objet. Par ailleurs, la manière dont la qualité et la plausibilité de la préhension sont évaluées, reste différente des approches analytiques. Certaines méthodes mesurent la qualité de préhension en se basant sur des formulations analytiques, mais elles se fient le plus souvent à des exemples de comportements humains à partir d'informations perceptuelles ou sémantiques.

Selon Bohg et al. (Bohg, Morales, Asfour, & Kragic, 2013), les approches empiriques basées sur l'observation de la géométrie des objets peuvent être classées en trois groupes en fonction de ce qui, a priori, est supposé être connu de l'objet.

- Un objet connu est un objet qui a été rencontré auparavant et pour lequel des préhensions ont déjà été générées.
- Un objet familier suppose que l'objet de la requête est similaire à un objet précédemment rencontré. Des paramètres sont alors reconnus.
- Un objet inconnu correspond à une nouvelle forme jamais saisie auparavant.

En 2003, Miller et al. (Miller, Knoop, Christensen, & Allen, 2003) présentent leur algorithme de préhension automatique pour des objets connus en se basant sur l'étude de la géométrie des objets. Dans cette optique, les objets dont la nature est connue sont simplifiés en modèles élémentaires de manière à réduire la complexité du problème. Pour cela, un objet est modélisé comme un ensemble de primitives géométriques, tels que des sphères, cylindres, cônes et boîtes, pour lesquels des préhensions valides sont préalablement enregistrées. Le modèle simplifié n'a pas besoin de correspondre exactement à l'objet réel, mais le choix des primitives détermine les différentes stratégies utilisées pour la saisie de l'objet.

A titre d'exemple dans la figure 1.3, la tasse est automatiquement approximée par un cylindre pour le corps ainsi qu'une boîte pour la poignée. A chaque primitive s'associe un ensemble de préhensions prédéterminées.

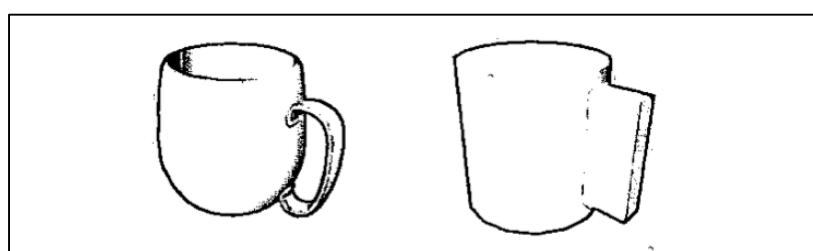


Figure 1.3 : Principe de simplification d'un modèle de tasse en formes géométriques élémentaires, tirée de Miller et al. (2003)

Dans une autre perspective, l'idée d'aborder le problème de la saisie d'objets familiers découle de l'observation que de nombreux objets dans l'environnement peuvent être regroupés en catégories ayant des caractéristiques communes. Une grande partie de la recherche associée à la préhension d'objets familiers consiste à identifier des similarités entre l'objet, ou une partie de l'objet, avec des références d'une base de données pour laquelle de bonnes préhensions sont déjà définies.

Li et al. (Li & Pollard, 2005) traitent la question de la préhension d'objets familiers comme un problème de correspondance de forme entre la main humaine et l'objet. Pour cela, les auteurs s'appuient sur une base de données d'exemples de préhensions humaines réalisée par Yamane et al. (Yamane, Kuffner, & Hodgins, 2004). A partir de cette base de données, une préhension appropriée est recherchée en comparant les caractéristiques géométriques extérieures de l'objet avec la forme de l'intérieur des postures des mains (voir figure 1.4) disponibles dans la base de données. Lorsque des correspondances sont trouvées, une préhension est automatiquement attribuée. Cependant, un grand nombre de saisies générées par cette méthode sont inadaptées pour la réalisation d'une tâche.

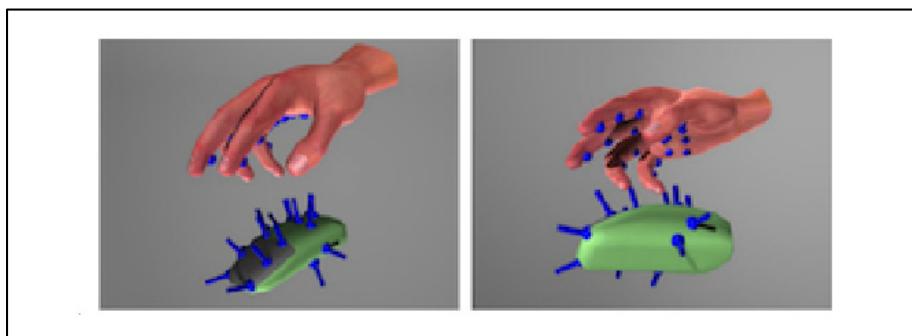


Figure 1.4 : Comparaison de la viabilité de la forme de la main avec la géométrie extérieure d'une souris, tirée de Li et Pollard (2005)

Parmi toutes ces recherches basées sur des approches empiriques où la recherche de préhension s'effectue par la compréhension de la géométrie de l'objet, la question de la saisie d'objets inconnus continue d'être un véritable défi. Une étape préliminaire à la préhension consiste à

comprendre et déterminer des caractéristiques sur la géométrie de l'objet. Pour cela, des algorithmes de régénération 3D sont de plus en plus utilisés.

Bohg et al. (Bohg et al., 2011) observent que de nombreux objets du quotidien possèdent des symétries. Ainsi en traitant l'objet d'étude comme un polyèdre 3D, les auteurs ont développé un algorithme visant à reconstruire la forme complète d'un objet en imposant une symétrie plane à partir de son nuage de points associé. Une fois la symétrie connue, les auteurs font appel au logiciel Open RAVE qui permet de déterminer des vecteurs d'approches pour la main. Son principe est simple : une boîte englobante du maillage est obtenue, et sa surface est échantillonnée uniformément. À chaque intersection des échantillons avec l'objet, un vecteur d'approche est créé et aligné avec la normale à la surface de l'objet (figure 1.5). Selon le nombre de vecteurs d'approche obtenus, des postures de préhension sont générées et la plus stable est finalement retournée.

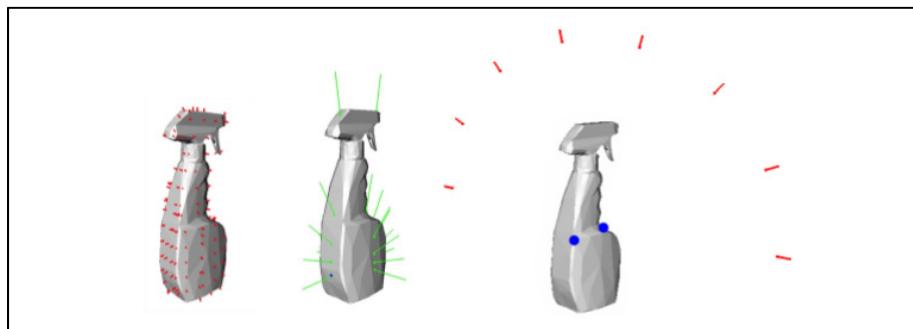


Figure 1.5 : Exemple de vecteurs d'approche générés pour un flacon pulvérisateur, tirée de Bohg et al. (2011)

Ces stratégies basées sur l'observation des objets semblent adaptées à la préhension de nouveaux objets. Néanmoins, ces stratégies ne sont pas sans faille et partagent un défaut commun en générant un grand nombre de préhensions stables sans sélectionner nécessairement la posture de main la plus adaptée à la tâche. Ainsi les solutions empiriques ont tendance à se heurter aux mêmes problèmes que les méthodes analytiques lorsqu'il s'agit de prendre en considération la tâche à réaliser.

1.4 Les approches hybrides

Face à ces limitations, des recherches récentes proposant des solutions hybrides ont été publiées. Ces nouvelles approches tentent de combiner les avantages respectifs de ces deux grandes familles.

Une partie des approches hybrides cherchent à exploiter la notion d'affordance associée aux objets. Selon la compagnie « Usabilis », spécialisée en ergonomie virtuelle, l'affordance est définie comme la capacité d'un objet ou d'un système à évoquer son utilisation, sa fonction. Par définition, l'affordance provoque une interaction spontanée entre un environnement et son utilisateur. En ergonomie, elle permet de rendre l'utilisation d'un objet ou d'un service « intuitive ».

Dans cette démarche, El-Khoury (El-Khoury, 2008) met en avant une nouvelle méthode de préhension automatique dans laquelle l'adaptabilité est assurée par la reconnaissance de caractéristiques géométriques pertinentes pour la saisie tandis que la stabilité de la saisie est assurée par une fermeture de force. En s'inspirant du comportement humain, El Khoury exploite l'affordance naturelle des objets pour rechercher une préhension. Intuitivement, la géométrie d'une pièce est étroitement liée à ses fonctions possibles, ou à son affordance. Au lieu de chercher des préhensions sur l'ensemble de la géométrie de l'objet, elle suppose qu'il est plus approprié de décomposer l'objet de recherche en un ensemble de régions distinctes afin de faciliter la recherche de préhension. Dans cette logique, les objets 3D sont segmentés en un ensemble de régions (figure 1.6) par la suite approximées par des superquadrics élémentaires (figure 1.7). Cette simplification du modèle géométrique permet ainsi de faciliter la formation d'un réseau de neurones pour l'identification des parties saisissables de l'objet.

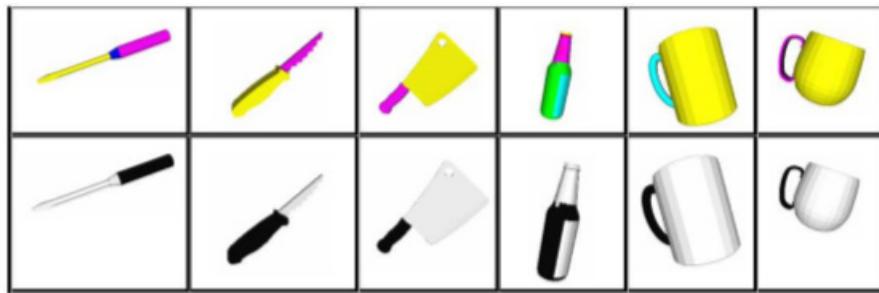


Figure 1.6 : Segmentation d'un maillage en différentes régions,
tirée de Sahar El Khoury (2008)

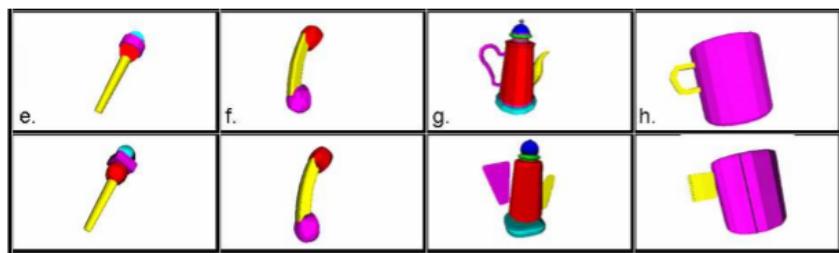


Figure 1.7 : Approximation des régions en superquadrics,
tirée de Sahar El Khoury (2008)

La segmentation apporte de meilleurs résultats pour la prise en main des objets inconnus. Pour cette raison, de nombreuses recherches dans le secteur de la robotique font appel à des notions de sémantique dans l'intérêt de distinguer et de regrouper des informations par région.

À titre d'exemple, Myers et al. (Myers, Teo, Fermüller, & Aloimonos, 2015) s'appuient sur les récents travaux de (Bo, Ren, & Fox, 2013) en vision par ordinateur pour rechercher des affordances à partir des différents calques de texture d'une image (depth map, normal map, curvature map). L'image est ensuite segmentée à partir des différentes couches de texture. Un réseau de neurones est ensuite formé pour identifier les parties saisissables. L'ensemble du processus de recherche d'affordance par vision ordinateur est représenté dans la figure 1.8.

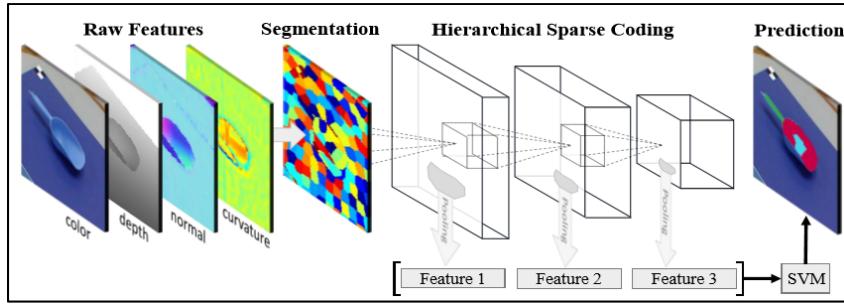


Figure 1.8 : Principe de recherche d'affordance avec vision par ordinateur, tiré de Myers et Al (2015)

Dans une autre mesure, Marton et al. (Marton, Pangercic, Blodow, & Beetz, 2011) proposent une stratégie de préhension unique pour laquelle un ensemble de primitives géométriques comme des sphères, des boîtes, des cylindres et des formes axisymétriques sont générées pour simplifier le modèle d'étude à partir de la segmentation du nuage de point. La reconstruction est effectuée en modifiant les dimensions des primitives de manière à remplir au maximum le volume occupé par le nuage de points. Dépendamment des reconstructions effectuées, une recherche est menée par réseaux de neurones de manière à rechercher des modèles de préhension selon les primitives générées ainsi que leurs dimensions.

1.5 Squelettisation sur géométrie tridimensionnelle

Au-delà de la préhension, de nombreux travaux s'attachent à déterminer de nouvelles méthodes d'analyse et de reconnaissance de formes géométriques sur des géométries tridimensionnelles. On conçoit ainsi que ces recherches peuvent apporter des réponses innovantes face aux limitations des approches empiriques pour la préhension. Parmi ces solutions, les procédés de squelettisation des maillages apportent de nouvelles possibilités en permettant de reconnaître des similarités géométriques entre les objets.

Définie en 2012 par Andrea Tagliasacchi (Tagliasacchi, Alhashim, Olson, & Zhang, 2012), la squelettisation de géométries 3D consiste à construire la charpente, communément appelée, squelette, d'un modèle 3D. Le principe de squelettisation s'attache à déterminer le plus grand motif de l'objet sans impacter sa forme globale.

Il existe dans la littérature, différentes approches permettant de faire de la squelettisation d'objets. On distingue de nous jours deux grandes catégories : la squelettisation discrète et la squelettisation géométrique.

La squelettisation discrète travaille dans l'espace image, en recherchant l'ensemble des pixels ou voxels équidistants à plusieurs points de la frontière du maillage. Il s'agit principalement de fonctions de distance. Le principe de squelettisation géométrique s'appuie principalement sur les diagrammes de Voronoi (Okabe, Boots, Sugihara, & Chiu, 2009). Des hyperplans sont calculés entre les points et se retrouvent par la suite combinés pour reconstruire la forme du squelette.

Selon Iyer et al (Iyer, Jayanti, Lou, Kalyanaraman, & Ramani, 2005) les systèmes PLM ne fournissent pas d'outils robustes pour rechercher des connaissances réutilisables telles que des similarités de formes entre les objets. Ainsi, ces auteurs suggèrent d'exploiter le principe de squelettisation des modèles d'objets 3D pour la mise en œuvre et l'exécution du système de recherche de formes sur des objets 3D. Leurs travaux s'appuient sur les recherches de Palagyi (Palágyi & Kuba, 1998) sur la squelettisation en amincissement dont le principe consiste à utiliser une représentation voxelisée de la géométrie, dans l'objectif d'effectuer une réduction itérative de l'objet tout en préservant sa forme initiale pour en extraire des axes médians.

Le squelette est converti en un squelette hiérarchique graphique composé de nœuds, de branches et de boucles. Les graphiques squelettiques sont des graphiques d'entités non dirigées et sont représentés sous forme de matrices de contiguïté. La matrice de contiguïté est formulée pour capturer les propriétés structurelles du squelette. Le principe de recherche de similarités géométriques s'appuie sur la recherche de modèles dont les squelettes ont un isomorphisme ainsi qu'un isomorphisme sous-graphique avec le modèle de requête (figure 1.9).

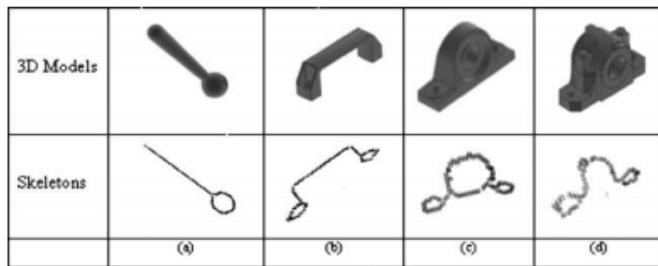


Figure 1.9 : Génération de squelettes sur géométries 3D, tiré de Natraj Iyer et al. (2005)

Différents travaux ont exploité la notion de squelettisation pour l'analyse géométrique de maillage. Yang et al. (Yang, Lin, & Zhang, 2007) proposent une amélioration de la recherche de similarités géométriques en exploitant les réseaux de neurones pour la comparaison de structures squelettiques. Les procédés de squelettisation possèdent tout de même certaines limitations dépendamment de la complexité de la géométrie 3D. Néanmoins, certains travaux permettent d'apporter de nouvelles solutions de squelettisation moins coûteuses en temps et permettant une reconstruction de squelettes sur des modèles géométriques plus complexes, notamment dans le domaine médical pour la reconstruction d'organes vitaux (Meiburger et al., 2016) (Khan, Mankar, Prashanthi, & Sathya, 2015).

1.6 Synthèse

Dans l'ensemble, à notre connaissance, aucune méthode proposée dans la littérature ne permet de guider un mannequin humain à déterminer automatiquement une préhension d'outils dans un environnement de manufacturier. Certains objets du quotidien possèdent une affordance naturelle leur permettant d'être saisis par une main humaine. Pour les outils, leur affordance est d'autant plus significative que leur géométrie est adaptée à une saisie spécifique se prêtant à la réalisation d'une tâche. Etant donné le contexte d'application industrielle du projet décrit dans ce mémoire, on se concentre sur les outils tenus à une main fréquemment utilisés en environnement manufacturier. En effet, tel que spécifié par l'équipe de Dassault

Systèmes, les outils à prioriser dans cette étude sont les maillets, les tournevis, les pinces, les visseuses droites et les visseuses pistolets.

La méthode proposée utilise donc la géométrie 3D de l'outil comme entrée. La famille à laquelle appartient l'outil est connue avant de lancer l'analyse, ce qui permet de rechercher des propriétés géométriques prédéterminées. Les outils sont donc considérés comme familiers. Un balayage est premièrement mené sur le maillage de l'outil. Son squelette est alors construit en structurant de manière hiérarchique et spatialisée les sections. La géométrie des outils est segmentée en tronçons de sections, segments et régions, successivement. La méthode classe ensuite les régions des outils comme une tête, un manche ou une gâchette (s'il y en a une), reflétant l'affordance des outils. Des indices de préhension sont finalement extraits de ces régions et transmis au SPE afin de générer des saisies plausibles pour la tâche à réaliser.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

2.1 Objectifs

L'objectif de ce mémoire est de déterminer une méthode d'extraction automatique d'indices de préhension en s'appuyant sur les caractéristiques d'affordance des outils tenus à une main et sur la géométrie 3D de chacun de ces outils, afin d'y reconnaître les caractéristiques propres à cette affordance.

Les indices de préhension sont ensuite envoyés au *Smart Posturing Engine* qui doit générer une préhension plausible des outils tenus à une main tout en considérant sa tâche. Les indices de préhension permettent de guider le SPE dans la définition de la préhension elle-même, tout en lui conférant une certaine liberté. Ainsi, les indices de préhension fournis peuvent mener à une multitude de préhensions plausibles. Dans notre cas d'étude, une « préhension plausible » est définie comme une préhension qui serait vraisemblablement choisie par un humain.

2.2 Démarche méthodologique

2.2.1 Sélection des outils de l'étude

Afin de développer une démarche d'extraction d'indices de préhension, différentes familles d'outils doivent être prises en compte afin d'assurer la portée de la méthode. Les familles d'outils retenues pour ce projet ont été choisies par Dassault Systèmes afin de répondre aux besoins industriels de ses clients. Les familles d'outils de l'étude sont les suivantes : maillets, tournevis, pinces, visseuses droites et visseuses de forme pistolet.

Une base de données composée de différents modèles géométriques d'outils a donc été créée pour les besoins de l'étude. Tous les modèles d'outils tenus à une main des familles mentionnées ci-haut et disponibles chez *Part Supply*, un service du groupe Dassault Systèmes regroupant un grand nombre de modèles géométriques d'outils appartenant à différents

fournisseurs, ont été récupérés. Au total, une cinquantaine d'outils tenus à une main ont été sélectionnés comptabilisant une dizaine de tournevis, de maillets, de pinces, et une vingtaine de visseuses.

2.2.2 Développement de la méthode

La vision globale de l'étude (Figure 2.1) consiste à s'appuyer sur l'affordance naturelle des outils pour extraire de leur géométrie 3D des indices agissants comme des guides pour proposer une préhension. La littérature récente indique en effet que la stratégie de segmentation propose de ne pas considérer l'outil comme une entité préhensible unique, mais plutôt comme composée d'un ensemble de régions géométriques distinctes. La préhension est alors définie relativement à des régions spécifiques de l'objet.

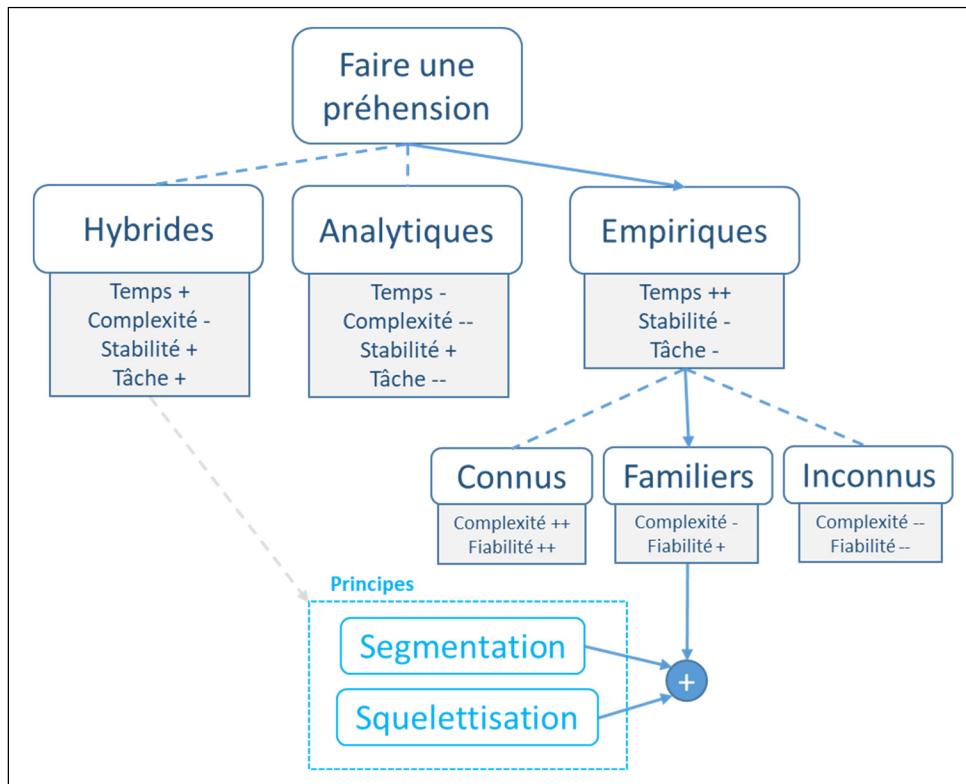


Figure 2.1 : Contextualisation du développement de la méthode

La segmentation peut être envisagée si des propriétés géométriques sont extraites de manière spatialisée de l'ensemble de la géométrie de l'outil. Pour cela, nous proposons dans cette étude une démarche de segmentation basée sur un balayage de sections desquelles des propriétés sont extraites. L'analyse des propriétés des sections permet de regrouper les sections de manière à former des segments, ce qui correspond à se doter d'une version simplifiée de la géométrie initiale, sous la forme d'un squelette. Ensuite, l'analyse permet de distinguer au sein du squelette les régions utiles, soit celles liées à la préhension (manche, gâchette) et la fonction de l'outil (tête ou axe de travail). Enfin, des indices de préhension sont générés pour chaque région utile.

2.2.3 Validation

La dernière étape consiste à valider la méthode proposée sur l'ensemble des outils de la base de test. La validation d'un test de génération d'indice de préhension est basée sur l'approbation visuelle de l'homme du positionnement des indices sur la géométrie de l'outil. Si la génération de ces indices n'aboutit pas à une préhension plausible, le test est refusé. Tous les détails utiles sur les tests réalisés sont fournis en annexe. Pour chaque outil, les indices de préhension extraits ont été examinés par l'ensemble des experts de Dassault Systèmes intervenant dans le développement du Smart Posturing Engine.

2.2.4 Les ressources de l'étude

Les logiciels de l'étude sont les suivants :

- CatiaV5 : Balayage de sections et extraction des propriétés géométriques de l'étude.
- Matlab : Calcul des évolutions des propriétés des faces et application à la segmentation.
- Excel : Réorganisation et gestion des propriétés des sections pour squelettisation.

CHAPITRE 3

DÉMARCHE PROPOSÉE POUR L'EXTRACTION DES INDICES DE PRÉHENSION

Dans ce chapitre sera présenté l'ensemble des étapes permettant la génération d'indices de préhension pour des outils tenus à une main. Le processus général est premièrement détaillé pour des outils à unique direction principale. Cinq étapes sont essentielles à la génération des indices de préhension : balayage de sections, extraction des propriétés des sections, segmentation, classification des régions utiles et, enfin, génération d'indices de préhension (Figure 3.1). Pour les outils à multiples directions principales, une étape préliminaire supplémentaire spécifique est introduite.¹

3.1 Format des données d'entrée

Comme la préhension est conditionnée par l'enveloppe extérieure (forme externe) de l'outil, le modèle d'étude est d'abord *wrapped* pour éliminer les détails internes et ne préserver que la forme extérieure de l'outil. Le wrapping sous CATIAV5 consiste à générer un modèle basse définition basé sur l'approximation de la peau extérieure de l'objet. Il n'y a donc pas d'exigence spécifique pour le format géométrique 3D d'entrée puisque le modèle de l'outil se retrouve

¹ La génération d'indices de préhensions pour des outils manufacturiers possédant une unique direction principale fait l'objet d'un article scientifique intitulé « Extracting grasping cues from one-handed tools geometry for digital human models » (Maccloud et al., 2019) publié au congrès « International Conference on Human Systems Integration (INCOSE 2019) ». La démarche expérimentale et les résultats sont explicités dans l'article pour des tournevis, maillets, pinces et visseuses droites à gâchette levier. Au sein de cette thèse ont été ajouté les familles d'outils à multiples composantes principales, telles que les visseuses de forme pistolet ainsi que le principe de détection des gâchettes pousoirs associées à leur affordance.

simplifié en format « stl ». De cette manière, la méthode proposée est à la fois viable pour des modèles CAO initialement exacts ou tessellés.

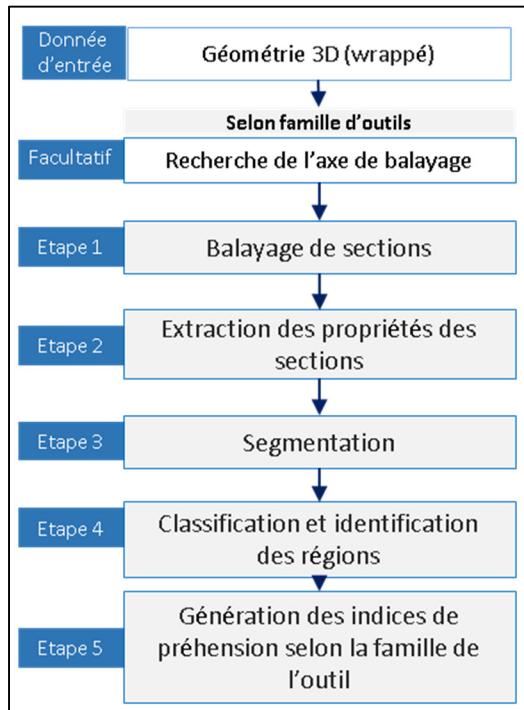


Figure 3.1 : Les étapes de génération automatique d'indices de préhension

3.2 Étape 1 : Balayage de sections

Puisque le principal défi de cette étude est d'identifier des caractéristiques d'affordance à partir d'un modèle géométrique 3D, la méthode exige un raisonnement à partir d'informations spatialisées. La méthode proposée extrait une série de sections du modèle 3D pour récupérer les propriétés de sections capables de générer un modèle spatialisé simplifié et exploitable. Par conséquent, la première étape consiste à effectuer un balayage de sections.

Une section est obtenue par intersection du modèle 3D (wrappé) avec un plan. Il est donc essentiel de déterminer une direction de balayage permettant une reconstruction simplifiée et exploitable du modèle à l'étude. De nombreux outils manufacturiers présentent une direction principale dirigée selon la plus grande dimension de l'objet. Cette composante coïncide

souvent avec l'axe du manche de l'outil. Ces outils sont catégorisés comme des outils à unique direction principale.

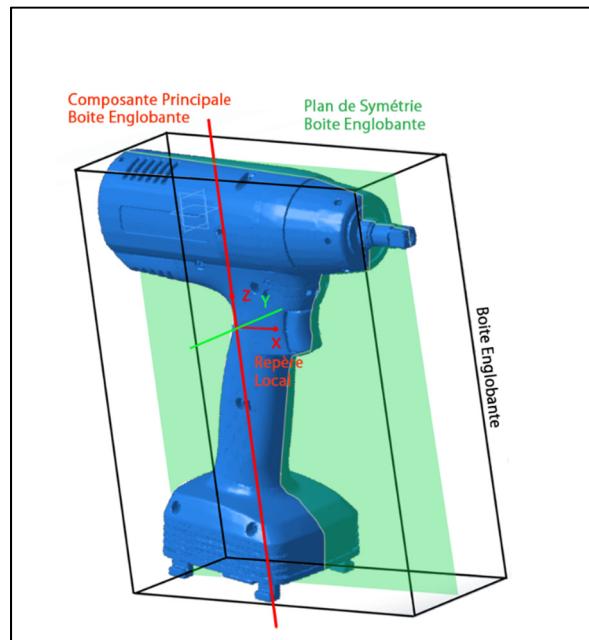


Figure 3.2 : Représentation de la boîte englobante et des repères associés

La « boîte englobante orientée (BEO) » correspond à la boîte tridimensionnelle orthogonale de plus petite dimension pouvant contenir l'ensemble des sommets de l'outil (Figure 3.2). Pour les outils à ‘unique direction principale’ (Figure 3.3), la BEO permet d’obtenir cette direction principale de l’outil en instaurant un nouveau repère local au centre d’inertie du modèle géométrique 3D de l’outil (Figure 3.4). Ce repère d’inertie est caractérisé par ses trois composantes axiales. La direction de balayage des outils possédant une unique direction principale est ainsi donnée par la composante axiale décrivant la plus grande dimension de la BEO, soit L1, Figure 3.4.

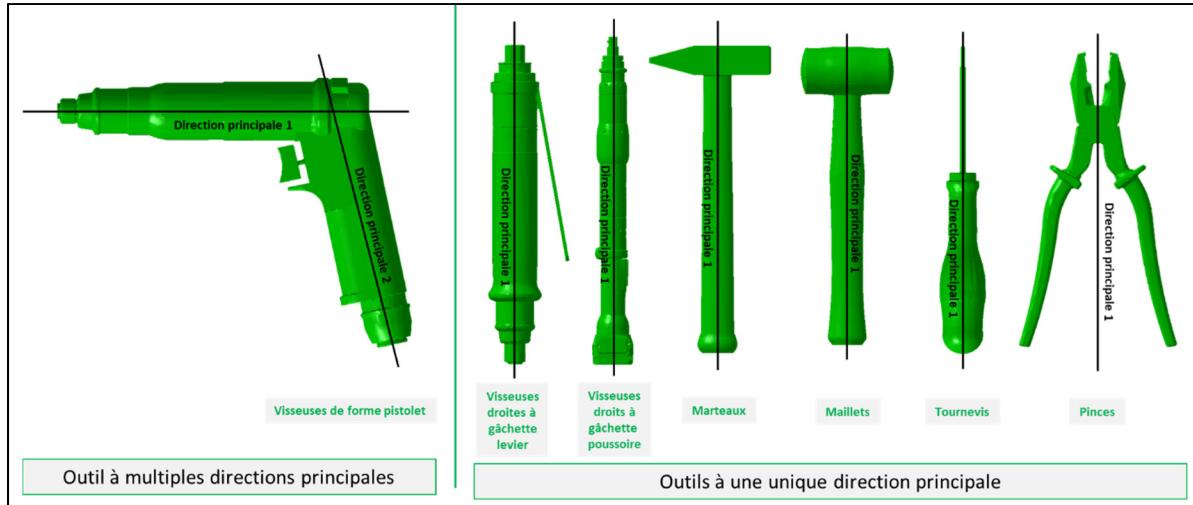


Figure 3.3 : Observation des directions principales selon les familles d'outils

Certains outils dont la géométrie est plus complexe, comme les visseuses de forme pistolet, possèdent plusieurs directions principales. Ces outils sont catégorisés comme des outils à multiples directions principales. La boîte englobante ne permet pas à elle seule d'identifier l'orientation du balayage permettant la génération de l'ensemble des indices de préhension. Une étape préliminaire pour ces outils consiste à rechercher l'axe de balayage optimal. Cette étape spécifique est décrite dans la suite de l'étude au chapitre 3.7.

