

Définition de la préhension en ergonomie virtuelle :  
Vers une démarche automatique basée sur la similarité  
géométrique des objets

par

Yann HALGAND

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.

MONTREAL, LE 05 JUIN 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Yann Halgand, 2018



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**  
**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ**  
**PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

M. Louis Rivest, directeur de mémoire  
Département de génie de la production automatisée 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. Rachid Aissaoui, membre du jury  
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

Mme Julie Charland, examinateur externe  
Dassault Systemes

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

**LE 22 MAI 2018**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**





## REMERCIEMENTS

La réalisation d'une maîtrise n'est pas tâche aisée. L'implication de différentes personnes, de près ou de loin, m'a permis de relever ce défi. Je souhaite les remercier à travers ces lignes.

Je tiens à remercier mon professeur Louis Rivest, d'une part, de m'avoir proposé ce projet. D'autre part, en dehors d'être d'excellent conseil quant au projet et à la recherche, il cumule différentes qualités que j'ai beaucoup appréciées telle que la patience et la bienveillance. Je suis heureux de terminer mes études avec lui car il me laisse un excellent souvenir de l'éducation et de la recherche.

Je remercie Julie Charland d'offrir aux étudiants la possibilité de travailler sur un problème aussi passionnant. Aussi, sa bonne humeur, toujours présente, et sa grande gentillesse m'ont beaucoup touché. Je tiens à remercier aussi David, Hugues et Pierre-Olivier qui m'ont aidé à différents niveaux à réaliser cette maîtrise. Je tiens à remercier également toutes personnes que j'ai pu côtoyer au sein de DS, j'ai passé de bons moments avec eux.

Je tiens à remercier ma femme qui m'a encouragé à poursuivre mes études à travers cette maîtrise. Je tiens finalement à remercier ma famille qui, malgré l'océan qui nous sépare, n'a jamais cessé de me soutenir.



# **DÉFINITION DE LA PRÉHENSION EN ERGONOMIE VIRTUELLE : VERS UNE DÉMARCHE AUTOMATIQUE BASÉE SUR LA SIMILARITÉ GÉOMÉTRIQUE DES OBJETS**

Yann HALGAND

## **RÉSUMÉ**

La simulation informatique, domaine vaste, se voit être de plus en plus utilisée en développement de produits et de processus manufacturiers. Ainsi, il est aujourd'hui possible de simuler un environnement de travail afin, entre autres, d'en évaluer l'ergonomie.

Le travail de positionnement du mannequin virtuel au sein d'une maquette numérique demeure cependant très interactif et peu intuitif. C'est pourquoi Dassault Systèmes a lancé un projet de développement d'un nouveau moteur de positionnement du mannequin. Parmi les objectifs de ce projet se trouve l'automatisation du positionnement du mannequin, ce qui requiert l'automatisation de la définition de la préhension des objets par le mannequin virtuel.

L'objectif général poursuivi dans ce mémoire consiste à évaluer une approche basée sur la similarité géométrique et la transposition de la préhension à des objets similaires, afin de fournir au nouveau moteur de positionnement du mannequin une préhension plausible même pour un outil inconnu du mannequin. Cette approche comporte plusieurs étapes. Lorsqu'un objet inconnu est présenté au mannequin dans l'environnement virtuel, le système cherche dans une base de données d'objets typés un objet géométriquement similaire au nouvel objet. Le système va ensuite transposer l'information de préhension propre à cet objet typé vers le nouvel objet, pour transmettre cette information de préhension au moteur de positionnement du mannequin.

Afin d'évaluer cette solution, une base de données a d'abord été créée. Il a fallu dans un premier temps choisir une liste d'objets tests, en l'occurrence, des outils usuels de l'industrie, tels qu'un marteau, une perceuse, un tournevis, une clé mixte, etc. Pour chacun des outils sélectionnés, une ou plusieurs actions sont considérées. En effet, il peut y avoir, d'une part, plusieurs façons d'utiliser un même outil. Il peut également être nécessaire, d'autre part, de définir des actions 'génériques', telles que « saisir pour déplacer » l'outil.

Dans une seconde étape, nous avons vérifié l'impact de l'anthropométrie sur la préhension. Puisque nous souhaitons enregistrer, pour chaque objet typé, une préhension par couple outil/action, il fallait déterminer si une préhension plausible pour un homme au 50<sup>ème</sup> centile pouvait aussi être plausible pour une femme au 5<sup>ème</sup> centile ou un homme au 95<sup>ème</sup> centile. Si une préhension de référence moyenne s'était avérée inutilisable pour des anthropométries éloignées, il aurait fallu inclure dans la base de données des triplets outil/action/anthropométrie. Les différents essais réalisés montrent que l'impact de l'anthropométrie sur la préhension est limité et qu'il est adéquat d'inclure uniquement la préhension d'un homme au 50<sup>ème</sup> centile au sein de la base de données.

## VIII

Finalement, il fallait évaluer la possibilité de transférer la préhension d'un outil de la base de données à un outil inconnu mais géométriquement similaire. La première étape consiste à retrouver dans la base de données un outil connu géométriquement similaire au nouvel outil. Dassault Systèmes offre son propre moteur de recherche géométrique, et nous avons souhaité tester cette solution. Nous avons observé des résultats encourageants, cependant, certains tests indiquent qu'il reste du travail à faire.

Dans l'hypothèse où la recherche d'outils géométriquement similaires se déroule bien, nous souhaitons évaluer la capacité de transférer l'information de préhension de l'outil typé vers l'outil géométriquement similaire. La méthode examinée consiste à prévoir des éléments géométriques (plan de symétrie, etc.) sur les objets typés, et tenter de retrouver des éléments géométriques équivalents sur le nouvel objet géométriquement similaire. Ces éléments géométriques sont ensuite utilisés comme contraintes de recalage entre les deux outils. Une fois le recalage réalisé, il est possible de transférer la préhension de l'objet typé vers le nouvel objet.

**Mots clés :** mannequin virtuel, préhension, similarité géométrique

# **DEFINITION OF GRASP IN VIRTUAL ERGONOMICS: TOWARDS AN AUTOMATIC APPROACH BASED ON THE GEOMETRIC SIMILARITY OF OBJECTS**

Yann HALGAND

## **ABSTRACT**

Computer simulation, a vast field, is being used more and more in the development of products and manufacturing processes. Thus, it is now possible to simulate a work environment to, among other things, evaluate ergonomics.

The work of positioning the virtual manikin within a digital mock-up remains however very interactive and not very intuitive. That's why Dassault Systèmes has launched a project to develop a new positioning engine for the manikin. Among the objectives of this project is the automation of the positioning of the manikin, which requires the automation of the definition of the grasping of objects by the virtual manikin.

The general objective pursued in this thesis is to evaluate an approach based on geometric similarity and the transposition of the grasp to similar objects, in order to provide the new positioning motor of the manikin a plausible grasp even for an unknown tool of the manikin. This approach involves several steps. When an unknown object is presented to the manikin in the virtual environment, the system looks in a database of typed objects for an object geometrically similar to the new object. The system will then transpose the grasp information specific to this typed object to the new object, to transmit this grasp information to the positioning engine of the manikin.

In order to evaluate this solution, a database was first created. First of all, it was necessary to choose a list of test objects, in this case, the usual industry tools, such as a hammer, a drill, a screwdriver, a combination wrench, and so on. For each of the selected tools, one or more actions are considered. Indeed, there may be, on the one hand, several ways to use the same tool. It may also be necessary, on the other hand, to define 'generic' actions, such as 'grab to move' the tool.

In a second step, we checked the impact of anthropometry on the grasp. Since we want to record, for each typed object, a tool-action pair, it was necessary to determine whether a plausible grasp for a 50th percentile could also be plausible for a woman at the 5th percentile or a 95th percentile. If an average reference grasp had proved unusable for distant anthropometries, it would have been necessary to include tool / action / anthropometry triplets in the database. The various tests carried out show that the impact of anthropometry on grasp is limited and that it is appropriate to include only the grasp of a man at the 50th percentile within the database.

Finally, it was necessary to evaluate the possibility of transferring the grasp of a tool from the database to an unknown but geometrically similar tool. The first step is to find in the

database a tool known geometrically similar to the new tool. Dassault Systèmes offers its own geometric search engine, and we wanted to test this solution. We have seen encouraging results, however, some tests indicate that there is still work to be done.

In the hypothesis that the search for geometrically similar tools is going well, we wanted to evaluate the ability to transfer the grasp information of the typed tool to the geometrically similar tool. The method examined consists of predicting geometric elements (plane of symmetry, etc.) on the typed objects, and trying to find equivalent geometric elements on the new geometrically similar object. These geometric elements are then used as resetting constraints between the two tools. Once the registration is completed, it is possible to transfer the grasp of the typed object to the new object.

**Keywords :** virtual manikin, grasp, geometric similarity

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	21
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE .....	27
1.1 Main humaine - description et fonctionnement .....	27
1.1.1 Ossature et articulations.....	27
1.1.2 Degrés de liberté des articulations .....	31
1.2 Préhension.....	33
1.2.1 Définition .....	33
1.2.2 Historique.....	34
1.2.3 Taxonomie de Thomas Feix.....	36
1.3 Main du mannequin de Delmia.....	38
1.3.1 Description de la main du mannequin de Delmia.....	38
1.3.2 Degrés de liberté et limitations .....	40
1.3.3 Fonctionnement de la préhension dans Delmia .....	44
1.4 L'automatisation de la préhension dans la littérature .....	45
1.5 Conclusion de la revue de littérature .....	50
CHAPITRE 2 CHOIX DE LA REPRÉSENTATION DE LA PRÉHENSION .....	51
2.1 Approche méthodologique.....	51
2.2 Couple outil / action.....	52
2.3 Outils de la base de données .....	53
2.4 Description de la représentation de préhension .....	56
CHAPITRE 3 INFLUENCE DE L'ANTHROPOMÉTRIE .....	61
3.1 L'anthropométrie de la main du mannequin .....	62
3.2 Méthodologie de l'analyse anthropométrique .....	65
3.3 Comparaisons des préhensions de trois anthropométries .....	66
3.4 Validation anthropométrique - plausibilité visuelle.....	77
CHAPITRE 4 APPARIEMENT, RECALAGE ET TRANSPOSITION .....	81
4.1 Recherche d'une géométrie similaire et appariement.....	82
4.2 Recalage et transposition .....	84
4.2.1 Quels indices ? .....	84
4.2.2 Combien d'indices? .....	86
4.2.3 Comment retrouver les indices ?.....	89
CONCLUSION.....	97
RECOMMANDATIONS .....	99
ANNEXE I Préhensions moyennes H50 transposées à F5 et H95 .....	103

ANNEXE II Indices de recalage des outils.....	107
ANNEXE III Possibilité de correction de la position selon l'anthropométrie.....	113
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	115



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1 : Tableau récapitulatif des ddl des articulations de trois modèles : modèle simple, Savescu (Savescu, 2006), Pitarch (Pitarch, 2007).....	33
Tableau 1-2 : Degré de liberté de la main du mannequin de Delmia par articulation .....	40
Tableau 1-3 : Valeurs limites des déplacements articulaires .....	43
Tableau 2-1 : Sélection d'outils.....	55
Tableau 2-2 : Position et orientation de la main par rapport à l'outil.....	58
Tableau 2-3 : Angles articulaires de la main .....	60
Tableau 3-1 : Mesures en centile de la main en fonction de la stature .....	65
Tableau 3-2 : Test de l'ANOVA de la position x.....	68
Tableau 3-3 : Test des étendues multiples de la position X, groupes.....	69
Tableau 3-4 : Test des étendues multiples de la position X, limites.....	69
Tableau 3-5: Longueur de la main des anthropométries F5, H50 et H95 .....	70
Tableau 3-6 : Condensé des résultats statistiques de l'impact de l'anthropométrie sur la préhension .....	71
Tableau 3-7 : Limites des tests des étendues multiples, fe1 fe2 et fe3 des 5 doigts .....	76



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 : Ossature de la main et articulations, tirée de dataabuledu (2014).....	27
Figure 1.2 : Circumduction du pouce, Tirée de Revol, Binder, & Danino (2012) .....	28
Figure 1.3 : L’arche transversale métacarpienne, Tirée de Savescu (2006) .....	29
Figure 1.4 : Adduction/abduction des doigts, Tiré de Clemedicine (2017).....	30
Figure 1.5 : Os du bras, Tiré de Clemedicine (2017).....	30
Figure 1.6 : Flexion/Extension des doigts, Tiré de Clemedicine (2017) .....	31
Figure 1.7 : Classification des préhensions par Schlesinger, Tirée de Savescu (2006).....	34
Figure 1.8 : Préhension de force et préhension de précision de Napier, Tirée de Napier (1956).....	34
Figure 1.9 : Classification de Cutkosky, Tirée de Cutkosky (1990).....	35
Figure 1.10 : Tableau de préhensions de Thomas Feix, Tirée de Feix (2015) .....	37
Figure 1.11 : Types d'opposition, Thomas Feix, Tirée de Feix (2015).....	38
Figure 1.12 : Origine de la position du centre des segments de la main. a) centre de préhension sur le mannequin de Delmia. b) main serrant un cylindre de 1-1/4 pouce de diamètre, tirée de Gordon (1990).....	39
Figure 1.13 : Centre de préhension sur la main d'un mannequin virtuel .....	40
Figure 1.14 : Main du mannequin de Delmia au repos.....	41
Figure 1.15: Phalange proximale pouce, 0 degré (défaut) .....	42
Figure 1.16 : Phalange proximale pouce, 15 degrés (maximum flexion).....	42
Figure 1.17 : Phalange proximale pouce, -40 degrés (maximum extension).....	43
Figure 1.18 : Base de données d'outils Delmia .....	44
Figure 1.19 : Main en position : a) plane, b) sphérique, c) cylindrique, d) pince.....	45
Figure 1.20 : Placement manuel de la main du mannequin sur un outil.....	45

Figure 1.21 : Séparation de la zone de fonction de la zone de préhension d'un objet, Tirée de Shiraki (2014).....	47
Figure 1.22 : Liens entre les différents paramètres de préhension. Tirée de Pitarch ( 2007) .	48
Figure 1.23 : Santos, préhension inadéquate sur un joystick. Tirée de Pitarch (2007) .....	48
Figure 1.24 : Base de données de Miyata (2013), tirée de Miyata (2013) .....	49
Figure 1.25 : Exemple de résultat de la solution de Miyata (2013) tirée de Miyata (2013) ...	49
Figure 2.1 : Possibilités d'action, exemple visseuse. a) saisir la visseuse. b) action inhérente. ....	52
Figure 2.2 : Possibilités d'action, exemple clé à molette. a) visser en tirant. b) visser en poussant. ....	53
Figure 2.3 : Boussole de Catia - Référence et mesure .....	57
Figure 2.4 : Position et orientation de la main/outil.....	58
Figure 2.5 : Numérotation des DDL de la main du mannequin de DELMIA.....	59
Figure 3.1 : Stature du mannequin .....	62
Figure 3.2 : Mesures de la main du mannequin .....	63
Figure 3.3 : Adaptation du centile en fonction de la stature .....	64
Figure 3.4 : Superposition au centre de préhension des mains d'un H95 (en bleu transparent) et d'une F5 (en rouge/violet) .....	65
Figure 3.5 : Mesures entre le repère de l'outil et le repère de la main .....	67
Figure 3.6 : Nuage de points de la position x suivant l'anthropométrie.....	68
Figure 3.7 : Régression linéaire sur le nuage de points de la position X suivant l'anthropométrie.....	70
Figure 3.8 : Régression linéaire sur le nuage de points de l'angle articulaire "pouce fe1" suivant l'anthropométrie .....	72
Figure 3.9 : Régression linéaire sur le nuage de points de l'angle articulaire "pouce fe2" suivant l'anthropométrie .....	73
Figure 3.10 : Nuage de points de l'articulation index fe1 suivant l'anthropométrie.....	73
Figure 3.11 : Nuage de points de l'articulation majeur fe2 suivant l'anthropométrie .....	74

Figure 3.12 : Nuage de points de l'articulation majeur fe3 suivant l'anthropométrie .....	74
Figure 3.13 : Nuage de points de l'articulation annulaire fe1 suivant l'anthropométrie .....	74
Figure 3.14 : Nuage de points de l'articulation annulaire fe2 suivant l'anthropométrie .....	75
Figure 3.15 : Nuage de points de l'articulation auriculaire fe2 suivant l'anthropométrie .....	75
Figure 3.16 : Nuage de points de l'articulation auriculaire fe3 suivant l'anthropométrie .....	75
Figure 3.17 : Préhension clé plate, F5, H50 et H95 .....	78
Figure 3.18 : Préhension pince, F5, H50 et H95 .....	79
Figure 3.19 : Préhension tournevis, F5, H50 et H95 .....	79
Figure 3.20 : Préhension perceuse, F5, H50 et H95 .....	80
Figure 4.1 : Démarche basée sur la similarité géométrique, le recalage des objets appariés et la transposition de la préhension .....	81
Figure 4.2 : Essais avec Exalead OnePart .....	83
Figure 4.3 : Plusieurs solutions possibles, a) coïncidence des têtes fermées, b) coïncidence des centroïdes, c) coïncidence des têtes ouvertes. ....	84
Figure 4.4 : Clés plates superposées .....	85
Figure 4.5 : Transposition de la préhension sur l'outil en fonction du type de préhension .....	86
Figure 4.6 : Exemple d'éléments géométriques à prévoir pour le recalage, clé plate de référence .....	87
Figure 4.7 : Exemple d'éléments géométriques à extraire pour le recalage, clé plate inconnue .....	88
Figure 4.8 : Clés plates, deux solutions de recalage .....	89
Figure 4.9 : Appariement de deux perceuses .....	89
Figure 4.10 : Correspondance des indices, perceuse .....	90
Figure 4.11 : Recalage des deux perceuses .....	90
Figure 4.12 : Préhension transposée vers une perceuse initialement inconnue .....	91
Figure 4.13 : Exemples de transposition vue superposée .....	92

Figure 4.14 : Transposition perceuse .....	93
Figure 4.15 : Transposition clé allen.....	93
Figure 4.16 : Transposition marteau .....	94
Figure 4.17 : Transposition clé mixte .....	94
Figure 4.18 : Transposition tournevis .....	95
Figure 4.19 : Transposition pince.....	95
Figure 4.20 : Transposition petite clé mixte.....	96

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

add/abd : adduction / abduction

anova : Analysis of variance

b-rep : boundary representation

cmc : carpométarcarpienne

ddl : degré de liberté

f/e : flexion / extension

f5 : femme au 5<sup>ème</sup> centile

h50 : homme au 50<sup>ème</sup> centile

h95 : homme au 95<sup>ème</sup> centile

ipd : interphalangienne distal

ipp : interphalangienne proximal

lsd : least significant difference

mcp : métacarpophalangienne

nmp : nouveau moteur de positionnement

rad/uln : déviation radiale/ulnaire

rula : rapid upper limb assesment

tms : trouble musculosquelettique





## INTRODUCTION

Dans les années 70 à 90, l'informatique commence à prendre place au sein des entreprises, en particulier afin de concevoir les produits à l'aide de logiciels de conception assistée par ordinateur. Depuis, ces logiciels ont grandement évolué avec une multitude de nouvelles fonctionnalités permettant d'étudier différents aspects de la conception d'un produit. Une de ces fonctionnalités concerne la possibilité d'intégrer un mannequin humain dans une maquette numérique à des fins de simulations variées. Un domaine très intéressé par cette fonctionnalité est l'ergonomie virtuelle. Valider l'ergonomie d'un produit, la sécurité d'un poste de travail, ou encore la faisabilité des opérations de maintenance sont des exemples de tâches reliées à ce domaine.