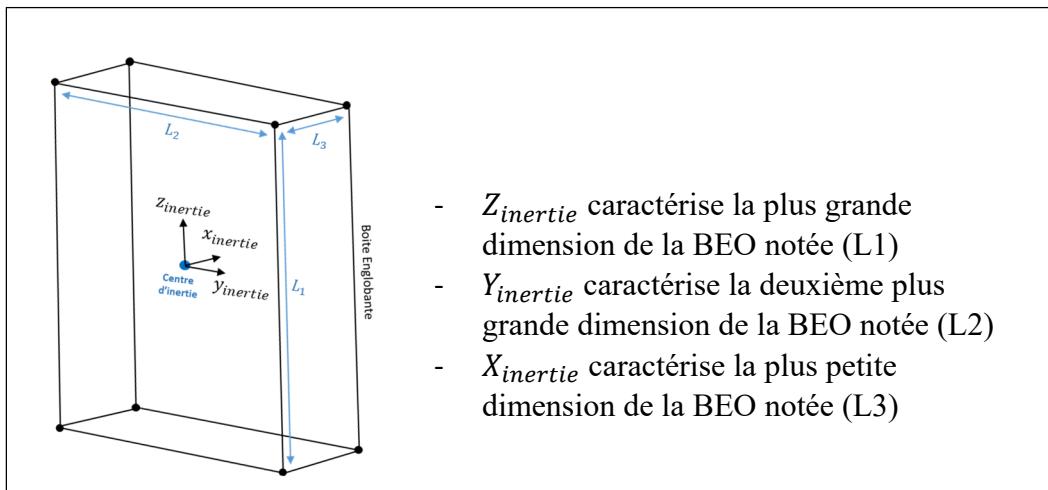


Figure 3.4 : Repère d'inertie associé à la boîte englobante orientée

Par ailleurs, de nombreux outils manufacturiers présentent des symétries pouvant contribuer à la réduction de la complexité du problème. On admet ainsi que pour l'ensemble des outils de l'étude il existe un plan de symétrie défini au centre d'inertie de l'outil dont le vecteur normal et colinéaire avec la composante axiale décrivant la plus courte dimension de la boîte englobante L3 (figure 3.6).

Pour rappel, un plan est instancié par rapport à un référentiel R selon un point d'application $A(x, y, z)$ et un vecteur normal $\vec{Z}(a, b, c)$ (Figure 3.5). L'équation du plan est donnée par

$$ax + by + cz = -d \quad (3.1)$$

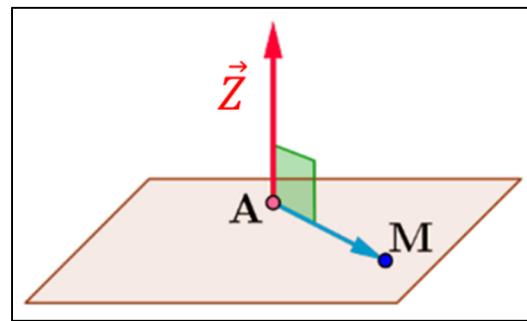


Figure 3.5 : Définition d'un plan

Le balayage est effectué en déplaçant progressivement le plan de coupe selon la direction de balayage précédemment déterminée. Pour chaque section effectuée, des propriétés sont extraites de manière à identifier par la suite des caractéristiques de préhension de l'outil. Afin d'éviter les sections dites « vides » apparaissant lorsque le plan de section n'intersecte pas le modèle 3D, un intervalle de translation du plan de coupe est calculé en projetant l'ensemble des sommets de la boîte englobante sur l'axe de balayage. Les deux points P_{sup} , P_{inf} obtenus (Figure 3.6) constituent les limites de translation du balayage. Aucun postulat n'est émis quant au point de départ de l'analyse : elle peut se faire à partir de l'une ou l'autre extrémité de l'outil.

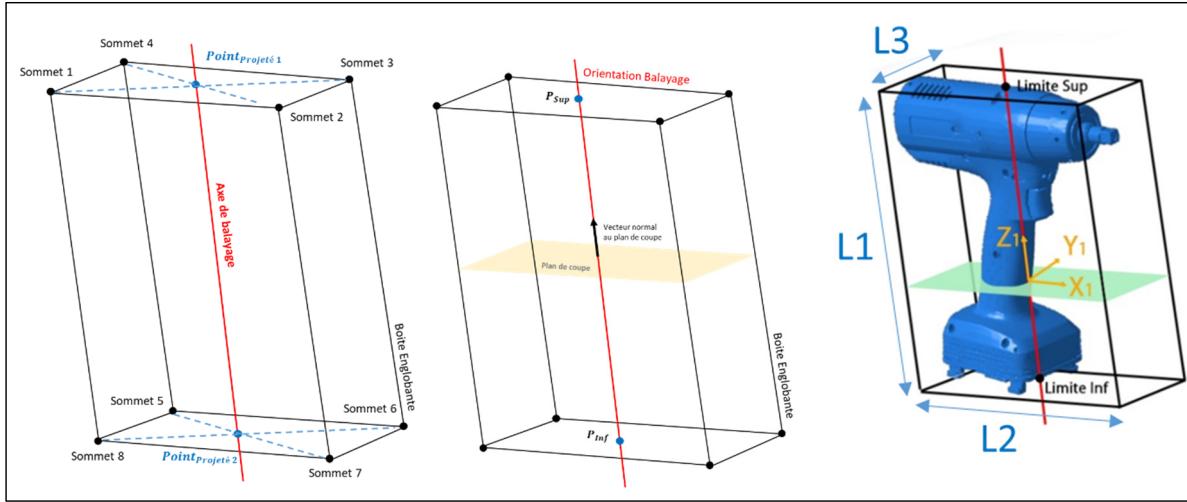


Figure 3.6 : Détermination d'une limite de translation de balayage selon la boîte englobante

En considérant un nombre de sections paramétrables à réaliser « $Nb_{Section}$ » et « n » le numéro de section de l’itération courante, la translation du point d’application du plan de coupe A est défini selon la relation suivante :

$$X_n = X_{Pinf} \times \frac{(X_{Psup} - X_{Pinf})}{Nb_{Section}} \times (n - 1) \quad (3.2)$$

$$Y_n = Y_{Pinf} \times \frac{(Y_{Psup} - Y_{Pinf})}{Nb_{Section}} \times (n - 1) \quad (3.3)$$

$$Z_n = Z_{Pinf} \times \frac{(Z_{Psup} - Z_{Pinf})}{Nb_{Section}} \times (n - 1) \quad (3.4)$$

3.3 Étape 2 : Extraction des propriétés des sections

3.3.1 Propriétés des faces

Une section réalisée dans CATIA se décompose en une ou plusieurs courbes fermées. Une face plane est ensuite définie sur chacune de ces courbes fermées (Figure 3.7). Ces faces, qui « remplissent » les courbes fermées, sont ensuite interrogées pour obtenir les caractéristiques de la section. Soulignons que ces faces planes sont employées comme intermédiaires pour obtenir des informations sur les sections pour des raisons de disponibilités des fonctions VB sous Catia.

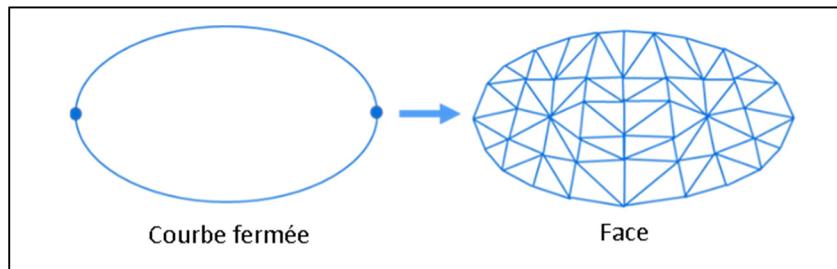


Figure 3.7 : Génération d'une face à partir d'une courbe fermée

Chaque face associée à une section est en mesure de fournir les informations suivantes :

- Une **aire** (évaluée en mm^2) permettant de quantifier l'évolution des dimensions de l'objet selon la direction de balayage (Figure 3.8). Celle-ci est calculée en effectuant la somme des aires des triangles constituant la face.
- Un **centre géométrique** (aussi appelé centroïde) dont la position est exprimée en mm , permettant de tracer l'évolution de la position des faces dans l'espace et ainsi de détecter des changements de forme (Figure 3.8). Cette donnée est obtenue par calcul du barycentre de l'ensemble des points constituant la face.

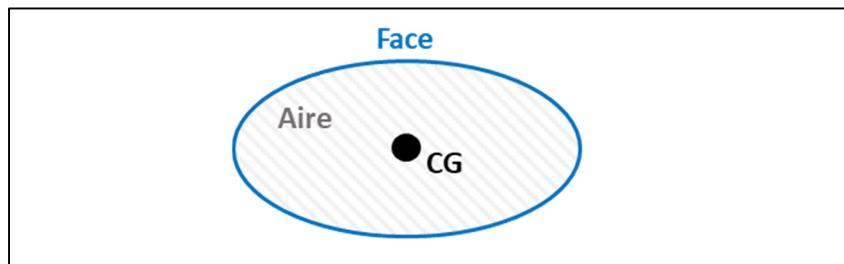


Figure 3.8 : Extraction de l'aire et du CG d'une face quelconque

Pour caractériser l'enveloppe extérieure de l'outil, des propriétés doivent également être extraites sur les extrémités des faces. Un plan de coupe (en longueur), dont la normale \vec{n}_{long} est colinéaire à la direction L3 de la boîte englobante (figure 3.9), est instancié sur la position

du CG de chaque face. Des informations dans la direction longitudinale de l'outil sont extraites.

Les propriétés sont les suivantes :

- La **position des deux points extremums** issue de l'intersection du plan de coupe en longueur avec la face (Ex1 et Ex2 en mm) (Figure 3.9).
- La **longueur** de la face est obtenue en calculant la distance entre Ex1 et Ex2 (Figure 3.9).

Par analogie au processus précédent, des propriétés peuvent être extraites dans la direction transversale de la face. Pour cela, un second plan de coupe (en largeur) de normale \vec{n}_{larg} est obtenu en effectuant une rotation de 90 degrés du vecteur normal du plan de coupe en longueur noté « \vec{n}_{long} » autour de l'axe de balayage « \vec{n}_{bal} ». Les données extraites sont les suivantes :

- La **position des deux points extremums** issue de l'intersection du plan de coupe en largeur avec la face (Ex3 et Ex4 en mm) (Figure 3.9) ;
- La **largeur** de la face est obtenue en calculant la distance entre Ex3 et Ex4 (Figure 3.9).

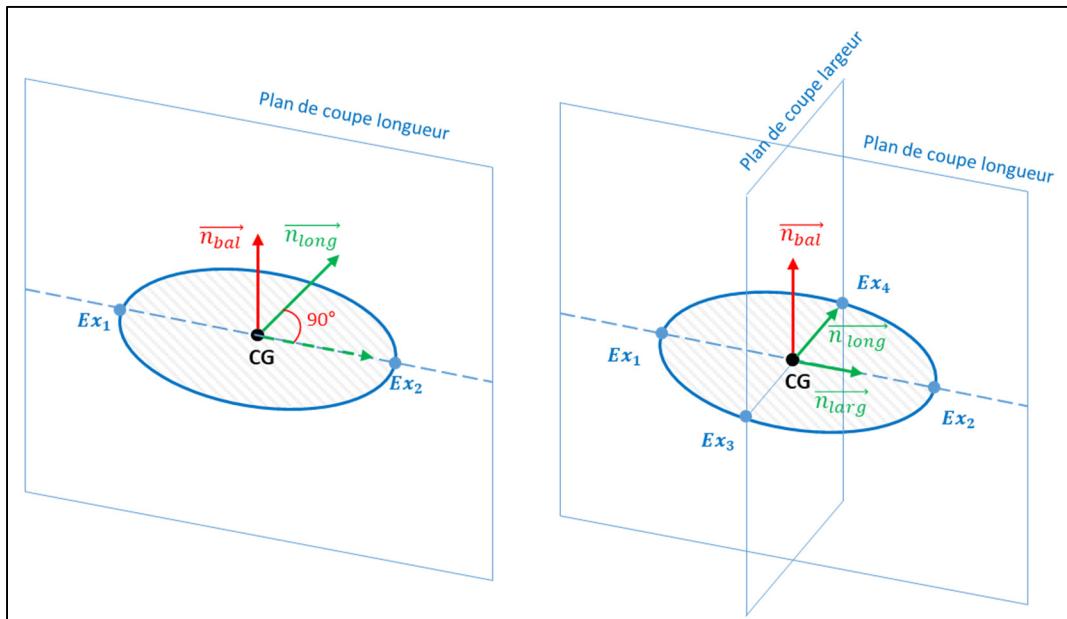


Figure 3.9 : Principe de récupération des points extrêmes en longueur
et largeur de la face

Une dernière propriété permettant de caractériser la face est son **asymétrie** selon la direction longitudinale (Figure 3.10). Ce paramètre apporte une information nécessaire à la détection d'une gâchette dans un manche. En effet, une gâchette entraîne un changement de forme du manche se caractérisant par une longueur de face plus grande et une modification du positionnement du centre géométrique. En considérant ainsi une distance L1 reliant le centroïde de la face à sa première extrémité Ex1, et L2 sa distance opposée envers Ex2, on affirme qu'une face est asymétrique si $|L_1 - L_2| > x$, où x est un seuil de tolérance fixé empiriquement à 1mm.

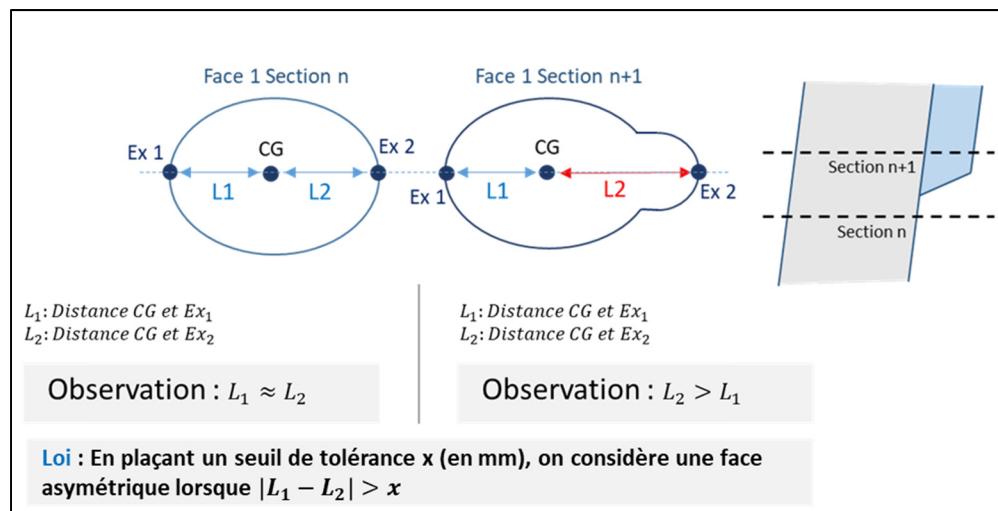


Figure 3.10 : Notion d'asymétrie d'une face

Dans un souci de lisibilité, l'ensemble du processus de traitement des sections est décrit visuellement dans la figure ci-contre.

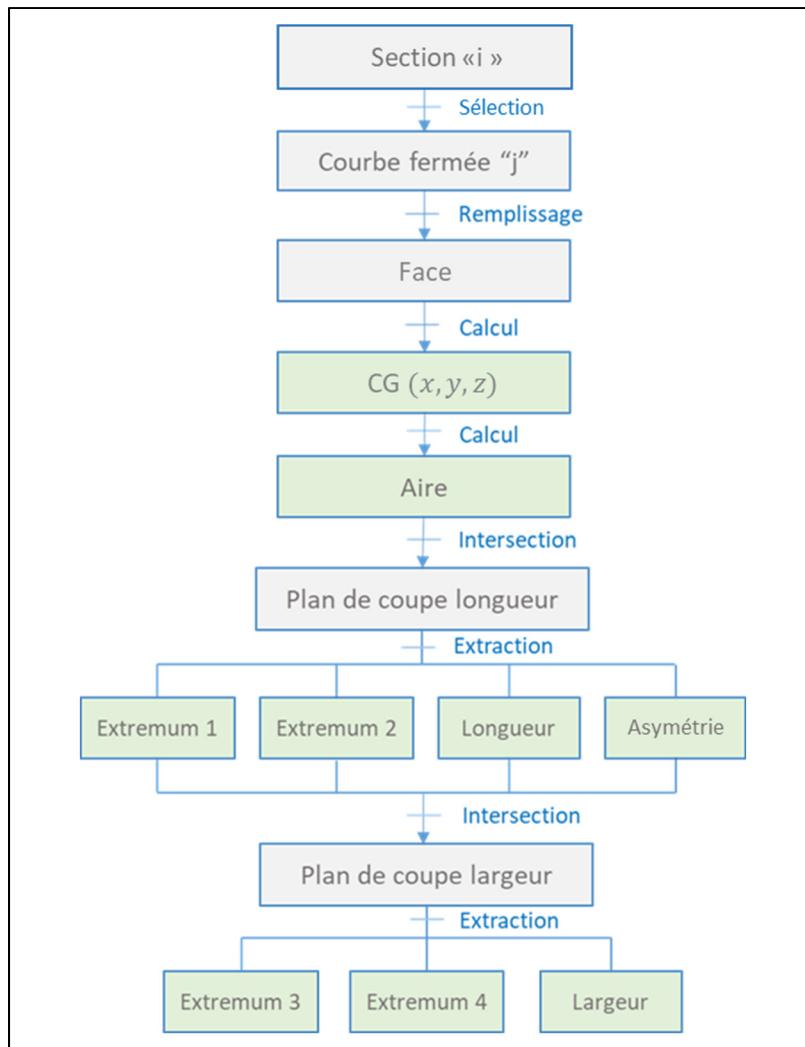


Figure 3.11 : Méthode d'extraction des propriétés des sections

3.3.2 Organisation des faces

Les propriétés des faces étant extraites, il faut maintenant organiser ces informations. Selon la géométrie de l'outil à analyser, une section peut contenir une ou plusieurs courbes fermées, donc une ou plusieurs faces. Lorsqu'une section ne présente qu'une unique face, celle-ci est dite « simple ». Dans le cas contraire, la section est considérée « multifaces ».

Le principe de balayage du modèle géométrique 3D pour en extraire des sections permet de reconstruire une coque extérieure élémentaire de l'outil à partir d'informations spatialisées afin de simplifier le modèle d'étude. Dépendamment de la précision du wrapping mené sur la

géométrie de l'outil, lorsqu'une section est réalisée dans un volume géométrique creux possédant des parois internes et externes (formes tubulaires, extrusions internes, etc.), la section génère des faces confondues. Une face est dite confondue lorsqu'elle est entièrement incluse dans une autre face de la même section (Figure 3.12). Une face confondue n'apporte donc aucune information sur l'enveloppe extérieure de l'outil et sera omise de l'analyse. Ainsi pour une section donnée, toute face considérée comme confondue dans une autre est supprimée. Mentionnons que puisque l'une des faces correspond à l'enveloppe extérieure de l'outil, le cas où une face serait partiellement incluse dans une autre face ne peut survenir et n'a pas à être considéré.

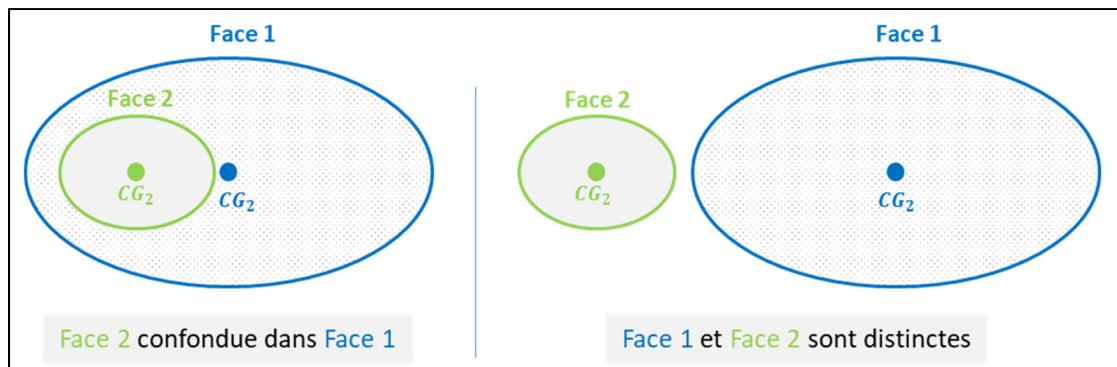


Figure 3.12 : Reconnaissance des faces confondues

Les données de l'étude nécessitent ensuite d'être spatialisées séquentiellement de manière à créer une logique d'association des faces dans l'espace. En effet, toute face d'une section « i » possède une affiliation directe à une face de sa section supérieure « i+1 ». Dans le cas des sections multifaces où les faces sont distinctes, la recherche d'affiliation s'effectue par une recherche de proximité : En prenant une face de référence « i » issue d'une section multifaces, on recherche alors la face correspondante de la section supérieure "i + 1" pour laquelle la distance entre les CG est la plus petite.

L'exemple de la figure 3.13 représente un cas de balayage de sections sur des pinces. Naturellement, l'homme identifie la présence d'une poignée gauche et droite. Pourtant sur le

plan algorithmique, les faces ne sont caractérisées que par des propriétés numériques. En appliquant le principe d'association des faces selon la plus courte distance, on obtient :

- La face « U » de la section 0 est affiliée à la face « W » de la section 1
- La face « V » de la section 0 est affiliée à la face « O » de la section 1

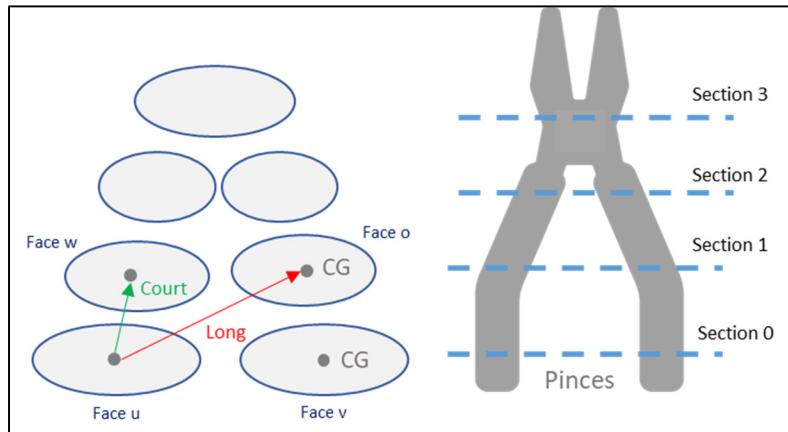


Figure 3.13 : Principe de spatialisation des faces

L'ordre d'écriture des faces provenant du balayage de sections est ajusté de manière à respecter la logique d'association des faces basée sur l'analyse de proximité. La réorganisation des faces par association agit ainsi comme une squelettisation de la géométrie de l'outil en créant des suites logiques entre les faces dans l'espace, permettant de distinguer les deux côtés de l'objet, notés Gauche et Droite au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Exemple de tableau de sections réorganisées

Numéro Section	Numéro Face	Propriétés de la face	
0	u	...	Gauche
0	v	...	Droite
1	w	...	Gauche
1	o	...	Droite
...	

3.3.3 Synthèse

L'approche proposée pour la collecte de données associées aux outils tenus à une main consiste à obtenir un ensemble de sections à intervalle régulier dans la direction de balayage de l'outil. Une section génère un ensemble de courbes fermées. Chaque courbe fermée est alors remplie par une face dont des propriétés sont extraites (CG, Ex1, Ex2, Ex3, Ex4, Longueur, Largeur, Asymétrie). Les faces confondues sont supprimées. Enfin, les données de l'étude nécessitent d'être spatialisées séquentiellement de manière à créer une logique d'association des faces dans l'espace. Pour cela chaque face est affiliée à une face d'une section successive par recherche de proximité entre leur CG.

3.4 Étape 3 : Segmentation

La segmentation consiste à imiter le comportement de l'homme à dissocier différentes parties au sein d'un objet. Selon Kalogerakis (Kalogerakis, Hertzmann, & Singh, 2010), la segmentation 3D est définie comme processus de décomposition d'un maillage en sous-maillages plus petits et significatifs. On retrouve ce procédé dans de nombreuses applications telles que l'animation par ordinateur, l'appariement de formes, la compression et la recherche de formes et la vision par ordinateur. Il n'existe cependant aucune solution générale de segmentation, mais plutôt un ensemble de solutions adaptées à des problèmes spécifiques. En contextualisant le problème autour de l'application industrielle du projet, un tel procédé serait alors en mesure de nous garantir la présence d'un manche, d'une gâchette, ou encore d'une tête, selon le type d'outil étudié.

La segmentation est effectuée par étapes de manière à identifier successivement dans l'outil des **tronçons**, des **segments** et des **régions**. Chaque étape est basée sur l'idée de regrouper des sections ou des faces partageant des propriétés communes, tandis qu'une modification significative des propriétés des sections peut être utilisée pour identifier une transition.

3.4.1 Crédation de tronçons et de segments

En toute logique, puisque le balayage est effectué selon une direction significative de l'outil, l'apparition d'un changement du nombre de faces par section marque l'apparition d'un nouveau tronçon de sections. Un **tronçon** est défini comme un ensemble de sections successives ayant le même nombre de faces. Dans l'exemple des pinces présenté à la figure 3.14, l'outil présente 3 tronçons de sections successifs : un tronçon pour la mâchoire, formé de deux faces par section, un tronçon pour le pivot composé d'une unique face par section, et enfin un dernier tronçon pour les poignées composées de deux faces par sections.

Dans le cas où un tronçon possède plusieurs faces par section, celui-ci est dit « *composé* ». Suite au principe d'association des faces dans l'espace, il est possible de décomposer un « *tronçon composé* » en autant de segments qu'il existe de faces par section au sein du tronçon. Un **segment** se définit alors comme un sous-ensemble d'un tronçon qui regroupe des faces successives affiliées en fonction de la proximité de leurs CG. On pourra alors distinguer, au sein d'un tronçon, le segment de gauche du segment de droite. L'exemple de la figure 3.15 illustre la décomposition d'un tronçon quelconque composé de deux faces par section en deux segments distincts.

Par application directe sur des pinces (figure 3.16), le tronçon de la mâchoire est décomposé en deux segments distincts correspondant à la tête gauche et droite de la pince. Par analogie, le processus sépare le tronçon du manche en deux segments distincts. Le pivot est quant à lui préservé de toute décomposition.

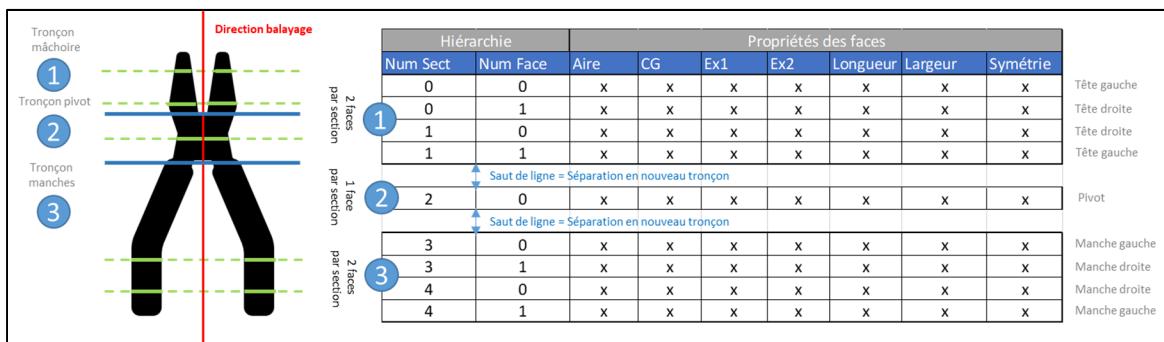


Figure 3.14 : Identification des tronçons sur une pince

Tronçon									Segment 1								
	Num Section	Num Face	Aire	Centroïde	Ex 1	Ex 2	Long	...		Num Section	Num Face	Aire	CG	Ex1	Ex2	Long	...
Gauche	0	0	x	x	x	x	x	x	Gauche	0	0	x	x	x	x	x	x
	0	1	x	x	x	x	x	x		1	0	x	x	x	x	x	x
Droite	1	0	x	x	x	x	x	x	Segment 2	0	1	x	x	x	x	x	x
	1	1	x	x	x	x	x	x		1	1	x	x	x	x	x	x

Figure 3.15 : Principe de décomposition des tronçons en segments

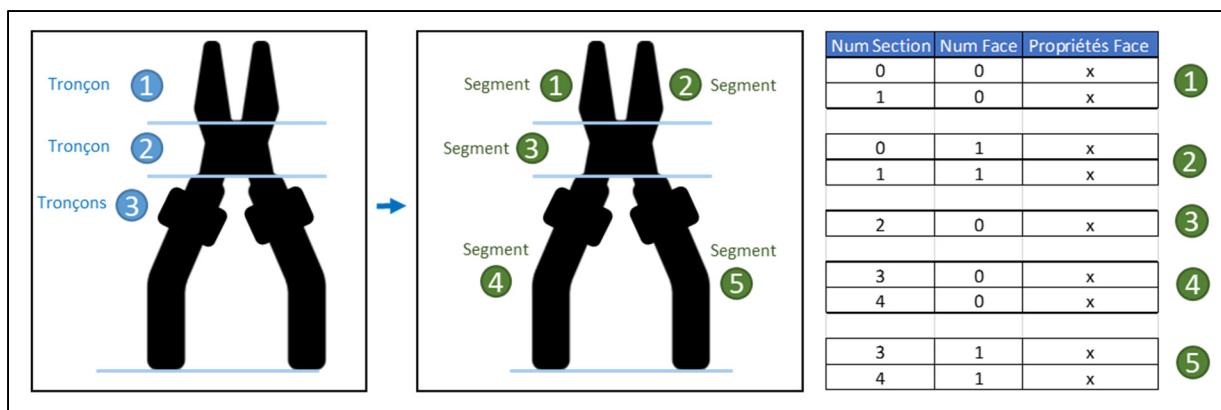


Figure 3.16 : Décomposition en segments d'une pince

3.4.2 Génération de régions

Chaque segment identifié plus haut correspond à une ‘patte’ ou encore à un membre du squelette. Un segment peut comprendre différentes régions. Les segments sont donc soumis à une analyse dont l’objectif est de rechercher si un ensemble de faces du même segment peut être divisé en différentes régions. Une **région** se définit comme un sous-ensemble d’un segment qui regroupe des faces successives partageant des propriétés similaires d’aire et de CG. Une région peut correspondre à un manche, une gâchette, etc. Une perturbation de ces propriétés géométriques (aire et CG) peut alors s’interpréter par un changement de région dans l’espace. En calculant l’évolution de l’aire (« Ev_{Aire} ») et un déplacement du centroïde (« δ ») par comparaisons successives entre deux faces, on émet l’hypothèse que les fortes divergences témoignent de la présence de nouvelles régions dans l’outil. Dans le cas contraire, les variations minimes supposées plus fréquentes imposent une tendance de la courbe à rester constante

autour d'une valeur médiane. Le comportement de l'évolution des propriétés des faces est illustré dans la figure 3.17. Les équations de segmentation en région sont présentées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Évolution des propriétés extraites par face

Évolution de l'aire	$Ev_{Aire} = \frac{Aire_{Face i} - Aire_{Face i-1}}{Aire_{Face i-1}}$
Déplacement du CG	$\delta_x = CG_{x face i} - CG_{x face i-1}$ $\delta_y = CG_{y face i} - CG_{y face i-1}$ $\delta_z = CG_{z face i} - CG_{z face i-1}$

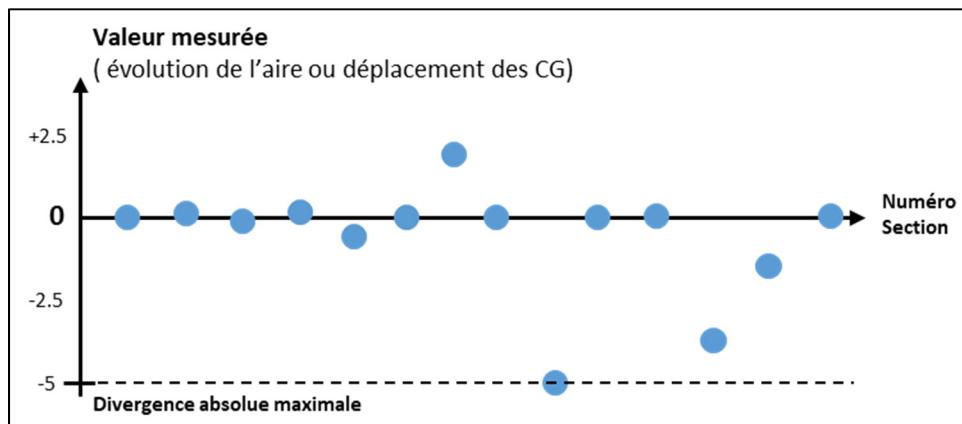


Figure 3.17 : Évolution des propriétés d'aire ou de CG selon les sections pour un cas arbitraire

En utilisant la fonction Matlab « IsOutlier », une donnée est considérée comme divergente lorsque sa valeur est à plus de trois déviations absolues médianes (MAD) par rapport à la médiane. Pour rappel, la détermination d'une médiane « $x_{1/2}$ » d'un ensemble de données $\{x_1, \dots, x_n\}$ s'effectue en ordonnant les informations par ordre croissant afin de choisir la valeur de rang $(n + 1)/2$. Ainsi l'écart médian est donné par la relation

$$e_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_{1/2}|.$$

L'application directe de la fonction IsOutlier sur le déplacement des CG des faces ne peut être envisagée que par l'ajout d'un critère de sécurité. En effet, une grande partie des outils d'étude étant symétriques, le déplacement des CG dans l'espace est homogène (les variations peuvent atteindre des valeurs inférieures au millimètre). Naturellement la fonction IsOutlier ne considère pas l'échelle de l'étude et détecte ainsi des divergences non désirées dont l'ordre de grandeur est fortement inférieur au changement topologique de l'objet. Par sécurité, la fonction IsOutlier ne peut être utilisée habilement que si l'amplitude mesurée de la divergence maximale ou minimale entre les CG des faces est supérieure ou égale à 1 mm.