Une étude ergonomique permet d'évaluer le confort d'utilisation d'un produit ou d'un poste de travail. Plusieurs méthodes existent, telles que la méthode « rapid upper limb assesment » (RULA), qui amène au calcul d'un score indiquant le risque de trouble musculosquelettique (TMS) associé à une situation donnée. Avec l'arrivée de l'ergonomie virtuelle, les calculs d'évaluation ergonomique peuvent être réalisés directement à partir de la posture du mannequin.

L'ergonomie virtuelle permet donc entre autres de simuler le travail d'un employé à sa station de travail afin d'optimiser celle-ci en améliorant la productivité et le confort, et en s'assurant qu'elle n'engendrera pas de problème pour le travailleur, comme des TMS.

### **Problématique :**

Le travail de positionnement d'un mannequin dans une maquette numérique demeure aujourd'hui encore complexe et peu intuitif. Il repose largement sur l'utilisateur, qui fait évoluer manuellement le positionnement du mannequin au sein de la maquette numérique. Bien que certaines options du logiciel permettent d'accélérer le processus, cette tâche demeure assez fastidieuse et peut parfois prendre plusieurs heures selon l'expérience de l'utilisateur.

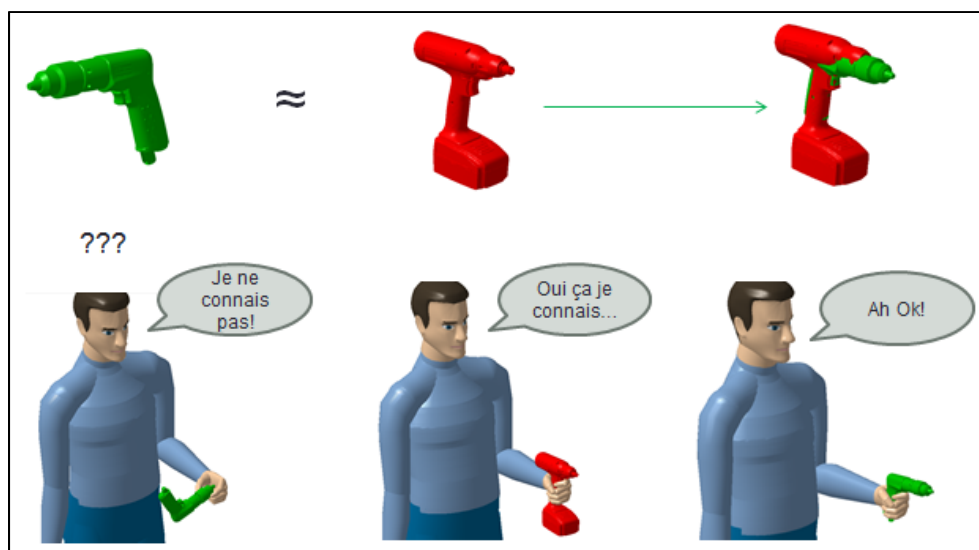
Un projet visant à faciliter le positionnement du mannequin dans une maquette numérique a été entrepris par Dassault Systèmes. Il prévoit le développement d'un nouveau moteur de positionnement qui permettra de positionner le mannequin en demandant un minimum d'information à l'utilisateur, soit l'objet à saisir, le type d'action à effectuer et la main à utiliser. Afin de parvenir à cet objectif, il faut résoudre la problématique de l'automatisation de la définition de la préhension d'un objet dans la maquette numérique. L'objet à saisir peut-être un produit quelconque aussi bien qu'un outil comme une perceuse. Cette problématique a une importance particulière au sein du projet global puisque la posture du mannequin découle en grande partie de la position de ses mains ainsi que de l'effort à effectuer.

Lorsqu'un humain saisit un objet, il existe deux possibilités. Soit l'humain connaît cet objet et se servira de ses connaissances pour le saisir. Soit l'humain ne connaît pas cet objet et va donc essayer de « deviner » comment l'utiliser en fonction de ses formes et de l'action à accomplir. Pour le mannequin virtuel, ces deux situations engendrent deux problèmes assez différents. En effet, générer une préhension pour un objet inconnu nécessite de prendre en compte différents paramètres de l'objet tel que sa masse, son volume, son centre de masse, ses formes, etc. À l'inverse si l'objet est connu, le mannequin peut « savoir » comment prendre cet objet si l'information de préhension est stockée au préalable avec l'objet.

L'approche préconisée dans ce mémoire repose sur l'hypothèse que des objets géométriquement similaires peuvent être pris en main de manières similaires. Elle consiste à transformer chaque cas où l'objet à saisir est inconnu du mannequin en un cas où l'objet est

assimilé à un objet déjà connu, afin de transposer la préhension de l'objet connu à l'objet inconnu. Ainsi, on considère que si un maillet s'apparente à un marteau, et qu'on sait tenir un marteau, on voudra transposer la préhension du marteau à un maillet.

Pour explorer cette approche, il faudra d'abord disposer d'une base de données d'outils de référence dont la préhension sera connue. Ensuite, un moteur de recherche géométrique sera exploité afin de retrouver, au sein de cette base de données, un objet connu géométriquement similaire à l'objet inconnu à saisir. Enfin, la préhension de l'objet connu pourra être transposée à l'objet inconnu. L'essentiel de cette approche est illustré à la Figure\_0 1.



Figure\_0 1 : Démarche basée sur la similarité géométrique, le recalage des objets appariés et la transposition de la préhension

Afin d'évaluer si l'approche préconisée peut fonctionner, la première étape consiste en la création d'une base de données d'objets typés avec leurs préhensions de références. La deuxième étape consiste à réussir l'appariement du nouvel objet à un objet typé de la base de données. Finalement, la dernière étape consiste à transférer la préhension de l'objet typé vers le nouvel objet.

**Objectif global :**

L'objectif général de ce mémoire consiste à évaluer la faisabilité d'utiliser l'appariement basé sur la similarité géométrique et la transposition d'une préhension de référence vers un outil inconnu afin de fournir, au moteur de positionnement du mannequin virtuel, une préhension de référence plausible pour un outil initialement inconnu.

### **Objectifs spécifiques :**

Afin de fournir une préhension de référence pour des outils initialement inconnus par le moteur de positionnement du mannequin, quatre objectifs spécifiques sont visés.

- Le premier objectif vise à déterminer *le format* selon lequel le système devra représenter une préhension de référence afin de la transposer à un outil inconnu.
- Le second objectif vise à déterminer la manière de prendre en compte *l'impact de l'anthropométrie* sur la définition d'une préhension de référence; on veut vérifier si une préhension de référence déterminée pour un homme de taille moyenne demeure plausible pour d'autres anthropométries; l'atteinte de cet objectif permettra de déterminer 'combien' de préhensions de référence devront être établies pour une action et un outil donnés.
- Le troisième objectif vise à évaluer sommairement la possibilité d'utiliser la solution de *recherche et comparaison géométrique* disponible chez Dassault Systèmes pour réaliser l'appariement d'outils géométriquement similaires.
- Le quatrième objectif vise à évaluer la faisabilité de *transposer la préhension de référence* d'un outil connu vers un outil inconnu apparié (donc géométriquement similaire) en identifiant les principaux obstacles et éventuels chemins de solution.

### **Méthodologie :**

Afin de répondre aux différents objectifs, la méthodologie suivante a été retenue.

1. Préparer une base de données d'outils de référence dont la géométrie et les préhensions seront connues.
  - a. Sélectionner les outils de référence. La sélection est réalisée afin d'inclure des outils les plus courants dans la simulation virtuelle en industrie, mais aussi en prenant soin de diversifier les outils par leurs formes, leurs tailles, leurs utilisations.
  - b. Identifier les actions susceptibles d'être réalisées pour chacun des outils (couples outil/action). Chaque outil présente au moins une action inhérente. Cependant, certains outils peuvent être utilisés de plusieurs façons. Aussi, il est possible de tenir compte d'actions plus élémentaires, telles que « saisir » l'outil.
  - c. Déterminer selon quel format la préhension de référence sera emmagasinée dans la base de données d'outils de référence et transmise au moteur de positionnement. La réalisation de cette étape permet d'atteindre le premier objectif spécifique.
  - d. Déterminer les préhensions de référence pour chaque couple outil/action pour une anthropométrie moyenne. Pour chaque couple outil/action, il faut établir une préhension de référence plausible, soit le 'comment' l'outil serait pris en main par un homme de taille moyenne.
  - e. Déterminer si la préhension de référence définie pour un homme de taille moyenne peut être utilisée pour une femme de petite taille ou un homme de grande taille. Cette étape permet de déterminer 'combien' de préhensions de référence seront nécessaires : soit une seule préhension de référence pour un couple outil/action, ou encore plusieurs triplets outil / action / anthropométrie. La réalisation de cette étape permet d'atteindre le second objectif spécifique.
2. Évaluer sommairement Exalead OnePart, de Dassault Systèmes, comme outil d'appariement géométrique. L'évaluation est réalisée avec une petite sélection d'outils, dont chacun possède au moins un modèle géométriquement proche. Le logiciel doit offrir

un score de similarité élevé pour les objets géométriquement similaires, et un score faible dans le cas contraire. La réalisation de cette étape permet d'atteindre le troisième objectif spécifique.

3. Évaluer sommairement la capacité de transposer la préhension de référence d'un outil connu vers un nouvel outil géométriquement similaire. Dans l'hypothèse où l'outil d'appariement fonctionne bien, la transposition de la préhension d'un outil à un autre requiert de réussir le recalage des deux outils en mettant en coïncidence les éléments géométriques les plus pertinents. Cela fait, les deux objets se superposent et la préhension peut être transférée au nouvel objet. La réalisation de cette étape permet d'atteindre le quatrième objectif spécifique.

La structure du mémoire est la suivante. Le chapitre 1 consiste à décrire l'univers de la main et de la préhension, chez l'humain et chez le mannequin de Delmia, afin de poser les concepts généraux ainsi que le vocabulaire nécessaire à la suite du travail. Le chapitre se termine avec une courte revue de littérature sur l'automatisation de la préhension. Le chapitre 2 identifie les différents outils utilisés pour la base de données d'outils de référence, et s'intéresse au mode de représentation de la préhension. Le chapitre 3 explore l'influence de l'anthropométrie sur une préhension, et par conséquent le nombre de préhensions nécessaires à inclure à la base de données d'outils de référence. Le chapitre 4 présente l'évaluation sommaire d'Exalead comme outil d'appariement géométrique, et la capacité de transposer la préhension de référence vers un nouvel outil.

## CHAPITRE 1

### REVUE DE LITTÉRATURE

Afin de répondre aux différents objectifs, il est nécessaire de s'intéresser au fonctionnement de la main humaine, à ce qu'est une préhension, à la main du mannequin virtuel, ainsi qu'à la littérature scientifique relative à l'automatisation de la préhension.

#### 1.1 Main humaine - description et fonctionnement

La main humaine a une structure anatomique complexe. L'agencement particulier de ses os et articulations lui confère une grande liberté de mouvement et lui permet de réaliser un grand nombre d'actions différentes, comme pousser, tirer, saisir, toucher et utiliser un grand nombre d'objets.

##### 1.1.1 Ossature et articulations

L'ossature de la main humaine est formée par 27 os, formant trois groupes distincts, le carpe, le métacarpe et les phalanges (Figure 1.1).

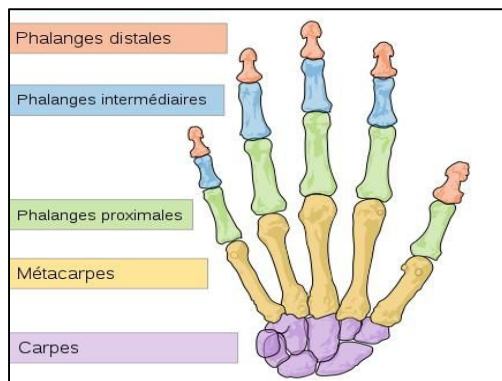


Figure 1.1 : Ossature de la main et articulations, tirée de dataabuledu (2014)

**Le carpe**, composé de huit os disposés sur deux rangées, correspond à l'ossature du poignet.

**Le métacarpe**, composé par les métacarpiens, forme la paume de la main. Comme pour les

doigts, les métacarpiens sont numérotés de 1 (pouce) à 5 (auriculaire). Le premier métacarpien s'articule avec le carpe et forme une articulation « en selle », qui permet les mouvements de circumduction du pouce, décomposable en deux mouvements élémentaires. L'un est perpendiculaire au plan de la paume et permet le mouvement d'antépulsion-rétropulsion. L'autre est parallèle au plan de la paume et permet l'abduction-adduction (Figure 1.2). La circumduction qui en résulte est dite « opposition » lorsqu'elle se fait dans le sens de la fermeture de la pince, et « reposition » lorsqu'elle se fait dans le sens inverse.

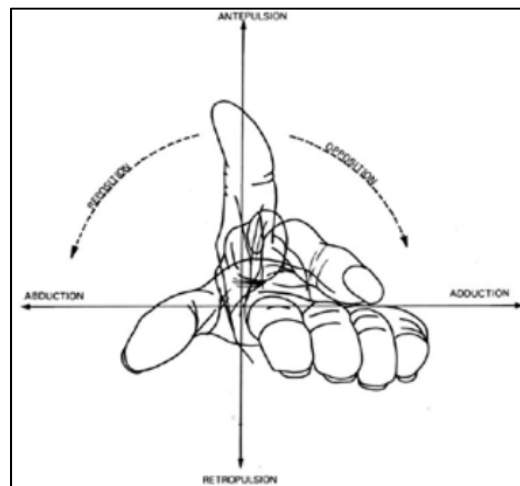


Figure 1.2 : Circumduction du pouce,  
Tirée de Revol, Binder, & Danino  
(2012)

Les articulations carpométacarpiennes (CMC) 2 à 5 ont quant à elles une liberté de mouvement très limitée, mais cependant existante, permettant l'arche de la paume (Figure 1.3).



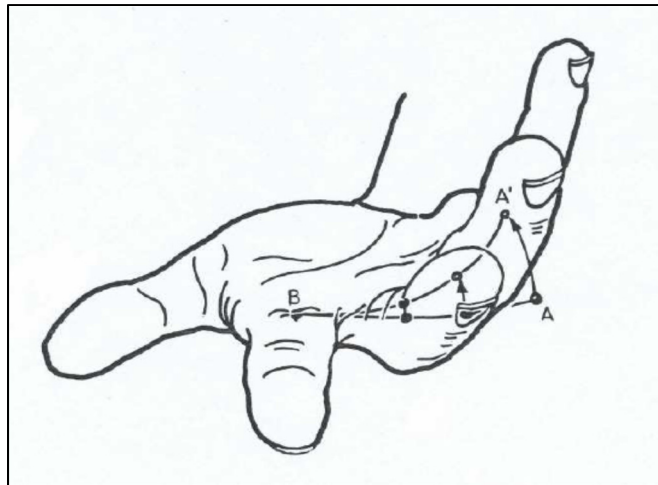


Figure 1.3 : L'arche transversale métacarpienne,  
Tirée de Savescu (2006)

**Les phalanges** forment les doigts qui en comprennent trois, proximales, intermédiaires ou moyennes, et distales. Seul le pouce n'est composé que de 2 phalanges. Les phalanges proximales sont jointes avec leurs métacarpiens respectifs et forment les articulations métacarpophalangiennes (MCP). Ces articulations permettent un mouvement de flexion/extension (F/E) mais aussi adduction/abduction (Add/Abd). Les phalanges intermédiaires sont liées aux phalanges proximales et forment les articulations interphalangiennes proximales (IPP) qui permettent un mouvement de F/E. Les phalanges distales sont liées aux phalanges intermédiaires et forment les articulations interphalangiennes distales (IPD) qui permettent un mouvement de F/E. Il est à noter que l'abduction et l'adduction des articulations métacarpophalangiennes voient leur sens être inversé autour du troisième doigt (Figure 1.4).

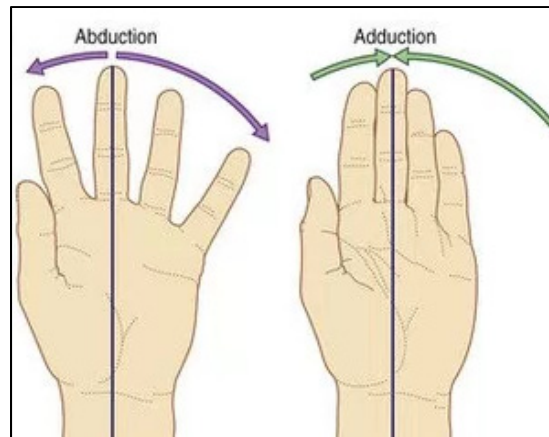


Figure 1.4 : Adduction/abduction des doigts, Tiré de Clemedicine (2017)

Un autre terme permet de s'affranchir de cette distinction, il s'agit de déviation radiale/ulnaire (rad/uln). Le sens du mouvement est décrit par l'ossature de l'avant-bras. Celui-ci contient deux os, l'ulna et le radius. Si le doigt se déplace vers le pouce, on parle de déviation radiale, tandis que s'il se déplace dans la direction opposée, on parle de déviation ulnaire (Figure 1.5).

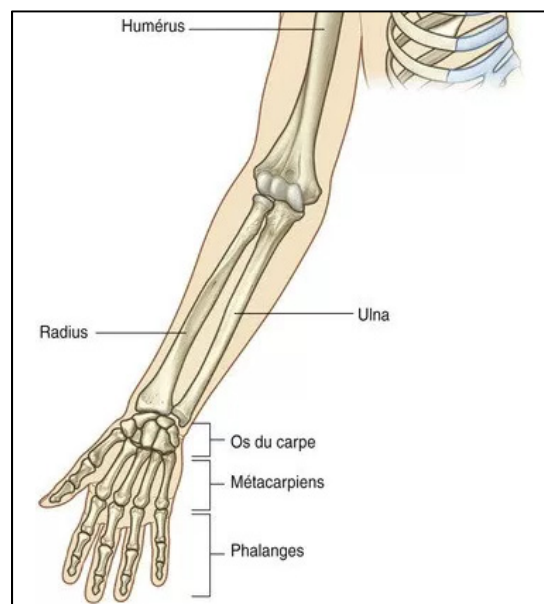


Figure 1.5 : Os du bras, Tiré de Clemedicine (2017)

Finalement, les articulations de la main peuvent toutes effectuer les mouvements de flexion, lorsque la direction du mouvement est vers l'intérieur de la main, et d'extension lorsque le mouvement est vers l'extérieur (Figure 1.6).