En reprenant l'exemple du graphique précédent, l'analyse MAD met en évidence trois divergences que l'on interprète alors comme de potentielles nouvelles régions (Voir figure 3.18).

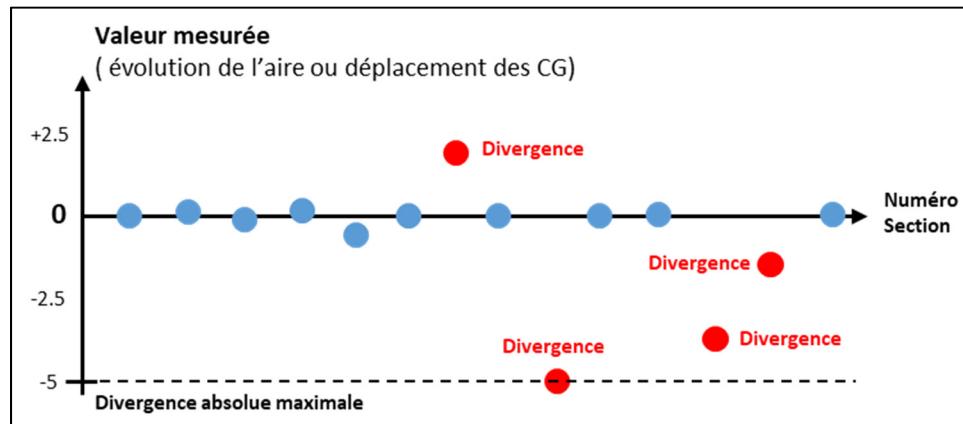


Figure 3.18 : Identification des points divergents selon l'évolution des propriétés d'aire ou de CG

Un seuil d'acceptabilité des divergences comme nouvelle région a été évalué empiriquement à 50% de la divergence maximale mesurée. De cette manière, la segmentation s'articule autour des plus grandes variations de taille de l'outil. Néanmoins, toute divergence par rapport à la médiane ne signifie pas systématiquement la présence d'une nouvelle région au sein d'un segment. En effet, la géométrie d'une région n'est jamais parfaitement uniforme. La question de la sensibilité des critères de segmentation se pose donc. Une hypothèse consiste à affirmer

que, pour l'ensemble des familles d'outils tenu à une main, les régions utiles pour définir la préhension, tels que les manches et les têtes d'outils, présentent des géométries distinctes du reste du corps, leur permettant d'être détectées seulement par de grandes divergences (Voir figure 3.19).

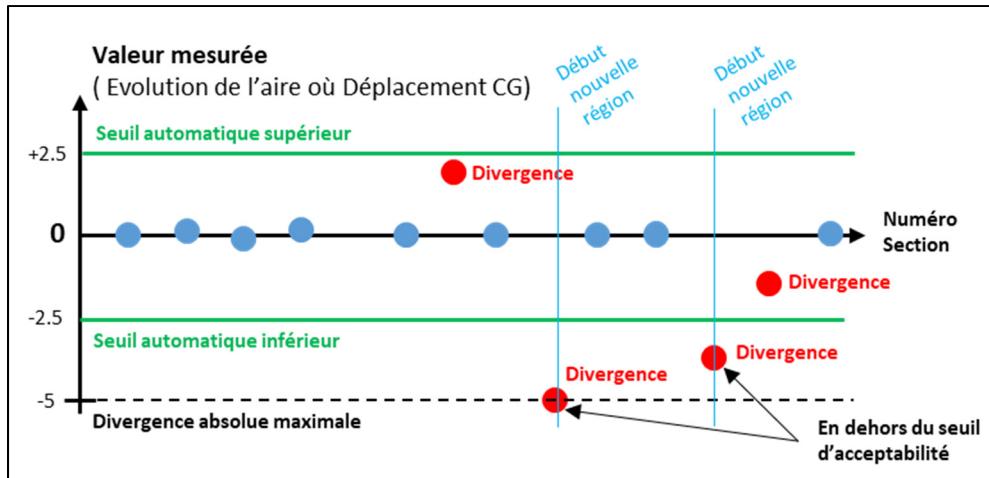


Figure 3.19 : Identification des nouvelles régions selon l'évolution des propriétés d'aire ou de CG

En prenant l'exemple des pinces illustré à la figure 3.20, des régions sont identifiées à partir des segments. Les segments 1, 2 et 3 sont géométriquement homogènes et ne génèrent respectivement qu'une unique région. Dans le cas des segments 4 et 5 appartenant aux manches de la pince, les changements d'aires générés par la zone de renforcement utile au positionnement de la main, imposent la décomposition des segments en différentes régions distinctes. Ainsi, le segment 4 se décompose en 3 régions (4, 6 et 8), tout comme le segment 5 qui se décompose lui aussi en 3 régions (5.7 et 9).

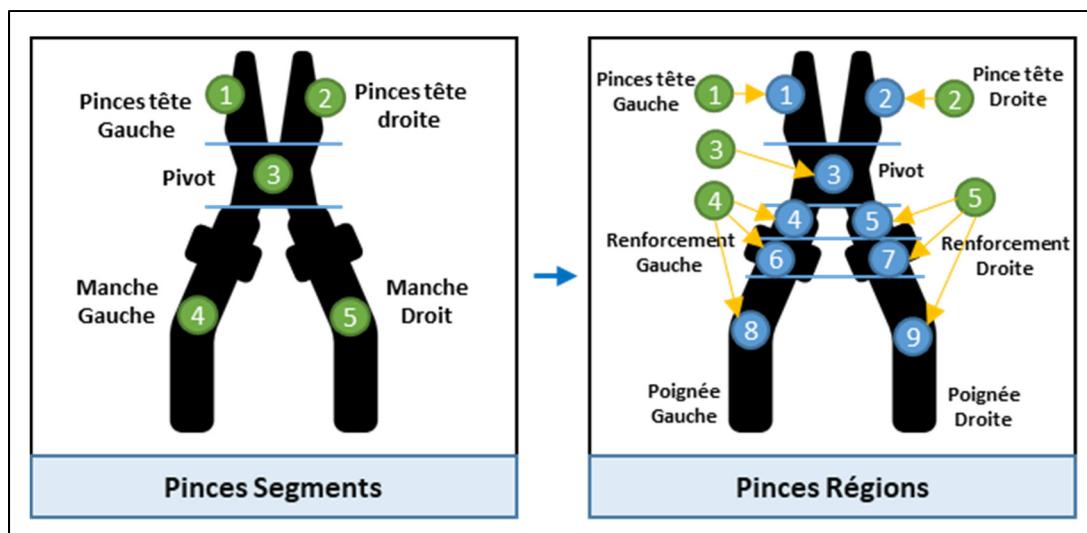


Figure 3.20 : Représentation visuelle de l'intérêt de l'évolution des propriétés des faces sur les résultats de la segmentation

3.4.3 Synthèse

La segmentation de la géométrie 3D de l'outil est réalisée en différentes étapes. Dans un premier temps, il est possible d'admettre qu'un changement du nombre de faces (courbes fermées) par section révèle la présence d'un nouveau tronçon de géométrie. Ensuite, par association des faces dans l'espace, chaque tronçon se décompose en autant de segments qu'il existe de faces par section. Enfin, un dernier traitement affine les segments en se basant sur deux propriétés d'étude : tout d'abord, l'utilisation de la variation de l'aire des faces permet de détecter les changements significatifs de forme au sein d'un segment. Dans un second temps, l'étude du déplacement du positionnement des CG (des faces) facilite la détection des extrusions et des changements de courbure. Des régions sont alors identifiées sur les segments.

3.5 Étape 4 : Classification des régions

3.5.1 Trois types de régions utiles : tête, manche et gâchette

À l'étape précédente, la géométrie de l'outil a été segmentée en un ensemble de régions distinctes. Il faut à présent classifier ces régions afin de reconnaître leur rôle dans la préhension. Le cerveau humain est en mesure d'interpréter visuellement ces résultats en associant des fonctions à des formes. Sur le plan algorithmique, une région correspond à un ensemble de faces partageant des propriétés géométriques similaires, sans néanmoins exprimer explicitement d'information exploitable pour la préhension. Une région utile est une région pour laquelle des informations peuvent être extraites afin de déterminer la préhension. Parmi l'ensemble des outils couverts par l'étude, trois types de régions utiles sont recherchées : le manche, la tête et la gâchette, si présente.

Une tête d'outil possède un point d'application pour la tâche à mener (visser, frapper, couper) déterminant l'orientation de l'outil dans la main. Un manche permet de positionner la main du mannequin selon un axe de préhension borné par des limites de translation supérieure et inférieure de la main. Une gâchette impose quant à elle de positionner l'index de l'utilisateur de manière spécifique. La figure 3.21 illustre l'intérêt d'exploiter la géométrie des têtes d'outil pour la génération d'une préhension des outils tenus à une main. Par analogie, les propriétés pouvant être extraites des manches et des gâchettes sont respectivement présentées aux figures 3.22 et 3.23.

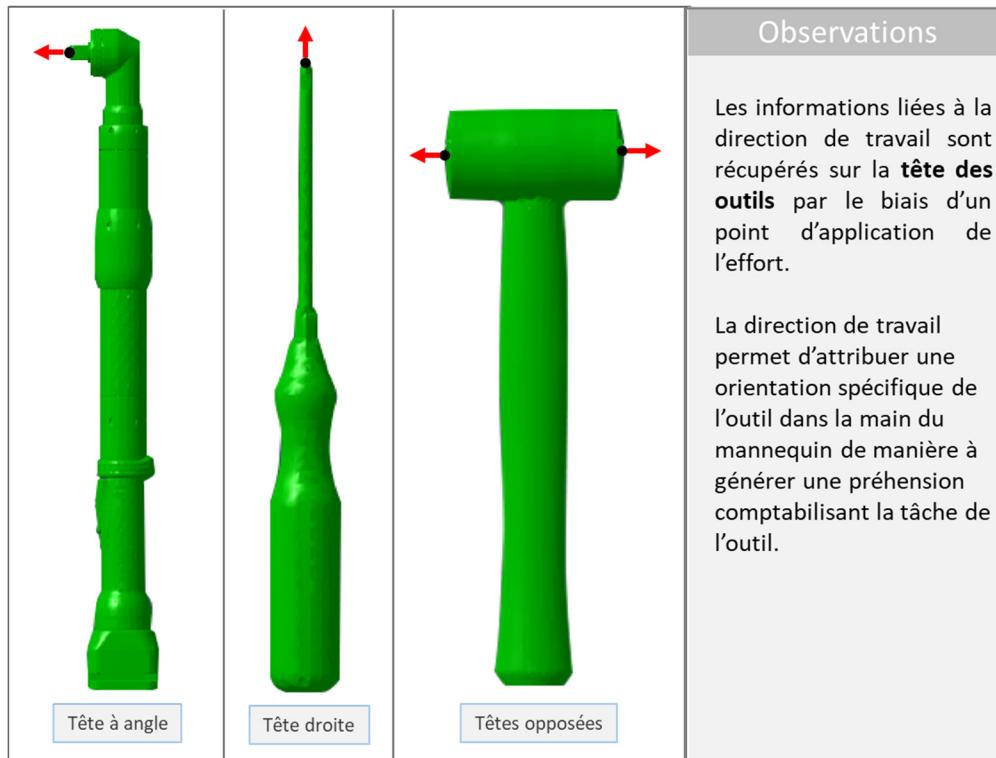


Figure 3.21 : Intérêt des indices de préhension des têtes pour la préhension de l'outil

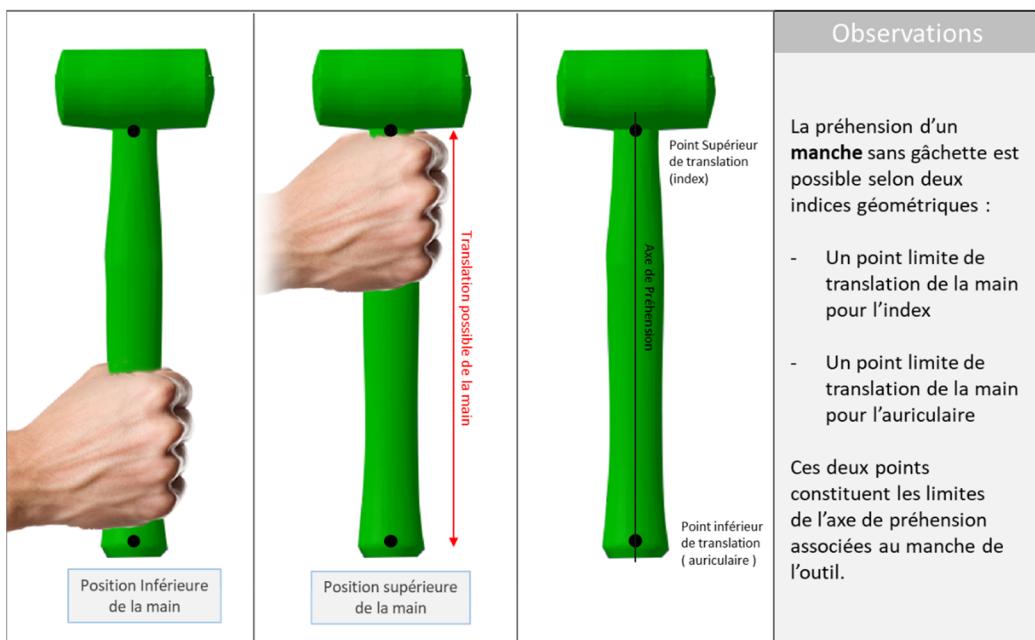


Figure 3.22 : Intérêt des indices géométriques du manche pour la préhension de l'outil

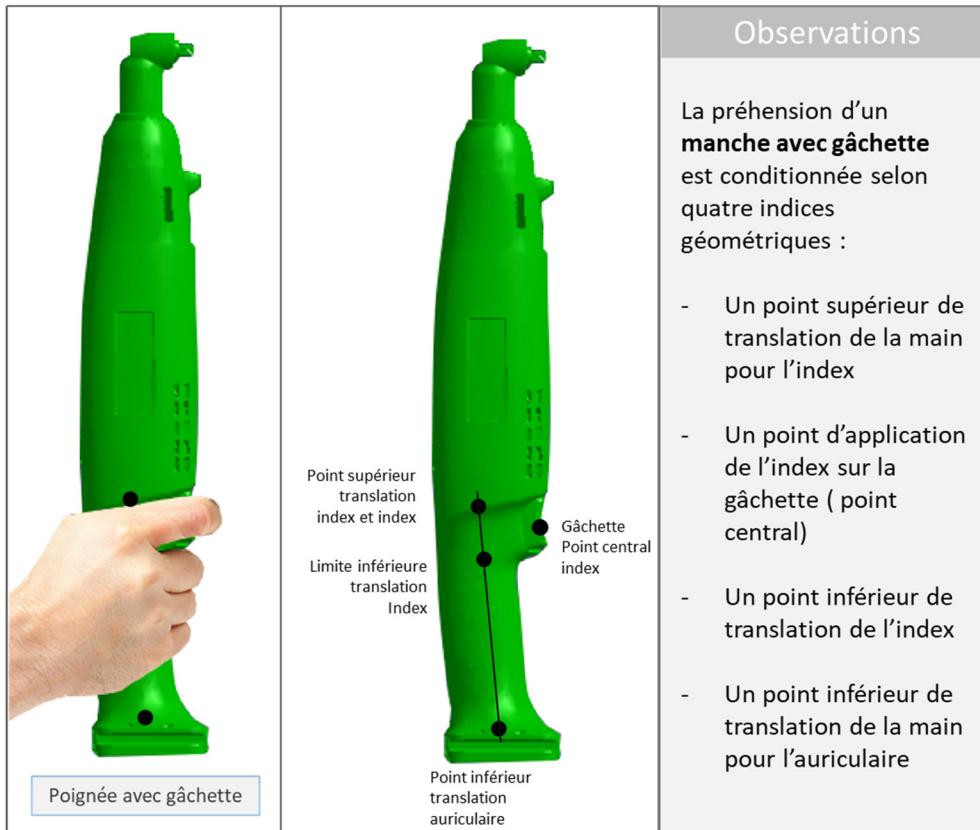


Figure 3.23 : Intérêt des indices géométriques de la gâchette pour la préhension de l'outil

Pour une tenue de maillet optimale, la position de la main doit maximiser le couple exercé par l'outil. Dans cette logique, il est favorable de positionner la main en opposition de distance à la tête tout en respectant ses tolérances de translation sur l'axe de préhension. L'exemple de préhension de maillets en « position supérieure » illustré à la figure 3.22 n'est pas optimal, mais laisse de la marge de manœuvre au moteur de positionnement tel que demandé par le partenaire industriel.

Chaque famille d'outils possède ses propres régions utiles pour définir la préhension.

- Pour les maillets, les tournevis et les pinces, un manche et une tête d'outil sont recherchés.
- Pour tous les types de visseuses, un manche, une gâchette et une tête sont recherchés.

3.5.2 Propriétés géométriques des régions à classer

Afin d'être en mesure de reconnaître les régions utiles à la préhension parmi l'ensemble des régions identifiées, il convient de déterminer une solution de classification des régions. Pour cela, chaque région est d'abord caractérisée par ses propriétés obtenues en faisant la moyenne des propriétés des faces appartenant à la région :

- Une estimation du **centre géométrique** correspondant à la moyenne des CG des faces comprises dans la région.
- Une estimation **moyenne de l'aire de la région** basée sur la moyenne des aires des faces comprises dans la région.
- Une estimation **moyenne de la largeur de la région** basée sur la moyenne des largeurs des faces comprises dans la région.
- Une estimation de la **hauteur de la région** en effectuant la somme des distances successives entre les CG des faces.
- Une estimation de l'**asymétrie de la région** basée sur la symétrie des faces. Trois cas possibles sont envisagés :
 - o « Symétrie totale » si toutes les faces de la région sont symétriques.
 - o « Asymétrie totale » si toutes les faces de la région sont asymétriques.
 - o « Asymétrie partielle » si une succession de faces asymétriques dépasse la longueur d'une gâchette de 15 mm (valeur empirique basée sur la plus petite longueur des gâchettes mesurée à partir de la base de données d'outils).

Cette notion d'asymétrie de région facilite l'identification d'une gâchette au sein d'un manche. En effet, parmi l'ensemble des géométries possibles d'outils tenus à une main, une gâchette se démarque toujours du manche par sa forme asymétrique.

3.5.3 Classification des régions

‘Reconnaître’ une région permet de la classer comme étant une tête, un manche ou une gâchette. Une région est reconnue lorsque les valeurs de toutes ses propriétés sont comprises à

l'intérieur des plages de valeurs prévues. Pour chaque famille d'outils, les plages de valeurs prévues des différentes régions utiles ont été obtenues empiriquement en mesurant les propriétés géométriques de ces régions sur la base de données d'outils. Ces valeurs sont choisies sur les plus grandes et petites mesures identifiées. L'ensemble des plages de valeurs qui seront utilisées pour classer les régions utiles est répertorié dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Critères de classification selon le type de région recherchée

	Aire Max (mm ²)	Aire Min (mm ²)	Hauteur Max (mm)	Hauteur Min (mm)	Largeur Max (mm)	Largeur Min (mm)	Asymétrie de la région
Manche pince	250	50	200	60	20	5	Non applicable
Tête pince	250	20	60	10	20	5	Non applicable
Manche maillet	900	100	400	60	60	20	Non applicable
Tête maillet	7000	200	75	20	200	50	Non applicable
Manche tournevis	900	100	400	50	60	20	Non applicable
Tête tournevis	75	5	250	0	40	5	Non applicable
Tête de visseuse droite	700	150	150	0	30	5	Non applicable
Manche visseuse	1500	200	350	60	50	30	Symétrie totale ou Asymétrie partielle
Gâchette pousoir	1700	250	60	10	50	30	Asymétrie totale
Gâchette levier	150	20	300	40	25	5	Non applicable

La figure 3.24 illustre visuellement le principe de reconnaissance des régions. L'ensemble des propriétés de la région testée est comparé aux propriétés des modèles de régions utiles recherchées. Si toutes les propriétés de la région testée sont comprises dans le domaine de

tolérance qui lui est attribué, alors la région est reconnue par rapport à son modèle de comparaison. Dans le cas contraire, le test n'aboutit pas et la région n'est pas donc pas reconnue.

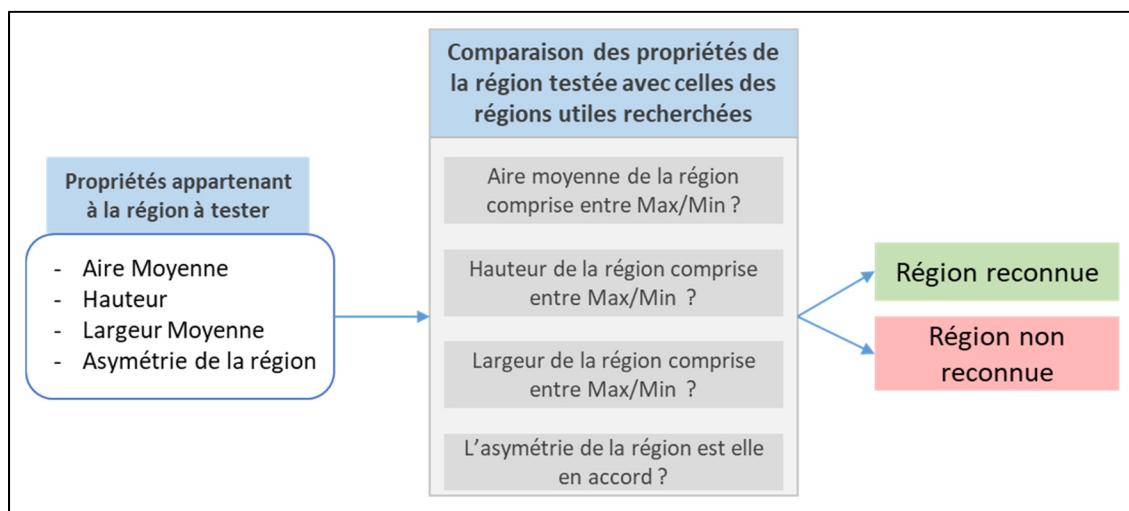


Figure 3.24 : Principe de réalisation des tests de reconnaissance des régions

3.5.4 Séquence de recherche de régions selon les familles d'outils

En appliquant ce principe de classification sur l'ensemble des régions, il existe un risque de trouver différentes correspondances pour une même région analysée. À titre d'exemple, il peut être difficile de différencier la tête d'une visseuse droite de la prise d'air pneumatique positionnée sur l'embout du manche, puisque ces deux régions, localisées aux extrémités de l'outil, partagent des propriétés géométriques similaires. Toutefois, il est possible de surmonter ce problème en recherchant d'abord la région la plus typique de la famille. Une région typique est une région se distinguant du reste des régions identifiées par des propriétés évidentes et partagées par l'ensemble de la famille.

Par exemple, pour la famille des maillets, la tête est considérée comme la région la plus évidente puisqu'elle se distingue des autres régions par son aire moyenne la plus grande. Par conséquent, pour cette famille d'objets, la tête est recherchée en premier. Une fois cette région typique reconnue, elle sert de référence dans la reconnaissance des autres régions de l'outil.

Ainsi, une séquence de classification prédéfinie est établie pour chaque famille d'outils et présentée au tableau 3.4. De manière générale, la séquence d'identification est liée à la complexité d'identification des différentes régions utiles à la préhension.

Tableau 3.4 : Séquence de recherche des régions selon les familles d'outils

Famille d'outils	Première Région	Deuxième région	Troisième région
Maillet	Tête	Manche	
Tournevis	Manche	Tête	
Pinces	Manche	Tête	
Visseuses droites avec gâchette levier	Gâchette	Manche	Tête
Visseuses droites avec gâchette levier et renvoi d'angle	Gâchette	Manche	Tête
Visseuses droites avec gâchette poussoir	Tête	Manche	Gâchette
Visseuses droites avec gâchette poussoir et renvoi d'angle	Tête	Manche	Gâchette
Visseuses de forme pistolet	Tête	Manche	Gâchette

Une séquence d'identification des régions est alors établie pour chaque famille d'outils afin de limiter le nombre de tests de reconnaissance et ainsi contrer le phénomène de possible multi reconnaissance. L'ordre d'identification explicité dans le tableau 3.4 est établi selon plusieurs postulats :

- Une tête de maillet possède la plus grande aire moyenne de l'outil.
- Un manche de tournevis possède la plus grande aire moyenne de l'outil.
- Les manches de pinces sont les régions utiles les plus longues de l'outil.
- Une gâchette de type levier possède la plus petite aire moyenne de l'outil.

Ces régions les plus typiques sont donc reconnues en premier lieu selon la famille d'outils, à l'aide d'un critère majeur. Par conséquent, les trois propriétés de la région testée (aire moyenne de la région, largeur moyenne de la région, hauteur de la région) doivent se situer dans la plage de valeurs explicitées au tableau 3.3. Si la région testée ne satisfait pas ces trois critères, une autre région est testée jusqu'à ce que la région typique soit trouvée.

Les régions utiles restantes sont alors recherchées en fonction de leurs positions relatives par rapport aux régions précédemment identifiées. La mesure des distances est menée sur les centres géométriques moyens des régions. Il peut s'agir d'une recherche de proximité ou d'opposition selon la région recherchée. Chaque famille d'outils nécessite un ordre de traitement spécifique en fonction de la position de ses régions fonctionnelles, tel que décrit dans la figure 3.25.

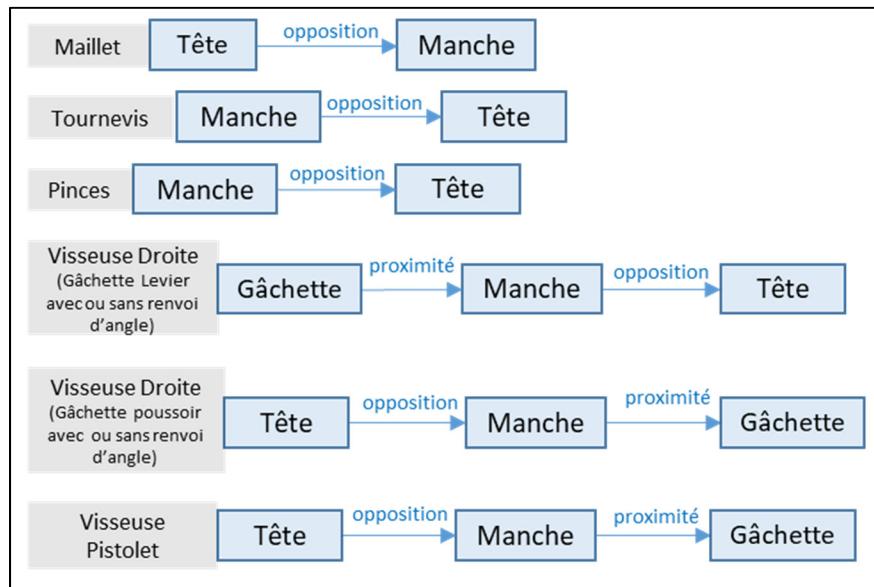


Figure 3.25 : Séquence d'identification des régions utiles

3.5.5 Identification de régions spécifiques

3.5.5.1 Gâchettes poussoir

Une gâchette est définie comme une région asymétrique pour laquelle il existe un côté suffisamment distant de l'axe du manche pour être considérée comme sa partie fonctionnelle où se positionne l'index de la main. L'identification du manche est donc un préalable requis pour la recherche de la gâchette.

Pour qu'une région soit considérée comme une gâchette celle-ci doit satisfaire les critères suivants :

- La région est totalement asymétrique
- La région vérifie les propriétés d'une gâchette poussoir listées au tableau 3.3.
- Pour chacune des faces asymétriques de la région, au moins un point extremum en longueur vérifie la règle $L_{ex} > \bar{L} + 5mm$, où L_{ex} est sa distance de projection sur l'axe du manche, tandis que \bar{L} caractérise la moyenne des distances de projection des extrema en longueur de la région du manche. De cette manière, on s'assure que la géométrie de la gâchette comporte une partie fonctionnelle se définissant géométriquement comme une zone extrudée du manche ou l'index de la main se positionne pour actionner le mécanisme (voir figure 3.26).

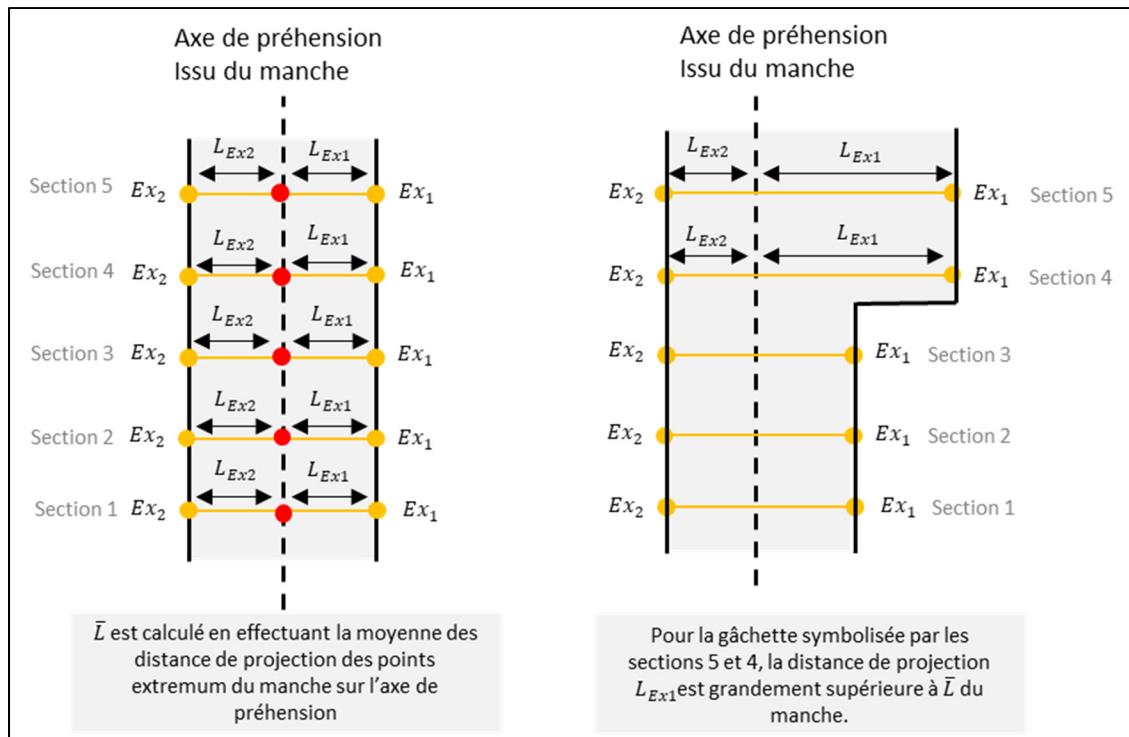


Figure 3.26 : Principe d'identification de la partie fonctionnelle de la gâchette poussoir

Selon la sensibilité de la segmentation, il existe pour les outils possédant une gâchette de type poussoir, trois scénarios de segmentation possibles :



Figure 3.27 : Scénarios possibles de segmentation sur le manche et la gâchette

- **Scenario 1 :** La segmentation a généré une région manche (**région C**), dont toutes les faces sont symétriques, ainsi qu'une région gâchette (**région B**), dont toutes les faces sont asymétriques et possèdent un côté fonctionnel.
- **Scenario 2 :** La segmentation a généré une région où un manche est confondu avec une gâchette (**région B**). Cette région cumule alors des faces symétriques correspondant au manche ainsi que des faces asymétriques correspondant à la gâchette.
- **Scenario 3 :** Seul le manche est correctement segmenté et identifiable. La segmentation n'a pas abouti à une séparation distincte de la gâchette.

Dans le scénario 1, le manche est connu et son axe de préhension est calculé. Par recherche de proximité au manche, la gâchette est alors facilement identifiée. En prenant le centre géométrique de la région classée comme manche, la recherche de la gâchette est permise jusqu'à une distance de 3 cm par rapport au centre géométrique de la face extrémum du manche le plus proche de la gâchette.

Dans le scénario 2, la présence de faces asymétriques dans un manche n'impose pas nécessairement la présence d'une gâchette. Parmi l'ensemble des outils de l'étude, une gâchette se caractérise par une hauteur moyenne d'appui du doigt de 20 mm. Une approche simple consiste à calculer, pour chaque face asymétrique consécutive d'un manche, la somme cumulative des distances inter-centroïdes. De cette manière, lorsqu'une succession de faces asymétriques vérifie la hauteur de référence du tableau 3.3, celle-ci forme une région pouvant s'assimiler à une gâchette. Celle-ci est alors séparée du manche et testée indépendamment du manche selon les trois critères précédemment cités.