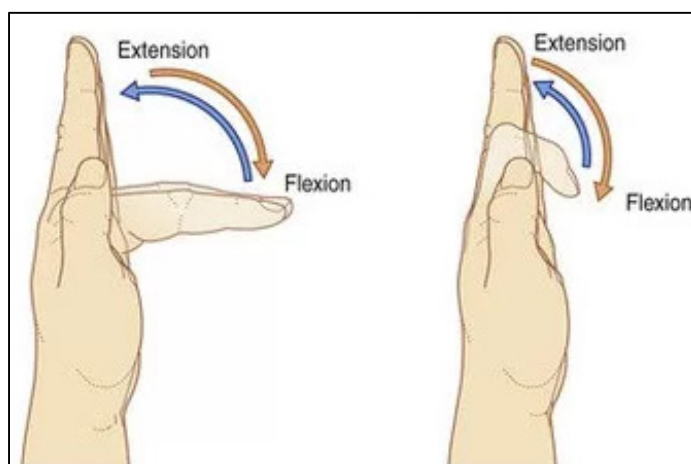


Figure 1.6 : Flexion/Extension des doigts, Tiré de Clemedicine (2017)

### 1.1.2 Degrés de liberté des articulations

Afin de pouvoir simuler le comportement de la main humaine sur ordinateur, il faut associer des degrés de liberté aux différentes articulations.

En mécanique, on appelle degré de liberté (DDL) les mouvements relatifs possibles d'un objet par rapport à un autre suivant un axe. Il existe six degrés de liberté, trois en rotation et trois en translation autour d'axes fixe formant un repère orthogonal.

La plupart des articulations sont simples et un consensus existe à travers la communauté scientifique quant au choix du nombre de degrés de liberté à leur accorder. D'ailleurs, ce qui est considéré comme étant un modèle simple dans l'univers de la simulation de la main humaine, correspond à un modèle où chacun des doigts présente 4 DDL, soit deux articulations F/E, et une articulation F/E et Abd/add. La main du mannequin de DELMIA, sujet de ce mémoire, est un modèle simple.

Cependant, l'articulation CMC du pouce, de l'annulaire et de l'auriculaire, ainsi que l'articulation MCP du pouce sont sujettes à discussion. Par exemple, deux chercheurs ayant travaillé sur la modélisation de la main humaine ont montré quelques divergences quant au choix des degrés de liberté des articulations. On retrouve dans la thèse de Savescu (Savescu, 2006) une comparaison de son modèle avec un modèle simple, tandis que Pitarch (Pitarch, 2007) explique dans sa thèse vouloir construire une main virtuelle humaine afin de simuler la main humaine le plus réalistement possible.

**IPD et IPP :** Les articulations interphalangiennes proximale et distale se comportent de la même façon et permettent une F/E, ce qui correspond à un degré de liberté.

**MCP :** Les articulations métacarpophalangiennes des 4 doigts autres que le pouce permettent la F/E ainsi que la déviation ulnaire/radiale, ce qui correspond à 2 degrés de liberté. L'articulation MCP du pouce permet la F/E, ce qui correspond à un degré de liberté. Cependant, Pitarch (Pitarch, 2007) préfère considérer 2 degrés de liberté ajoutant un mouvement d'Add/Abd.

**CMC :** Les articulations carpométacarpiennes des 4 doigts autres que le pouce ont un mouvement relativement limité qui a mené les chercheurs de différents domaines à les ignorer. Pourtant, Pitarch (Pitarch, 2007) et Savescu (Savescu, 2006) ont montré que les considérer permettait une meilleure simulation de préhension. Cependant, ils ne sont pas d'accord sur le nombre de degrés de liberté à leur accorder, soit un ou deux, et ne sont pas non plus d'accord sur le nombre de doigts à considérer. Les articulations CMC génèrent un mouvement permettant l'arche de la paume qui se retrouve beaucoup dans les préhensions. La Figure 1.3 montre cette particularité et suggère que le mouvement est le plus important au plus proche du côté de l'ulna. L'articulation CMC du pouce est complexe. Elle a été souvent simplifiée à 2 degrés de liberté F/E et Add/Abd, mais Savescu (Savescu, 2006) montre que l'ajout d'un degré de liberté lié au mouvement des 2 autres permet une meilleure simulation. Finalement, on a un total de 20 à 26 degrés (Tableau 1-1) de liberté pour la main, sans compter le poignet, en fonction des différentes considérations, ou, autrement dit, du niveau

de précision que l'on souhaite atteindre. Il est important de comprendre que l'ajout de degré de liberté complexifie le problème, les simulations et les temps de calcul pour un ordinateur qui simulera des préhensions.

Tableau 1-1 : Tableau récapitulatif des ddl des articulations de trois modèles : modèle simple, Savescu (Savescu, 2006), Pitarch (Pitarch, 2007)

	<b>Pouce</b>	<b>Index</b>	<b>Majeur</b>	<b>Annulaire</b>	<b>auriculaire</b>
CMC	2,3,2	0	0	0,1,2	0,1,2
MCP	1,1,2	2	2	2	2
IPP	/	1	1	1	1
IPD	1	1	1	1	1

## 1.2 Préhension

### 1.2.1 Définition

« La préhension est une faculté exécutée par l'intermédiaire d'un organe approprié et permet de saisir. Le crabe refermant ses pinces sur un objet effectue une préhension tout comme le singe s'accrochant à une branche d'arbre. Mais c'est l'humain qui a l'organe le plus développé et qui lui permet des préhensions complexes. Cela est dû à la capacité chez l'homme de pouvoir opposer le pouce à chacun des autres doigts, avec une grande amplitude. » (Kapandji, 1980).

La structure particulière de la main humaine, et sa particularité de pouvoir opposer le pouce aux autres doigts lui confèrent un grand nombre de possibilités de préhension applicables à des objets de tailles et de formes différentes. Aussi, saisir un même objet peut se faire d'une multitude de façons différentes. En effet, un objet peut être saisi afin de réaliser une variété d'actions, et plusieurs préhensions peuvent être réalisées pour une action. Plusieurs chercheurs de différents domaines ont cherché à catégoriser ces préhensions.

### 1.2.2 Historique

Dans un premier temps, la variété de manières dont l'humain peut saisir un objet engendre la classification en lien avec la forme et la taille des objets. On retrouve alors une classification des préhensions tel que proposé par Schlesinger (Schlesinger, 1919), qui classifia les préhensions en 6 catégories : cylindrique, digitale, crochet, palmaire, sphérique et latérale.

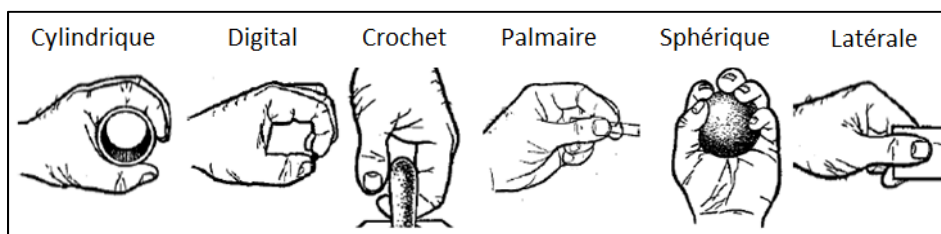


Figure 1.7 : Classification des préhensions par Schlesinger, Tirée de Savescu (2006)

Napier (Napier, 1956) explique par ailleurs que le but de la préhension, soit la raison pour laquelle on doit saisir l'objet, est plus important que la forme, la texture et la masse. Ainsi, la classification doit se faire en deux groupes, les postures de forces, où l'objet est enfermé dans la main contre la paume, et les postures de précision, où seuls les doigts sont utilisés pour saisir l'objet (Figure 1.8).

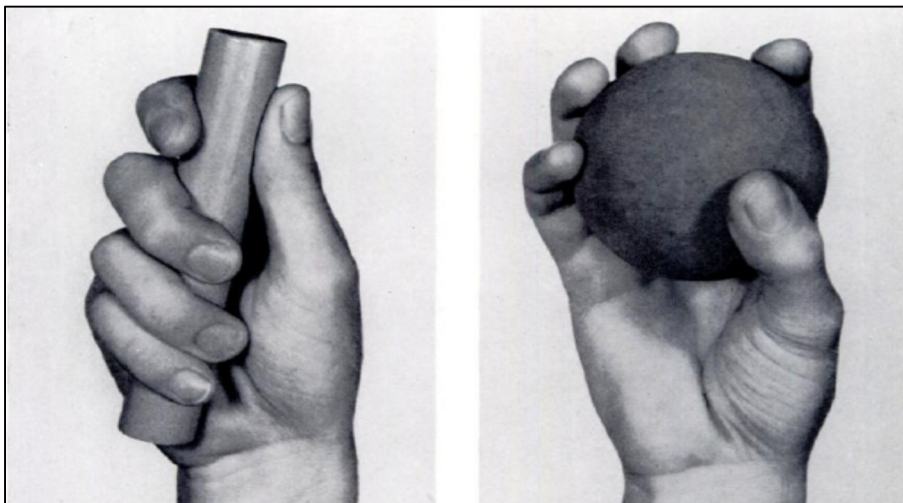


Figure 1.8 : Préhension de force et préhension de précision de Napier, Tirée de Napier (1956)

Cutkosky (Cutkosky, 1990) a réalisé une taxonomie afin de prendre en compte les préhensions que l'on retrouve dans un milieu manufacturier, en séparant les possibilités de préhension de force de celles de précision tel que suggéré par Napier (1956), et se retrouve avec un total de 16 catégories classées dans un arbre.

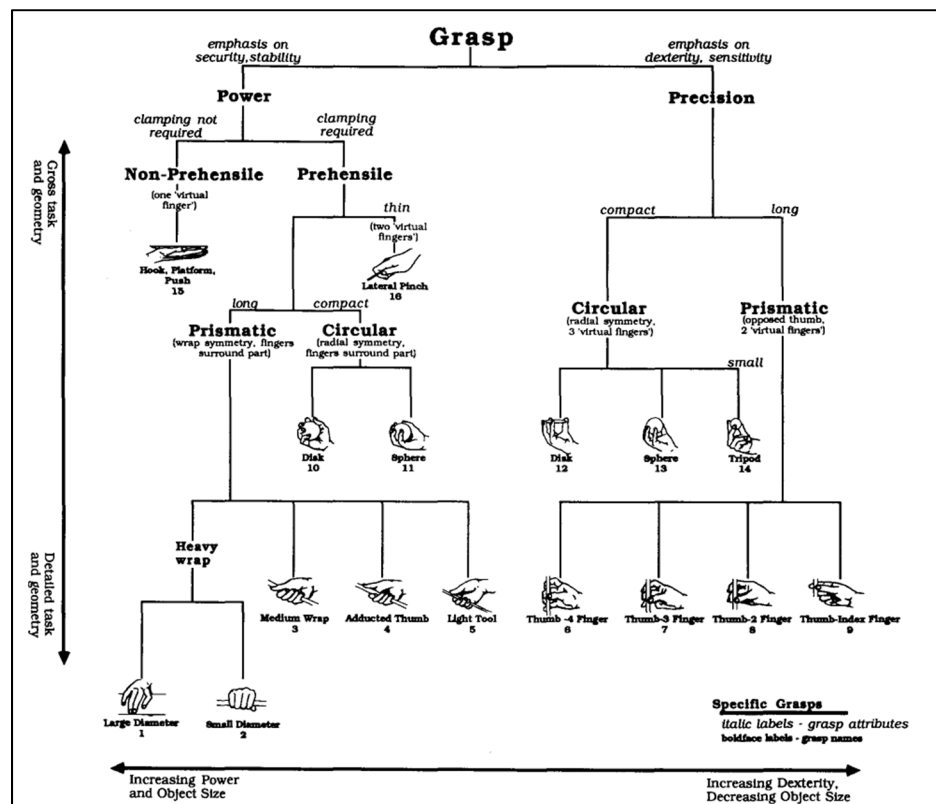


Figure 1.9 : Classification de Cutkosky, Tirée de Cutkosky (1990)

Pour compléter l'historique, et sans être exhaustif, on retrouve différents auteurs ayant travaillé sur une classification des préhensions que voici :

- Slocum 1946 - 3 catégories
- Cooney 1977 - 4 catégories
- Kamakura 1980 - 14 catégories
- Lister 1984 - 8 catégories
- Elliot 1984 - 16 catégories
- Lyons 1985 - 3 catégories
- Kroemer 1986 - 8 catégories

- Kang 1992 - 12 catégories
- Light 2002 - 6 catégories
- Edwards 2002 - 23 catégories
- Feix 2015 - 33 catégories

### 1.2.3 Taxonomie de Thomas Feix

Comme on vient de le voir, plusieurs chercheurs se sont intéressés à classifier les préhensions disponibles à l'humain, en abordant le problème de différentes façons, ce qui résulte en une variété de classifications allant du plus simple au plus complexe. Thomas Feix (Feix, 2015) a travaillé sur les préhensions et a classifié dans un tableau toutes les catégories issues de ces différents auteurs en précisant les liens entre les catégories, quand ils existent.

Ainsi, cette étude, qui semble être aujourd'hui la référence, montre une taxonomie des préhensions humaines, prenant en considération les différentes études passées. En analysant la littérature, il a trouvé 211 exemples de préhensions qu'il a classifiées en 17 préhensions différentes, que l'on peut étendre à 33 en considérant la forme et la taille de l'objet (Figure 1.10).

On observe dans ce tableau 3 colonnes : « Power », « Intermediate » et « precision ». Une préhension de force entraîne une relation rigide entre la main et l'objet. Le mouvement de celui-ci ne peut alors être généré que par le mouvement du bras. Au contraire, dans une préhension de précision, la main est capable de bouger l'objet. Finalement, une préhension intermédiaire contient des éléments de préhension de force et des éléments de préhension de précision.

Les 2 lignes que l'on observe, « Thumb abducted » et « Thumb adducted », se différencient par la position du pouce par rapport au reste de la main. « Thumb abducted » correspond à une opposition du pouce aux autres doigts, par exemple quand on prend un verre d'eau pour boire. « Thumb adducted » correspond à une position du pouce naturelle, ou autrement dit



perpendiculaire aux autres doigts. C'est une position que l'on retrouve par exemple avec le couteau quand on l'a dans la main à table.

Une autre information que l'on retrouve dans le tableau est le type d'opposition, qui peut être palmaire, digitale ou latérale (Figure 1.11). La majorité des préhensions d'opposition à la paume (« palm opposition ») sont de type force tandis que la majorité des préhensions d'opposition digitale (« pad opposition ») sont de types précision. La dernière information que l'on retrouve est le « virtual finger » (VF). Cela correspond aux doigts qui sont en opposition avec la paume ou le pouce. Par exemple, si pour une préhension il est écrit 2-5 dans « VF » et que la préhension est palmaire, alors les 4 doigts de l'index à l'auriculaire sont impliqués dans la préhension en opposition à la paume.

Opp: VF:	Power					Intermediate			Precision					
	Palm		Pad			Side			Pad				Side	
	3-5	2-5	2	2-3	2-4	2-5	2	3	3-4	2	2-3	2-4	2-5	3
Thumb Abducted		1: Large Diameter 2: Small Diameter 3: Medium Wrap 10: Power Disk 11: Power Sphere	31: Ring	28: Sphere Finger	18: Extension Type 26: Sphere 4-Finger	19: Distal Type	23: Adduction Grip		21: Tripod Variation	9: Palmar Pinch 24: Tip Pinch 33: Inferior Pincer	8: Prismatic 2 Finger 14: Tripod	7: Prismatic 3 Finger 27: Quadpod	6: Prismatic 4 Finger 12: Precision Disk 13: Precision Sphere	20: Writing Tripod
Thumb Adducted	17: Index Finger Extension	4: Adducted Thumb 5: Light Tool 15: Fixed Hook 30: Palmar					16: Lateral 29: Stick 32: Ventral	25: Lateral Tripod					22: Parallel Extension	

Figure 1.10 : Tableau de préhensions de Thomas Feix, Tirée de Feix (2015)

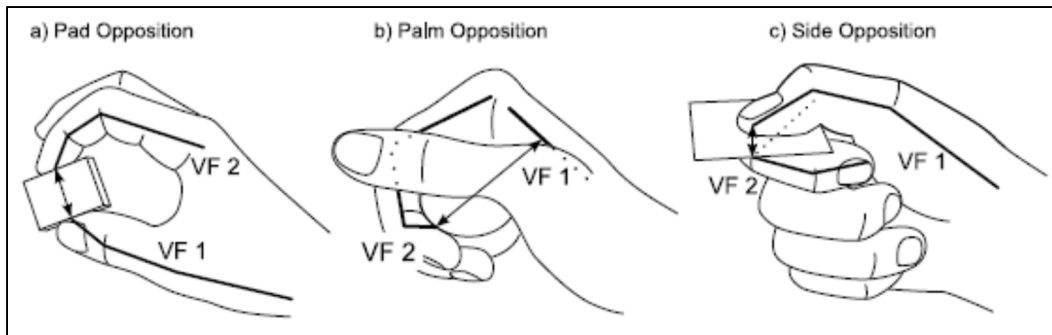


Figure 1.11 : Types d'opposition, Thomas Feix, Tirée de Feix (2015)

### 1.3 Main du mannequin de Delmia

La création de Delmia s'appuie sur plusieurs acquisitions réalisées par Dassault Systèmes. DENEb, acquis en décembre 1997 (3DS, 1997), est une compagnie ayant pour mission de fournir des applications de fabrication numérique permettant de définir, simuler et contrôler des processus de fabrication. SAFEWORK, acquis en décembre 1999 (3DS, 1999), est une compagnie permettant l'utilisation de mannequin virtuel dans un environnement numérique pour simuler, démontrer et optimiser la façon dont une tâche spécifique peut être effectuée. EAI-DELTA (3DS, 2000), acquis en mars 2000, est une compagnie qui fournit une gamme de logiciels et d'expertises permettant de définir et simuler des activités de fabrication.

Le 7 juin 2000, Dassault Systèmes annonce la création de la marque Delmia (edubourse, 2000). Celle-ci est axée sur le domaine de la fabrication numérique ou, autrement dit, de réaliser la planification du processus de fabrication, la simulation de robots et la modélisation ergonomique. Dans ce cadre, on retrouve la possibilité de réaliser des simulations numériques intégrant un mannequin humain.

#### 1.3.1 Description de la main du mannequin de Delmia

La main du mannequin de Delmia au sein de CatiaV5 comprend 16 segments et 20 degrés de liberté, 4 pour chacun des doigts. Sur la Figure 1.12, on peut observer les différents segments

de la main. La paume contient plusieurs segments auxquels se rattachent ceux des doigts. Ces segments partent tous du même point.

Il semblerait que ce point ait été défini à partir de « anthropometric survey of US army »<sup>1</sup> (Gordon, 1990). Une des mesures correspond à la distance entre le poignet et le centre d'un cylindre de 1-1/4 pouce de diamètre serré dans la main.

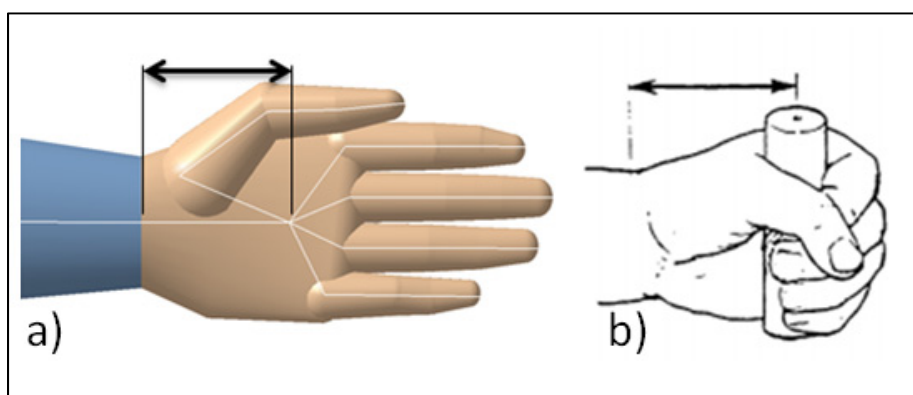


Figure 1.12 : Origine de la position du centre des segments de la main.  
a) centre de préhension sur le mannequin de Delmia. b) main serrant un cylindre de 1-1/4 pouce de diamètre, tirée de Gordon (1990)

Aussi, cette distance permet le positionnement d'un point très utilisé dans le placement de la main dans l'environnement virtuel. Ce point est appelé le centre de préhension et est déporté sur la surface de la main suivant l'axe perpendiculaire à la paume, comme on peut l'observer dans la Figure 1.13.

---

<sup>1</sup> L'information est issue des connaissances des employés de DS, cependant, aucune trace écrite relative à ce choix n'a pu être retrouvée.

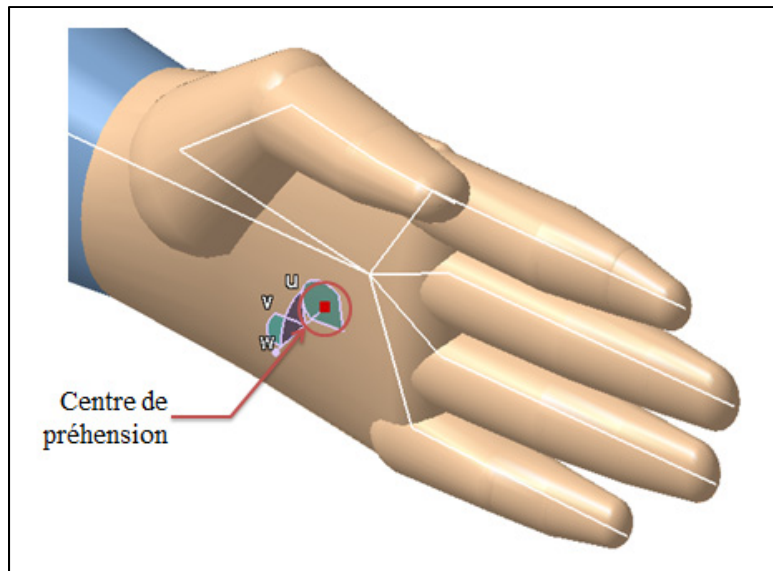


Figure 1.13 : Centre de préhension sur la main d'un mannequin virtuel

### 1.3.2 Degrés de liberté et limitations

La main du mannequin est composée de vingt degrés de liberté (DDL), quatre pour chacun des doigts. Les degrés de liberté de la main du mannequin de Delmia sont équivalents à ceux du modèle simplifié discuté en partie 2.1.3 et ne permettent donc pas l'arc de la paume.

Tableau 1-2 : Degré de liberté de la main du mannequin de Delmia par articulation

	<b>Pouce</b>	<b>Index</b>	<b>Majeur</b>	<b>Annulaire</b>	<b>auriculaire</b>
CMC	2	0	0	0	0
MCP	1	2	2	2	2
IPP	/	1	1	1	1
IPD	1	1	1	1	1

Chaque DDL est contrôlé par une mesure dont la valeur par défaut correspond à 0 degré. Lorsque tous les DDL de la main ont une valeur de 0 degré, alors la main est à plat au repos (Figure 1.14).

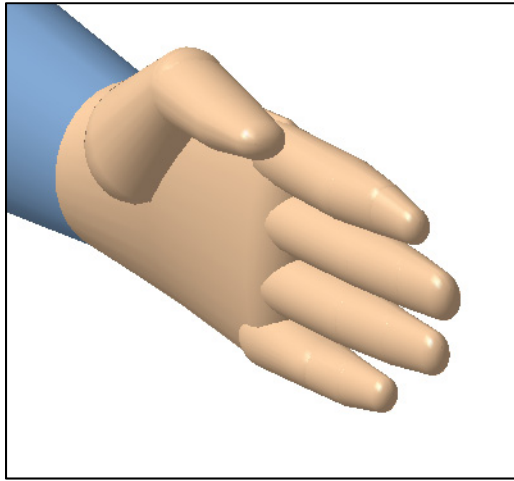


Figure 1.14 : Main du mannequin de Delmia au repos

Chacune des articulations de la main humaine à un déplacement maximal, quelle que soit la direction. Pour le mannequin de Delmia, cela se traduit par une limite inférieure et supérieure des mesures de chaque DDL.

Par exemple, la phalange proximale du pouce est à 0 degré lorsque celle-ci est au repos (Figure 1.15). Lorsque celle-ci est en flexion maximale, la valeur est de 15 degrés (Figure 1.16). Lorsqu'elle est en extension maximale, la valeur devient -40 degrés (Figure 1.17).

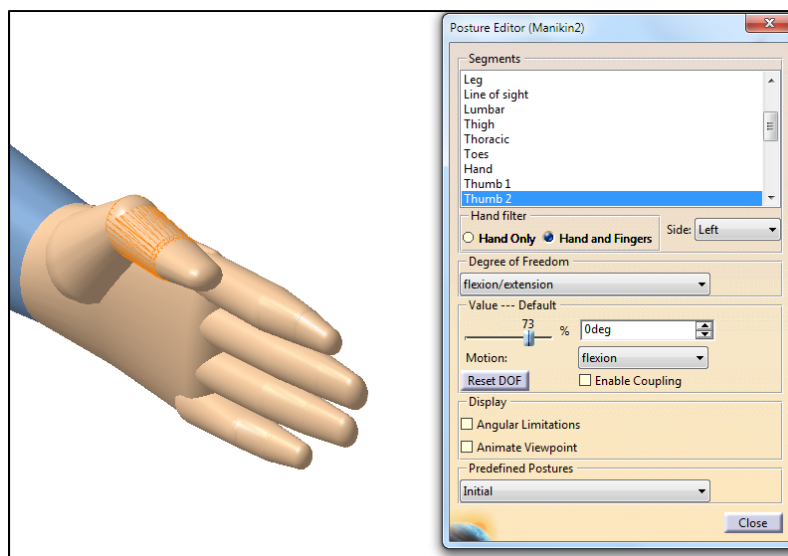


Figure 1.15: Phalange proximale pouce, 0 degré (défaut)

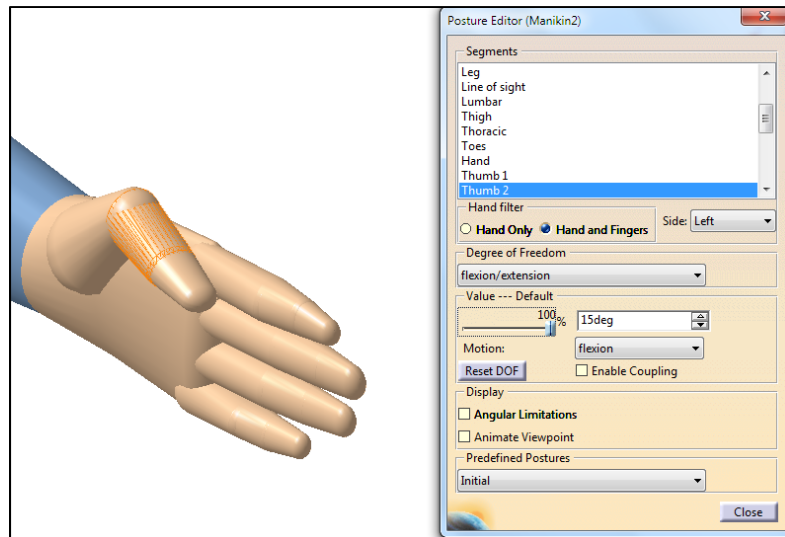


Figure 1.16 : Phalange proximale pouce, 15 degrés (maximum flexion)

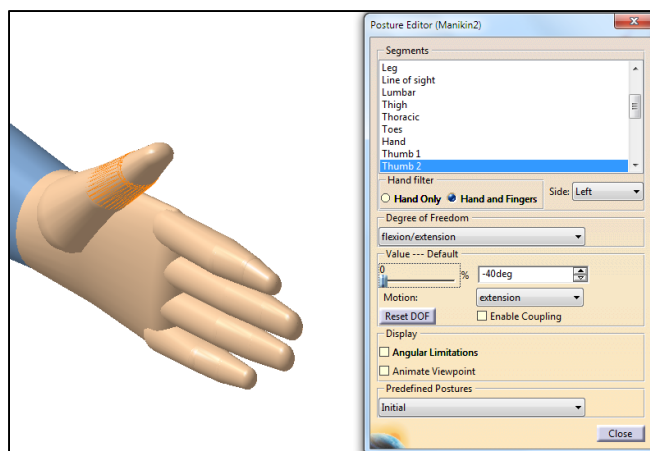


Figure 1.17 : Phalange proximale pouce, -40 degrés (maximum extension)

Ces limites (Tableau 1-3) permettent d'éviter à l'utilisateur des valeurs d'angle trop éloignées de la réalité. Ceci dit, au besoin, ces limites peuvent être dépassées en modifiant certains paramètres.

Tableau 1-3 : Valeurs limites des déplacements articulaires

	<b>Pouce</b>	<b>Index</b>	<b>Majeur</b>	<b>Annulaire</b>	<b>auriculaire</b>
CMC	F/E : Min : -38 Max : 20 ABD/ADD : Min : -7 Max : 80				
MCP	F/E : Min : -40 Max : 15	F/E : Min : -20 Max : 90 devR/devU : Min : -20 Max : 20	F/E : Min : -20 Max : 90 devR/devU : Min : -30 Max : 15	F/E : Min : -20 Max : 90 devR/devU : Min : -30 Max : 15	F/E : Min : -20 Max : 90 devR/devU : Min : -30 Max : 15
IPP		F/E : Min : -2 Max : 100	F/E : Min : -2 Max : 100	F/E : Min : -2 Max : 100	F/E : Min : -2 Max : 100
IPD	F/E : Min : -10 Max : 70	F/E : Min : -2 Max : 70	F/E : Min : -2 Max : 70	F/E : Min : -2 Max : 70	F/E : Min : -2 Max : 70

### 1.3.3 Fonctionnement de la préhension dans Delmia

La génération d'une préhension par le mannequin sur un objet d'un environnement virtuel peut se faire de différentes façons.

Tout d'abord, il existe une petite base de données d'objets auxquels une préhension est associée (Figure 1.18). Cette méthode permet de générer une préhension rapide puisqu'automatique, mais uniquement sur les objets de la base de données. On retrouve des objets courants, mais aussi des outils, tels qu'un crayon, une lampe de poche, un marteau, une perceuse.

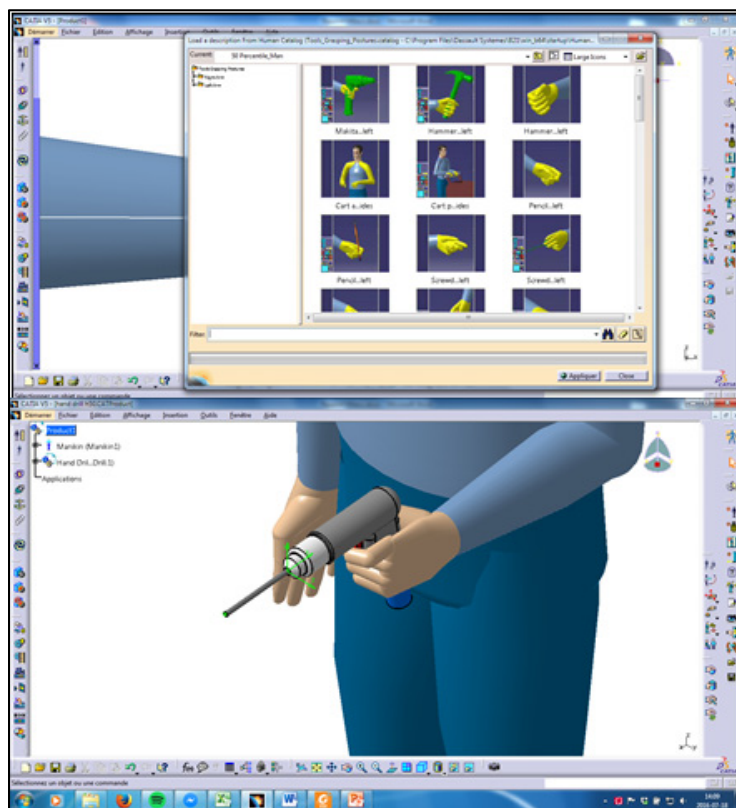


Figure 1.18 : Base de données d'outils Delmia

Il existe une méthode "auto-grasp" (Figure 1.19) qui permet de faire refermer les doigts par le logiciel sur un objet en partant d'une base sphérique, cylindrique ou pince. Cette méthode



demande à ce que la position et l'orientation de la main soient déjà finales, car seuls les doigts bougeront.

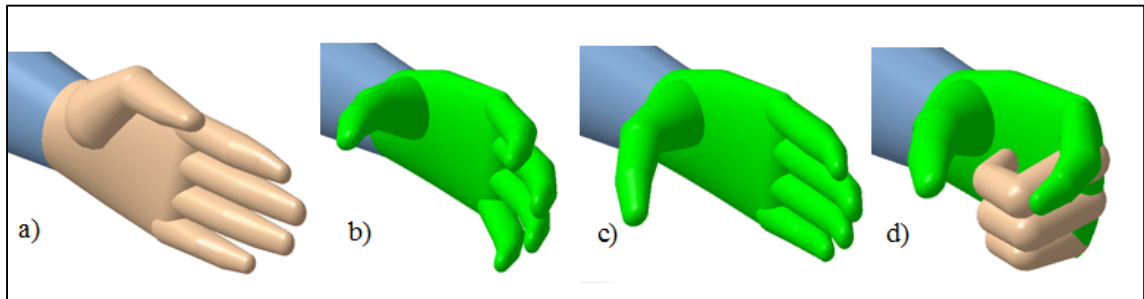


Figure 1.19 : Main en position : a) plane, b) sphérique, c) cylindrique, d) pince

Finalement la dernière méthode est un placement manuel, qui consiste à faire évoluer interactivement les valeurs des angles articulaires. Dans un premier temps, l'outil est placé proche de la main du mannequin. Ensuite, les valeurs des angles articulaires de la main sont modifiées une par une jusqu'à ce que la préhension soit satisfaisante.

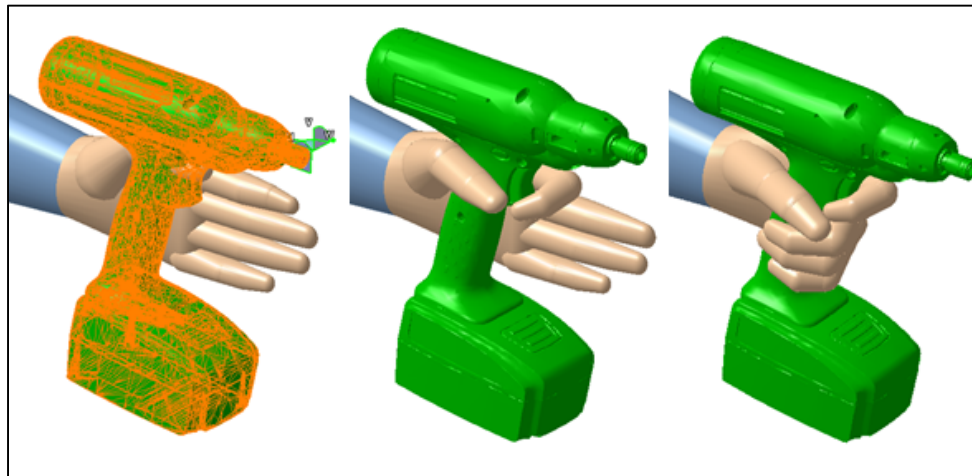


Figure 1.20 : Placement manuel de la main du mannequin sur un outil

#### 1.4 L'automatisation de la préhension dans la littérature

Le problème de l'automatisation de la préhension se retrouve dans différents domaines, tels que la robotique et l'ergonomie virtuelle. Si l'automatisation de la préhension est un défi

commun, l'approche ne sera pas nécessairement la même. La robotique cherche notamment le meilleur moyen de réaliser des préhensions par un actionneur plus ou moins comparable à une main humaine. Dans ce cadre, la stabilité de la préhension est importante et nécessite de prendre en compte les forces en jeu. Dans le domaine de l'ergonomie virtuelle, plusieurs travaux se penchent sur la définition d'une préhension adéquate.

Différents travaux ont été proposés pour générer une préhension de manière automatique. On retrouve donc différentes techniques pour atteindre cet objectif, tel que la prise en compte de la synergie articulaire de la main (Ciocarlie, 2009), permettant de simplifier les mouvements de la main à 2 ou 3 composantes principales (autrement dit, 2 ou 3 ddl au lieu de 20), et donc de simplifier le calcul de la génération de la préhension. D'autres réalisent des bases de données de préhensions prédéfinies, qui permettent de trouver la forme de préhension la plus adaptée à la forme de l'objet (Li, 2007). D'autres ajoutent certaines considérations, telles que l'intention de la préhension; par exemple, une tasse de café vide peut se tenir par le haut, mais elle sera prise par l'anse si l'intention est de boire (Shiraki, 2014). On retrouve aussi des systèmes de génération de préhension se basant sur des caractéristiques liées à l'objet, tel que sa masse et sa géométrie, au mannequin, tel que la taille de la main et le nombre de mains, ou à l'intention d'action suite à la préhension (Pitarch, 2007).