Dans le scénario 3, où la gâchette pousoir n'est pas clairement segmentée et reconnue, la solution consiste à procéder à la reconstruction de la gâchette. Un postulat consiste à affirmer qu'une gâchette est toujours juxtaposée au manche. Ainsi en partant de la face extrémum du manche dans la direction montante de la gâchette, les faces sont testées successivement selon les règles d'identification de la gâchette précédemment explicitées. L'objectif est ainsi de

reconstruire une région de hauteur 20 mm avec des faces successives dont les propriétés s'assimilent à celles d'une gâchette.

3.5.5.2 Têtes de visseuses à renvoi d'angle

Certaines visseuses droites présentent une tête à renvoi d'angle permettant d'effectuer des opérations à la verticale et à l'horizontale. De manière générale, le principe de segmentation génère une tête à renvoi d'angle approximative pour laquelle certaines informations géométriques sont manquantes, la rendant inexploitable pour la génération d'indices de préhension. De ce fait, une stratégie spécifique de recherche de tête est proposée.

Puisque le balayage de sections est effectué dans la direction principale de BEO de l'outil, il est possible d'affirmer que la tête correspond de manière évidente aux premières ou dernières faces du balayage. La méthodologie d'identification d'une tête à renvoi d'angle s'attache à créer une nouvelle région en analysant les deux extrémités longitudinales de l'outil. Ainsi pour chaque extrémité du tableau les faces sont analysées itérativement.

Une face est considérée comme appartenant à une tête à renvoi d'angle si les conditions suivantes sont vérifiées :

- La face est asymétrique.
- En obtenant d'abord le point d'intersection « P » de l'axe du corps avec la face, il est ensuite possible de calculer les distances « d1 et d2 » entre les deux points extremums en longueur « Ex1 et Ex2 » de la face et le point P. L'objectif est de s'assurer qu'au moins un côté de la face soit suffisamment distant de l'axe du corps pour être considéré comme appartenant à une tête à renvoi d'angle. Pour cela, $|d_1 - d_2| > 10mm$ (Voir figure 3.28)

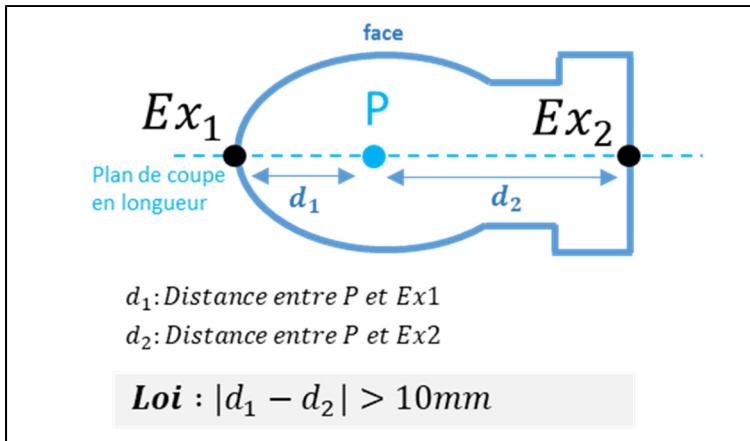


Figure 3.28 : Principe de recherche du côté fonctionnel

de la tête à renvoi d'angle

Lorsqu'une face testée ne vérifie pas ces conditions, le processus itératif s'arrête. Une nouvelle région correspondant à la tête est alors formée.

3.5.6 Synthèse

Pour l'ensemble des outils couverts par l'étude, trois régions utiles à guider la préhension doivent être identifiées : les manches, les têtes, et les gâchettes. De manière générale, la reconnaissance de ces régions utiles est réalisée en comparant les propriétés des régions testées avec celles attendues pour la classification des régions (hauteur, largeur, aire moyenne, asymétrie). Pour assurer la bonne reconnaissance des régions, une séquence spécifique de classification est imposée selon la famille d'outils. Une région typique est premièrement recherchée pour ses critères évidents et valables pour l'ensemble de la famille. Cette région typique sert ensuite de référence pendant que les autres régions sont recherchées selon leurs positions relatives aux régions précédemment identifiées. En s'appuyant sur la séquence de classification des régions utiles à la préhension, les squelettes des outils sont visuellement représentés selon la structure hiérarchique graphique de la figure 3.29. Certaines régions aux géométries plus difficiles à reconnaître, telles que les « gâchettes poussoir » et les « têtes à renvoi d'angle », sont donc recherchées de manière spécifique.

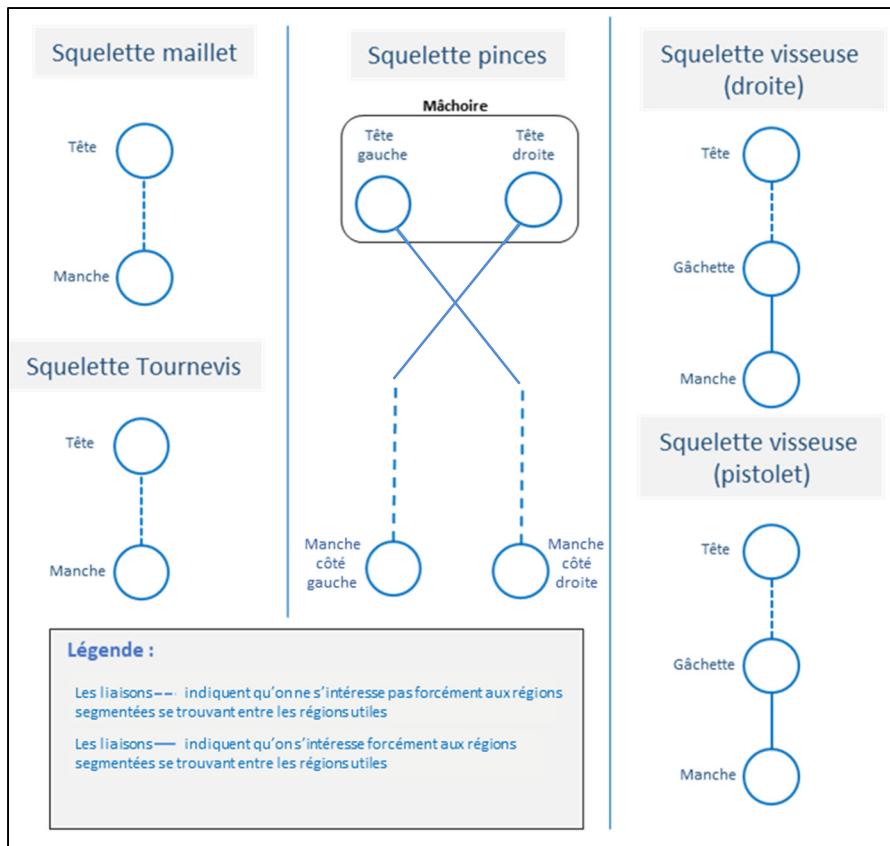


Figure 3.29 : Squelettes des différentes familles d'outils selon leurs régions utiles

3.6 Étape 5 : Extraction des indices de préhension

Une fois que toutes les régions utiles pour guider la préhension (manche, tête et éventuellement gâchette) sont identifiées, on génère des indices de préhension. Différents indices sont extraits en fonction du type de région.

3.6.1 Principe de traitement d'un manche

Puisqu'il s'agit de la partie de l'outil avec laquelle la main est en contact direct, le manche est considéré comme la principale région de préhension de l'outil. En appliquant le principe de décomposition en valeurs singulières sur l'ensemble des centroïdes des faces qui composent le manche (*SVD* : *Singular Value Decomposition*), il est possible d'obtenir un axe de préhension passant par la moyenne de ces points. Les deux CG les plus éloignés projetés sur l'axe de

préhension forment les deux indices de préhension qui limitent la translation de la main sur l'axe : la limite de l'auriculaire et la limite de l'index (Figure 3.30 et 3.31).

L'utilisation du SVD n'est exploitable que si l'ensemble d'étude est centré. Pour cela, l'ensemble des centroïdes des faces du manche est exprimé par rapport au centre géométrique moyen de la région.

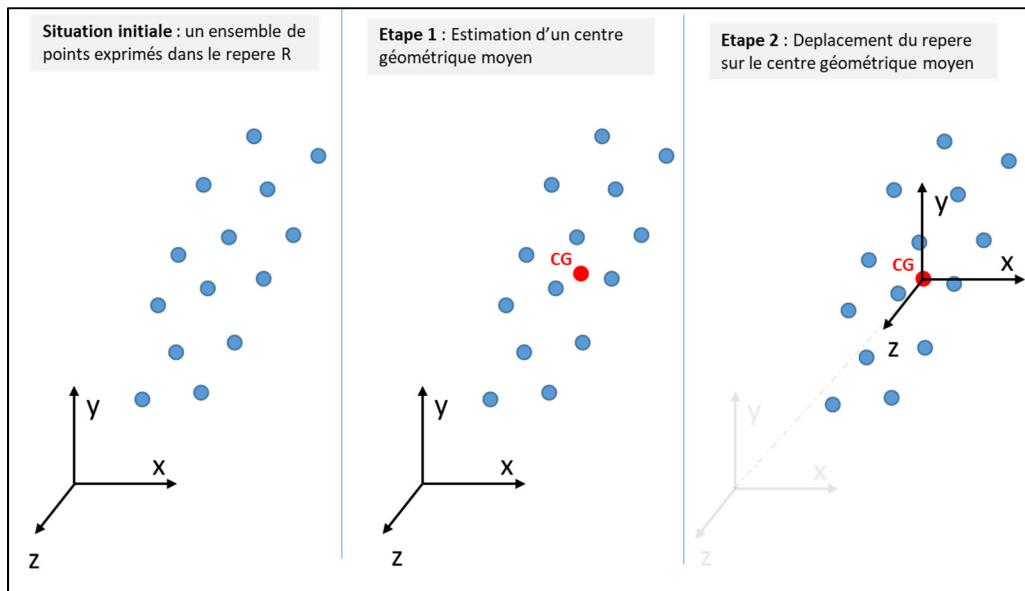


Figure 3.30 : Expression de l'ensemble d'étude autour d'un repère centré

Seule la direction principale U1 de la décomposition en valeurs singulières est préservée. Les deux points de l'ensemble pour lesquels les coordonnées sont minimales et maximales sur U1 sont ensuite exprimés dans le référentiel global pour contraindre la translation de la main sur l'axe de préhension.

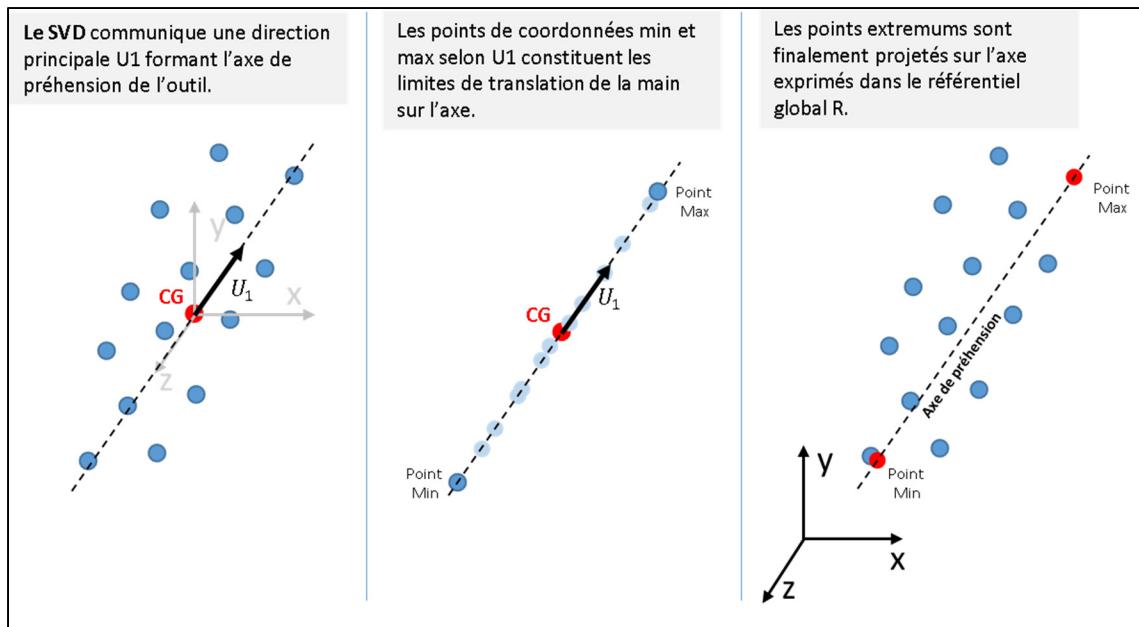


Figure 3.31 : Application du SVD sur un ensemble quelconque de points

3.6.2 Principe de traitement d'une gâchette de type poussoir

Puisque la gâchette conditionne le positionnement de l'index sur l'enveloppe extérieure de l'outil, une grande partie du traitement de cette région est basée sur l'étude des points extrêmes des faces. Par ailleurs, les indices de préhension d'une gâchette nécessitent la connaissance du manche et de son axe de préhension. En projetant l'ensemble des points extrêmes en longueur de la région sur l'axe du manche, le côté fonctionnel de la gâchette peut être déterminé en recherchant la distance de projection moyenne la plus grande sur l'axe de préhension.

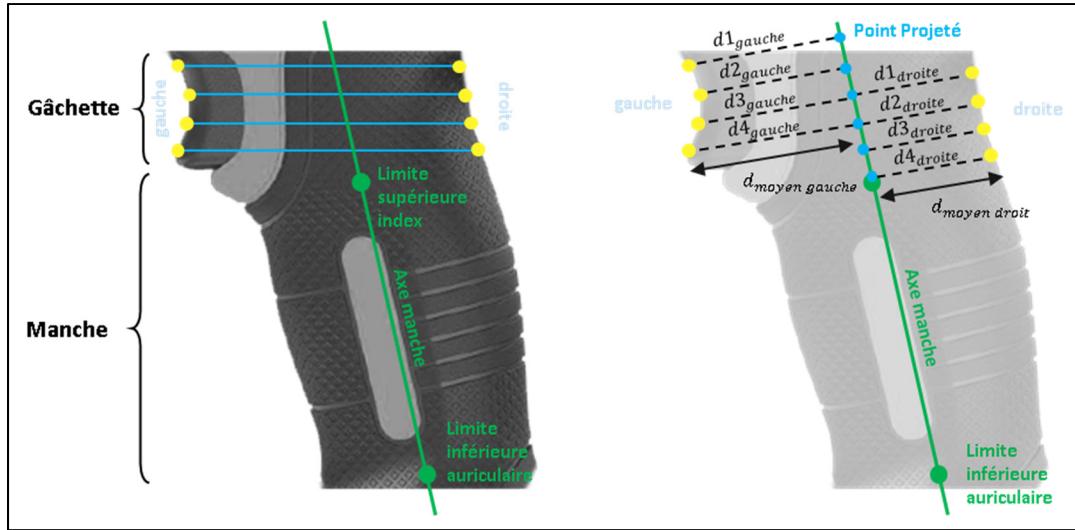


Figure 3.32 : Recherche du côté fonctionnel de la gâchette pousoir par distance de projection des points extrêmes

Une fois le côté fonctionnel reconnu, la position de l'index sur la gâchette est calculée en effectuant la moyenne des points extrêmes appartenant à ce côté. (Voir figure 3.32)

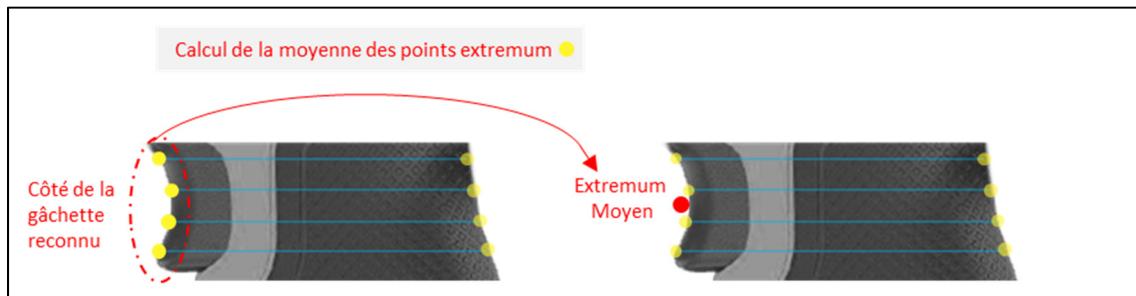


Figure 3.33 : Calcul du point d'application de l'index sur la gâchette

Tout comme le manche, il est possible pour l'index de translater sur la surface de contact de la gâchette. Deux limites de déplacement de l'index sont calculées en projetant le premier et dernier extrême du côté fonctionnel de la gâchette sur l'axe du manche. Dans cette logique, la limite de translation de l'index sur le manche devient la limite inférieure de l'index sur la gâchette. L'ensemble des indices de préhension issus d'une gâchette pousoir est illustré à la figure 3.34.

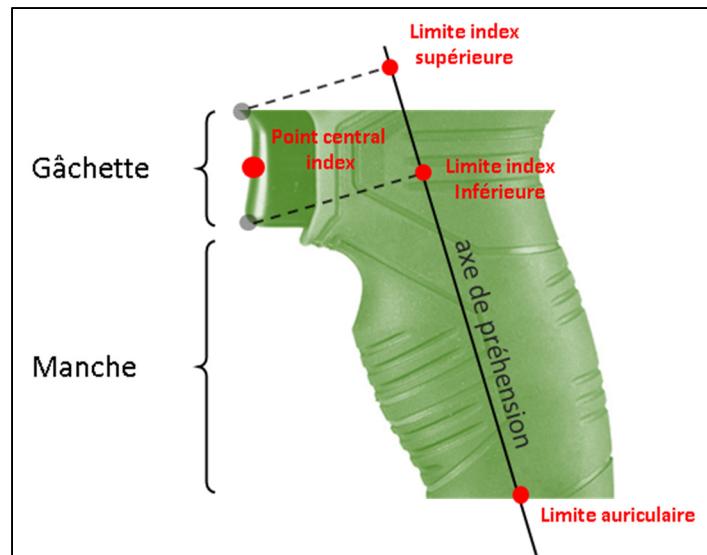


Figure 3.34 : Indice de préhension associé à une gâchette poussoir.

3.6.3 Principe de traitement d'une gâchette de type levier

Similairement au manche, l'axe de la gâchette levier est déterminé par décomposition en valeurs singulières des centroïdes de la région de la gâchette. Le centroïde moyen fournit la position de l'index sur la languette tandis que la projection du premier et dernier centroïde sur l'axe de préhension limite la translation de la main sur l'outil. L'ensemble des indices de préhension issus d'une gâchette levier est illustré à la figure 3.35.

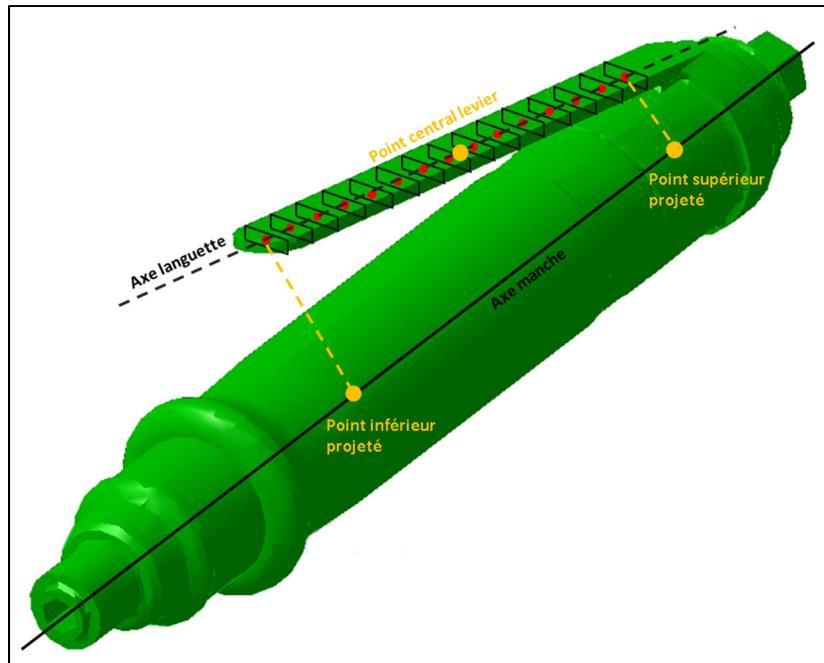


Figure 3.35 : Projection des points limites de la gâchette levier sur l'axe du manche

3.6.4 Principe de traitement des têtes d'outils

De manière générale, la tête de l'outil est la région fonctionnelle qui exécute la tâche. Qu'il s'agisse de frapper ou de visser, ces deux actions s'effectuent par le biais d'un point d'application symbolisant le point de contact où s'exerce l'effort. La bonne reconnaissance de la tête assure ainsi une prise en main pour laquelle la tâche est prise en considération. La direction de travail est spécifique à chaque famille d'outils. Par exemple, pour une visseuse droite, la direction de travail coïncide avec l'axe du manche tandis que pour la tête d'un maillet il existe deux directions de travail, une de chaque côté de la tête du maillet.

3.6.4.1 Les têtes de tournevis et de visseuses droites régulières

Pour les têtes de tournevis ainsi que les têtes de visseuses droites régulières, le point de travail est placé sur le CG de la face la plus éloignée du manche (Figure 3.36).

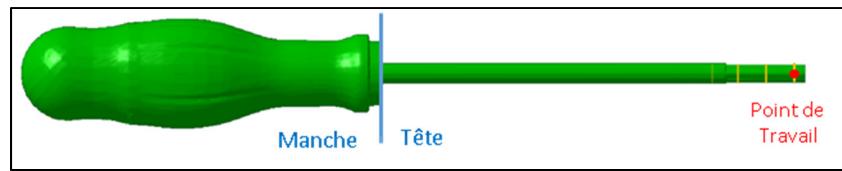


Figure 3.36 : Indice de préhension pour une tête de tournevis

3.6.4.2 Les têtes à renvoi d'angle

Pour une tête à renvoi d'angle, le processus d'extraction d'indices géométriques s'effectue en différentes étapes. La région du corps de la visseuse nécessite d'être au préalablement identifiée. Le corps de la visseuse est défini comme la région segmentée de plus grande hauteur. Une fois cette région identifiée, l'axe du corps est obtenu par une décomposition en valeurs singulières de ses centroïdes. La connaissance du corps permet par la suite de rechercher le côté fonctionnel de la tête à renvoi d'angle. La partie fonctionnelle de la tête à renvoi d'angle correspond au côté, dans la direction longitudinale des faces, où la tête exerce son action. Géométriquement, cette partie de l'outil est identifiée comme le côté de la tête pour lequel la longueur de projection moyenne des extremums en longueur de la région est la plus grande. Le point de travail de la tête est enfin obtenu par la moyenne des extremums appartenant au côté fonctionnel de la visseuse.

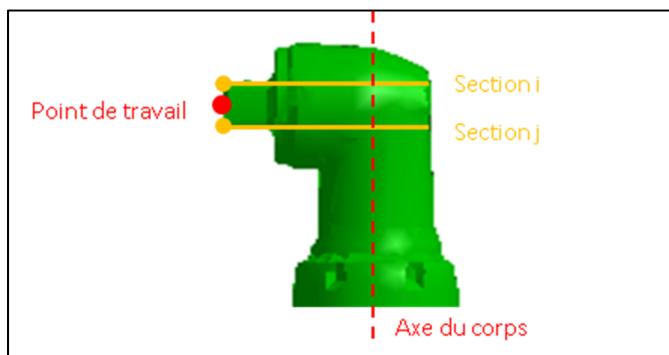


Figure 3.37 : Indice de préhension pour une tête à renvoi d'angle

3.6.4.3 Les têtes de maillets

Pour les maillets, il existe deux directions de travail possibles basées sur les deux côtés équivalents de la tête. Les deux points de travail sont placés aux deux extrémités de la tête en calculant la moyenne des "points extreums en longueurs" des deux côtés de la tête (figure 3.38). Ainsi, pour une tête de maillet, ces 2 points guident la préhension de l'outil.

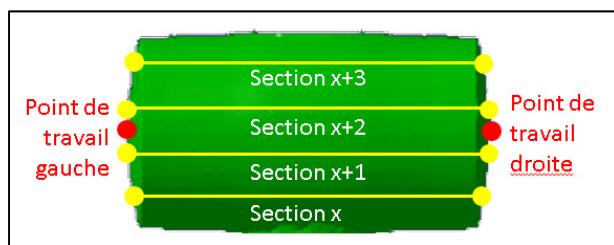


Figure 3.38 : Indices de préhension pour une tête de maillet

3.6.4.4 Les têtes de pinces

Pour les pinces, un axe de travail est obtenu pour chaque tête de la mâchoire à partir de la décomposition en valeurs singulières des CG de toutes les faces appartenant à une tête. Les deux points limites de chaque axe deviennent les indices de préhension de la tête de la pince (Figure 3.39). Ainsi, pour la mâchoire d'une pince, 4 points guident la préhension de l'outil.

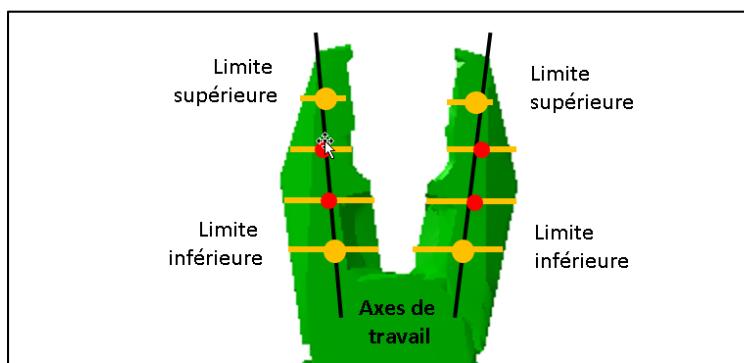


Figure 3.39 : Indices de préhension pour des têtes de pinces

3.7 Étape de détermination de l'axe de balayage pour les outils à multiples directions principales

La solution présentée jusqu'ici présume que la direction du balayage réalisé à l'étape 1 est initialement connue. Pour les outils évoqués jusqu'ici, cette direction de balayage coïncide avec la direction principale de la boîte englobante du modèle géométrique de l'outil (outil à unique direction principale). Toutefois, certains outils ne présentent pas une unique direction principale colinéaire avec la direction principale de leur boîte englobante. Dans un tel cas, il faut prévoir une étape permettant de déterminer une direction de balayage adéquate qui ne coïncide pas avec la direction principale de la boîte englobante. Comme illustré dans la figure 3.40, la forme en boomerang des visseuses pistolets empêche l'exploitation directe de leur boîte englobante.

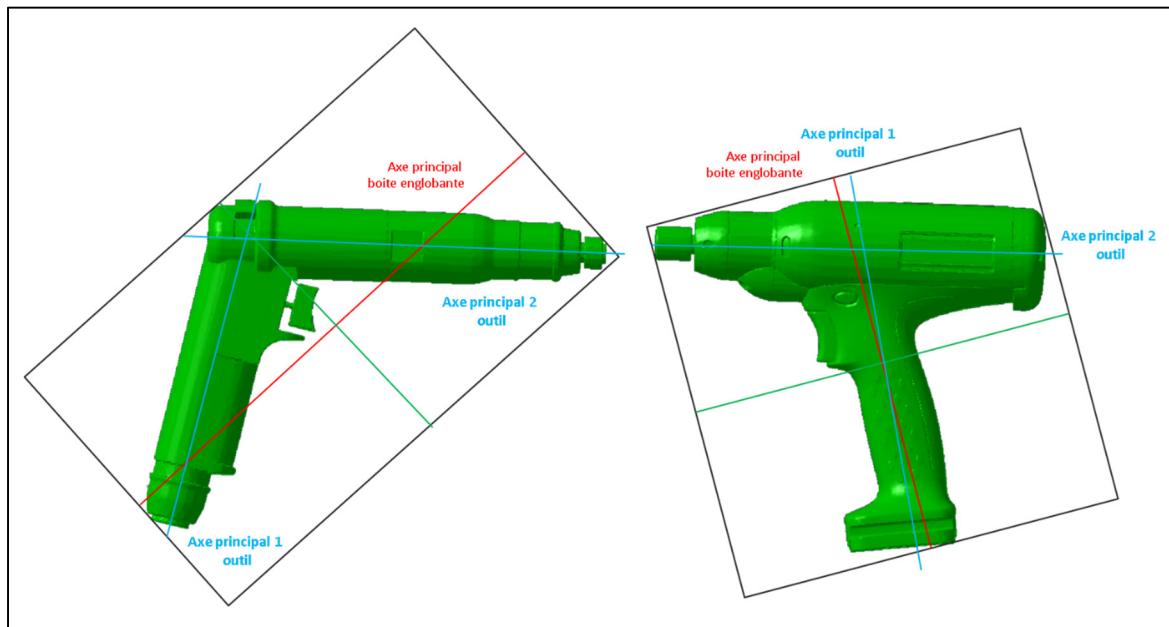


Figure 3.40: Boîtes englobantes pour des visseuses de forme pistolet

Un prérequis pour ces outils complexes consiste à déterminer un axe de balayage optimal permettant de récupérer l'ensemble des informations nécessaires à la recherche d'indices de préhension. Pour les visseuses de forme pistolet, l'axe de balayage optimal est défini comme étant perpendiculaire à l'axe de la tête (ou axe de travail) de manière à identifier un changement

d'aire des faces à la transition entre le manche et le corps (la tête) de la visseuse. Cet axe de balayage optimal est obtenu en un processus à 3 sous-étapes F1, F2, F3 (Figure 3.41).

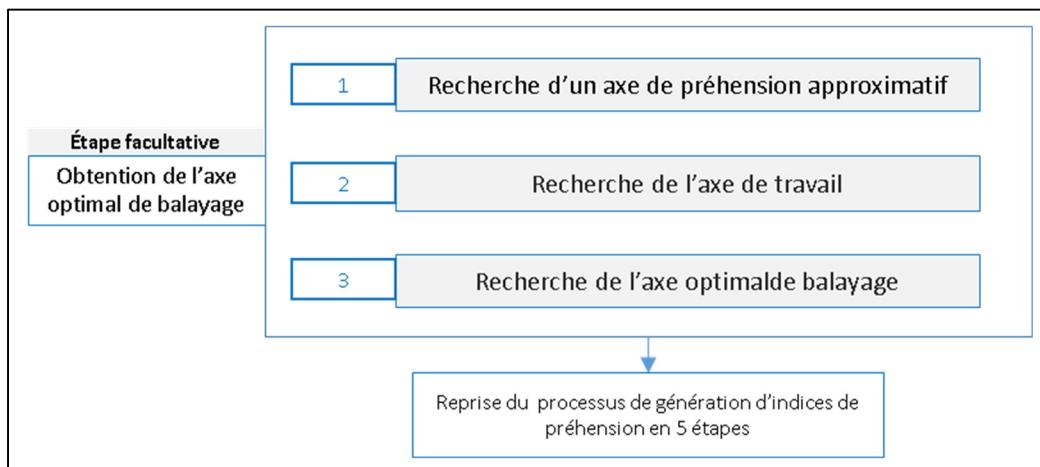
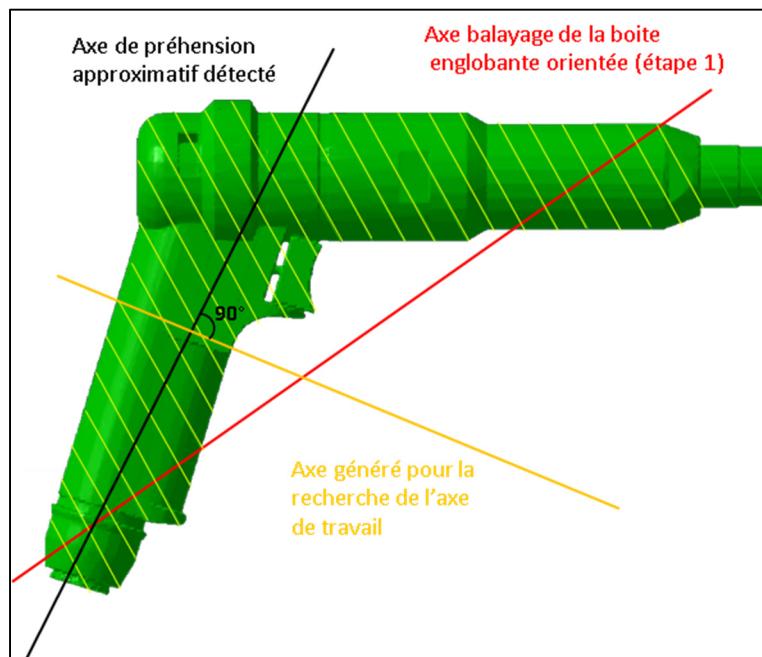


Figure 3.41 : Les sous-étapes pour la recherche de l'axe optimal de balayage

La première sous-étape F1 consiste à rechercher un axe de préhension approximatif à partir de l'axe principal de la boîte englobante. En effet, l'orientation de la boîte englobante permet dans un premier temps de dégager une approximation du manche. Cette région se distingue notamment par une largeur de région plus faible que celle du corps de la visseuse. Ainsi, comme présenté plus haut, un balayage de section est effectué selon la direction principale de la boîte englobante et les propriétés sont extraites pour chaque face (figure 3.42). Les faces confondues sont supprimées et les sections multifaces sont rendues uniques en effectuant une enveloppe convexe des faces. L'ensemble des sections est alors segmenté en régions. Un manche est par la suite recherché parmi ces régions en effectuant des tests de reconnaissance sur les régions de plus grandes hauteurs. Puisque l'orientation de l'axe de la boîte englobante est rarement colinéaire avec l'axe du manche, les propriétés des régions s'avèrent parfois plus grandes. Un manche approximatif est recherché à partir de critères de tolérance plus larges. Néanmoins pour être reconnu comme un manche, la région ne doit pas être la plus large des régions segmentées. Une fois identifiée selon les propriétés du tableau 3.5, une décomposition en valeurs singulières permet de générer un axe de préhension passant par la moyenne des CG du manche.