La préhension d'outil présente des particularités par rapport à la préhension d'un objet quelconque. En effet, l'affordance - qui réfère à la relation entre les propriétés d'un objet et la capacité de l'agent (animal, humain, machine, robot) à déterminer comment l'objet peut être utilisé (Norman, 2013) - entre un objet quelconque et un humain génère un champ de possibilités d'actions, dont des préhensions, qui dépendent de l'objet et de l'humain. Or, un outil est associé à une action inhérente qui peut influencer la préhension, telle que la fonction de perçage d'une perceuse, qui demande à l'utilisateur de poser son index sur la gâchette, mais aussi de générer une force dans la direction du perçage.

Différents chercheurs s'intéressent à cette problématique. Par exemple Shiraki (Shiraki, 2014) discute l'idée de différencier les parties de l'objet qui concernent la préhension des parties de l'objet qui concernent son action (Figure 1.21).

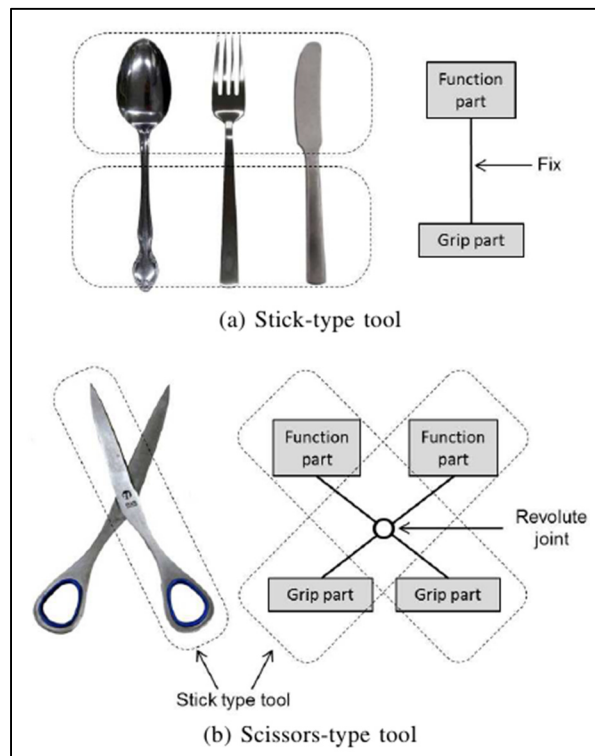


Figure 1.21 : Séparation de la zone de fonction de la zone de préhension d'un objet, Tirée de Shiraki (2014)

Pitarch (Pitarch, 2007) explique les relations qui existent entre l'objet et le mannequin lors d'une préhension dans un environnement virtuel. Les formes de l'objet et ses caractéristiques telles que sa masse, son centre d'inertie, sa température, sa fragilité, l'anthropométrie du mannequin, la tâche à réaliser ainsi que la position des mains et de l'objet dans l'environnement sont des facteurs influençant la préhension (Figure 1.22).

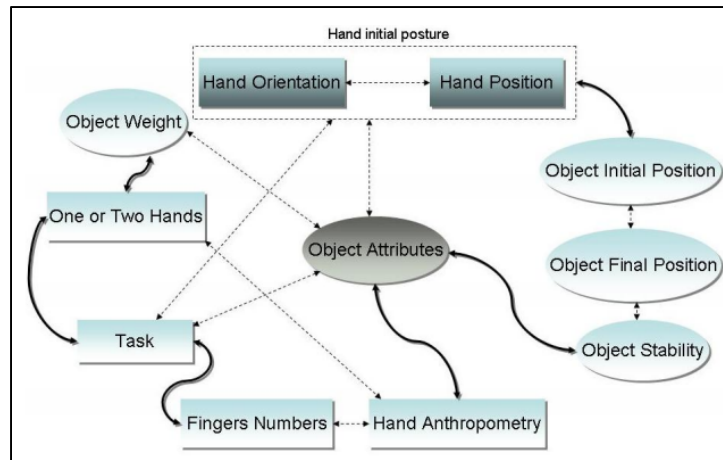


Figure 1.22 : Liens entre les différents paramètres de préhension. Tirée de Pitarch ( 2007)

L'algorithme développé par Pitarch propose la préhension à effectuer en demandant à l'utilisateur les sélections de l'outil à saisir et de la tâche à accomplir. L'algorithme choisit un type de préhension parmi celles implémentées, et génère la préhension sur l'objet. On observe Figure 1.23 deux préhensions réalisées sur un joystick. Tandis que l'image de droite montre une préhension permettant d'utiliser l'objet, ce n'est pas le cas de celle de gauche qui, cependant, montre que son algorithme est capable de trouver dans l'objet des formes adaptées à la préhension.

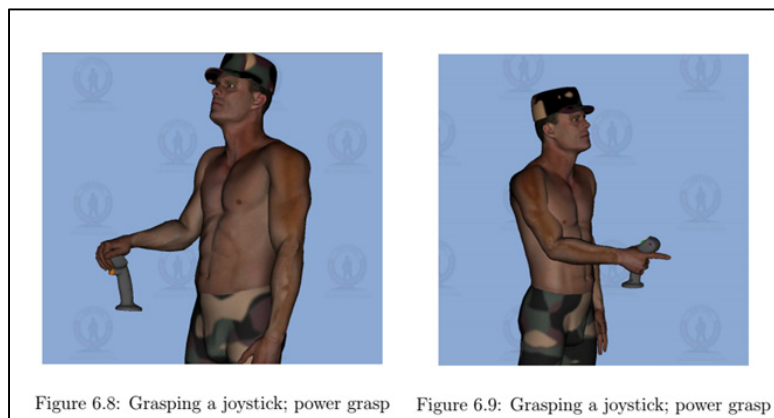


Figure 1.23 : Santos, préhension inadéquate sur un joystick. Tirée de Pitarch (2007)

Miyata (2013) propose quant à elle d'utiliser une base de données de préhensions contenant les régions de la main en contact en fonction de la distance entre les différentes régions de

contact. La base de données a été réalisée en mesurant les préhensions d'un homme, en considérant 34 régions distinctes sur sa main. Il en a résulté 170 régions de contact différentes, engendrant 801 préhensions statiques (Figure 1.24). Sa solution nécessite que les informations des régions de contact sur la main et sur l'objet soient connues. On peut observer un résultat de sa solution à la Figure 1.25.

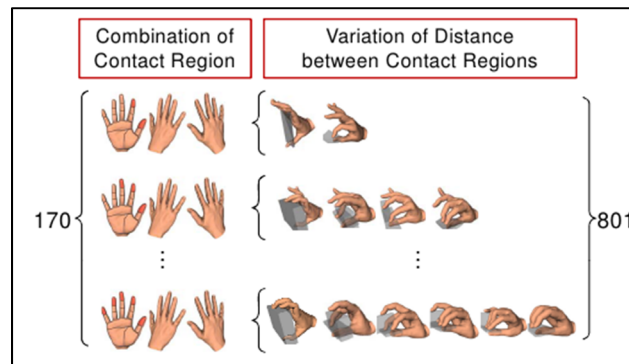


Figure 1.24 : Base de données de Miyata (2013), tirée de Miyata (2013)

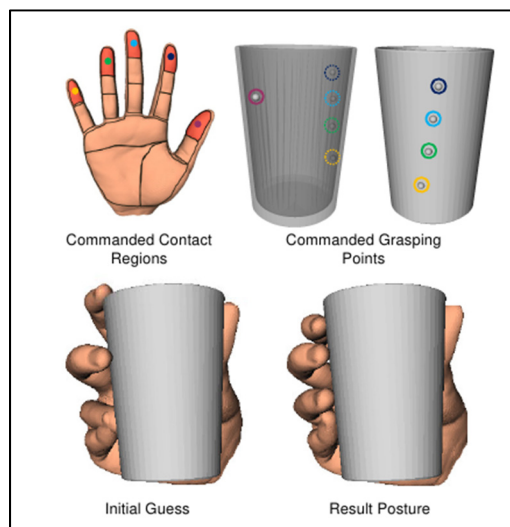


Figure 1.25 : Exemple de résultat de la solution de Miyata (2013) tirée de Miyata (2013)

## **1.5 Conclusion de la revue de littérature**

L'anatomie squelettique de la main est complexe, particulièrement le pouce et son articulation métacarpophalangienne, ainsi que l'arche de la main. Ces complexités sont difficiles à simuler sur ordinateur, alors qu'elles jouent un rôle important dans le réalisme de la préhension (Savescu, 2006).

Napier (Napier, 1956) a introduit l'idée que la préhension dépend de la tâche à réaliser. Par extension on peut considérer que, pour un outil donné, il existe une ou plusieurs actions possibles à effectuer, et donc qu'une préhension est liée à l'outil, mais aussi à l'action à réaliser avec l'outil.

Le mannequin actuel possède une petite base de données d'outils permettant de s'affranchir de la tâche de définition de la préhension. Cependant, la quantité et la diversité d'outils de cette base de données ne couvrent qu'un éventail très restreint de possibilités, ce qui mène souvent les concepteurs à effectuer les déplacements du mannequin en grande partie manuellement.

Le problème de l'automatisation de la préhension touche différents domaines. Les critères de fonctionnement d'un système automatisé ne vont pas nécessairement être les mêmes selon qu'on s'intéresse à la robotique ou à l'ergonomie virtuelle. Les chercheurs utilisent différentes techniques pour l'atteindre cet objectif. On peut affirmer que le problème de la définition automatique d'une préhension plausible en ergonomie virtuelle n'est pas encore solutionné.

La démarche explorée dans ce mémoire vise à étendre, de manière automatique, les préhensions associées aux outils connus d'une base de données à des outils inconnus, mais géométriquement similaires. Ainsi, à partir de la préhension de référence associée à une perceuse de la base de données, on pourrait déterminer automatiquement la préhension pour des centaines de perceuses à priori inconnues.

## CHAPITRE 2

### CHOIX DE LA REPRÉSENTATION DE LA PRÉHENSION

#### 2.1 Approche méthodologique

L'objectif de ce chapitre est de déterminer quelles informations doivent accompagner un outil de référence afin de fournir une préhension de référence plausible. Une avenue de solution pourrait être de disposer d'une collection d'outils pour lesquelles le moteur de positionnement saura comment appliquer au moins une bonne préhension par action possible. Lorsqu'un nouvel outil inconnu sera présenté au moteur de positionnement, celui-ci devra être en mesure de trouver un outil géométriquement similaire dans sa collection, et de transposer les préhensions connues de l'outil au nouvel outil. En d'autres mots, plutôt que d'essayer de faire comprendre au moteur de positionnement comment prendre un outil inconnu en fonction de ses différentes caractéristiques, on choisit de lui « montrer » comment faire, sur la base d'une comparaison avec un outil connu pour lequel on possède une préhension de référence.

Cette solution implique plusieurs étapes de développement. Tout d'abord, des outils de références sont choisis, pour lesquelles on spécifie une ou plusieurs actions possibles. Par la suite, on définit une ou des préhensions de référence pour chaque couple outil/action. Il faut ensuite déterminer le nombre de préhensions de référence requises en fonction des variations d'anthropométrie. Finalement, la solution devra proposer la possibilité de retrouver un outil géométriquement similaire pour réussir des appariements, et de transférer les informations de préhensions à l'outil inconnu, ce qui est discuté en dernière partie du présent mémoire.

Aussi, cette solution nécessite essentiellement la représentation géométrique du modèle 3D de l'outil. Cependant, il est probable que l'algorithme du moteur de positionnement cherche à optimiser la préhension proposée à la situation, ou encore pourrait inclure les efforts nécessaires à la tâche. Dans ces conditions, il est nécessaire que certaines informations intrinsèques à l'outil, tel que la masse, soient incluses dans l'outil de référence. Aussi, de la

même façon que les informations de préhensions, les caractéristiques de l'outil de référence pourraient être transposées à un outil similaire mais inconnu auquel il manquerait ces données.

## 2.2 Couple outil / action

Pour chacun des outils de la base de données, il faut déterminer la variété d'actions différentes possibles, afin d'associer une préhension pour chaque couple outil/action. Par exemple, la perceuse ne semble présenter qu'une solution d'action. Pourtant, afin de tenir compte d'un éventail de possibilités, il faut envisager l'action de saisir l'outil entreposé. Si la perceuse est posée sur le côté (Figure 2.1a), alors la préhension naturelle à l'action de « percer » (Figure 2.1b) de l'outil n'est pas vraiment adéquate.

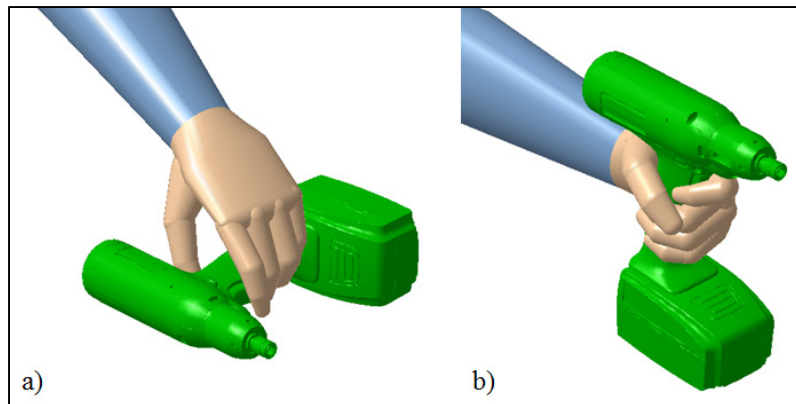


Figure 2.1 : Possibilités d'action, exemple visseuse. a) saisir la visseuse. b) action inhérente.

Certains outils présentent plusieurs actions inhérentes, tels que la clé à molette. L'outil offre la possibilité d'exercer le couple nécessaire soit en tirant sur l'outil (Figure 2.2a), soit en poussant sur l'outil (Figure 2.2b). Il est à noter que l'action de pousser chez l'humain utilise l'éminence thénar et hypothénar. Puisqu'elles ne sont pas représentées dans le modèle de la main du mannequin, il est un peu plus difficile de réaliser ce type de préhension (Figure 2.2-b), et peut paraître un peu moins plausible.



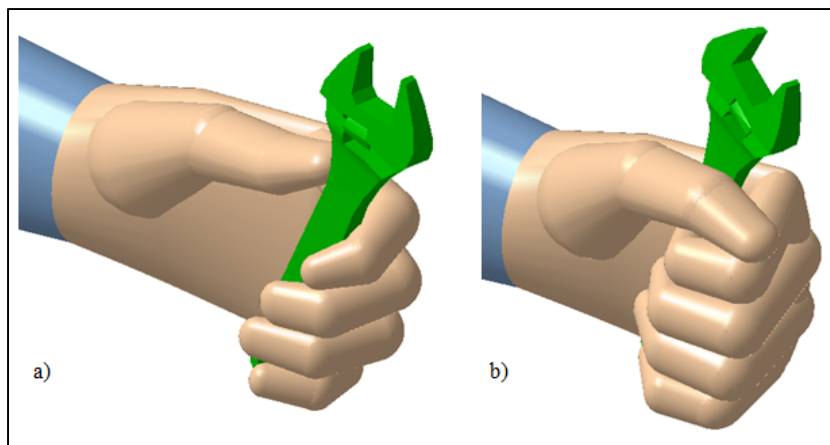


Figure 2.2 : Possibilités d'action, exemple clé à molette. a) visser en tirant. b) visser en poussant.

Les interactions de l'homme avec son environnement sont en grande partie réalisées avec ses mains. Les tâches qu'il accomplit sont nombreuses, allant de la simple action de toucher un objet à celle de manipuler avec ses mains. Alors qu'un objet quelconque peut, bien souvent, être saisi d'une multitude de façons, les actions inhérentes d'un outil peuvent être réalisées selon une préhension qui ne changera pas ou peu. C'est pourquoi chacune des actions inhérentes d'un outil doit être précisément définie.







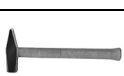





### 2.3 Outils de la base de données

La sélection a été réalisée afin d'inclure des outils les plus courants dans la simulation virtuelle en industrie, mais aussi en prenant soin de diversifier les outils, par leurs formes, leurs tailles, leurs utilisations. Le Tableau 2-1 montre la liste des outils, au nombre de douze. On y retrouve des outils demandant des préhensions de précision telle que la clé allen (11), des préhensions de force telle que le marteau (7), mais aussi des préhensions particulières, tels que la préhension d'une visseuse/perceuse électrique (5,12) avec le doigt qui doit être sur la gâchette, ou encore les pinces (1,2). Les clés plates (8,9) montrent la particularité de pouvoir être utilisées dans un sens comme dans un autre (côté ouvert ou fermé), et nécessitent donc plusieurs préhensions en fonction des différentes actions qu'elles permettent.

Ces outils seront regroupés au sein de la base de données du moteur de positionnement, et incluront pour chacun les préhensions plausibles en fonction des différentes actions prévues pour un outil donné. La base de données doit aussi contenir des informations de l'outil, telles que sa géométrie, sa masse et son centre de masse, son volume d'enveloppe. Ces données seront nécessaires dans différentes situations. Aussi, des informations pourraient être ajoutées à chacun des outils de la base de données concernant le recalage, tels que des plans ou axes de symétrie, des axes d'action, ou encore des éléments spécifiques tels qu'un point sur la gâchette d'une perceuse.

Les modèles sont issus de trois sources de modèles 3D sur internet, Grabcad (<https://grabcad.com/>) qui est un site d'échange communautaire de modèles 3D, Tracepart (<https://www.tracepartsonline.net/>) qui est une bibliothèque de modèles 3D, et Atlas Copco (<https://www.atlascopco.com/>) qui est un fournisseur d'équipement industriel et offre la possibilité de télécharger certain modèle (<https://webbox.atlascopco.com/webbox/dimdrw/>).

Tableau 2-1 : Sélection d'outils

No	Name (nom)	Image	Actions considérées	Source (lien ou manufacturier-partno)
1	Slip joint pliers (Pince)		inhérente	<a href="https://grabcad.com/library/combinatietang-combination-pliers-1">https://grabcad.com/library/combinatietang-combination-pliers-1</a>
2	Locking pliers (Pince-étau)		inhérente	<a href="https://grabcad.com/library/locking-pliers-1">https://grabcad.com/library/locking-pliers-1</a>
3	Small slotted screwdriver (Tournevis plat petit)		inhérente	Facom - AEF.2,5X75
4	Regular slotted screwdriver (Tournevis plat régulier)		inhérente	Facom - ACZH.8EX175
5	Cordless pistolgrip screwdriver (Visseuse à batterie)		Inhérente, saisir	Atlascopco - BCP BL12-I06
6	Hand held circular saw (Scie circulaire à main)		inhérente	Atlascopco - LCS 38 S150-D
7	Hammer (Marteau)		inhérente	Gamm - 6605035
8	Small combination wrench (Petite clé plate)		Visser en tirant coté ouvert	Facom - 40.10
9	Large combination wrench (Grande clé plate)		Visser en tirant coté ouvert, visser en tirant coté fermé	Facom - 40.24
10	Adjustable wrench (Clé à molette)		Visser en tirant, Visser en poussant	Facom - 113A.12T
11	Allen wrench (Clé Allen)		Visser grand couple	Facom - 82.8
12	Pistolgrip drill (Perceuse)		Inhérente, saisir	Atlascopco - LBB 26 EPX 005

## 2.4 Description de la représentation de préhension

Les informations de préhension fournies au moteur de positionnement sont, pour chaque couple outil/action :

- La position et l'orientation de la main par rapport à l'outil
- Les angles articulaires de la main

Dans un environnement virtuel, il existe un référentiel, défini par un repère orthonormé, permettant de positionner les différents composants de l'environnement virtuel. Chacun de ces composants a son propre référentiel, défini aussi par un repère orthonormé, permettant de les localiser dans l'environnement virtuel.

Aussi, lorsqu'un composant est inséré dans un environnement virtuel, celui-ci verra par défaut son origine coïncider avec l'origine de l'environnement virtuel. Par exemple, si on insère un mannequin, la position et l'orientation de son origine par rapport à la référence absolue (Figure 2.3 cadre rouge), soit l'origine de la maquette numérique, auront des valeurs nulles (Figure 2.3 cadre vert). On peut par ailleurs remarquer que l'origine du mannequin se situe au niveau du bassin, à la jointure entre le haut du corps et les jambes.

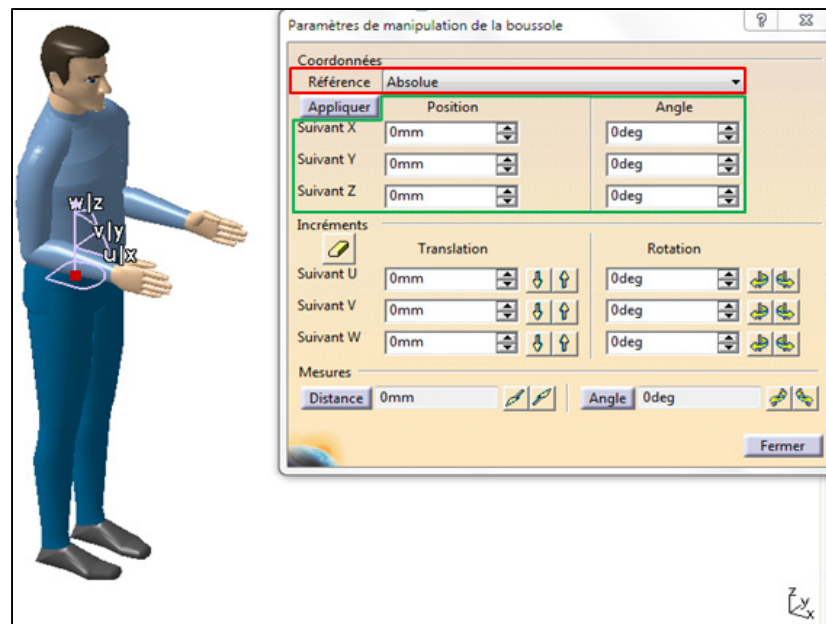


Figure 2.3 : Boussole de Catia - Référence et mesure

Une des informations souhaitées est la position et l'orientation du repère de la main par rapport au repère de l'outil. L'outil vient avec son propre repère. La main quant à elle a un point appelé centre de préhension, dont la position est décrite à la Figure 1.13, et se trouve être l'origine du repère de la main. On observe à la Figure 2.4 le centre de préhension sur lequel se situe la boussole de Catia, ainsi que le repère de l'outil, situé à l'extrémité de celui-ci. La référence choisie est maintenant le repère de l'outil, la boussole indique donc la position et l'orientation du repère de la main par rapport au repère de l'outil. Catia nous permet aisément d'extraire les mesures entre ces deux repères (Tableau 2-2), à l'aide de la boussole. On remarque que la valeur suivant x dans le tableau est de 127,523 mm; elle correspond à la position du centre de préhension de la main mesurée suivant l'axe x du repère de l'outil. Ces valeurs feront l'objet d'analyses statistiques au chapitre 3 afin d'évaluer l'impact de l'anthropométrie sur la préhension de référence.

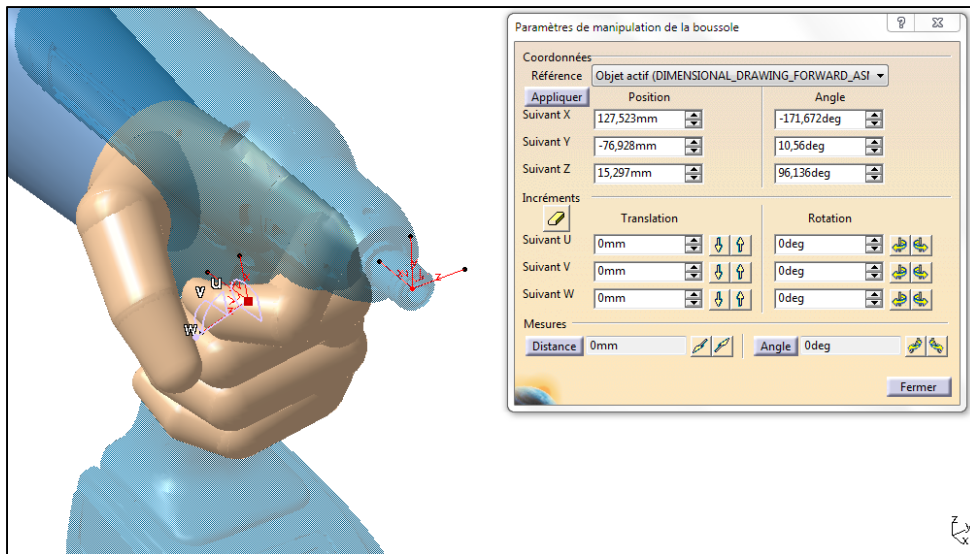


Figure 2.4 : Position et orientation de la main/outil

Tableau 2-2 : Position et orientation de la main par rapport à l'outil

Cordless pistolgrip powered screwdriver		use_H50_1
Hand position / outil	x (mm)	127,523
	y (mm)	-76,928
	z (mm)	15,297
	rx (deg)	-171,672
	ry (deg)	10,56
	rz (deg)	96,136

La deuxième information nécessaire pour représenter la préhension est la valeur de chacun des angles articulaires de la main. Ceux-ci peuvent être extraits de Catia via un script en VB écrit par l'un des employés de DS.

On peut observer sur la Figure 2.5 la main du mannequin dans la position de préhension de la visseuse électrique, tel que montré sur la Figure 2.4. Les numéros permettent d'identifier les degrés de liberté de la main, que l'on retrouve dans le Tableau 2-3 qui indique la valeur en degrés de l'angle formé par l'articulation par rapport au repos. Sur l'image a), on observe uniquement les phalanges dont les articulations ne permettent qu'un mouvement de F/E,

tandis que sur l'image b), on observe uniquement celles dont l'articulation permet F/E ainsi qu'abduction/adduction.

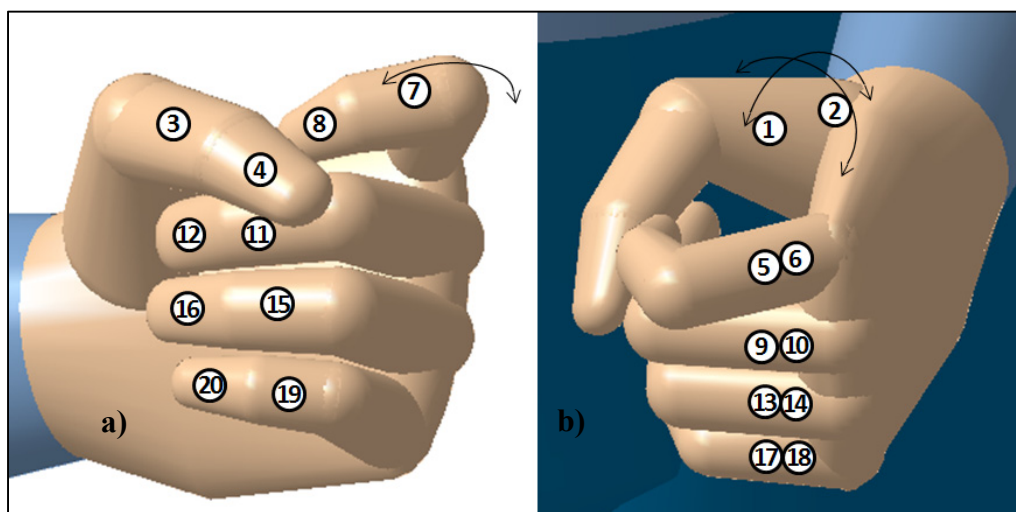


Figure 2.5 : Numérotation des DDL de la main du mannequin de DELMIA

Tableau 2-3 : Angles articulaires de la main

No	Phalanges	Degré de liberté	Mesure en degré
1	Left Thumb 1	flexion/extension (deg)	-11,062
2	Left Thumb 1	abduction/adduction (deg)	44,649
3	Left Thumb 2	flexion/extension (deg)	15
4	Left Thumb 3	flexion/extension (deg)	24,246
5	Left Index 1	flexion/extension (deg)	51,819
6	Left Index 1	radial deviation/ulnar deviation (deg)	11,268
7	Left Index 2	flexion/extension (deg)	91,343
8	Left Index 3	flexion/extension (deg)	38,242
9	Left Middle Finger 1	flexion/extension (deg)	90
10	Left Middle Finger 1	radial deviation/ulnar deviation (deg)	4,367
11	Left Middle Finger 2	flexion/extension (deg)	81,763
12	Left Middle Finger 3	flexion/extension (deg)	18,317
13	Left Annular 1	flexion/extension (deg)	90
14	Left Annular 1	radial deviation/ulnar deviation (deg)	1,656
15	Left Annular 2	flexion/extension (deg)	73,106
16	Left Annular 3	flexion/extension (deg)	25,079
17	Left Auricular 1	flexion/extension (deg)	84,486
18	Left Auricular 1	radial deviation/ulnar deviation (deg)	-3,001
19	Left Auricular 2	flexion/extension (deg)	55,555
20	Left Auricular 3	flexion/extension (deg)	34,952



## **CHAPITRE 3**

### **INFLUENCE DE L'ANTHROPOMÉTRIE**

L'anthropométrie, terme issu du grec Anthropos (« homme ») et metron (« mesure »), réfère aux mesures de l'être humain. Lorsqu'un produit est destiné à être utilisé par l'humain, les concepteurs peuvent prendre en compte l'anthropométrie de ses utilisateurs. Dans grand nombre de cas, les concepteurs essaient de créer un produit utilisable par une majorité de la population. Cependant, est-ce que cela veut dire qu'une personne avec une petite anthropométrie saisira de la même façon un outil qu'une personne avec une grande anthropométrie ? Autrement dit, à quel point l'anthropométrie influence-t-elle la position, l'orientation et les angles de la main face à l'outil ?

Pour un couple outil/action donné, la préhension est définie par la position et l'orientation relative de la main par rapport à l'outil et par les angles articulaires de la main. Mais si cette préhension peut s'avérer acceptable pour une certaine anthropométrie, il pourrait en être autrement avec une anthropométrie différente.

S'il était nécessaire de prévoir plusieurs préhensions de référence pour autant d'anthropométries, il faudrait définir plusieurs triplets outil/action/anthropométrie. Au contraire, si la préhension de référence restait acceptable peu importe l'anthropométrie, alors il serait uniquement nécessaire d'avoir une préhension par couple outil/action.

Afin de comprendre comment l'anthropométrie peut influencer la préhension, et particulièrement si la préhension reste acceptable, peu importe l'anthropométrie du mannequin, il est d'abord nécessaire de comprendre l'anthropométrie de la main du mannequin.

### 3.1 L'anthropométrie de la main du mannequin

Lors de l'utilisation d'un mannequin dans un environnement virtuel, on peut choisir que celui-ci soit un homme ou une femme, avec une anthropométrie en particulier choisie par l'intermédiaire d'un centile. Ce centile correspond à la stature du mannequin, soit la mesure des pieds à la tête (Figure 3.1) par rapport à la population choisie, qui par défaut est la population américaine.

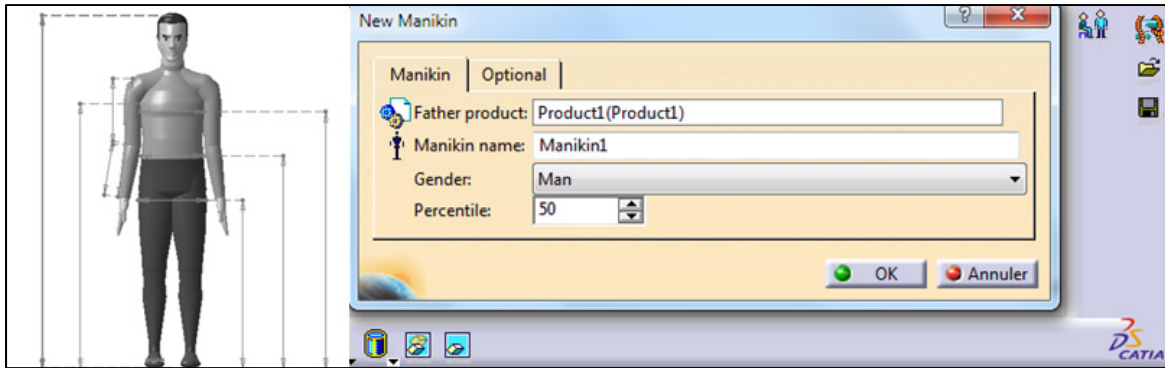


Figure 3.1 : Stature du mannequin

Les dimensions mesurant le mannequin sont nombreuses, il y en a au total 103 incluant la stature. La main comprend 7 dimensions que nous pouvons observer sur la Figure 3.2.

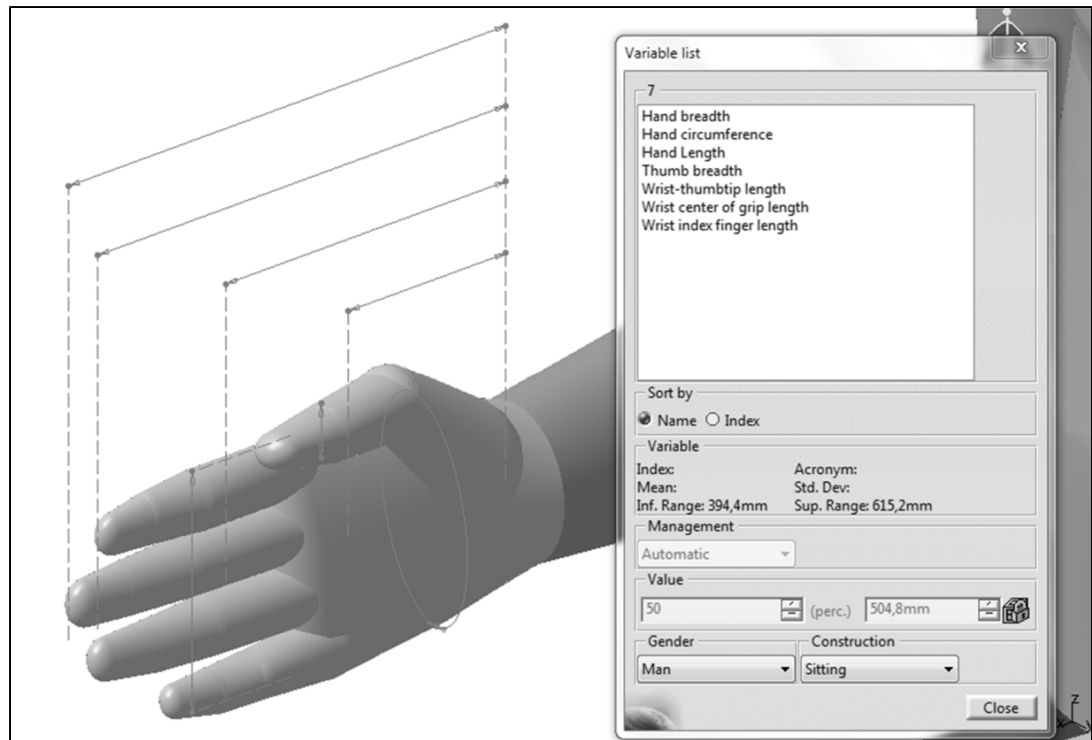


Figure 3.2 : Mesures de la main du mannequin

Chacune des dimensions peut-être spécifiées manuellement, mais cela en influencera d'autres afin de conserver des proportions humainement possibles. Lorsque l'anthropométrie du mannequin est choisie par un centile sur la stature, alors le logiciel adapte les autres dimensions du mannequin pour correspondre à un humain moyen de ce centile. Si pour un 50<sup>e</sup> centile en stature les autres dimensions vont aussi être au 50<sup>e</sup> centile, il n'en est pas de même pour un 95<sup>e</sup> centile en stature.