Tableau 3.5 – Critères d'identification d'un manche approximatif

	Aire Max (mm ²)	Aire Min (mm ²)	Hauteur Max (mm)	Hauteur Min (mm)	Largeur Max (mm)	Largeur Min (mm)	Symétrie
Manche approximatif	1600	250	350	50	50	25	

Figure 3.42 : Premier balayage pour la recherche
d'un manche approximatif

La seconde sous-étape F2 consiste à rechercher un axe de travail passant par le corps de l'outil. Pour cela, un second axe de balayage est positionné sur le centre d'inertie de l'outil et orienté à 90 degrés de l'axe de préhension approximatif (figure 3.43). Une fois cet axe déterminé, des sections sont générées et leurs propriétés extraites. Un nombre de 19 sections est paramétré par défaut. Les faces confondues sont supprimées et les sections multifaces sont rendues uniques en effectuant une enveloppe convexe des faces. La géométrie 3D est ensuite segmentée en régions. Le corps de la visseuse est par la suite recherché en effectuant des tests de reconnaissance sur les régions de plus grandes hauteurs. Les critères de reconnaissance d'un

corps de visseuse sont présentés au tableau 3.6. Une fois cette région identifiée, une décomposition en valeurs singulières des CG des faces du corps permet d'obtenir l'axe de travail de la visseuse. Le point de travail associé correspond quant à lui au CG de la face extrema pour laquelle l'aire est la plus petite.

Tableau 3.6 – Critères d'identification du corps de la visseuse

	Aire Max (mm ²)	Aire Min (mm ²)	Hauteur Max (mm)	Hauteur Min (mm)	LARGEUR Max (mm)	LARGEUR Min (mm)	Symétrie
corps de visseuse	1600	300	350	50	50	25	/

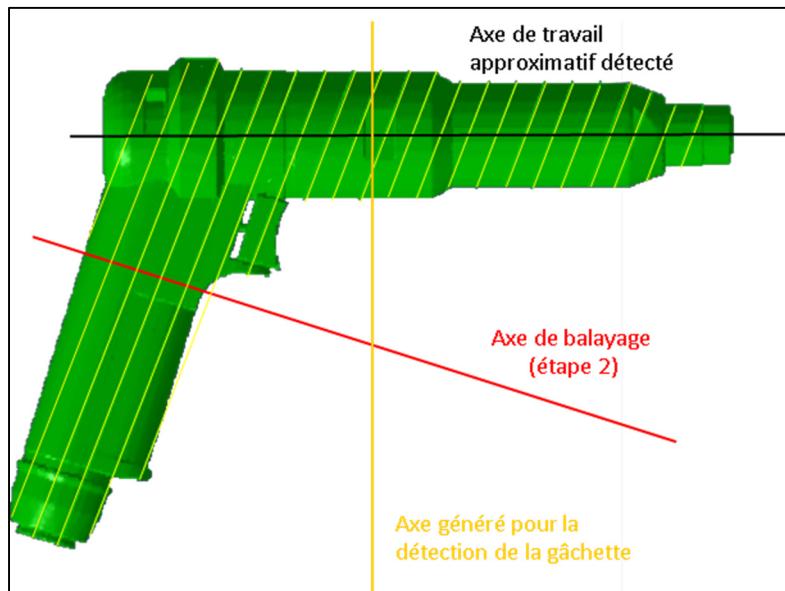


Figure 3.43 : Second balayage pour la recherche
du corps de la visseuse

La troisième et dernière sous-étape F3 consiste à effectuer un balayage optimal dans la direction perpendiculaire à l'axe de travail (figure 3.44). La démarche demeure la même. Des sections sont générées dans la direction optimale de balayage et leurs propriétés extraites. Un nombre de 28 sections est paramétré par défaut. Les faces confondues sont supprimées et les sections multifaces sont rendues uniques en effectuant une enveloppe convexe des faces. De

manière à faciliter la reconnaissance de la gâchette, les faces appartenant au corps de la visseuse sont cependant supprimées. En effet, puisque le balayage est effectué dans la direction perpendiculaire au corps de la visseuse, toute face de grande superficie dont l'aire est supérieure à 2000 mm^2 est définie comme appartenant au corps et supprimée. L'ensemble des sections restantes est finalement segmenté en régions. Un manche est par la suite recherché en effectuant des tests de reconnaissance sur les régions de plus grandes hauteurs. Une fois identifiée, la gâchette poussoir est alors recherchée par proximité au manche. Pour rappel, une gâchette est définie comme une région asymétrique pour laquelle il existe un côté suffisamment distant de l'axe du manche pour être considérée comme sa partie fonctionnelle où se positionne l'index de main. Par analogie au processus d'extraction d'indices de préhension précédemment explicité, ceux-ci si sont générés pour le manche et la gâchette dépendamment de la nature respective de ces régions.

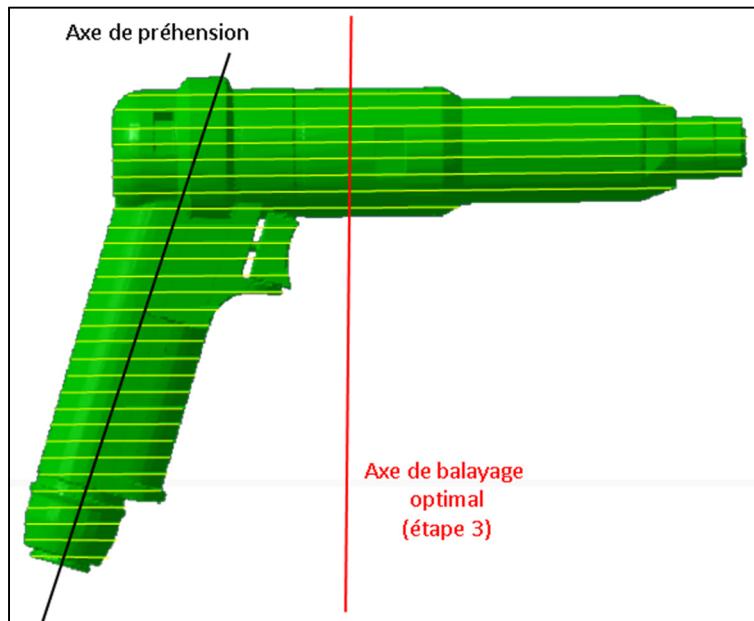


Figure 3.44 : Balayage optimal d'une visseuse pistolet

La méthode d'extraction des indices de préhension proposée dans ce chapitre a été testée sur une cinquantaine d'outils appartenant aux cinq familles mentionnées ci-dessus. Les tests réalisés sont présentés au chapitre suivant.

CHAPITRE 4

EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS

La méthode d'extraction d'indices de préhension a été présentée au chapitre trois. Le présent chapitre présente, pour chaque famille d'outils, un cas expérimental de génération d'indices de préhension. Dans un premier temps, un exemple de génération d'indices de préhension est présenté pour chaque famille d'outils à unique direction de balayage. Dans un second temps, les tests menés pour les outils à multiples balayages seront présentés. Enfin, l'ensemble des résultats des tests réalisés sur la cinquantaine d'outils de l'étude est proposé en annexe.

4.1 **Expérimentation sur les familles d'outils à ‘unique direction principale’**

4.1.1 **Résultats de la génération d'indices de préhension sur les maillets**

Les maillets sont considérés comme des outils à balayage unique puisque la direction principale de l'outil est coïncidente avec l'axe principal de la boîte englobante de l'objet. Un seul balayage suffit donc pour alimenter la méthode proposée pour la génération des indices de préhension.

Les cinq étapes de la méthode sont illustrées ici sur un maillet de 2 kg. Le nombre « n » de sections à extraire peut-être contrôlé par l'utilisateur. Néanmoins, pour cet exemple, un nombre par défaut de 28 sections est retenu. Pour rappel, deux régions utiles à la préhension sont recherchées pour un maillet : une tête et un manche.

Tableau 4.1 : Caractéristiques du
maillet d'étude

Famille d'outil	Maillet
Modèle	Maillet 2000g
Format	".STL"
Dimensions	275mm x 75mm x 33mm

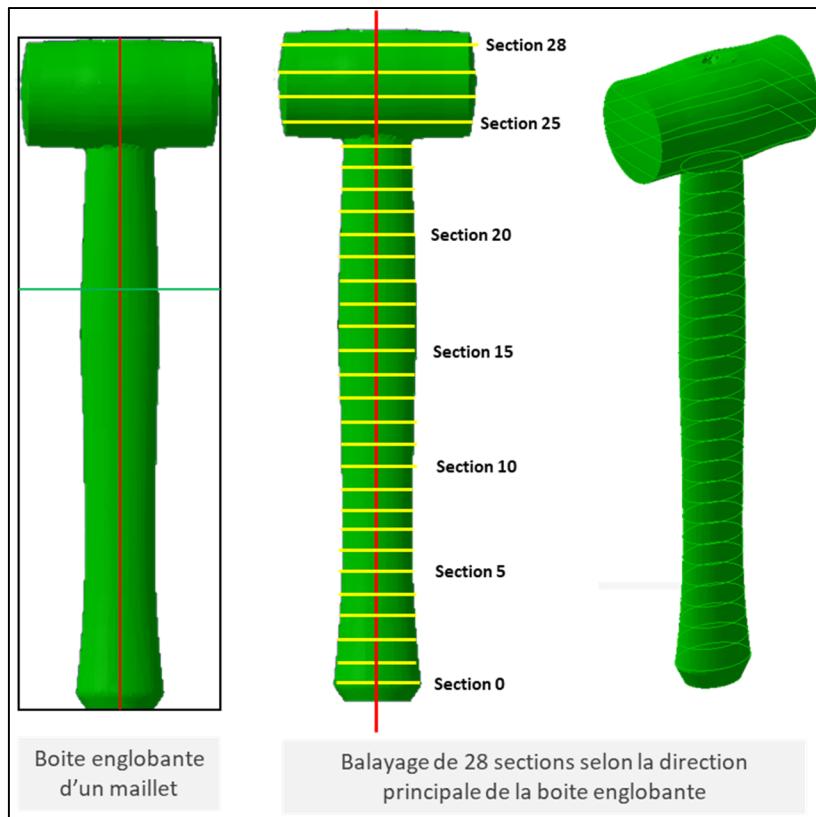


Figure 4.1 : Boîte englobante du maillet et balayage de sections

- L'étape 1 (balayage des sections) et l'étape 2 (extraction des propriétés des sections) sont réalisées et les propriétés sont extraites pour chaque face générée (Figure 4.1).
- Puisque toutes les sections sont composées d'une unique face, l'étape 3 (segmentation) révèle dans un premier temps un unique tronçon de sections se décomposant en un seul segment. Ce segment est par la suite décomposé en deux régions distinctes puisqu'une variation significative de l'aire des faces est détectable lors de la transition entre la tête et le manche de l'outil (Figures 4.2 et 4.3). Puisque les maillets sont symétriques selon l'axe de balayage, les déplacements des CG sont homogènes et ne révèle aucune région supplémentaire.

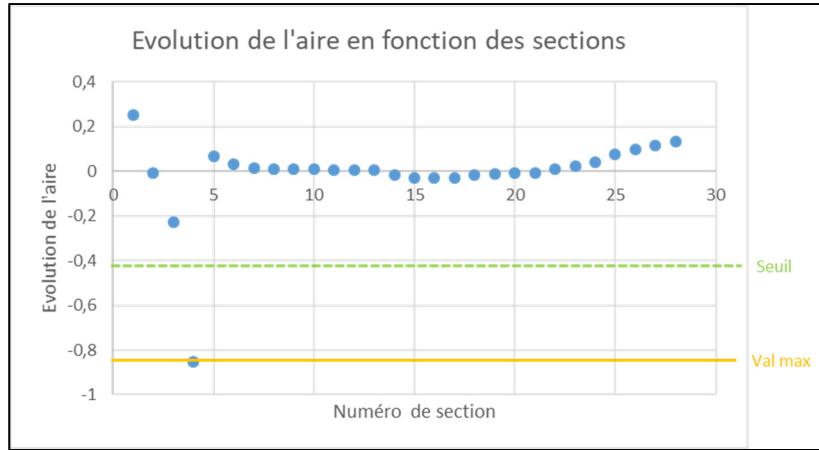


Figure 4.2 : Courbe de l'évolution des aires des faces
selon les sections

VB Array Second Region Detection													
Section	Sous Section	Aire (mm ²)	CG X mm	CG Ymm	CG Z mm	X1 mm	Y1 mm	Z1 mm	X2 mm	Y2 mm	Z2 mm	Largeur (mm)	
0	1	4287.942892	-0.016178588	0.027428024	338.48275	49.0564	0.027428	338.4841	-49.0538	0.027428	338.481386	98.11017932	
1	1	5366.93099	-0.006555625	0.007223106	326.810922	49.75447	0.007223	326.8123	-49.7546	0.007223	326.809538	99.5090644	
2	1	5316.384181	-0.01068686	0.000556112	315.139093	49.70804	-2.5E-06	315.1405	-49.7079	-2.9E-06	315.13771	99.4159443	
3	1	4102.979691	-0.016516157	-0.00253709	303.467264	48.94751	-0.00254	303.4686	-48.9472	-0.00254	303.465902	97.89472572	
4	1	598.6127101	0.000228289	0.000660278	291.795435	17.41208	0.00066	291.7959	-17.393	0.00066	291.794951	34.80482914	
5	1	638.0109303	-9.12438E-05	-2.762E-06	280.123602	18.36442	7.2E-07	280.1241	-18.0465	2.75E-07	280.123104	36.73584209	
6	1	657.6047093	-0.000273799	-5.8811E-06	268.451777	18.36793	-5.9E-06	268.4523	-18.3679	-5.9E-06	268.451266	36.73584209	
7	1	666.8816149	-0.000130633	-3.8878E-05	256.779948	18.49935	-3.9E-05	256.7805	-18.4994	-3.9E-05	256.779433	36.99860556	
8	1	673.2790378	-0.00018816	-3.9929E-05	245.108119	18.59066	-4E-05	245.1086	-18.5907	-4E-05	245.107602	37.18131809	
9	1	679.6007293	-0.000241877	0.000191795	233.436269	18.68198	0.000192	233.4368	-18.682	0.000192	233.43577	37.36388072	
10	1	685.9752614	-0.000253937	0.000157698	221.764461	18.77257	0.000158	221.765	-18.7726	0.000158	221.763938	37.5450824	
11	1	690.8203724	-0.001469476	-0.00206991	210.092632	18.82511	-0.00202	210.0932	-18.8252	-0.00202	210.092108	37.65025388	
12	1	695.5878022	-0.005222632	-0.00241177	198.420803	18.87744	-0.00237	198.4213	-18.8775	-0.00236	198.420278	37.75489353	
13	1	700.0551555	-0.006611276	-0.00258933	186.748974	18.92976	-0.00254	186.7495	-18.9298	-0.00253	186.748447	37.85954167	
14	1	688.7548068	0.009306527	0.000819894	175.077145	-18.7036	0.00082	175.0766	18.70363	0.00082	175.077665	37.40699833	
15	1	667.0976947	0.021994132	0.007411086	163.405316	-18.2846	0.007252	163.4048	18.28479	0.007411	163.405824	36.5693101	
16	1	646.843703	0.024170038	0.014716258	151.733487	-17.8653	0.014716	151.733	17.86554	0.014716	151.733984	35.73084139	
17	1	627.204094	0.001784844	0.0244117783	140.061657	-17.4465	0.024418	140.0612	17.44584	0.024418	140.062143	34.89230795	
18	1	618.0085803	-0.008282924	0.03312483	128.389828	17.22461	0.033125	128.3903	-17.2259	0.033125	128.389349	34.45058371	
19	1	611.8346963	-0.006109021	0.034908306	116.717999	17.05658	0.034908	116.7185	-17.0579	0.034908	116.717524	34.11446084	
20	1	606.2059474	-0.002644698	0.028998513	105.04617	16.88956	0.028993	105.0466	-16.8908	0.028993	105.0457	33.78038628	
21	1	600.8958462	0.000822603	0.013985754	93.3743414	-16.7257	0.013986	93.37388	16.72512	0.013986	93.3748067	33.45082507	
22	1	605.547088	-0.0015558484	0.002623771	81.7025124	16.73524	-0.002548	81.70298	-16.73533	0.002576	81.7020468	33.47055678	
23	1	618.522984	-0.001238893	-0.01353769	70.0306837	16.85663	-0.01354	70.0315	-16.8566	-0.01354	70.0302146	33.71326253	
24	1	643.2826915	-0.006447375	-0.02999556	58.3588548	17.14273	-0.03	58.35933	-17.1431	-0.03	58.3583779	34.28577162	
25	1	692.9467504	-0.014076419	-0.03355514	46.6870256	17.75544	-0.03356	46.68752	-17.7562	-0.03356	46.6865319	35.51163034	
26	1	761.6214629	-0.016448976	-0.031084848	35.0151964	18.58909	-0.03108	35.01571	-18.5901	-0.03108	35.0146796	37.17918127	
27	1	848.8883693	-0.003962239	-0.02013852	23.3433676	19.61656	-0.02014	23.34391	-19.6203	-0.02014	23.3428217	39.23689617	
28	1	962.9357566	0.008332302	0.008313795	11.6715384	-20.862	0.008251	11.67096	20.86159	0.008314	11.6721187	41.72362859	

Figure 4.3 : Segmentation en deux régions du maillet

- À l'étape 4 (classification des régions) chacune des deux régions est reconnue au moyen des caractéristiques de ses propriétés élémentaires, illustrées au tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Propriétés des régions du maillet

Num Région	CG Région (mm)	Aire Moyenne (mm ²)	Hauteur (mm)	Largeur Moyenne (mm)	Asymétrie
1	(0 ; 0 ; 321)	4800	35	99	Symétrie totale
2	(0 ; 0 ; 152)	667	280	37	Symétrie totale

- Conformément à la séquence de classification des régions illustrée au tableau 3.4, la région de la tête est recherchée d'abord afin d'exploiter sa caractéristique dominante, soit son aire de grande amplitude. Dans l'exemple ci-contre, la région 1 est testée en premier comme une tête en raison de sa plus grande aire. Puisque toutes ses propriétés vérifient les conditions d'identification d'une tête (tableau 3.3), celle-ci est donc identifiée comme telle. Un manche est alors recherché par distance d'opposition des CG à la tête. Dans le cas présent, la région 2 correspond comme attendu au manche puisque l'ensemble de ses propriétés satisfait aux valeurs attendues du tableau 3.3.
- À l'étape 5 (extraction des indices de préhension), l'axe de préhension est obtenu à partir de la région du manche par une décomposition en valeur singulière (SVD) des CG des faces. Les limites de translation de la main sont ensuite obtenues en projetant les CG des deux faces extrems de la région sur l'axe de préhension. Enfin, les deux points de travail sont obtenus en calculant la moyenne des points extrêmes des deux côtés de la tête. Les indices de préhension qui en résultent sont représentés par des points noirs sur la figure 4.4.

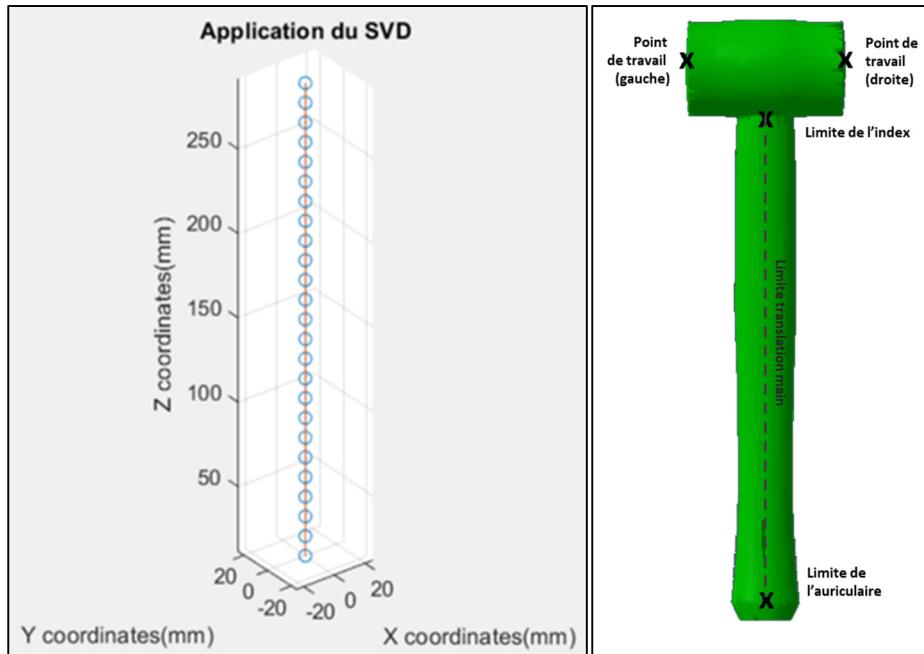


Figure 4.4 : SVD pour l'obtention de l'axe de préhension et représentation visuelle des indices de préhension du maillet

4.1.2 Résultats de la génération d'indices de préhension sur les tournevis

Comme pour les maillets, un unique balayage suffit à alimenter la démarche proposée pour l'extraction de l'ensemble des indices de préhension associés aux tournevis. Les cinq étapes de la méthode sont illustrées ci-contre pour un tournevis de longueur 275mm. Le nombre « n » de sections effectuées peut être choisi par l'utilisateur. Néanmoins, pour cet exemple, un nombre par défaut de 28 sections est retenu. Pour la famille des tournevis, deux régions sont recherchées : une tête et un manche.

Tableau 4.3 – Caractéristiques du tournevis d'étude

Famille d'outil	Maillet
Modèle	screwdrivers L275
Format	".STL"
Dimensions	275mm x 48mm x 48mm

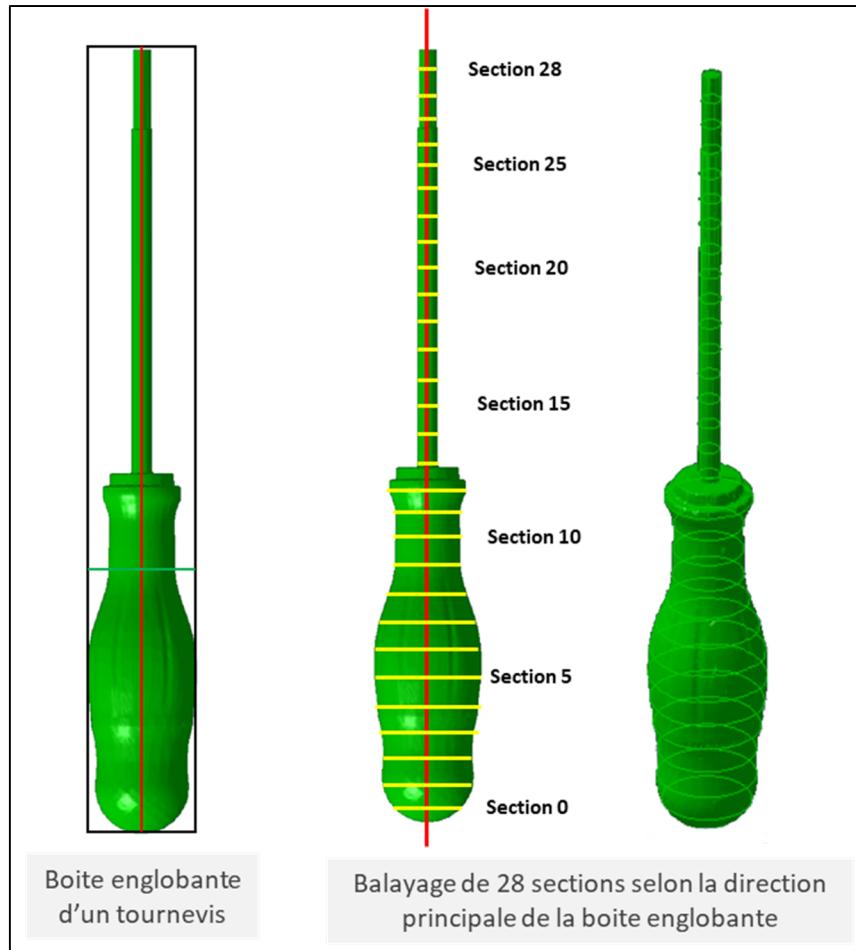


Figure 4.5 : Boîte englobante du tournevis et balayage de sections

- Tout comme pour les maillets, les étapes 1 (balayage de sections) et 2 (extraction des propriétés) sont facilement réalisées.
- L'étape 3 (segmentation) révèle un unique tronçon de sections se décomposant en un seul segment. Trois régions sont ensuite générées, basées sur les résultats de l'évolution de l'aire des faces. Puisque les tournevis sont symétriques par rapport à l'axe de balayage, les déplacements des CG sont homogènes et ne génèrent aucune autre région supplémentaire.

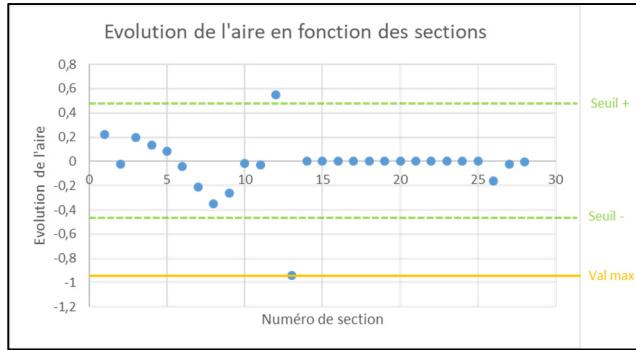


Figure 4.6 : Évolution des aires des faces selon les sections

VB Array Region Detection												
Section	Sous Section	Aire (mm²)	CG X mm	CG Y mm	CG Z mm	X1 mm	Y1 mm	Z1 mm	X2 mm	Y2 mm	Z2 mm	Largeur (mm)
0	1	668.4130468	-9.1648249	-0.0121777	0.0090253	-9.16573	-8.29824	-12.0713	-9.16392	8.258323	12.06666	29.22231516
1	1	816.4548732	-18.333333	-0.0119324	-0.0121115	-18.3343	-9.14542	-13.3279	-18.3323	9.113839	13.29243	32.26782897
2	1	798.6844252	-27.501839	-0.0004141	0.00061791	-27.5028	0.95961	-13.2069	-27.5009	9.055577	13.20343	32.03131578
3	1	954.2204769	-36.670347	-0.0063543	-0.0125901	-36.6693	9.928435	14.47143	-36.6714	-9.9026	-14.44041	35.0229707
4	1	1080.509113	-45.838852	0.00484973	0.00126417	-45.8377	10.66121	15.53726	-45.84	-10.6463	-15.52707	37.6999519
5	1	1173.329933	-55.007359	0.00054392	0.00304641	-55.0086	-11.1688	-16.2808	-55.0061	11.16519	16.28009	39.4762816
6	1	1122.104099	-64.175866	-5.997E-05	-0.0012032	-64.1711	-10.928	-15.9332	-64.1747	10.89044	15.87615	38.6391905
7	1	887.0586231	-73.344372	0.00123349	0.00149561	-73.3433	9.682849	14.11641	-73.3454	-9.67795	-14.10988	34.16635472
8	1	574.4277364	-82.512879	0.00045432	0.00143048	-82.512	7.706685	11.23641	-82.5137	-7.68013	-11.19616	27.21695533
9	1	422.5846157	-91.681386	-0.0010157	-0.0004693	-91.6807	6.537752	9.532319	-91.6821	-6.53433	-9.52545	23.18176996
10	1	415.2970152	-100.84989	0.00270338	0.0082651	-100.851	-6.5104	-9.48725	-100.849	6.500051	9.481535	23.0056235
11	1	402.423796	-110.0184	-0.0014174	0.00043884	-110.019	-6.40433	-9.3342	-110.018	6.39813	9.330391	22.66497729
12	1	622.3559263	-119.18691	0.00078121	-0.0025709	-119.186	8.026004	11.69747	-119.188	-7.99718	-11.66287	28.31662337
13	1	37.5846904	-128.35541	-0.000179	-4.727E-05	-128.356	-1.96562	-2.86548	-128.355	1.964994	2.864996	6.949743455
14	1	37.5836621	-137.52392	-7.819E-05	-9.5E-05	-137.524	1.965521	2.86557	-137.524	-1.96554	-2.865554	6.949686558
15	1	37.5820131	-146.69243	-4.636E-05	-4.52E-05	-146.692	1.96552	2.865572	-146.693	-1.96554	-2.865553	6.949618449
16	1	37.58071952	-155.86093	8.0183E-06	-3.22E-05	-155.861	1.96555	2.865548	-155.861	-1.96551	-2.865558	6.949530409
17	1	37.57916499	-165.02944	7.1812E-05	-8.772E-06	-165.03	-1.96548	-2.86561	-165.029	1.965579	2.865521	6.949476788
18	1	37.57753128	-174.19795	0.000145933	2.5015E-05	-174.198	-1.96545	-2.86564	-174.198	1.965611	2.865494	6.949448995
19	1	37.57581897	-183.36645	0.00023045	6.9297E-05	-183.367	-1.96542	-2.86567	-183.366	1.965644	2.865463	6.949434821
20	1	37.57403588	-192.53496	0.00032692	0.00012314	-192.535	-1.96539	-2.86571	-192.535	1.965682	2.865431	6.949428478
21	1	37.57221307	-201.70347	0.00043678	0.00018664	-201.704	-1.96535	-2.86575	-201.703	1.965722	2.865393	6.949423411
22	1	37.5703198	-210.87197	0.00054752	0.00027423	-210.872	-1.96532	-2.86578	-210.872	1.965754	2.865366	6.949422095
23	1	37.56829877	-220.04048	0.00067262	0.00035951	-220.041	-1.96528	-2.86582	-220.04	1.965795	2.865328	6.949423968
24	1	37.56630083	-229.20899	0.00080428	0.00046583	-229.209	-1.96524	-2.86585	-229.209	1.965831	2.865295	6.949425717
25	1	37.56419821	-238.37749	0.00090806	0.00058369	-238.378	-1.96523	-2.86587	-238.377	1.965844	2.86528	6.949430143
26	1	31.62043449	-247.546	-0.0023415	-0.0006523	-247.546	1.839425	2.684476	-247.546	-1.84268	-2.6837	6.153639026
27	1	30.90114001	-256.71451	-0.0002811	-0.0002098	-256.715	-1.84179	-2.68495	-256.714	1.839046	2.681361	5.987416626
28	1	30.84211302	-265.88301	0.00029278	0.00021362	-265.883	-1.81643	-2.6484	-265.883	1.816707	2.64838	6.021553866

Figure 4.7 : Segmentation en régions du tournevis

- A l'étape 4 (classification des régions) chacune des trois régions est caractérisée en propriétés élémentaires illustrées au tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Propriétés des régions du tournevis

Num région	CG Région (mm)	Aire Moyenne (mm ²)	Hauteur (mm)	Largeur Moyenne (mm)	Asymétrie
1	(-60 ; 0 ; 0)	807	101	32	Symétrie totale
2	(-119 ; 0 ; 0)	622	0	28	Symétrie totale
3	(-197 ; 0 ; 0)	38	137	7	Symétrie totale

Conformément à la séquence de classification illustrée au tableau 3.4, la région 1 est testée comme un manche en raison de sa plus grande aire. Puisque toutes ses propriétés vérifient les conditions d'identification de cette région, celle-ci est donc identifiée comme le manche. La tête est ensuite recherchée par distance d'opposition au manche. Dans le cas présent, la région 3 correspond comme attendu à la tête puisque l'ensemble de ses propriétés satisfont aux valeurs attendues du tableau 3.3. Il est à noter que pour certains tournevis, la région de la tête comprend la tige, tandis que pour d'autres, la région de la tête comprend uniquement la pointe.

- Enfin à l'étape 5, l'axe de préhension est obtenu à partir d'une décomposition en valeur singulière (SVD) des CG des faces du manche. Les limites de translation de la main sont ensuite obtenues en projetant les CG des deux faces extrems de la région sur l'axe de préhension. Enfin, le point de travail coïncide avec le CG de la face appartenant à la région de la tête qui est la plus éloignée du manche. Les indices de préhension qui en résultent sont représentés par des points noirs sur la figure 4.8.

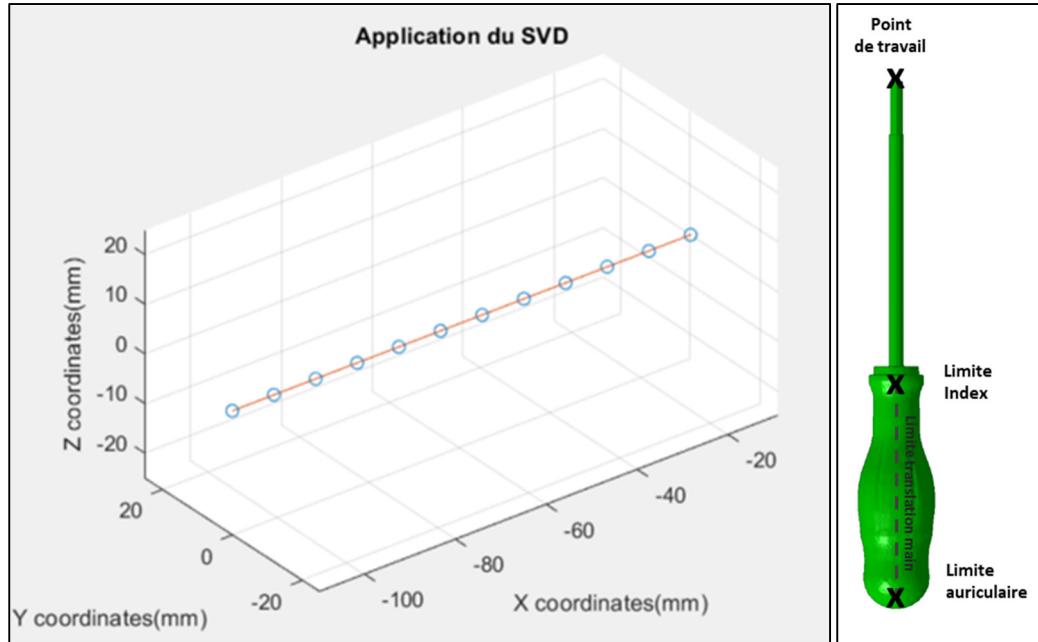


Figure 4.8 : SVD pour l'obtention de l'axe de préhension et représentation visuelle des indices de préhension du tournevis.

4.1.3 Résultats de la génération d'indices de préhension sur les pinces

Les pinces font partie des familles d'outils à unique direction de balayage. Quatre régions utiles à la préhension sont recherchées : deux têtes formant la mâchoire et deux poignées (ou manches). Les cinq étapes de la méthode sont illustrées ci-dessous pour une pince de longueur 275mm. Le nombre « n » de sections effectuées peut être choisi par l'utilisateur. Un nombre par défaut de 28 sections est retenu.

Tableau 4.5 : Caractéristiques de la pince d'étude

Famille d'outil	Pinces
Modèle	IndustrialPliers
Format	".STL"
Dimensions	184mm x 99mm x 22mm

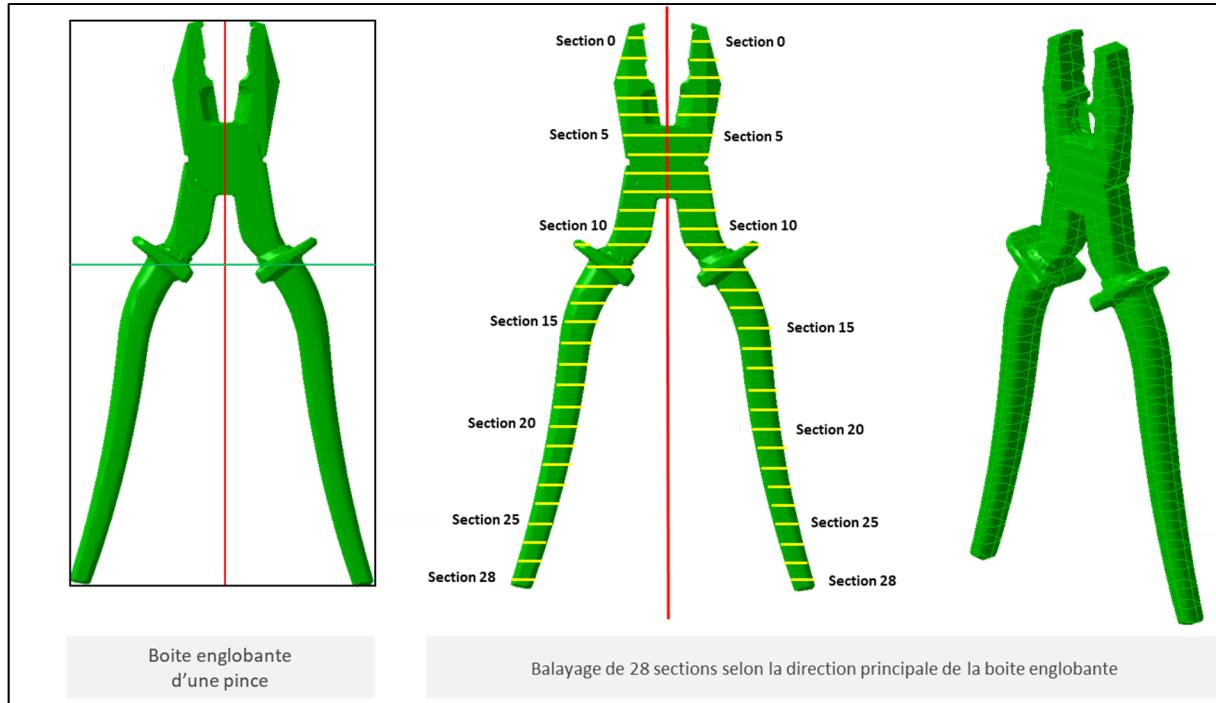


Figure 4.9 : Boîte englobante de la pince et balayage de sections

- L'étape 1 (balayage de sections) génère 28 sections dont certaines sont multifaces.
- L'étape 2 extrait pour chaque face des propriétés géométriques. Les faces sont réorganisées et des liens d'association sont créés. Selon la géométrie des pinces, il est possible d'observer que certaines sections possèdent plus de deux faces lorsque les poignées possèdent des zones de renforcement (figure 3.20). Un tel scénario pourrait perturber l'étape de la segmentation basée sur l'évolution du nombre de faces. Ainsi lorsqu'une section présente plus de deux faces par section, seules les deux faces de plus grande aire sont préservées.
- L'étape 3 de segmentation génère trois tronçons basés sur l'évolution du nombre de faces par section (Figure 4.10). Le premier et le troisième tronçon sont formés de deux faces par section. Ainsi pour chacun de ces tronçons, deux segments sont générés. Le second tronçon génère quant à lui un unique segment. La variation des aires des faces et le déplacement des CG sont analysés pour ces cinq segments (Figure 4.12). En fin de compte, neuf régions sont générées (Figure 4.11).

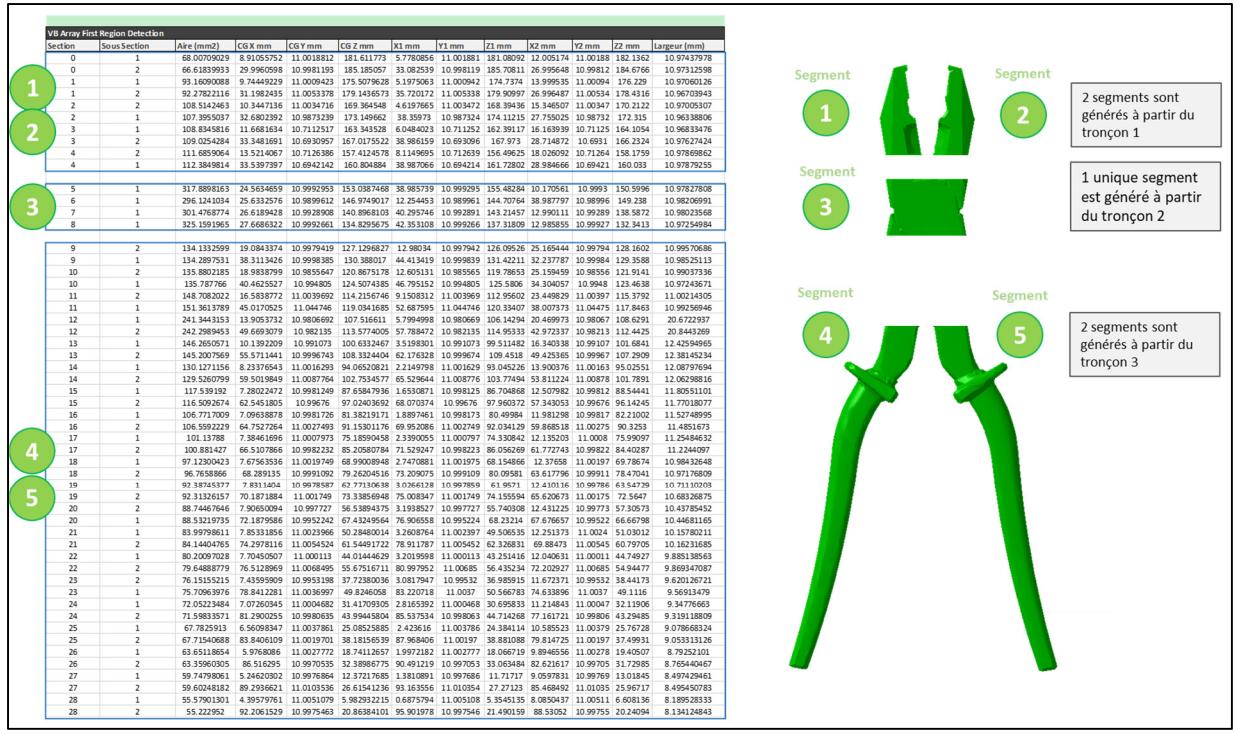


Figure 4.11 : Segmentation en régions de la pince

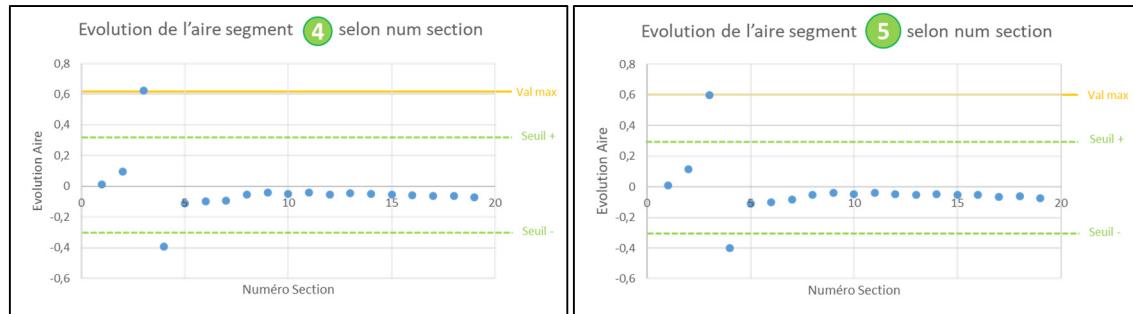


Figure 4.12 : Évolution des aires des faces selon les sections pour les segments 4 et 5

- A l'étape 4 (classification des régions) chacune des neuf régions est caractérisée selon ses propriétés élémentaires illustrées dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Propriétés des régions de la pince

Num région	CG Région (mm)	Aire Moyenne (mm ²)	Hauteur (mm)	Largeur Moyenne (mm)	Asymétrie
1	(10 ; 11 ; 169)	109	25	11	Symétrie totale
2	(33 ; 11 ; 173)	107	25	11	Symétrie totale
3	(26 ; 11 ; 144)	309	18	11	Symétrie totale
4	(19 ; 11 ; 121)	136	19	11	Symétrie totale
5	(40 ; 11 ; 125)	136	19	11	Symétrie totale
6	(14 ; 11 ; 108)	241	0	21	Symétrie totale
7	(50 ; 11 ; 114)	242	0	21	Symétrie totale
8	(87 ; 11 ; 53)	86	94	10	Symétrie totale
9	(86 ; 11 ; 54)	86	94	10	Symétrie totale

Conformément à la séquence de classification des régions illustrées au tableau 3.4, les régions 8 et 9 sont testées comme des poignées (manches) en raison de leur hauteur (94 mm). Puisque toutes leurs propriétés vérifient les conditions requises, alors ces deux régions sont classées comme des poignées (manches). Les têtes sont ensuite recherchées par distance d'opposition des CG aux manches. Dans le cas présent, les régions 1 et 2 correspondent, comme il est espéré, aux deux têtes de la mâchoire puisque l'ensemble de leurs propriétés satisfont aux valeurs attendues du tableau 3.3.

- Enfin, à l'étape 5 (extraction des indices de préhension), un axe de préhension est obtenu pour le manche du côté gauche, un autre pour le manche du côté droit, à partir d'une décomposition en valeurs singulières des CG des faces composant la région. Similairement aux autres manches vus plus haut, deux limites de translation de la main sont obtenues par manche en projetant les deux CG des faces les plus distantes sur leur axe de préhension respectif. Par analogie aux manches, un axe de travail est calculé pour chaque tête. Les deux points extrêmes de l'axe sont déterminés par projection des CG des faces extrêmes sur chaque axe de travail respectif. Les indices de préhension qui en résultent sont représentés par des points noirs sur la figure 4.13.

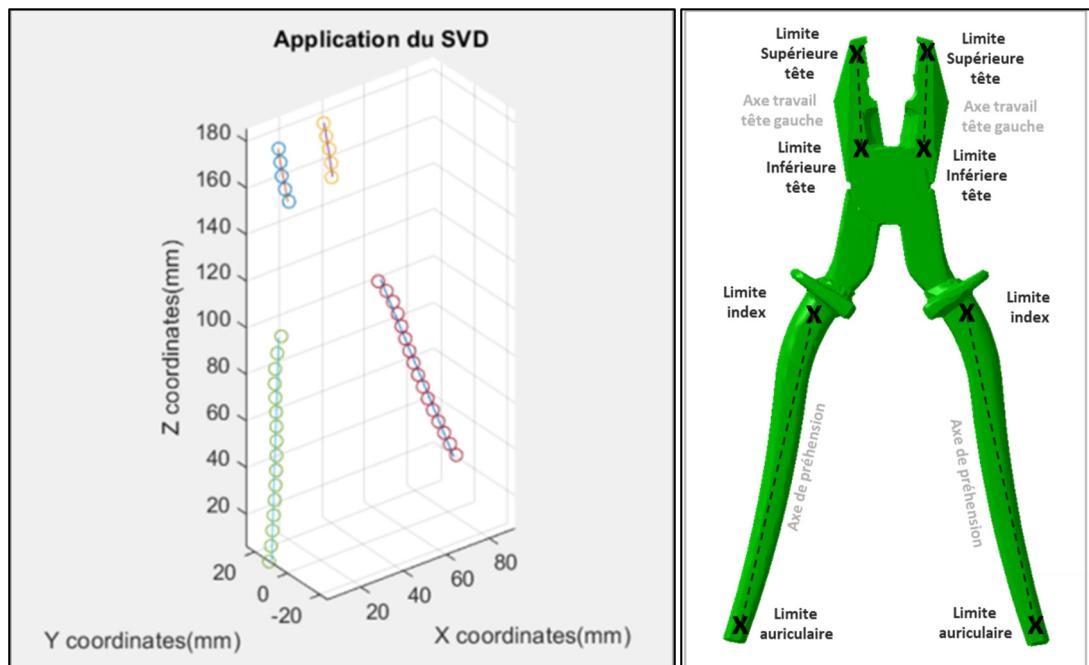


Figure 4.13 : SVD pour l'obtention des axes de préhension et de travail, et représentation visuelle des indices de préhension de la pince

4.1.4 Résultats de la génération d'indices de préhension sur les visseuses droites à gâchette levier

Les visseuses droites font partie des familles d'outils à unique direction de balayage. Dans le cas présent, la visseuse droite est munie d'une gâchette de type levier. Trois régions utiles à la

génération d'une préhension sont recherchées successivement (conformément à ce qui est indiqué au tableau 3.4) : gâchette, manche, tête. Les cinq étapes de la méthode sont illustrées ci-dessous pour une visseuse droite de longueur de 312mm. Le nombre « n » de sections effectuées peut être choisi par l'utilisateur. Un nombre par défaut de 28 sections est retenu.

Tableau 4.7 : Caractéristiques de la visseuse
droite à gâchette levier d'étude

Famille d'outil	Visseuse droite à gâchette levier
Modèle	Visseuse Pneumatique L312
Format	".STL"
Dimensions	312mm x 852mm x 40mm

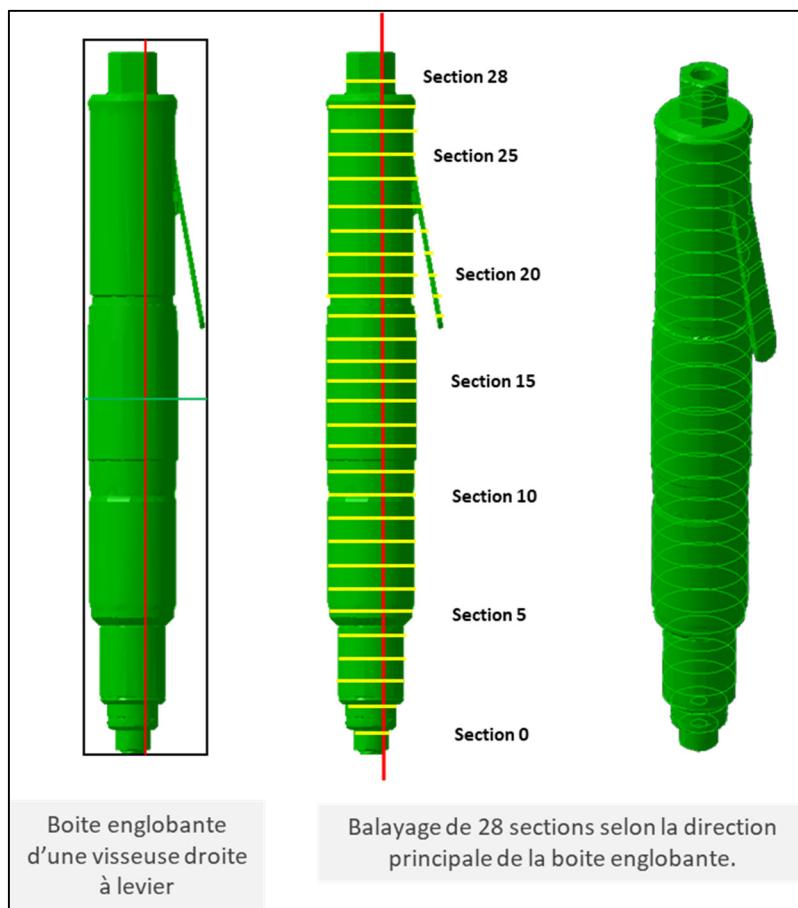


Figure 4.14 : Boîte englobante de la visseuse droite à gâchette levier et balayage de sections

- L'étape 1 (balayage de sections) génère 28 sections dont certaines sont multifaces.
- L'étape 2 extrait pour chaque face les propriétés souhaitées. Les faces confondues sont supprimées et des liens d'association sont créés.
- L'étape 3 de segmentation génère trois tronçons basés sur l'évolution du nombre de faces par section. Le tronçon central est formé de deux faces par section tandis que les deux autres présentent une seule face par section. Quatre segments sont alors générés (Figure 4.15). Ces segments sont ensuite décomposés en huit régions distinctes (Figures 4.17) en raison de divergences remarquables sur l'évolution de l'aire des faces (Figure 4.16). En raison de l'homogénéité des faces et de la symétrie de visseuses droites, les déplacements des CG sont homogènes et ne génèrent aucune autre région.

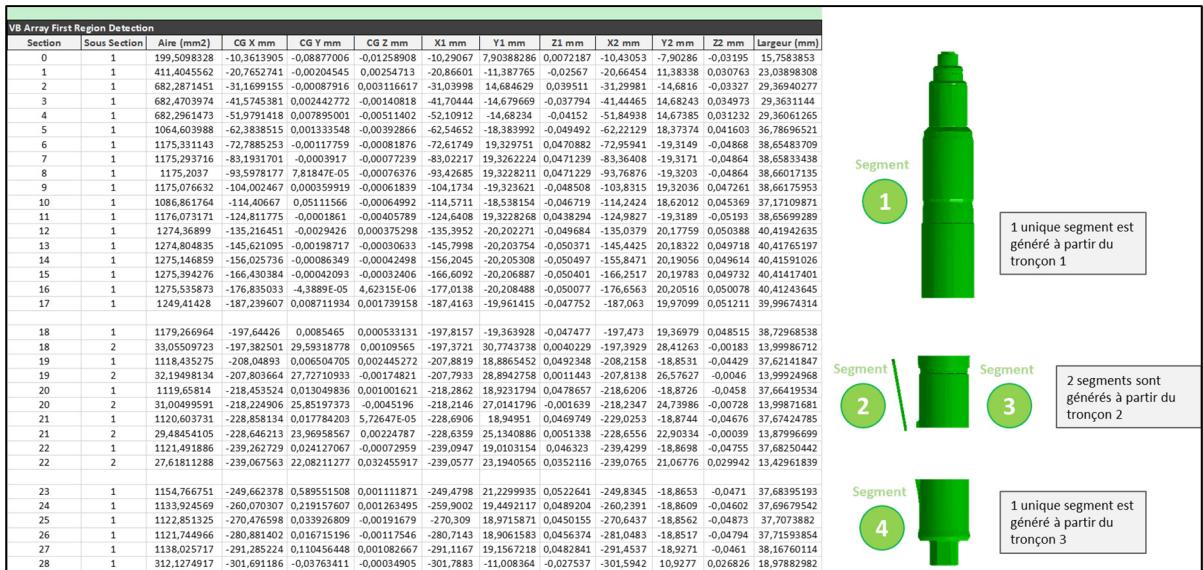


Figure 4.15 : Segmentation en segments de la visseuse droite à gâchette levier

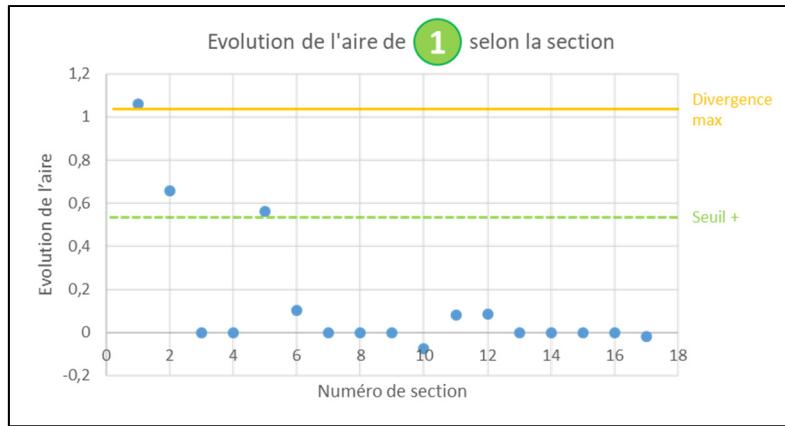


Figure 4.16 : Évolution des aires des faces selon les sections pour le segment 1

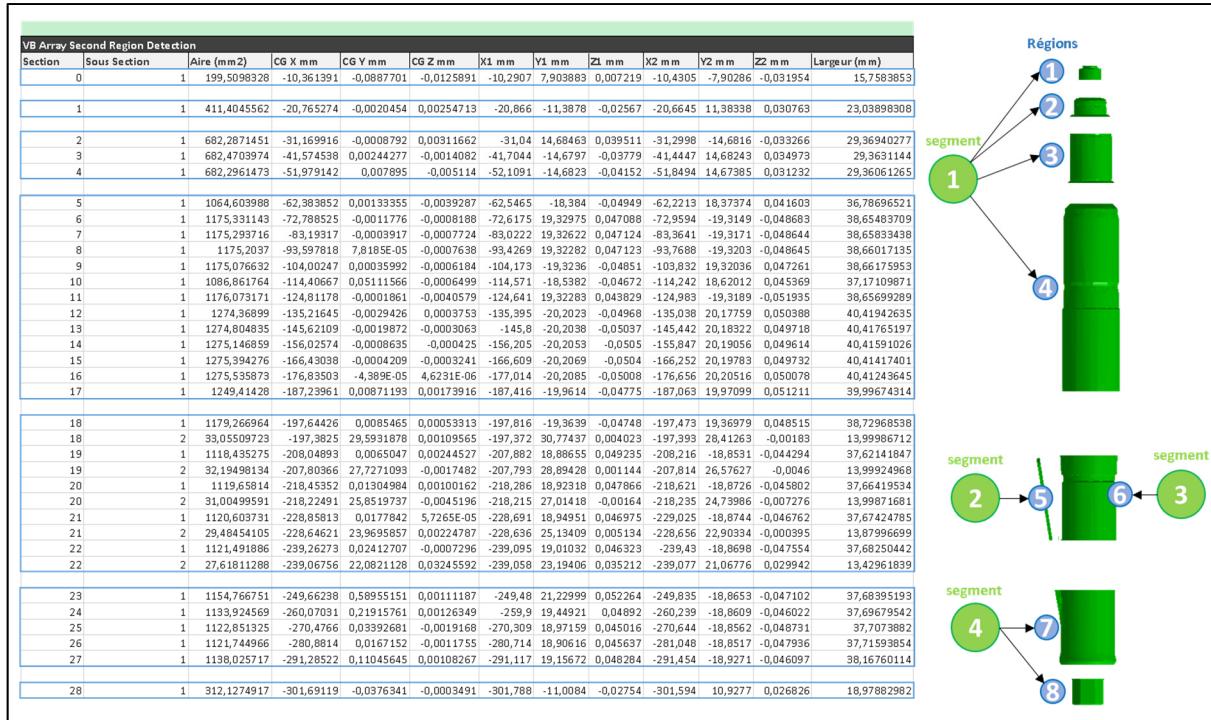


Figure 4.17 : Segmentation en régions de la visseuse droite à gâchette levier

- A l'étape 4 (classification des régions) les propriétés des régions sont calculées pour chacune des huit régions.

Tableau 4.8 : Propriétés des régions de la visseuse droite à gâchette levier

Num région	CG Région (mm)	Aire Moyenne (mm ²)	Hauteur (mm)	Largeur Moyenne (mm)	Asymétrie
1	(-10 ; 0 ; 0)	200	0	16	Symétrie totale
2	(-21 ; 0 ; 0)	411	0	23	Symétrie totale
3	(-42 ; 0 ; 0)	682	20	29	Symétrie totale
4	(-125 ; 0 ; 0)	1176	125	39	Symétrie totale
5	(-218; 25 ; 0)	31	44	13	Symétrie totale
6	(-218; 0 ; 0)	1120	42	38	Symétrie totale
7	(-270 ; 0 ; 0)	1134	41	38	Symétrie totale
8	(-301 ; 0 ; 0)	312	0	18	Symétrie totale

Conformément aux règles du tableau 3.4, la gâchette levier est identifiée en premier en raison de son aire de faible amplitude. Ici, la région 5 est testée comme une gâchette en raison de sa plus petite aire. Puisque toutes ses propriétés vérifient les conditions requises, celle-ci est donc classée comme la gâchette. Un manche est ensuite recherché par proximité à cette gâchette. La région 6 est la région la plus proche dont les propriétés vérifient celles d'un manche. Enfin par distance d'opposition au manche, la région 1 est finalement testée et identifiée comme la tête de la visseuse droite.

- Enfin, à l'étape 5 (extraction des indices de préhension), un axe de préhension est généré à partir d'une décomposition en valeurs singulières des CG des faces du manche. Les CG des faces extrêmes de la gâchette sont ensuite projetés sur l'axe de préhension pour former la limite supérieure et inférieure de l'index, tandis que le point central de la gâchette est préservé à sa position initiale pour guider le placement de l'index du mannequin pour actionner le mécanisme. Finalement, le point de travail coïncide avec le CG de la face de la tête qui est la plus éloignée du manche. Les indices de préhension générés sont représentés par des points noirs sur la figure 4.18.

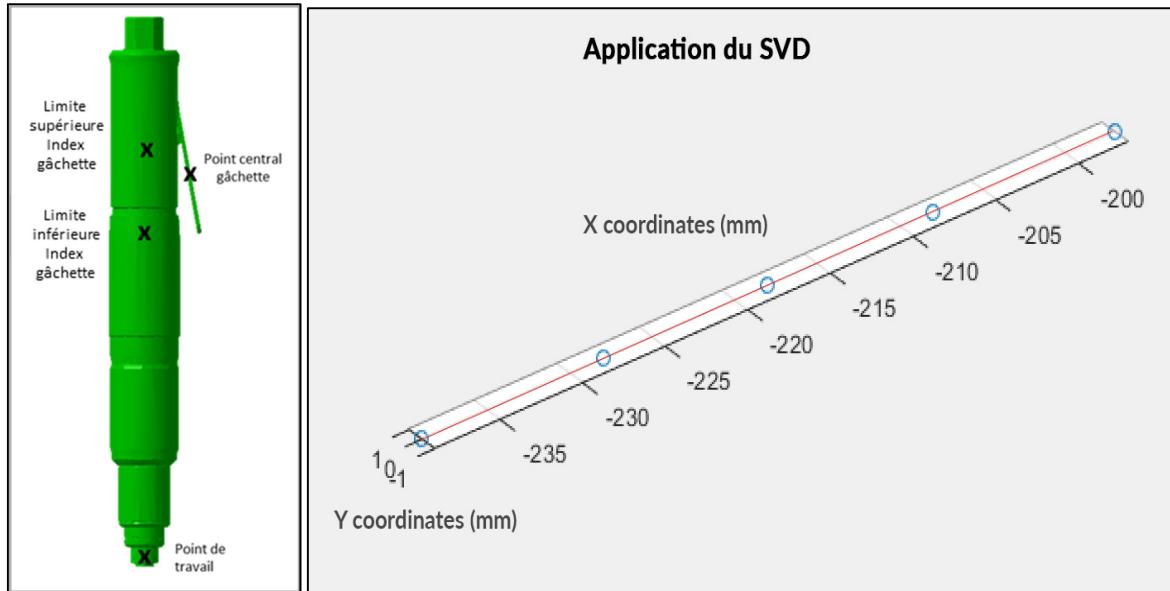


Figure 4.18 : SVD pour l’obtention de l’axe de préhension et représentation visuelle des indices de préhension de la visseuse droite à gâchette levier

4.1.5 Résultats de la génération d’indices de préhension sur les visseuses droites à gâchette pousoir et renvoi d’angle

Dans ce scenario la visseuse est droite comme dans le cas précédent, mais est équipée d’une gâchette de type pousoir et d’une tête à renvoi d’angle. Selon la séquence du tableau 3.3, la tête à renvoi d’angle est recherchée en premier pour ensuite permettre la recherche du manche et de la gâchette. Les cinq étapes de la méthode sont illustrées ci-dessous pour une visseuse droite de longueur de 455mm. Le nombre « n » de sections effectuées peut être choisi par l’utilisateur. Un nombre par défaut de 28 sections est retenu.

Tableau 4.9 – Caractéristiques de la visseuse droite à gâchette pousoir et renvoi d’angle d’étude

Famille d’outil	Visseuse droite à gâchette pistolet et renvoi d’angle
Modèle	BallRetainer455
Format	".STL"
Dimensions	455mm x 83mm x 37mm

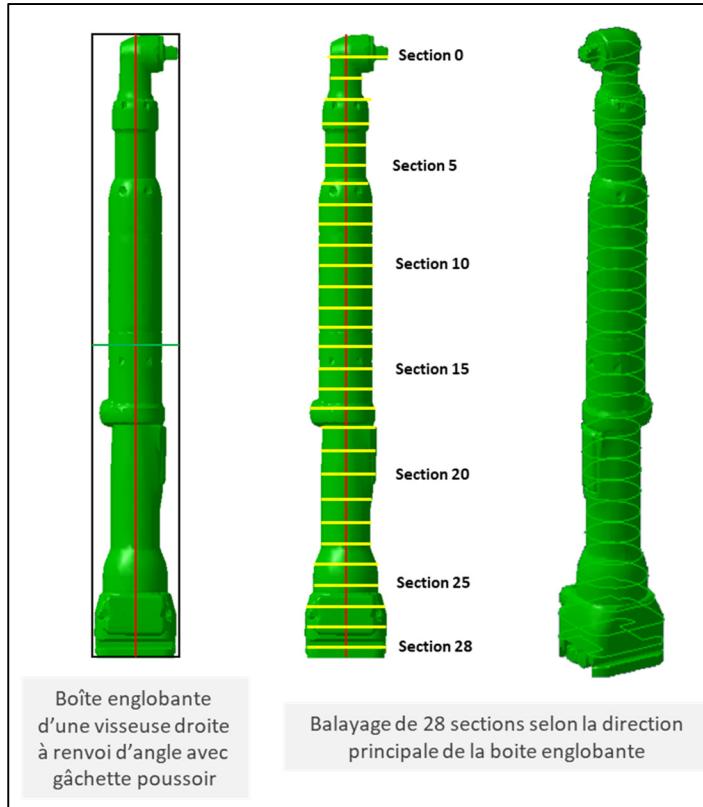


Figure 4.19 : Boîte englobante de la visseuse droite à renvoi d'angle et balayage de sections

- L'étape 1 (balayage de sections) génère 28 sections.
- L'étape 2 extrait pour chaque face les propriétés souhaitées. Les liens d'association sont facilement réalisés puisque chaque section ne contient qu'une unique face.
- Puisque toutes les sections sont composées d'une unique face, l'étape 3 (segmentation) révèle dans un premier temps un unique tronçon de sections se décomposant en un seul segment. Neufs régions sont ensuite générées grâce aux résultats de l'évolution de l'aire des faces (figures 4.20 et 4.21). En raison de l'homogénéité des faces et de la symétrie de l'outil, les déplacements des CG sont homogènes et ne génèrent aucune autre région.