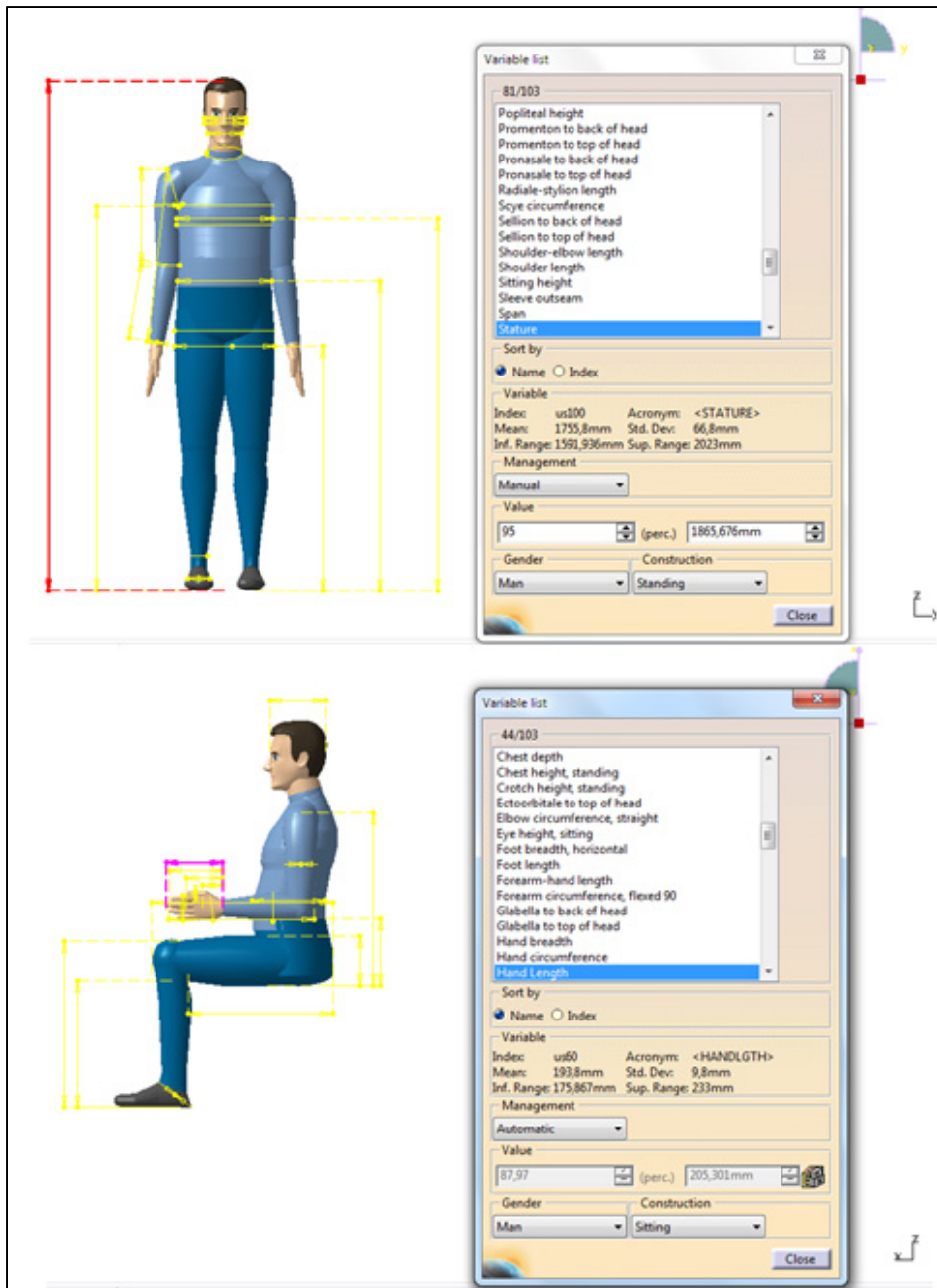


Figure 3.3 : Adaptation du centile en fonction de la stature

On peut voir dans le Tableau 3-1 les dimensions de la main pour différents centiles de stature. On y observe que l'homme de stature au 50<sup>e</sup> centile (H50) se retrouve avec des dimensions de main aussi au 50<sup>e</sup>. Par contre, l'homme de stature au 95<sup>e</sup> centile (H95) ne voit pas les dimensions de sa main être également au 95<sup>e</sup>, mais légèrement en dessous (Figure

3.3). Inversement, la femme de stature au 5<sup>e</sup> centile (F5) voit les dimensions de sa main être légèrement au-dessus.

Tableau 3-1 : Mesures en centile de la main en fonction de la stature

Sexe	Stature (centile)	Longueur main (centile)	Largeur main (centile)	Circonférence main (centile)	Largeur pouce (centile)	Poignet - extrémité pouce (centile)	Poignet - centre de préhension (centile)	Poignet - extrémité index (centile)
Homme	50	50	50	50	50	50	50	50
Homme	95	87.97	85.61	87.38	77.5	85.9	75.34	88.35
Femme	5	12.57	15.21	14.08	25.31	14.47	27.89	11.88

On peut visuellement observer l'importante différence de taille de main qui existe entre un H95 et une F5 à la Figure 3.4 en faisant coïncider leurs centres de préhension.

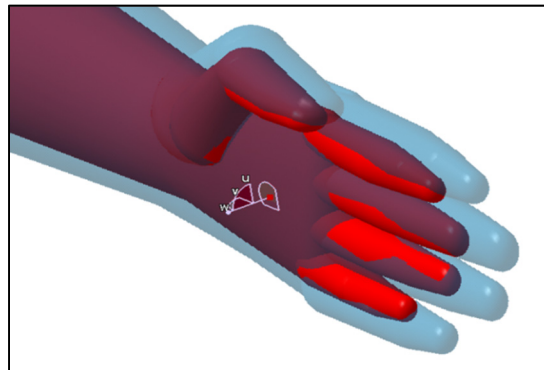


Figure 3.4 : Superposition au centre de préhension des mains d'un H95 (en bleu transparent) et d'une F5 (en rouge/violet)

### 3.2 Méthodologie de l'analyse anthropométrique

L'objectif spécifique est de vérifier si une préhension de référence réalisée à partir d'un H50 demeure plausible pour des anthropométries très différentes, soit le F5, beaucoup plus petit, et le H95, beaucoup plus grand.

Afin de déterminer si une préhension de référence doit être définie pour différentes anthropométries, l'étude consiste dans un premier temps à comparer les préhensions de

références obtenues pour des anthropométries F5, H50 et H95. Dans un second temps, la plausibilité de la préhension H50 transposée à H95 et F5 sera examinée.

Afin d'obtenir des résultats comparables, quelques règles ont été respectées concernant les essais.

**Génération d'une préhension :** Une maquette numérique est créée, un mannequin d'une certaine anthropométrie y est inséré, ainsi qu'un outil. Afin de standardiser l'extraction des informations de la préhension, toutes les préhensions sont réalisées sur la main gauche du mannequin (l'auteur est gaucher...), le bras gauche reste dans sa position initiale et seuls les angles des doigts de la main vont évoluer. Itérativement, l'outil est déplacé et les angles des doigts sont modifiés jusqu'à ce que la préhension paraisse plausible.

**Répétition des essais :** Pour chacune des trois anthropométries, soit F5, H50 et H95, dix préhensions sont indépendamment réalisées sur l'outil.

**Moyenne de préhension :** À partir de plusieurs (au moins trois) préhensions d'un H50, une préhension moyenne est calculée en prenant la moyenne de chacune des mesures caractérisant la préhension.

### 3.3 Comparaisons des préhensions de trois anthropométries

Afin de comparer les anthropométries F5, H50 et H95, dix préhensions indépendantes ont été réalisées manuellement pour chacune d'elles pour un outil donné. Par conséquent, la comparaison permet d'observer la variation due à la génération manuelle des dix préhensions. Aussi, la comparaison permet de déterminer selon quelle ampleur un changement anthropométrique fait varier la définition de la préhension pour un outil donné. Finalement, la comparaison permet de déterminer si la moyenne de préhension reste plausible, et peut être utilisée comme préhension de référence.

La comparaison a été effectuée sur l'outil « Cordless pistolgrip screwdriver », et pour chacune des trois anthropométries F5, H50 et H95, dix préhensions indépendantes ont été réalisées. Les mesures sont prises du repère de l'outil vers celui de la main (Figure 3.5).

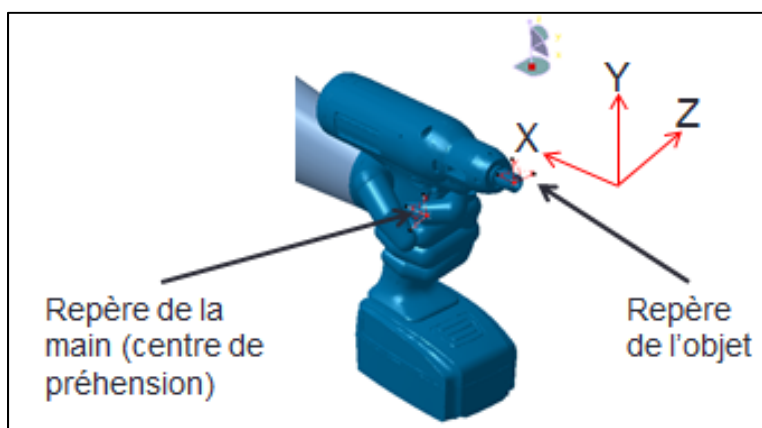


Figure 3.5 : Mesures entre le repère de l'outil et le repère de la main

Afin d'observer s'il existe un impact de la taille de la main (F5, H50 et H95) sur les différentes mesures définissant la préhension, des tests ont été effectués à l'aide de « STATGRAPHICS centurion ». Dans un premier temps, pour chaque mesure définissant la préhension, nous effectuons un test d'analyse de la variance (ANOVA). Le test ANOVA permet de déterminer s'il existe des différences significatives entre les groupes. Si telle est le cas, le test des étendues multiples permet de déterminer entre quels groupes il existe des différences significatives. Finalement, l'observation de différences significatives entre les différents groupes peut être la conséquence d'une corrélation, que nous pouvons vérifier en réalisant une régression simple. Afin d'illustrer la méthode employée, un exemple portera sur la position suivant x, qui correspond à la position du centre de préhension de la main mesurée suivant l'axe x du repère de l'outil, tel que décrit à la section 2.4. Les résultats dans leur ensemble seront discutés par la suite.

### **Position suivant x**

Les données de la position suivant x des 30 préhensions réalisées, soit 10 par anthropométrie, sont observables à la Figure 3.6. On peut déjà remarquer qu'il semble exister une corrélation

sur ces données, mais afin de s’en assurer, nous procédons dans un premier temps au test ANOVA.

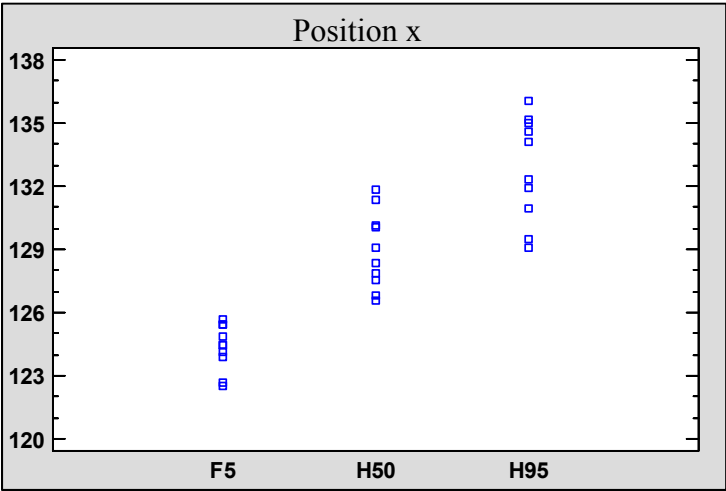


Figure 3.6 : Nuage de points de la position x suivant l'anthropométrie

Test ANOVA

La première étape consiste à vérifier si les données montrent des différences significatives entre les groupes. STATGRAPHICS nous retourne les résultats sous la forme du Tableau 3-2. On peut y observer que la valeur de la probabilité pour le test F est inférieure à 0,05, ce qui suggère une différence statistiquement significative entre les moyennes des 3 variables au niveau de signification de 5%.

Tableau 3-2 : Test de l'ANOVA de la position x

Source	Somme des carrés	Ddl	Carré moyen	F	Probabilité
Inter-groupes	362,492	2	181,246	50,65	0,0000
Intra-groupes	96,6224	27	3,57861		
Total (Corr.)	459,114	29			

Tests des étendues multiples

Afin de déterminer entre quels groupes il existe des différences significatives, nous réalisons un test des étendues multiples, avec la procédure des différences significatives minimales de Fisher (LSD). STATGRAPHICS retourne le Tableau 3-3 dans lequel 3 groupes homogènes



sont identifiés en utilisant des colonnes de X. Dans chaque colonne, les niveaux contenant des X forment un groupe de moyennes à l'intérieur desquelles il n'y a pas de différences statistiquement significatives. On remarque que STATGRAPHICS a formé trois groupes de moyenne différents, ce qui indique qu'il existe des différences statistiquement significatives.

Tableau 3-3 : Test des étendues multiples de la position X, groupes

	<i>Effectif</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Groupe homogène</i>
F5	10	124,369	X
H50	10	128,956	X
H95	10	132,875	X

Bien que trois paires existent, seules les paires F5-H50 et H50-H95 nous intéressent, puisque nous vérifions la possibilité de n'utiliser que le H50. Quoiqu'il en soit, tel qu'on peut l'observer dans le Tableau 3-4, ces deux groupes ont des différences significatives, puisqu'elle dépasse la limite de 95% LSD.

Tableau 3-4 : Test des étendues multiples de la position X, limites

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Différence</i>	<i>+/- limites</i>
F5 - H50	*	-4,5862	1,73586
F5 - H95	*	-8,5059	1,73586
H50 - H95	*	-3,9197	1,73586

\* indique une différence statistiquement significative.

## Régression

Puisque nous avons déterminé qu'il existait des différences significatives entre les trois groupes, nous pouvons effectuer une régression simple sur les données afin d'observer s'il existe une corrélation. Pour ce faire, nous procédons à une régression linéaire entre la mesure de la position suivant x et la longueur de la main, dont les valeurs sont précisées dans le Tableau 3-5.

Tableau 3-5: Longueur de la main des anthropométries F5, H50 et H95

Anthropométrie	Longueur Main (mm)
F5	169,376
H50	193,8
H95	205,301

STATGRAPHICS nous permet d'observer la régression linéaire sur le nuage de point (Figure 3.7). Le logiciel nous précise les valeurs du modèle ajusté :

$$\text{Position X (mm)} = 85,3186 + 0,229111 * \text{Longueur Main (mm)}.$$

Le logiciel nous informe aussi du coefficient de corrélation, qui vaut 0,88, ce qui indique une relation modérément forte entre les variables. Finalement, la statistique de R-carré indique que le modèle ajusté explique 76,96% de la variabilité dans Position X (mm).

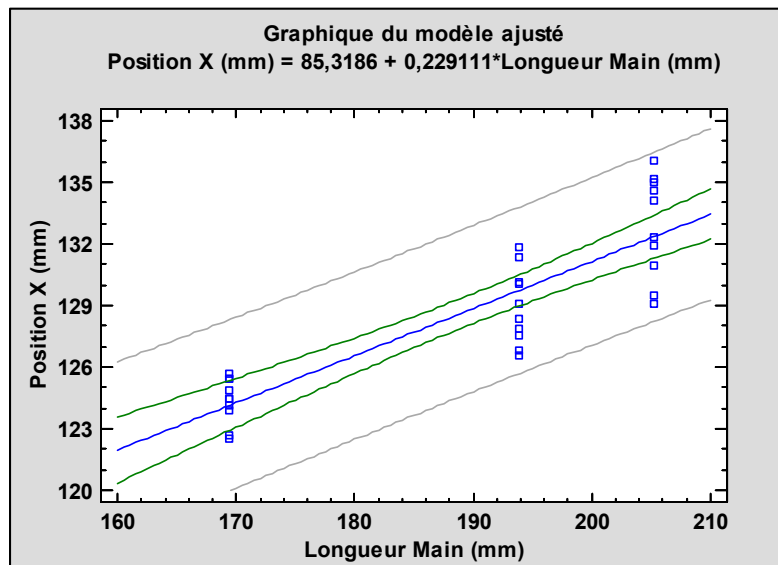


Figure 3.7 : Régression linéaire sur le nuage de points de la position X suivant l'anthropométrie

Nous avons vu qu'il existait une corrélation suivant la position x, cependant, comme nous pouvons le remarquer dans le Tableau 3-6, elle est la seule mesure dont les paires F5-H50 et H50-H95 présentent des différences statistiquement significatives, et aucune autre mesure de position et d'orientation n'est influencée par l'anthropométrie. L'annexe 3 propose une

possible démarche d'ajustement automatique de la valeur de x selon l'anthropométrie pour prendre en compte cette corrélation pour cet exemple.

Tableau 3-6 : Condensé des résultats statistiques de l'impact de l'anthropométrie sur la préhension

	ANOVA p-val	Test des étendues multiples			Moyenne H50
		F5-H50	H50-H95	+/- limites	
Pos. x	0	-4.5862	-3.9197	1.73586	128.956 mm
Pos. v	0.0574	0.9094	1.1008	1.63725	-81.0888 mm
Pos. z	0.1588	-1.0168	0.4138	1.05672	13.252 mm
Rot. x	0.1391	0.9	0.0049	1.03737	-172.554°
Rot. v	0.7966	-0.464	0.1323	1.44851	9.0454°
Rot. z	0.5524	-0.4225	-0.4831	1.68798	92.2154°
pouce fe1	0	-2.672	-6.9555	3.11097	-0.9856°
pouce add/abd1	0.0597	1.0493	1.7688	2.33444	43.1314°
pouce fe2	0.0176	-4.1146	10.3906	6.99897	-1.3986°
pouce fe3	0.5807	3.3778	1.8231	10.2818	35.3966°
index fe1	0.0266	-7.1655	2.2997	5.20492	40.2877°
index rad/uln1	0.77	1.0049	-0.5858	2.85093	10.132°
index fe2	0.2302	-4.0103	-0.4907	5.75222	94.6339°
index fe3	0.1865	1.2704	-9.4182	11.0894	32.9365°
maieur fe1	0.4937	-1.3099	1.8057	3.18043	87.1726°
maieur rad/uln1	0.7887	0.5219	0.2389	2.30722	-1.646°
maieur fe2	0.001	-2.2417	-7.0997	4.72618	80.0667°
maieur fe3	0.0667	-2.3722	7.6255	6.5391	28.7286°
annulaire fe1	0.08	-0.2859	3.2736	3.15654	88.4136°
annulaire rad/uln1	0.7112	0.76	0.123	2.36236	-3.3167°
annulaire fe2	0	-4.6526	-10.0913	5.09626	67.0976°
annulaire fe3	0.0541	2.2988	7.9224	8.62359	37.7082°
auriculaire fe1	0.2362	-2.6705	4.2743	5.07721	80.8236°
auriculaire rad/uln1	0.3709	1.3395	1.0151	3.37821	-6.3905°
auriculaire fe2	0.0002	-4.6875	-15.2268	8.58027	50.9451°
auriculaire fe3	0.0692	-3.8217	12.153	10.4918	45.4551°

Par ailleurs, excepté la position x, seul « l'index fe1 » présente une différence statistiquement significative pour la paire F5-H50, toutes les autres différences observées concernent la paire H50-H95. On peut aussi remarquer qu'aucun angle articulaire « add/abd » et « rad/uln » ne présente de différences statistiquement significatives.

Le pouce présente aux articulations Fe1 et Fe2 une différence statistiquement significative entre H50 et H95. Cependant, la régression de Fe1, visible graphiquement à la Figure 3.8,

propose un coefficient de corrélation de 0,70 ce qui indique que la relation est considérée modérément forte entre la longueur de la main et l'angle formé par le pouce Fe1. La statistique de R-carré indique que le modèle ajusté explique 49,49% de la variabilité dans Pouce Fe1 (deg). La régression réalisée pour l'articulation Fe2 (Figure 3.9) donne un coefficient de corrélation de -0,21 ce qui indique que la relation est relativement faible entre les variables. La statistique de R-carré indique que le modèle ajusté explique 4,65702% de la variabilité dans Pouce Fe2 (deg). On suppose que la dispersion due à la génération manuelle des préhensions influence autant que l'anthropométrie pour Fe1, et plus largement pour Fe2.