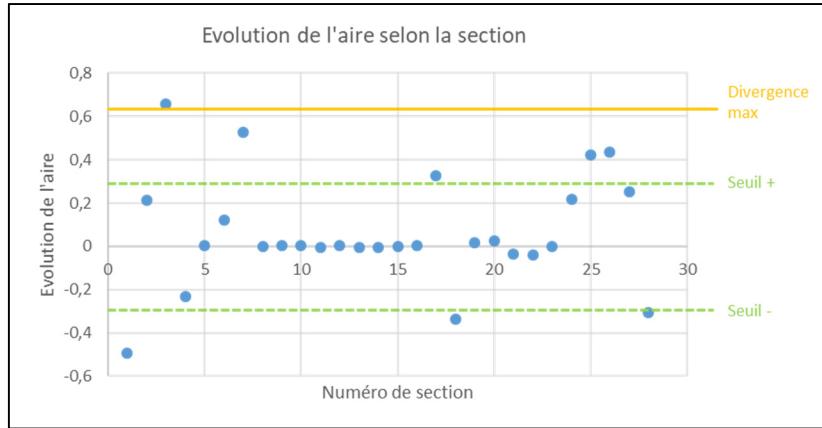


Figure 4.20 : Évolution des aires des faces selon les sections

VB Array Second Region Detection															
Section	Sous Section	Aire (mm²)	CG X mm	CG Y mm	CG Z mm	X1 mm	Y1 mm	Z1 mm	X2 mm	Y2 mm	Z2 mm	Largeur (mm)			
0	1	875.3230815	0.02301406	-7.9399407	391.701317	0.02267	-30.454	391.5729	0.023304	10.98948	391.8093	26.98079011		①	
1	1	444.653283	0.01008692	0.0600238	376.570782	0.010269	11.96984	376.6387	0.009912	-11.3779	376.5055	23.81225063		②	
2	1	539.75459	0.0045694	0.03165375	361.394429	0.004915	13.27071	361.47	0.004373	-12.8139	361.3212	26.3393005		③	
3	1	894.1195328	0.00804129	0.00058525	346.218036	0.008301	16.97645	346.3149	0.007782	-16.9344	346.1214	33.74106233		④	
4	1	688.5759475	-0.0087257	-0.0058738	331.041838	-0.0085	14.94688	331.1271	-0.00895	-14.9434	330.9566	29.54019317		⑤	
5	1	692.2350631	0.00846947	-0.0051409	315.86559	0.008698	14.95959	315.9509	0.008241	-14.949	315.7803	29.64148196		⑥	
6	1	777.2505836	0.04620876	-0.0504346	300.689025	0.04645	15.73512	300.7791	0.045968	-15.7988	300.5992	31.71952079		⑦	
7	1	1185.737556	0.03469743	-0.0017371	285.513128	0.034399	-19.5126	285.4018	0.034995	19.42096	285.6239	38.94320412		⑧	
8	1	1184.339305	0.00040493	0.00088303	270.337028	0.000703	19.51576	270.4484	0.000107	-19.4974	270.2258	38.77149417		⑨	
9	1	1186.667095	0.00064313	-0.001355	255.160809	0.000942	19.51978	255.2722	0.000345	-19.5019	255.0496	39.41529653			
10	1	1191.588989	0.00476826	0.0044566	239.984625	0.005067	19.52753	240.096	0.004471	-19.424	239.8738	39.42490167			
11	1	1187.683401	-0.0012358	-0.0020533	224.808398	-0.00094	19.37913	224.919	-0.00153	-19.2923	224.6984	39.15619627			
12	1	1192.415117	-0.0012599	-0.0023042	209.632185	-0.00096	19.52706	209.7436	-0.00156	-19.5131	209.5209	39.07370226			
13	1	1186.54767	0.00510366	0.0026264	194.455996	0.004805	-19.529	194.3446	0.005402	19.53311	194.5674	39.10249546			
14	1	1180.549199	0.00511534	0.00038792	179.279777	0.004817	-19.5072	179.1685	0.005414	19.49985	179.391	38.6232282			
15	1	1179.956139	-0.0005022	-0.0046799	164.103557	-0.0008	-19.4128	163.9928	-0.00021	19.32476	164.2138	38.60219452			
16	1	1182.305603	0.00878203	0.0058205	148.927386	0.008484	-19.4922	148.8162	0.00908	19.49031	149.0385	38.81633754			
17	1	1570.499207	-0.0039731	1.76587242	133.761255	-0.0036	25.90229	133.8989	-0.00433	-21.454	133.6288	42.54516883		⑤	
18	1	1043.280784	0.00709645	-2.6110596	118.56005	0.00679	-22.6691	118.4456	0.007396	16.94176	118.6716	33.2636642		⑥	
19	1	1051.252861	0.00187367	-1.9245063	103.387775	0.00156	-22.4061	103.2709	0.00217	17.44892	103.4983	34.70905574		⑦	
20	1	1089.626908	-0.0017728	-1.439188	88.214347	-0.00209	-22.0227	88.09693	-0.00137	17.95872	88.325	35.65271228		⑧	
21	1	1050.238518	-0.0054547	-0.6959592	73.0423907	-0.00575	-19.743	72.93374	-0.00515	18.0356	73.14925	35.88347025		⑨	
22	1	1009.44629	-0.0125427	-0.0110881	57.8701106	-0.01227	18.0354	57.97306	-0.01282	-18.0266	57.76734	35.93493747			
23	1	1010.193426	0.01319095	-0.002969	42.6938819	0.012915	-18.0402	42.59099	0.013467	18.03055	42.79676	36.03274354			
24	1	1228.310992	0.02241829	-0.0568081	27.5173441	0.022721	19.72664	27.6302	0.022116	-19.8233	27.40458	39.84827827			
25	1	1745.768533	-0.0057213	-0.0152185	12.3414507	-0.00608	-23.7003	12.20634	-0.00536	23.46291	12.47538	47.34215045			
26	1	2508.915181	-1.9340675	-0.1071012	-2.8301132	-1.93367	26.16812	-2.68022	-1.93447	-26.3232	-2.979664	54.14018242			
27	1	3140.596936	-1.7044781	-0.0078456	-18.006368	-1.70493	-29.7215	-18.1759	-1.70403	29.59754	-17.83748	57.00526428			
28	1	2183.73314	0.01046536	0.04639213	-33.186859	0.01022	-15.9684	-33.2782	0.010709	15.94319	-33.09618	52.0465192			

Figure 4.21 : Segmentation en régions de la visseuse droite à renvoi d'angle et gâchette poussoir

- A l'étape 4 (classification des régions) les propriétés des régions sont calculées pour chacune des neuf régions.

Tableau 4.10 : Propriétés des régions de la visseuse droite à gâchette pousoir

Num région	CG Région (mm)	Aire Moyenne (mm ²)	Hauteur (mm)	Largeur Moyenne (mm)	Asymétrie
1	(0.02 ; -7.93 ; 391)	875.32	0	26,98	asymétrie totale
2	(0 ; 0 ; 368.50)	497.5	15.01	25.07	symétrie totale
3	(0 ; 0 ; 323.21)	762.75	45.53	32.25	symétrie totale
4	(0 ; 0 ; 216.75)	1182	137.23	38.86	symétrie totale
5	(0 ; 176 ; 133.76)	1570.49	0	42.54	symétrie totale
6	(0 ; 0 ; 72.50)	1090.86	91.50	35.53	asymétrie partielle
7	(0 ; 0 ; 12.34)	1745.76	0	47.34	symétrie totale
8	(0 ; 0 ; 8.62)	2824.32	10	55.55	symétrie totale
9	(0 ; 0 ; -33.18)	2183.73	0	52.04	symétrie totale

Conformément à la séquence de classification au tableau 3.4, la tête à renvoi d'angle est reconnue en premier. Celle-ci est déterminée à partir de la « méthodologie d'identification d'une tête à renvoi d'angle » présenté au chapitre 3.5.5.2. La région reconstruite n'est constituée que de la section 0 puisque cette section est la seule à vérifier les critères d'identification d'une tête. Une fois la région de la tête à renvoi d'angle reconnue, on examine la région qui se trouve complètement à l'opposé à la tête afin de reconnaître le manche. La région 6 est la région la plus éloignée de la tête dont les propriétés vérifient celles d'un manche. Cette région possède une asymétrie partielle signifiant que la gâchette est confondue avec le manche. De ce fait, la région 6 comporte la gâchette pousoir.

- Enfin, à l'étape 5 (extraction des indices de préhension), un manche est extrait à partir des faces symétriques successives de la région 6 tandis que la gâchette est générée à partir des faces asymétriques de cette même région 6. Un axe de préhension est généré selon une décomposition en valeurs singulières des CG des faces du manche. Les limites de translation de la main sont obtenues en projetant les deux CG des faces extremums du manche sur l'axe de préhension issu du SVD, ce qui fournit la limite supérieure de l'index du manche et la limite inférieure de l'auriculaire. Les points extremums longitudinaux du côté fonctionnel de la gâchette sont ensuite projetés sur l'axe de préhension pour former la limite supérieure et inférieure de l'index sur la gâchette, tandis que le point central est préservé pour guider le placement de l'index du mannequin sur la gâchette. Le point

supérieur de l'index en provenance du manche est donc remplacé par le point donnant la limite inférieure de la gâchette. Finalement, le point de travail est obtenu en effectuant la moyenne des extrêmes du côté fonctionnel de la tête à renvoi d'angle. Les indices de préhension qui en résultent sont représentés par des points noirs sur la figure 4.22.

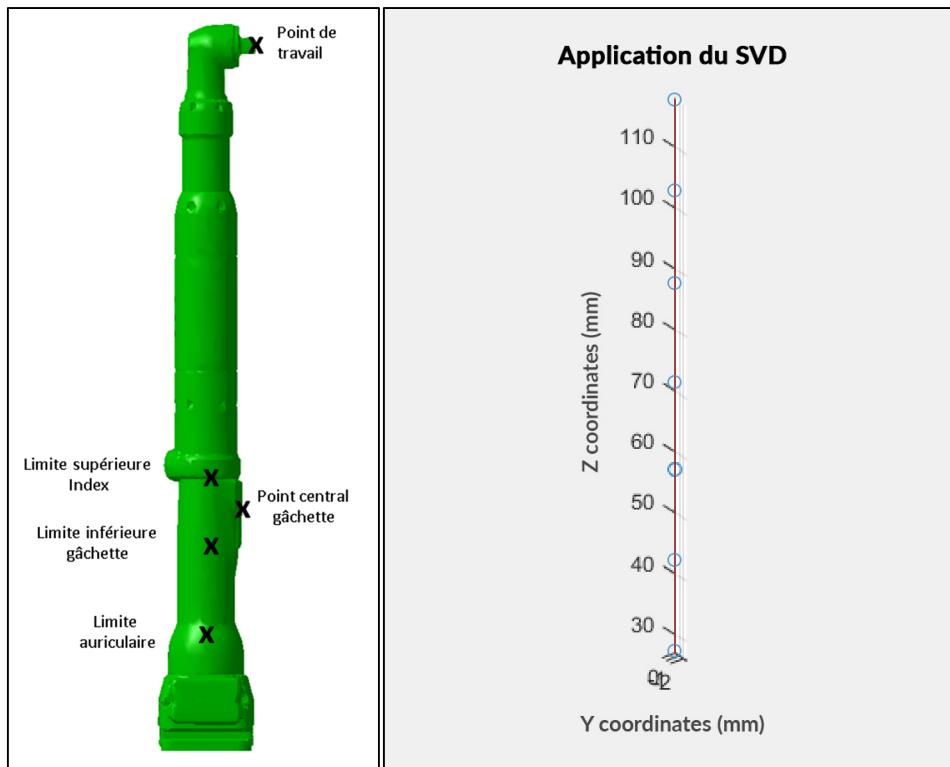


Figure 4.22 : SVD pour l'obtention de l'axe de préhension et représentation visuelle des indices de préhension de la visseuse droite à renvoi d'angle et gâchette poussoir

4.2 Expérimentation sur les familles d'outils à ‘multiples directions principales’

Les outils dits ‘à multiples directions principales’ sont ceux pour lesquels la boîte englobante orientée ne permet pas d’identifier à elle seule la direction du balayage menant à la génération de l’ensemble des indices de préhension. Une étape préliminaire pour ces outils consiste à rechercher l’axe optimal de balayage.

4.2.1 Résultats de la génération d'indices de préhension sur les visseuses pistolets

Les visseuses de forme pistolet sont celles dont la forme en boomerang impose deux directions principales (figure 3.2) associées respectivement au manche et à la tête de l'outil. La boîte englobante orientée ne permet pas d'obtenir directement la direction optimale de balayage. Pour rappel, pour les visseuses pistolet, la direction optimale de balayage permettant de générer l'ensemble des indices de préhension doit être perpendiculaire à l'axe du corps de la visseuse. Dans le présent exemple, l'outil d'étude est une visseuse à calage pneumatique de forme pistolet et de longueur 232mm.

Tableau 4.11 : Caractéristiques de la visseuse pistolet d'étude

Famille d'outil	Visseuse pistolet
Modèle	Visseuse a calage L232
Format	".STL"
Dimensions	232mm x 200mm x 36mm

- La première sous-étape F1 consiste donc à rechercher le meilleur axe de balayage. Pour cela, un premier balayage est effectué selon l'axe principal de la boîte englobante de l'outil. Un nombre de 28 sections est défini par défaut. Les faces confondues sont supprimées. Les sections multifaces sont rendues simples en effectuant l'enveloppe convexe des faces. Les propriétés des faces sont ensuite extraites pour chaque section. Puisque toutes les sections sont composées d'une unique face, la segmentation révèle dans un premier temps un unique tronçon de sections se décomposant en un seul segment. De ce segment sont issues cinq régions (figure 4.23).

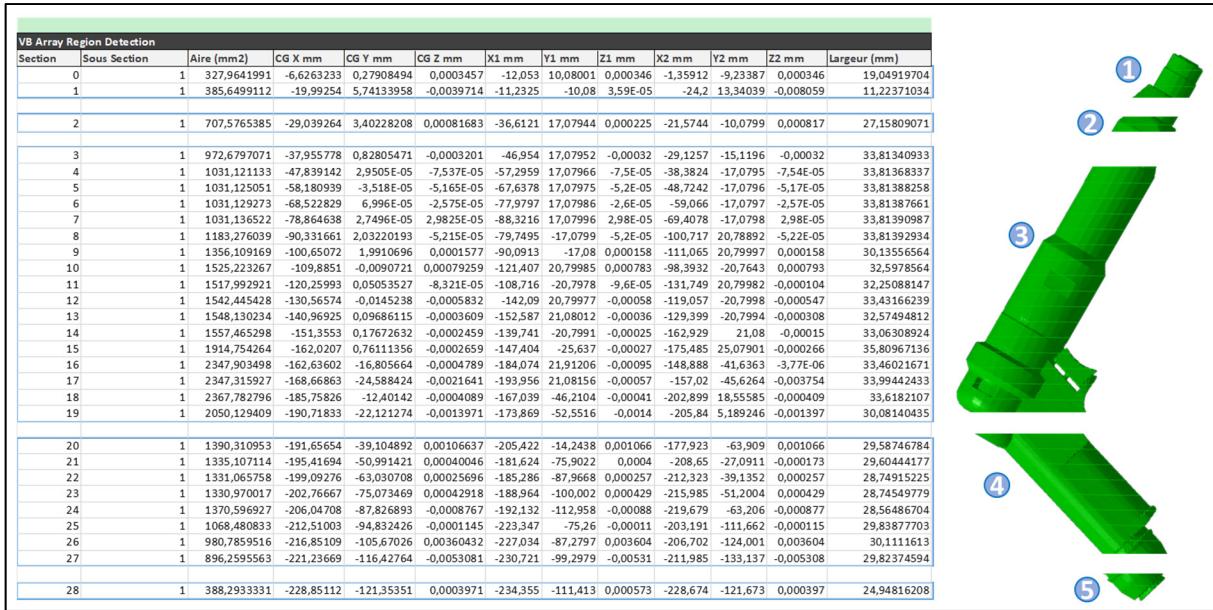


Figure 4.23 : Segmentation en régions de la visseuse pistolet selon le premier balayage.

Le manche est d'abord recherché par hauteur de région. Cependant, la région 3 possédant la plus grande hauteur n'est pas approuvée comme un manche puisqu'il s'agit de la région segmentée de plus grande largeur. De plus, sa hauteur ne satisfait pas les dimensions d'un manche défini dans le tableau 3.3. La région 4 est alors reconnue comme un manche et son axe de préhension est déterminé à partir d'une décomposition en valeur singulière des CG de ses faces.

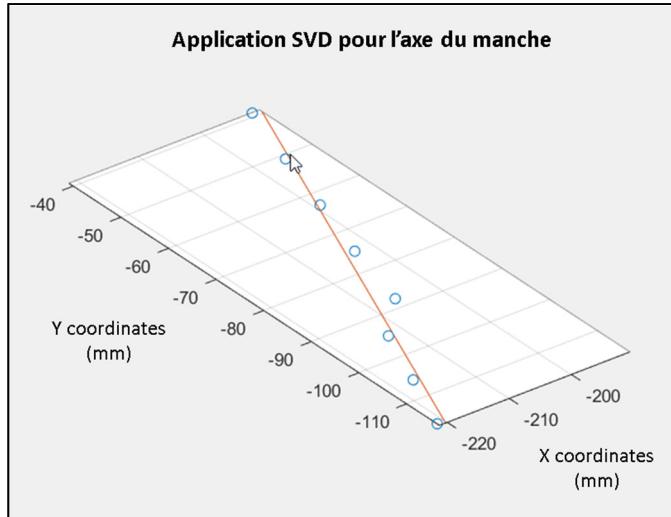


Figure 4.24 : SVD pour l'obtention d'un axe approximatif du manche

- A partir de la sous-étape F2, un second balayage est ensuite effectué dans la direction perpendiculaire au manche de manière à identifier le corps de la visseuse. Un nombre de 19 sections est défini par défaut. Les faces confondues sont supprimées et les sections multifaces sont rendues simples en obtenant l'enveloppe convexe des faces. Les propriétés des faces sont ensuite extraites pour chaque section. Puisque toutes les sections sont composées d'une unique face, la segmentation révèle dans un premier temps, un unique tronçon de sections se décomposant en un seul segment. Six régions sont finalement segmentées (Figure 4.25).

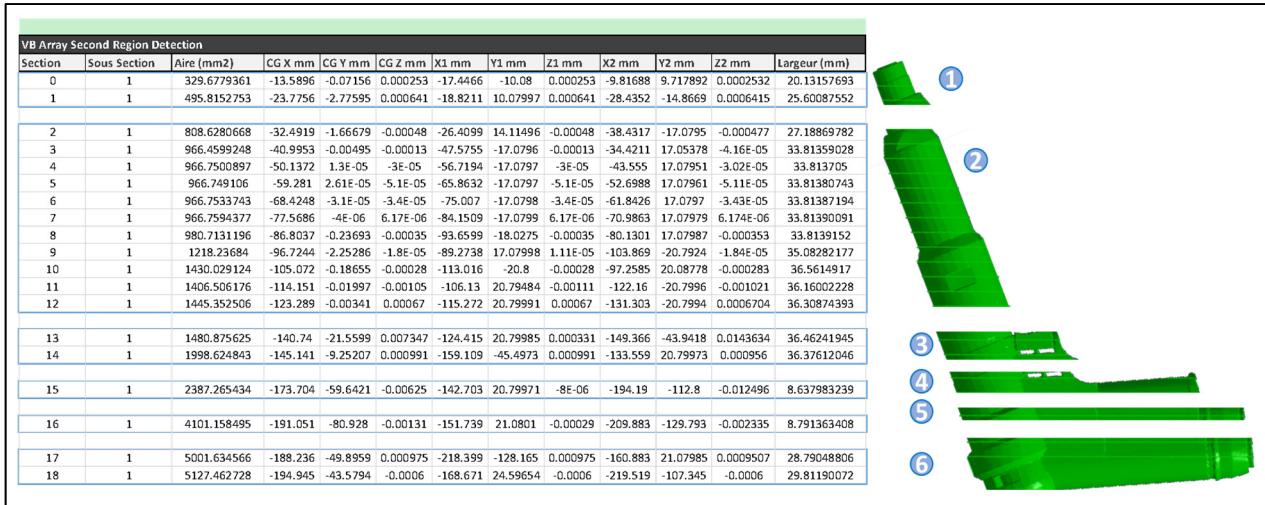


Figure 4.25 : Segmentation en régions de la visseuse pistolet selon le second balayage

La tête de la visseuse est recherchée par hauteur de région. Dans ce cas de figure, la région 2 vérifie l'ensemble des critères de cette région. L'axe de travail associé est obtenu en effectuant une décomposition en valeurs singulières des CG de la tête.

L'indice de préhension associé à la tête de la visseuse est directement extrait à cette sous-étape du processus qui se concentre principalement sur le corps et la tête de la visseuse: le point de travail de la tête coïncide avec le CG de la face extremaum du balayage pour laquelle l'aire est la plus faible (Figure 4.29).

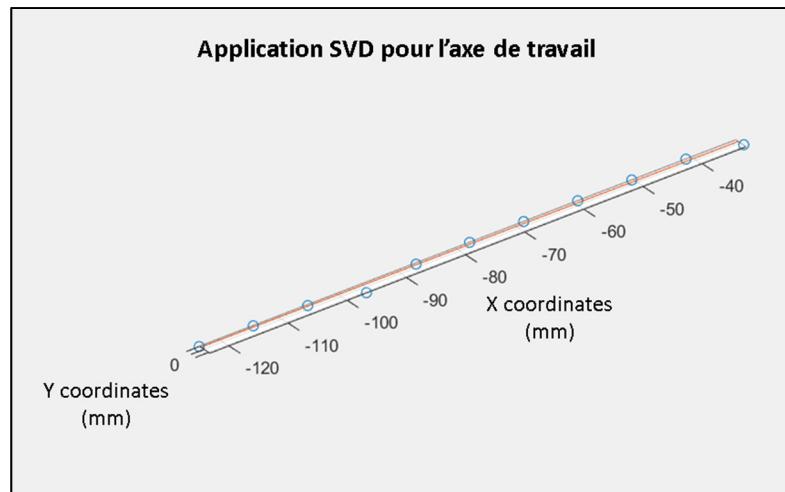


Figure 4.26 – SVD pour l'obtention de l'axe
de la tête de la visseuse

- A la sous-étape F3, un dernier balayage est finalement effectué dans la direction optimale de balayage. Sa direction est perpendiculaire à l'axe de travail. Un nombre de 28 sections est défini par défaut. Les faces confondues sont supprimées et les sections multifaces sont rendues simples en obtenant l'enveloppe convexe des faces. Enfin, les sections appartenant à la tête de la visseuse sont supprimées de manière à faciliter la segmentation de la gâchette. Les propriétés des faces sont ensuite extraites pour chaque section. Puisque toutes les sections sont maintenant composées d'une unique face, la segmentation révèle dans un premier temps un unique tronçon de sections se décomposant en un seul segment. Cinq régions sont enfin segmentées à partir de ce segment (Figure 4.27).

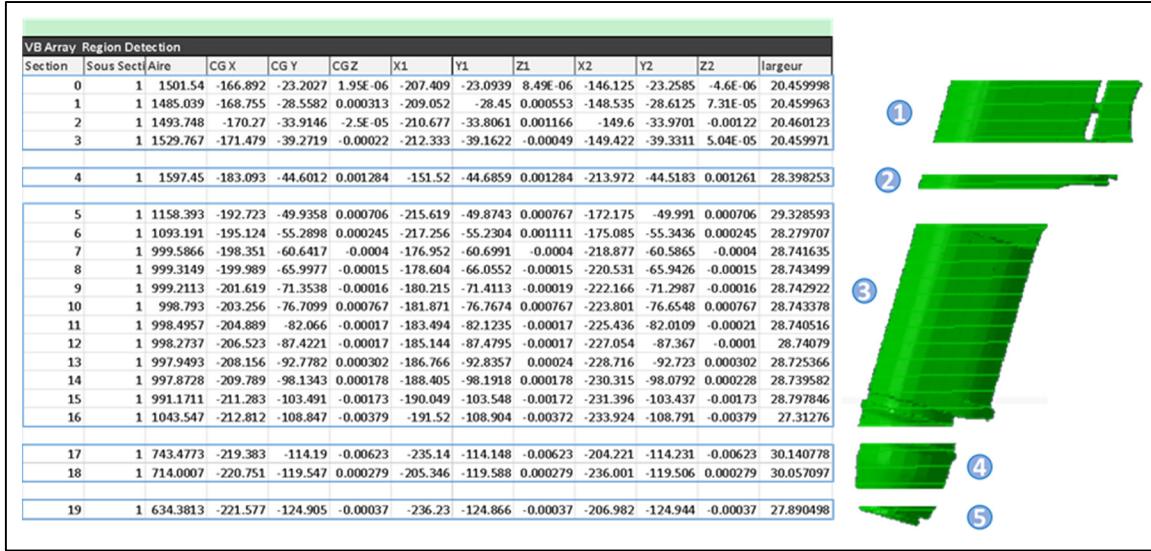


Figure 4.27 : Segmentation en régions de la visseuse pistolet selon la direction optimale de balayage

- Le manche de la visseuse est recherché par hauteur de région. Dans le présent cas de figure, la région 3 satisfait l'ensemble des propriétés d'un manche définies dans le tableau 3.3. La symétrie de cette région indique qu'aucune gâchette n'y est confondue. La gâchette est alors recherchée par proximité au manche en se déplaçant dans la direction de la tête. Selon les critères d'identification d'une gâchette poussoir, la région 1 est finalement identifiée comme une gâchette poussoir.

Les indices de préhension sont alors générés en fonction de la nature de chacune des régions identifiées. Pour rappel, la sous-étape F2 nous a précédemment permis d'obtenir le point d'application associé à la tête de la visseuse. Concernant le manche, les limites de translation de la main sont obtenues en projetant les deux CG des faces extrellums du manche sur l'axe de préhension issu du SVD, ce qui fournit la limite supérieure de l'index du manche et la limite inférieure de l'auriculaire. Les points extrellums longitudinaux du côté fonctionnel de la gâchette sont ensuite projetés sur l'axe de préhension pour former la limite supérieure et inférieure de l'index sur la gâchette, tandis que le point central est préservé pour guider le placement de l'index du mannequin sur la gâchette. Le point supérieur de l'index en provenance du manche est donc remplacé par le point donnant la

limite inférieure de la gâchette. Les indices de préhension générés sont représentés par des points noirs sur la figure 4.29.

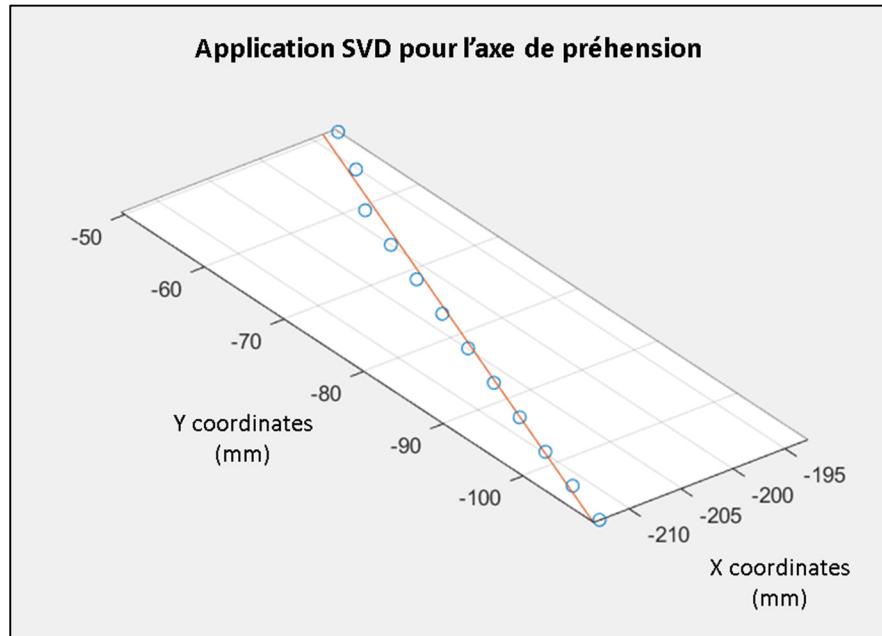


Figure 4.28 : SVD pour l'obtention de l'axe de préhension
de la visseuse pistolet

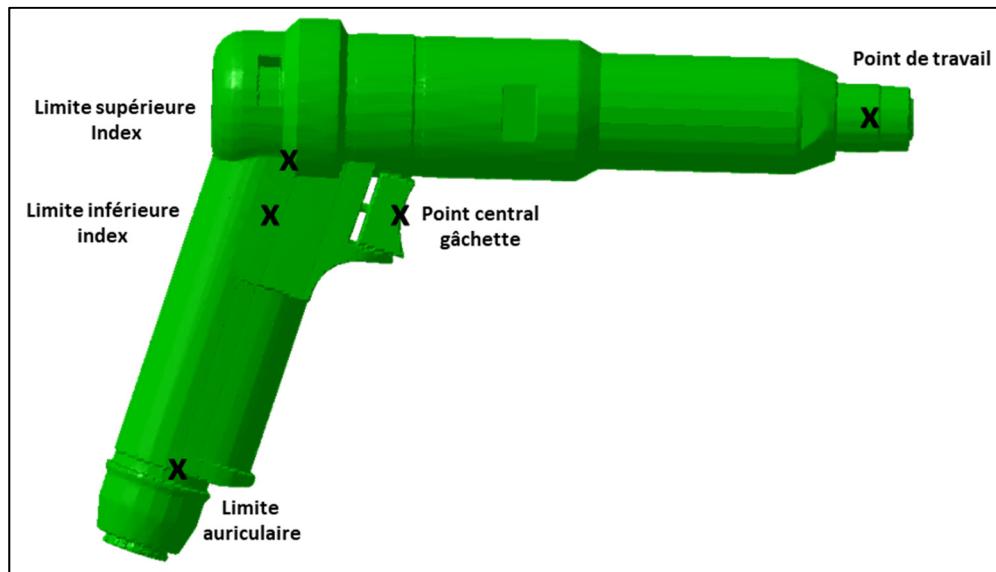


Figure 4.29 : Indices de préhension pour la visseuse pistolet

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5.1 Originalité de la démarche

La méthode proposée est la seule, à la connaissance des auteurs, à permettre d'extraire automatiquement des indices de préhension des modèles 3D d'outils familiers. Cette méthode originale s'appuie sur des techniques simples (balayage de la géométrie 3D pour extraire des sections, analyse des variations des propriétés, classification de régions, etc.) permettant de générer une représentation simplifiée du modèle géométrique d'étude sous la forme d'un squelette. Cette solution génère des indices géométriques agissant comme des guides pour générer la préhension automatique. En effet, les indices permettent de contraindre les degrés de liberté du mannequin virtuel et ainsi de retourner un ensemble de préhensions plausibles prenant en compte l'affordance de l'outil et la tâche à accomplir. Un exemple de fermeture de main, basé sur les indices de préhension générés, est présenté à la figure 5.1. Le SPE est en mesure de générer différentes postures de main plausibles selon les contraintes de positionnement voulues.

En moyenne, la génération d'indice de préhension requiert une trentaine de secondes pour mener à terme les cinq étapes du processus sur des outils à unique direction principale. Concernant les outils à multiples directions principales, la recherche de l'axe optimal de balayage augmente le temps de calcul à environ une minute de traitement pour ces outils. Une intégration industrielle de l'algorithme au sein de la plateforme numérique 3D Expérience de Dassault Système permettra de centraliser le traitement au sein du même logiciel et ainsi de réduire le temps de calcul.

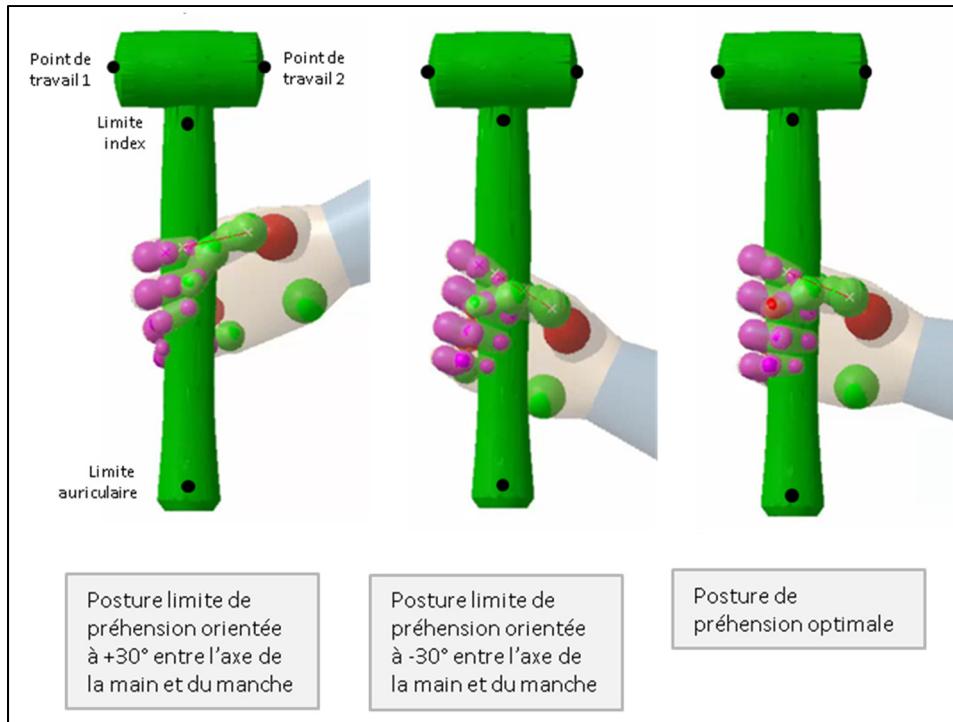


Figure 5.1 : Génération de préhensions par le SPE à partir d'indices de préhension sur un maillet

5.2 Limitations

Cette étude comporte aussi certaines limites. D'abord, la qualité de la segmentation s'avère étroitement liée au balayage effectué sur la géométrie de l'outil et menant à l'extraction de sections. En effet, plus la taille du pas (ou la distance entre les sections) est grande, plus le risque de rater une variation de forme est élevé (figure 5.2). A l'inverse, un pas de balayage trop fin ne parviendrait pas à détecter des variations importantes mais continues. Une solution possible serait d'effectuer deux balayages : un premier, plus grossier, détecterait les divergences, et donc les transitions entre les régions, alors qu'un second, plus fin, aiderait à affiner l'acquisition des données là où cela est nécessaire. Soulignons néanmoins que le nombre de sections effectuées lors de l'étape de balayage est fixé par défaut à 28 et a permis d'obtenir des indices de préhension satisfaisants dans 45 cas sur 47.

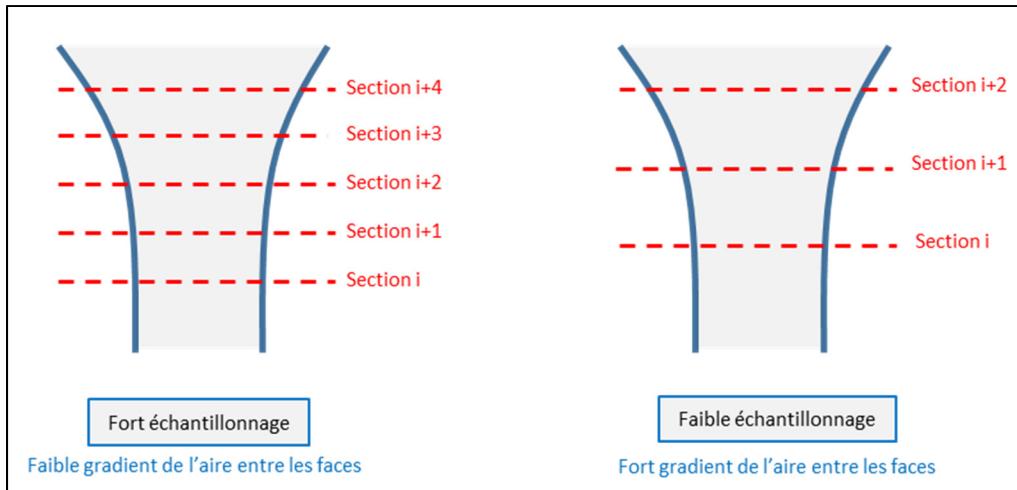


Figure 5.2 : Comportement de l'évolution de l'aire selon l'échantillonnage

Une autre limitation est liée à la détermination de la direction du balayage qui, dans certaines conditions, empêche la reconstruction d'un squelette d'étude exploitable. En effet, cette solution est efficace avec des modèles d'outils pour lesquels la boîte englobante communique directement la direction optimale de balayage. C'est le cas pour les familles d'outil possédant une unique direction principale vérifiant que $L_1 \gg L_2 > L_3$. Cependant, ce n'est pas le cas pour toutes les familles d'outils. Dans certains cas, comme celui des perceuses de forme pistolet, la direction de balayage doit être identifiée à partir d'une étape préliminaire.

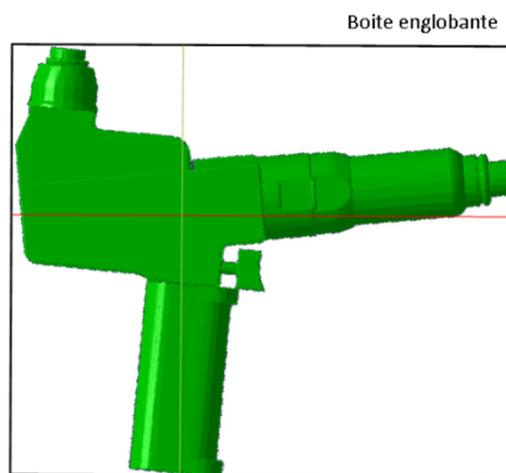


Figure 5.3 : Boite englobante pour une visseuse à embrayage carré

Dans le cas de la visseuse à embrayage carré de la figure 5.3, l'axe principal de la boîte englobante ne permet pas d'obtenir dans un premier temps l'axe de préhension puisque celui-ci est perpendiculaire au manche. Une amélioration possible afin de rechercher l'axe de balayage optimal consisterait à rendre l'algorithme plus polyvalent en étant capable d'identifier si l'axe principal de la boîte englobante est aligné avec la tête ou le manche.

5.3 Réflexion sur la validité de la démarche

L'acceptation, ou non, d'un test de génération d'indices de préhension est basée sur la reproduction du comportement humain à saisir des objets. Le résultat d'extraction d'indices de préhension se comporte comme un booléen : si les indices de préhension sont visuellement positionnés de manière plausible, alors le résultat est considéré comme valide. Dans le cas contraire, le résultat est considéré erroné. Les tests ont été menés sur une base de données composée d'une cinquantaine d'outils. Avec un taux de réussite de 45 outils sur 47, il est possible d'affirmer que la démarche proposée d'analyse des modèles géométriques 3D des familles d'outils sélectionnées par le partenaire industriel fonctionne de manière satisfaisante. Nous sommes donc capables de reconnaître les portions de géométrie d'un outil qui en déterminent la préhension grâce à son affordance et la tâche à réaliser.

Dans l'intérêt de vérifier la robustesse de notre solution il aurait été intéressant d'augmenter le nombre de tests. Néanmoins, il s'avère difficile de bénéficier d'un grand nombre de modèles géométriques de qualité. Comme mentionné précédemment, l'ensemble des modèles d'outils a été récupéré sur la plateforme *Part Supply* de Dassault Systèmes et TracePart, puisqu'il s'agit de modèles de fournisseurs. A l'inverse, de nombreuses plateformes en ligne, telles que TurboSquid ou Sketchfab, proposent une grande diversité de modèles 3D déposés librement par les internautes. L'exploitation de ces modèles pour la validation de notre démarche s'avère difficile puisque de nombreux modèles ne proviennent pas de sources industrielles, mais plutôt du domaine de l'infographie pour lesquelles les contraintes de conception ne sont pas les mêmes que celles de l'ingénierie (topologie, échelle, etc.). Il conviendrait de tester la solution proposée à l'aide de modèles d'outils en provenance de clients de Dassault Systèmes.

CONCLUSION

Ce mémoire de maîtrise propose une méthode d'extraction automatique d'indices de préhensions dans l'objectif d'aboutir à une préhension d'outils tenus à une main considérant la tâche à effectuer. Ces indices de préhension servent de données d'entrée au moteur de positionnement du mannequin virtuel du partenaire industriel. L'intérêt des indices de préhension est de communiquer des degrés de liberté au mannequin permettant de générer un ensemble de préhensions orientées tâche. Cette méthode s'attache ainsi à couvrir la génération d'indices de préhension sur des outils manufacturiers tenus à une main tels que les maillets, tournevis, pinces, visseuses droites et visseuses de forme pistolet.

En partant du principe que les outils étudiés sont familiers, autrement dit que la famille d'outils est initialement connue, la méthode d'extraction des indices de préhension analyse automatiquement le modèle géométrique 3D en réalisant d'abord un balayage de sections. Chaque section se décompose en une ou plusieurs faces desquelles des propriétés géométriques sont extraites (aire, largeur, extremums, CG, asymétrie). Ces propriétés sont ensuite spatialisées logiquement de manière à reconstruire un squelette de l'outil agissant comme un modèle d'étude simplifié. Afin de se rapprocher du comportement humain à identifier des formes élémentaires au sein d'un objet complexe, une stratégie de segmentation permet de découper la géométrie 3D de l'outil en différentes régions. Dans cette logique, la segmentation permet d'identifier successivement des tronçons, des segments, puis des régions.

Un tronçon est défini comme un ensemble de sections successives ayant le même nombre de faces. La spatialisation logique des propriétés permise par la squelettisation assure la segmentation des tronçons en segments. Ainsi, un segment se définit comme un sous-ensemble d'un tronçon qui regroupe des faces successives affiliées en fonction de la proximité de leurs CG. En exploitant les divergences d'évolution de l'aire des faces des segments ainsi que le déplacement des CG, les segments sont finalement segmentés en régions. Une région se définit comme un sous-ensemble d'un segment qui regroupe des faces successives partageant des

propriétés similaires d'aire et de CG. Pour chaque région issue de la segmentation, des propriétés sont extraites (hauteur, largeur moyenne, CG moyen, asymétrie, aire moyenne).

La méthode identifie les régions utiles à la préhension (tête, manche, gâchette) selon une séquence d'identification spécifique à chaque famille d'outils dont le principe général consiste à comparer les valeurs des propriétés des régions avec des intervalles d'acceptation. En effet, l'exploitation directe des propriétés géométriques des régions ne peut suffire à elle seule pour assurer la robustesse de l'identification d'une région utile à la préhension. Ainsi en se basant sur des propriétés de régions évidentes et viables pour l'ensemble des outils d'une famille, il est possible de rechercher des régions utiles dans un ordre spécifique selon leurs positions relatives. Cette séquence d'identification des régions s'adapte selon la famille d'outils considérée.

Une fois le manche, la tête et la gâchette (s'il y a lieu) reconnues, les indices de préhension sont extraits afin de guider le positionnement de la main sur le manche, tout en tenant compte de l'orientation de l'outil potentiellement contrainte par la tête de l'outil. Au total, des indices de préhension ont été générés sur une cinquantaine d'outils manufacturiers. La validation des résultats est basée sur l'évaluation visuelle du positionnement des indices selon la reproduction du comportement humain à saisir des objets. Avec un taux de réussite de 45 outils sur 47, il est possible d'affirmer que la démarche proposée apporte des résultats satisfaisants pour la génération d'indices de préhension. La capacité de la solution à générer des indices de préhension est conditionnée par la direction de balayage, qui s'avère être une étape délicate pour certaines familles d'outils. Une méthode a été présentée pour déterminer la direction optimale de balayage des outils selon leur nature.

Cette démarche originale de génération d'indices de préhension, apporte de nouvelles réponses à la problématique de la préhension automatique. Au regard de la littérature actuelle, il s'agit de la seule solution de préhension automatique pour des outils manufacturiers. Parmi l'ensemble des outils couverts par la démarche, de nombreuses familles peuvent être facilement ajoutées afin d'être, par la suite, automatiquement appréhendées. La squelettisation

des outils par spatialisation des faces des sections permet d'extraire des informations géométriques simples pouvant amener à de nouvelles applications technologiques. A titre d'exemple, les indices géométriques peuvent faciliter l'estimation automatique des couples et des forces transmis par les outils. Finalement, au vu de l'intérêt suscité par les résultats, de futurs travaux peuvent être menés dans l'intérêt d'exporter la notion de génération d'indices de préhension sur des outils inconnus, ou encore permettre la préhension d'outil à deux mains. Pour cela, il convient de réfléchir à une stratégie générale d'automatisation de la recherche de direction optimale de balayage.

ANNEXE I

Résultats de l'extraction d'indices de préhension

Les résultats des tests réalisés afin de valider la méthode proposée sont présentés ici. Au total, 45 tests démontrent un succès, alors que 2 tests se sont révélés infructueux. Pour chaque outil testé, l'image montre l'outil étudié et les indices de préhensions obtenus.

Tableau A 1 - Fiche de résultats pour les maillets

Fiche de résultats												
Famille d'outils : Maillets												
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail 1 X	Point travail 1 Y	Point travail 1 Z	Limite Index X	Limite Index Y	Limite Index Z	Image	Nombre de sections	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
Hammer_340g	4	37,46	0	256,73	0	0	238,39		28	2	2	
Hammer_600g	4	-50,386355	0	256,73	0	0	9,12		28	2	2	
Hammer_1000g	4	-49,66	0	275,39911	0	0	245,8841		28	2	2	
Hammer_1400g	4	49,75	0	298,74	0	0	9,767965		28	2	2	
Hammer_2000g	4	-53,13	0	298,82	0	0	10,66877		28	2	2	

Tableau A 2 - Fiche de résultats pour les tournevis

Fiche de résultats													
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Tête X	Tête Y	Tête Z	Limite Index X	Limite Index Y	Limite Index Z	Famille d'outil : Tournevis	Image	Nombre de sections segmentées	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
screwdrivers1_1275.stl	3	-265,883	0	0	Limité Auri X	Limité Auri Y	0			28	2	2	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Tête X	Tête Y	Tête Z	Limité Index X	Limité Index Y	Limité Index Z			Nombre de sections segmentées	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
screwdrivers1_1178.stl	3	172,11	0	0	Limité Auri X	Limité Auri Y	0			28	3	2	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Tête X	Tête Y	Tête Z	Limité Index X	Limité Index Y	Limité Index Z			Nombre de sections segmentées	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
screwdrivers1_1144.stl	3	-251	0	0	Limité Auri X	Limité Auri Y	0			28	3	2	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Tête X	Tête Y	Tête Z	Limité Index X	Limité Index Y	Limité Index Z			Nombre de sections segmentées	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
ScrewDrivers2_1108.stl	3	-251,62	0	0	Limité Auri X	Limité Auri Y	0			28	2	2	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Tête X	Tête Y	Tête Z	Limité Index X	Limité Index Y	Limité Index Z			Nombre de sections segmentées	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
ScrewDrivers2_1219.stl	3	-309,38	0	0	Limité Auri X	Limité Auri Y	0			28	3	2	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Tête X	Tête Y	Tête Z	Limité Index X	Limité Index Y	Limité Index Z			Nombre de sections segmentées	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
ScrewDrivers2_1242.stl	3	-357,51	0	0	Limité Auri X	Limité Auri Y	0			28	3	2	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Tête X	Tête Y	Tête Z	Limité Index X	Limité Index Y	Limité Index Z			Nombre de sections segmentées	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
ScrewDrivers3_1200.stl	3	-186,75	0	0	Limité Auri X	Limité Auri Y	0			28	3	2	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Tête X	Tête Y	Tête Z	Limité Index X	Limité Index Y	Limité Index Z			Nombre de sections segmentées	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
ScrewDrivers3_1225.stl	3	-227,19	0	0	Limité Auri X	Limité Auri Y	0			28	3	2	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Tête X	Tête Y	Tête Z	Limité Index X	Limité Index Y	Limité Index Z			Nombre de sections segmentées	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
ScrewDrivers3_1270.stl	3	-193,33	0	0	Limité Auri X	Limité Auri Y	0			28	3	2	

Tableau A 3 - Fiche de résultats pour les pinces

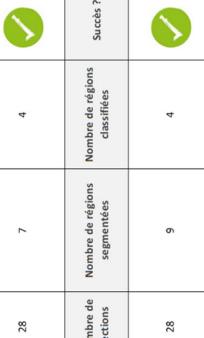
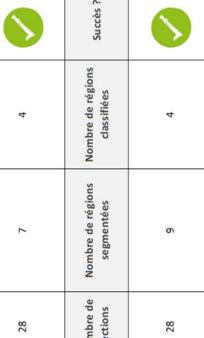
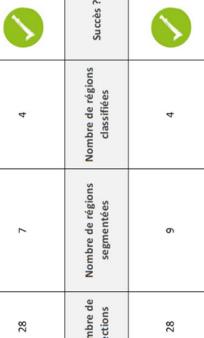
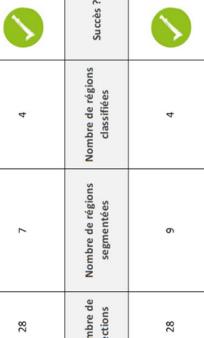
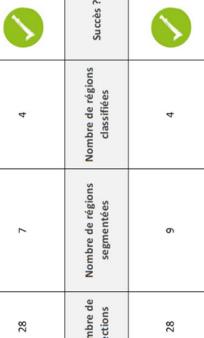
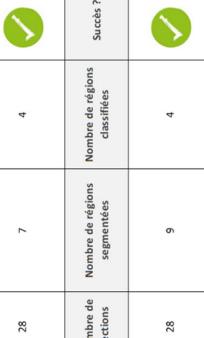
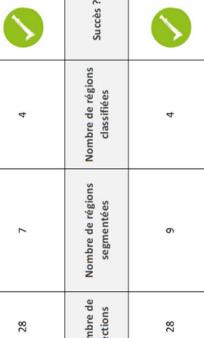
Fiche de résultats																	
Famille d'outils : Pinces																	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite sup axe travail X	Limite sup axe travail Y	Limite sup axe travail Z	Image	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
Plier Type 1	8	-202	-55	0	202	55	0	-7	-9	0	7	9	0		28	7	4
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite inf axe travail X	Limite inf axe travail Y	Limite inf axe travail Z	Image	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
Plier Type 2	8	82,92	13,45	0	82,92	12	0	-13,45	0	10	11,74	0	10		28	7	4
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite inf axe travail X	Limite inf axe travail Y	Limite inf axe travail Z	Image	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
Plier Type 3	8	266	65	0	266	-64	0	38	9,7	0	38	-9,7	0		28	7	4
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite inf axe travail X	Limite inf axe travail Y	Limite inf axe travail Z	Image	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
Plier Type 4	8	74	11	0	74	-11	0	8,47	-11	0	8,47	11	0		28	7	4
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite inf axe travail X	Limite inf axe travail Y	Limite inf axe travail Z	Image	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
Plier Type 5	8	215	55	0	215	55	0	53,19	8	0	53,19	8	0		28	9	4
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite inf axe travail X	Limite inf axe travail Y	Limite inf axe travail Z	Image	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
Plier Type 6	8	Limite Audi X	Limite Audi Y	Limite Audi Z	Limite Audi X	Limite Audi Y	Limite Audi Z	Limite Audi X	Limite Audi Y	Limite Audi Z	Limite inf axe travail X	Limite inf axe travail Y	Limite inf axe travail Z		28	7	4
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite sup axe travail X	Limite sup axe travail Y	Limite sup axe travail Z	Image	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
Plier Type 7	8	Limite Audi X	Limite Audi Y	Limite Audi Z	Limite Audi X	Limite Audi Y	Limite Audi Z	Limite Audi X	Limite Audi Y	Limite Audi Z	Limite inf axe travail X	Limite inf axe travail Y	Limite inf axe travail Z		28	9	4
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Limite sup axe travail X	Limite sup axe travail Y	Limite sup axe travail Z	Image	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?

Tableau A 4 - Fiche de résultats pour les visseuses droites à gâchette levier

Fiche de résultats																		
Famille d'outil : Viseuse droite à gâchette levier																		
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	Limite Index X	Limite Index Y	Limite Index Z	Point central Gâch X	Point central Gâch Y	Point central Gâch Z	Gâchette Index Sup X	Gâchette Index Sup Y	Gâchette Index Sup Z	Nombre de sections	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?	
Viseuse droite 1217	6	-7,88	-0,00646	0	-190,08	0,02	0,002	-134,45	29	0	-189,97	19,17	-0,01		28	6	3	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	Limite Index X	Limite Index Y	Limite Index Z	Point central Gâch X	Point central Gâch Y	Point central Gâch Z	Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z		28	6	3	
Viseuse droite 1250	6	-8,27	0	0	-192,14	0	0	-191,83	21,1	0,04	-166,69	25,56	0		28	6	3	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	Limite Index X	Limite Index Y	Limite Index Z	Point central Gâch X	Point central Gâch Y	Point central Gâch Z	Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z		28	6	3	
Viseuse droite 1274	6	-8,35	0	0	-133	0	0	-185	28	0	-133	38	0		28	6	3	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	Limite Index X	Limite Index Y	Limite Index Z	Point central Gâch X	Point central Gâch Y	Point central Gâch Z	Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z		28	6	3	
Viseuse droite 1312	6	-10,36	0	0	-239,26	0	0	-239,06	22,08	0	-218,25	25,84	0		28	6	3	
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	Limite Index X	Limite Index Y	Limite Index Z	Point central Gâch X	Point central Gâch Y	Point central Gâch Z	Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z		28	6	3	
Viseuse droite 1340	6	11,29	0	0	-272,79	0	0	-249,14	25,68	0	-271,65	21,65	0		28	6	3	

Tableau A 5 - Fiche de résultats pour les visseuses droites à gâchette levier et renvoi d'angle

Fiche de résultats																
Famille d'outils : Visseuse droite à levier à renvoi d'angle																
Num de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	Limite Index X	Limite Index Y	Limite Index Z	Point central Gâch. levier X	Point central Gâch. levier Y	Point central Gâch. levier Z	Gâchette index Inf X	Gâchette index Inf Y	Gâchette index Inf Z			
viseuse_ang[0]_1280	6	-0.34	10.02	0	212.53	31.78	0	Point central Gâch. levier X	Point central Gâch. levier Y	Point central Gâch. levier Z	193.14	59.33	0			
viseuse_ang[0]_1280	6	0	10	0	Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	32.5	0	Point central Gâch. levier X	Point central Gâch. levier Y	Point central Gâch. levier Z	174.47	62.6	0			
viseuse_ang[0]_1239	6	0	10	0	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	202	31	0	Point central Gâch. levier X	Point central Gâch. levier Y	Point central Gâch. levier Z			
viseuse_ang[0]_1239	6	0	10	0	Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	31	0	Point central Gâch. levier X	Point central Gâch. levier Y	Point central Gâch. levier Z	205	10	0			
viseuse_ang[0]_1266	6	0	9	0	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	199.79393	34.12922	-8.7357E-05	Point central Gâch. levier X	Point central Gâch. levier Y	Point central Gâch. levier Z			
viseuse_ang[0]_1266	6	0	9	0	Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	198.67	58.47	0	Point central Gâch. levier X	Point central Gâch. levier Y	Point central Gâch. levier Z	160.3008181	65.2437123	0.002030422		
viseuse_ang[0]_1290	6	192.8	-20.3	0	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	161.732099	34.0946888	-0.001552726	Point central Gâch. levier X	Point central Gâch. levier Y	Point central Gâch. levier Z	179.4867827	61.85882603	0.017393051
viseuse_ang[0]_1290	6	192.8	-20.3	0	Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	231.782427	32.5459017	0.00205226	Point central Gâch. levier X	Point central Gâch. levier Y	Point central Gâch. levier Z	193.05	32.5	0		
viseuse_ang[0]_1290	6	192.8	-20.3	0	Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	212.19	-8.95	0	Point central Gâch. levier X	Point central Gâch. levier Y	Point central Gâch. levier Z	231.58	24.4	0		



Tableau A 6 - Fiche de résultats pour les visseuses droites à gâchette poussoir

Tableau A 7 - Fiche de résultats pour visseuses droites à gâchette pousoir et renvoi d'angle

Fiche de résultats																
Famille d'outils : Visseuse droite/gâchette pousser et renvoi d'angle																
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	Point central X	Point central Y	Point central Z	Gâchette Index inf X	Gâchette Index inf Y	Gâchette Index inf Z	Nombre de sections segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
Ball Retainer 1455	6	0	-30	392	0	0	0	114.23	0	-22.6	99.58	0	0	80.25	8	3
Ball Retainer 1455	6	0	-45.35	508.23	0	0	0	153	0	22.65	140.2	0	0	130.21	7	3
Ball Retainer 1533	6	0	-45.35	508.23	0	0	0	77.23	0	22.65	140.2	0	0	153.3	7	3
Ball Retainer 1508	6	0	-35	487	0	0	0	157.32	0	21.85	142.56	0	0	127.36	8	3
BallRetainer-V2-1419	6	-54	-28	0	208	7	0	213	-27	0	223	6	0	28	6	3
BallRetainer-V2-1419	6	-54	-28	0	327	0	0	213	-27	0	223	6	0	28	6	3

Tableau A 8 - Fiche de résultats pour les visseuses de forme pistolet 1

Fiche de résultats																					
		Famille d'outil : Visseuse de forme pistolet																			
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	Point travail X	Point travail Y	Point travail Z	Limite index X	Limite index Y	Limite index Z	Gâchette X	Gâchette Y	Gâchette Z	Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z	Image	Nombre de sections	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions classifiées	Succès ?
Electric Pistolgrip 1200	6	0	-0.2	144	0.04	.77	36.85	Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	0	-60.2	78.09	0	-67	39.4		28	5	3			
Electric Pistolgrip 1210	6	2,39	0,05	0	0,02	-141	21	Point central Point travail X	Point central Point travail Y	Point central Point travail Z	Gâchette X	Gâchette Y	Gâchette Z	Gâchette Index Sup X	Gâchette Index Sup Y	Gâchette Index Sup Z		0,04	-51,7	43,26	
Electric Pistolgrip 1216	6	0	0	87,32	0	-56	-38	Point central Point travail X	Point central Point travail Y	Point central Point travail Z	Gâchette X	Gâchette Y	Gâchette Z	Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z		126,59	-71,8	0,12	
Femelle	6	-0,03	-0,07	86,52	0	-134,86	-59,3	Point central Point travail X	Point central Point travail Y	Point central Point travail Z	Gâchette X	Gâchette Y	Gâchette Z	Gâchette Index Sup X	Gâchette Index Sup Y	Gâchette Index Sup Z		140,25	-126,16	-0,02	
Pneumatic 1176	6	-8	-0,05	-0,01	-137,87	-50,82	0	Point central Point travail X	Point central Point travail Y	Point central Point travail Z	Gâchette X	Gâchette Y	Gâchette Z	Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z		0	-40	-33	
Pneumatic 1184	6	-5,32	0	0	-153,43	-118,11	0	Point central Point travail X	Point central Point travail Y	Point central Point travail Z	Gâchette X	Gâchette Y	Gâchette Z	Gâchette Index Sup X	Gâchette Index Sup Y	Gâchette Index Sup Z		0	-34,14	-36,34	
					-140,5	-65	0	Point central Point travail X	Point central Point travail Y	Point central Point travail Z	Gâchette X	Gâchette Y	Gâchette Z	Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z		0	-52,39	-40,5	
					Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	-66,63	-43,75											28	5	3	
					-118,11	0												0	-136,43	-44,62	
					-100	-37,41	-1											-132,4	-27,18	0	
					-140,5	-65	0											-136,43	-44,62	0	
					Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	-88	-49,5											-126,72	-57,59	0,01	
					-128	-64,76	0											-123,14	-40	0,02	

Tableau A.9 - Fiche de résultats pour les visseuses de forme pistolet 2

Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail x	Point travail y	Point travail z	Point travail	Limité Index x	Limité Index y	Limité Index z	Point central gâchette X	Point central gâchette Y	Point central gâchette Z	Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z	Image	Nombre de sections	Nombre de régions segmentées	Nombre de régions recherchées	Succès ?
Pneumatic L195	6	-7,43	0	0	-200,39	-114,31	0	Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	-139,82	-32,75	0	-177,54	-20,02	0		28	7	3	✓
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail x	Point travail y	Point travail z	Point travail	Limité Index x	Limité Index y	Limité Index z	Point central gâchette X	Point central gâchette Y	Point central gâchette Z	Gâchette Index Sup X	Gâchette Index Sup Y	Gâchette Index Sup Z		36,76	.	.	
Pneumatic L205	6	-11,21	-1,64	-0,02	-207,8	-114,46	0	Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	-147,86	-33,24	0	-192,46	-40,3	0		28	6	3	✓
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail x	Point travail y	Point travail z	Point travail	Limité Index x	Limité Index y	Limité Index z	Point central gâchette X	Point central gâchette Y	Point central gâchette Z	Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z		23,33	.	.	
Pneumatic L232	6	-13,58	-0,07	0	-213,34	-108,67	0	Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	-147,73	-31,29	0	-188,23	-33,62	0		28	6	3	✓
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail x	Point travail y	Point travail z	Point travail	Limité Index x	Limité Index y	Limité Index z	Point central gâchette X	Point central gâchette Y	Point central gâchette Z	Gâchette Index Sup X	Gâchette Index Sup Y	Gâchette Index Sup Z		28	6	3	✓
Pneumatic L143	6	-5,8	0	0	-193,88	-49,53	0	Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	-147,38	-114,26	0	-183,42	-17,76	0		28	6	3	✓
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail x	Point travail y	Point travail z	Point travail	Limité Index x	Limité Index y	Limité Index z	Point central gâchette X	Point central gâchette Y	Point central gâchette Z	Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z		28	6	3	✓
Pneumatic L143	6	-14,38	-52,11	0	-132,43	-52,11	0	Limite Auri X Limite Auri Y Limite Auri Z	-90,05	-39,24	0	-126,97	-29,42	0		28	6	3	✓
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail x	Point travail y	Point travail z	Point travail	Limité Index x	Limité Index y	Limité Index z	Point central gâchette X	Point central gâchette Y	Point central gâchette Z	Gâchette Index Sup X	Gâchette Index Sup Y	Gâchette Index Sup Z		28	5	0	✗
Pneumatic L143	6											Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z		28	5	0	✗
Nom de l'outil	Nb d'indices de préhension	Point travail x	Point travail y	Point travail z	Point travail	Limité Index x	Limité Index y	Limité Index z	Point central gâchette X	Point central gâchette Y	Point central gâchette Z	Gâchette Index Sup X	Gâchette Index Sup Y	Gâchette Index Sup Z		28	5	0	✗
Pneumatic L143	6											Gâchette Index Inf X	Gâchette Index Inf Y	Gâchette Index Inf Z		28	5	0	✗

BIBLIOGRAPHIE

- Bicchi, A. (1995). On the closure properties of robotic grasping. *The International Journal of Robotics Research*, 14(4), 319-334.
- Bo, L., Ren, X., & Fox, D. (2013). Unsupervised feature learning for RGB-D based object recognition. Dans *Experimental Robotics* (pp. 387-402). Springer.
- Bohg, J., Johnson-Roberson, M., León, B., Felip, J., Gratal, X., Bergström, N., Morales, A. (2011). Mind the gap-robotic grasping under incomplete observation. Dans *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 686-693). IEEE.
- Bohg, J., Morales, A., Asfour, T., & Kragic, D. (2013). Data-driven grasp synthesis—a survey. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(2), 289-309.
- Cutkosky, M. R., & Howe, R. D. (1990). Human grasp choice and robotic grasp analysis. Dans *Dextrous robot hands* (pp. 5-31). Springer.
- Ding, D., Liu, Y.-H., & Wang, S. (2000). Computing 3-D optimal form-closure grasps. Dans *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)* (Vol. 4, pp. 3573-3578). IEEE.
- El-Khoury, S. (2008). *Approche mixte, analytique et par apprentissage, pour la synthèse d'une prise naturelle* (Paris 6). (Thèse de doctorat, Université Campus Pierre et Marie Curie, Paris, France) Repéré à <http://www.theses.fr/2008PA066585>
- Ferrari, C., & Canny, J. F. (1992). Planning optimal grasps. Dans *ICRA* (Vol. 3, pp. 2290-2295).
- Iyer, N., Jayanti, S., Lou, K., Kalyanaraman, Y., & Ramani, K. (2005). Shape-based searching for product lifecycle applications. *Computer-Aided Design*, 37(13), 1435-1446.
- Kalogerakis, E., Hertzmann, A., & Singh, K. (2010). Learning 3D mesh segmentation and labeling. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 29(4), 102.
- Kapandji, I. A. (1980). *Physiologie articulaire* (Vol. 2). Maloine Paris.
- Khan, M. S., Mankar, V. H., Prashanthi, G., & Sathya, G. (2015). Skeletonization of 3D images using 2.5 D and 3D algorithms. Dans *2015 1st International Conference on Next Generation Computing Technologies (NGCT)* (pp. 971-975). IEEE.

- Li, Y., & Pollard, N. S. (2005). A shape matching algorithm for synthesizing humanlike enveloping grasps. Dans *2005 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2005.
- Marton, Z.-C., Pangercic, D., Blodow, N., & Beetz, M. (2011). Combined 2D–3D categorization and classification for multimodal perception systems. *The International Journal of Robotics Research*, 30(11), 1378-1402.
- Meiburger, K., Nam, S., Chung, E., Suggs, L., Emelianov, S., & Molinari, F. (2016). Skeletonization algorithm-based blood vessel quantification using in vivo 3D photoacoustic imaging. *Physics in Medicine & Biology*, 61(22), 7994.
- Miller, A. T., Knoop, S., Christensen, H. I., & Allen, P. K. (2003). Automatic grasp planning using shape primitives. Dans *2003, IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No.03CH37422)
- Myers, A., Teo, C. L., Fermüller, C., & Aloimonos, Y. (2015). Affordance detection of tool parts from geometric features. Dans *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 1374-1381). IEEE.
- Nguyen, V.-D. (1987). Constructing stable grasps in 3D. Dans *Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Vol. 4, pp. 234-239). IEEE.
- Nguyen, V.-D. (1988). Constructing force-closure grasps. *The International Journal of Robotics Research*, 7(3), 3-16.
- Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K., & Chiu, S. N. (2009). *Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams* (Vol. 501). John Wiley & Sons.
- Palágyi, K., & Kuba, A. (1998). A 3D 6-subiteration thinning algorithm for extracting medial lines. *Pattern Recognition Letters*, 19(7), 613-627.
- Tagliasacchi, A., Alhashim, I., Olson, M., & Zhang, H. (2012). Mean curvature skeletons. Dans *Computer Graphics Forum* (Vol. 31, pp. 1735-1744). Wiley Online Library.
- Yamane, K., Kuffner, J. J., & Hodgins, J. K. (2004). Synthesizing animations of human manipulation tasks. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 23(3), 532-539.
- Yang, Y., Lin, H., & Zhang, Y. (2007). Content-based 3-D model retrieval: A survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(6), 1081-1098.
- Zhu, X., & Ding, H. (2004). Planning force-closure grasps on 3-D objects. Dans *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004* (Vol. 2, pp. 1258-1263). IEEE.