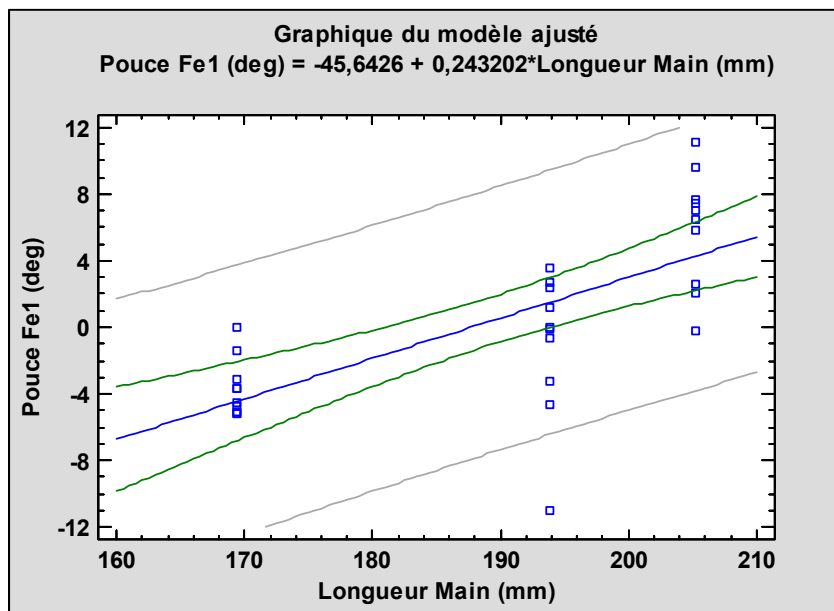


Figure 3.8 : Régression linéaire sur le nuage de points de l'angle articulaire "pouce fe1" suivant l'anthropométrie

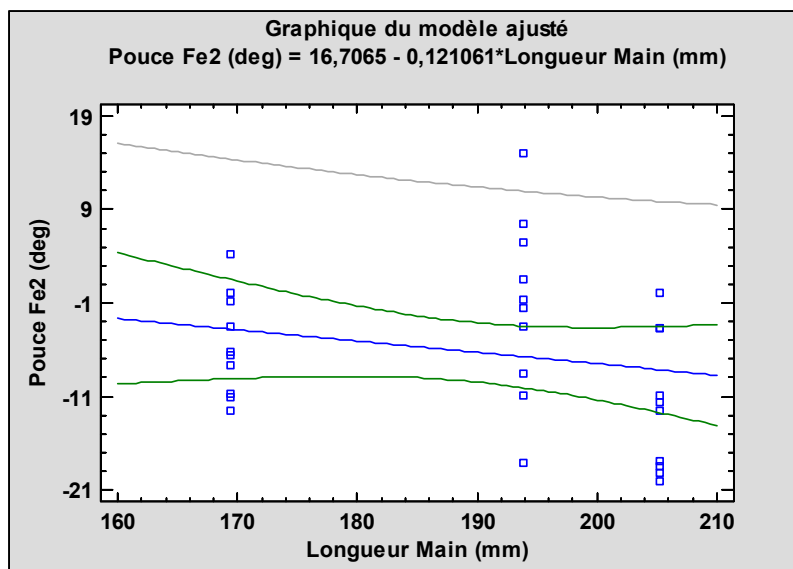


Figure 3.9 : Régression linéaire sur le nuage de points de l'angle articulaire "pouce fe2" suivant l'anthropométrie

En observant les nuages de point des articulations index fe1 (Figure 3.10), majeur fe2 (Figure 3.11), majeur fe3 (Figure 3.12), annulaire fe1 (Figure 3.13), annulaire fe2 (Figure 3.14), auriculaire fe2 (Figure 3.15) et auriculaire fe3 (Figure 3.16), on remarque un comportement relativement similaire à l'articulation du pouce fe2. Quand elles sont présentes, les tendances sont peu marquées, et l'on observe souvent une dispersion importante. Dans presque tous les cas, le H50 couvre une grande partie des angles formés par le F5 et le H95.

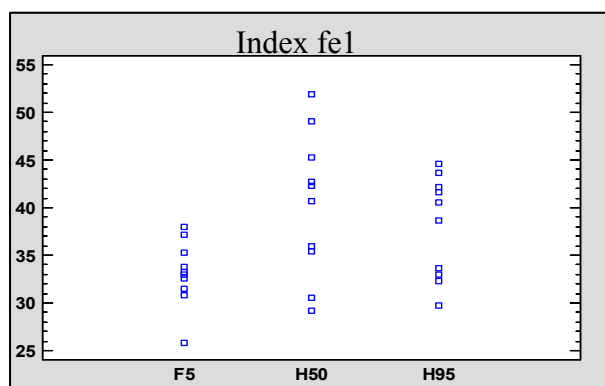


Figure 3.10 : Nuage de points de l'articulation index fe1 suivant l'anthropométrie

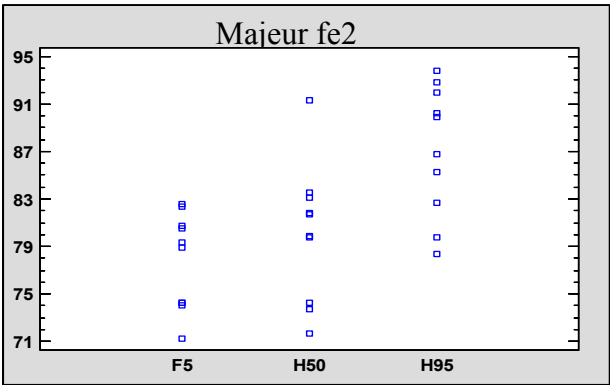


Figure 3.11 : Nuage de points de l'articulation majeur fe2 suivant l'anthropométrie

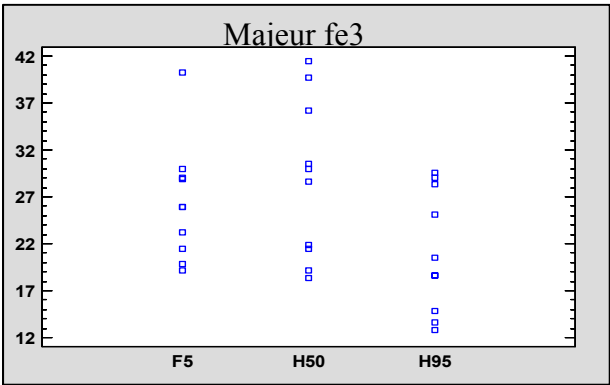


Figure 3.12 : Nuage de points de l'articulation majeur fe3 suivant l'anthropométrie

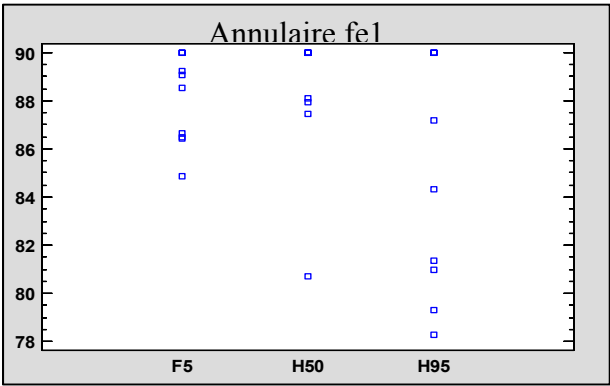


Figure 3.13 : Nuage de points de l'articulation annulaire fe1 suivant l'anthropométrie

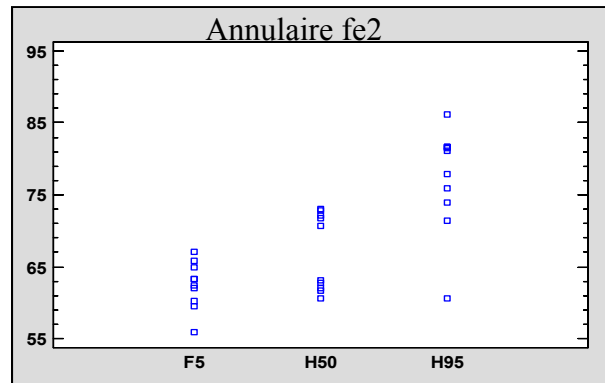


Figure 3.14 : Nuage de points de l'articulation annulaire fe2 suivant l'anthropométrie

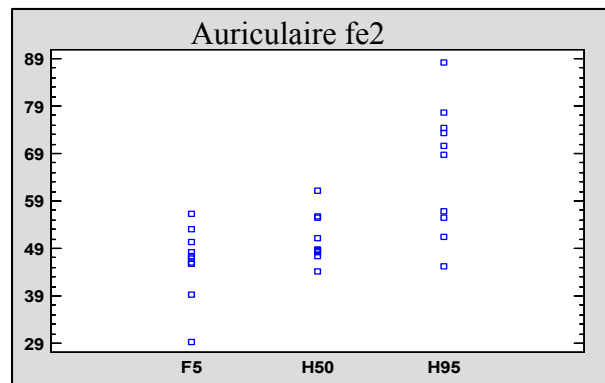


Figure 3.15 : Nuage de points de l'articulation auriculaire fe2 suivant l'anthropométrie

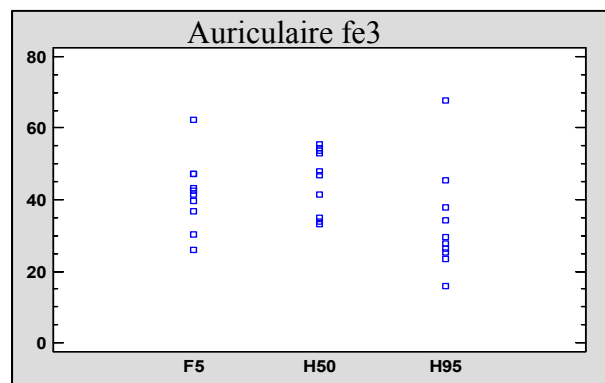


Figure 3.16 : Nuage de points de l'articulation auriculaire fe3 suivant l'anthropométrie

L'angle formé par les phalanges des doigts montre une plus grande dispersion à mesure que l'on s'éloigne de la paume, ou autrement dit, la dispersion de l'angle fe1 est moindre que fe2,

et elle-même moindre que fe3, telle qu'on peut le voir dans le Tableau 3-7. Cela s'explique par deux facteurs. D'abord, la répétition des essais génère, comme pour toutes les autres mesures, une certaine dispersion. Aussi, lors de la génération de la préhension, les phalanges proximales sont déplacées en premier pour finir avec les phalanges distales. Par conséquent, la dispersion dans l'articulation MCP amplifie la dispersion de l'articulation IPP, qui elle-même amplifie la dispersion de l'articulation IPD.

Tableau 3-7 : Limites des tests des étendues multiples, fe1  
fe2 et fe3 des 5 doigts

	Test des étendues multiples, +/- limites				
	pouce	index	majeur	annulaire	auriculaire
fe1	3,11097	5,2049	3,18043	3,15654	5,07721
fe2	6,99897	5,7522	4,72618	5,09626	8,58027
fe3	10,2818	11,089	6,5391	8,62359	10,4918

L'observation de la variation de chacune des anthropométries montre qu'il existe une certaine dispersion due à la génération manuelle des préhensions, et que la moyenne des différentes informations de la représentation de préhensions devrait aboutir à une préhension plausible.

L'observation de la variation des mesures entre les différentes anthropométries ne nous permet pas d'affirmer que les valeurs du H50 pourraient être transposées vers le F5 et le H95 en conservant une certaine plausibilité. La corrélation entre la taille de la main et la distance du centre de la main au repère de l'outil pourrait mener à un décalage et nuire à la plausibilité. De façon moins importante, les angles des articulations en F/E montrent dans de nombreux cas des différences statistiquement significatives, qui pourraient elles aussi nuire à la plausibilité d'une transposition.

Il faut donc vérifier l'impact de la corrélation observée concernant la position de la main par rapport à l'outil en fonction de sa taille. Pour cela, nous avons choisi de réaliser les préhensions moyennes du H50, de les transférer au F5 et H95 pour les outils de la base de données, et juger visuellement la plausibilité des préhensions en résultant.



### **3.4 Validation anthropométrique - plausibilité visuelle**

Tout d'abord, il faut déterminer ce qu'est la plausibilité visuelle. D'après le dictionnaire Larousse, la plausibilité réfère à ce qui semble pouvoir être admis, accepté, tenu pour vrai. On comprend donc que pour une préhension soit visuellement plausible, il faut que cette préhension paraisse réaliste.

Un autre facteur influence la plausibilité visuelle : la distance à laquelle, ou la minutie avec laquelle, on observe la préhension. En effet, si celle-ci peut paraître plausible vue dans son ensemble, elle pourrait paraître improbable lorsque regardée de près. Par exemple, lorsque nous regardons les trois préhensions de la Figure 3.17, celles-ci semblent être identiques, et pour cause, la position et l'orientation de la main par rapport à l'outil, ainsi que les angles articulaires, sont identiques dans les trois cas. Par contre, la taille de la main varie, puisqu'on retrouve une F5 (Figure 3.17, a), un H50 (Figure 3.17, b) et un H95 (Figure 3.17, c). Regardées sommairement, ces trois préhensions semblent plausibles. Mais si nous portons notre regard sur les doigts 2 à 5 de la main du F5, leurs 3<sup>es</sup> phalanges sont toutes à l'intérieur de l'outil. À l'opposé, le H95 voit son pouce rentrer dans l'outil tandis que ses autres doigts semblent légèrement dans le vide. L'annexe 3 propose une possible démarche d'ajustement automatique selon l'anthropométrie pour éliminer dans cet exemple le problème de la pénétration des doigts dans le cas F5.

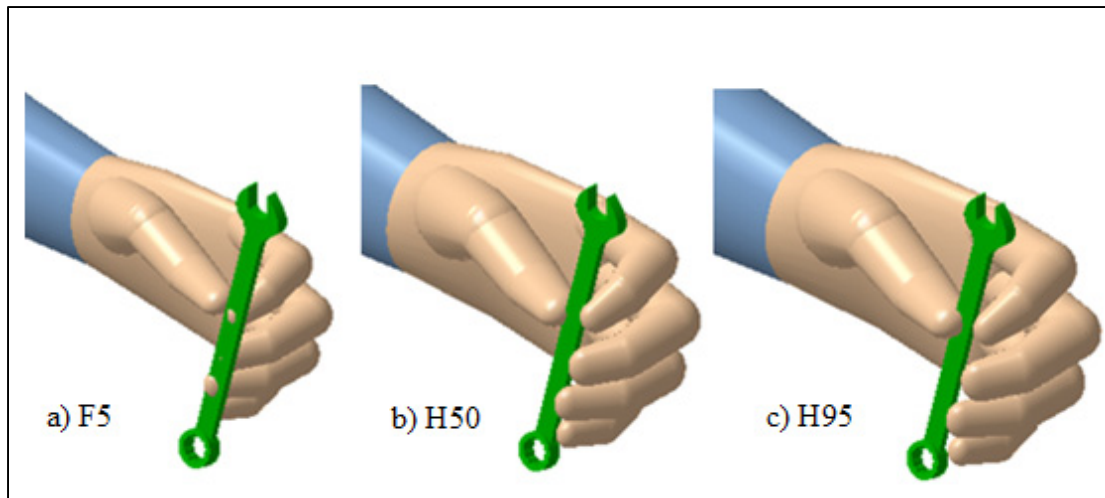


Figure 3.17 : Préhension clé plate, F5, H50 et H95

Afin de vérifier dans l'ensemble la plausibilité visuelle, la méthode retenue fut de réaliser plusieurs préhensions (au moins trois) sur chacun des outils avec un mannequin d'anthropométrie H50. Ensuite, une préhension moyenne avec un H50 est calculée pour chaque outil, puis cette préhension moyenne est appliquée sur les mannequins d'anthropométrie F5 et H95. Finalement, les images de ces préhensions ont été jugées par une équipe. Le jour de la présentation, 14 personnes étaient présentes, dont 3 professeurs GPA, 2 étudiants postdoctorats, une assistante de recherche, la directrice et deux employés du département ergonomie virtuel de Dassault Systèmes, deux employés du département informatique de DS, trois stagiaires.

Voici quelques exemples d'images discutés en Figure 3.17, Figure 3.18, Figure 3.19 et Figure 3.20. D'autres exemples se trouvent en annexe 1.

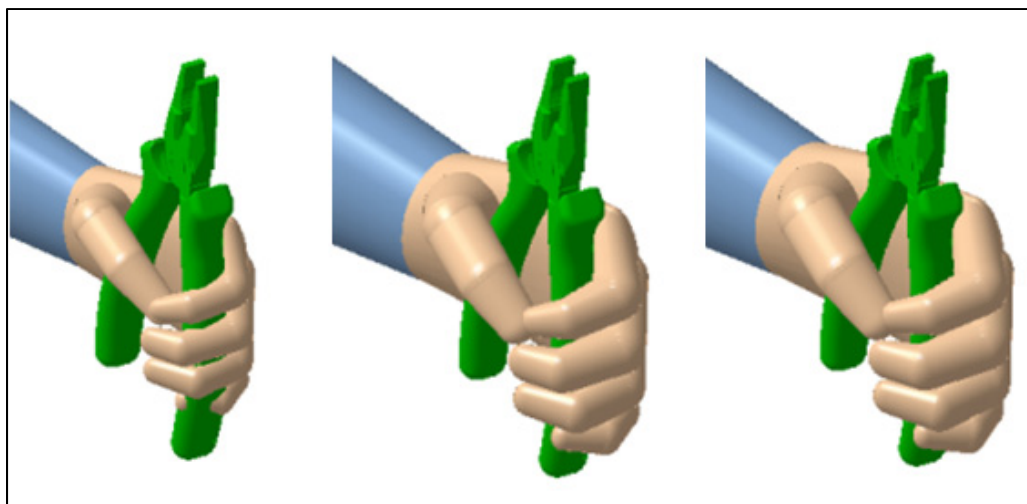


Figure 3.18 : Préhension pince, F5, H50 et H95

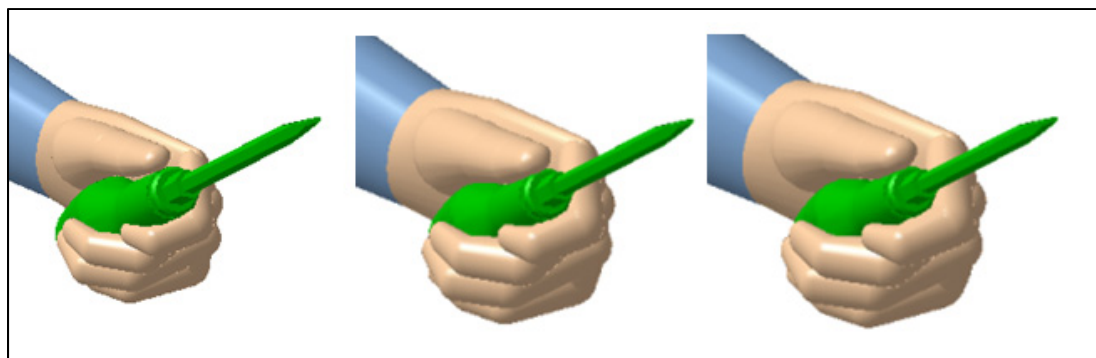


Figure 3.19 : Préhension tournevis, F5, H50 et H95

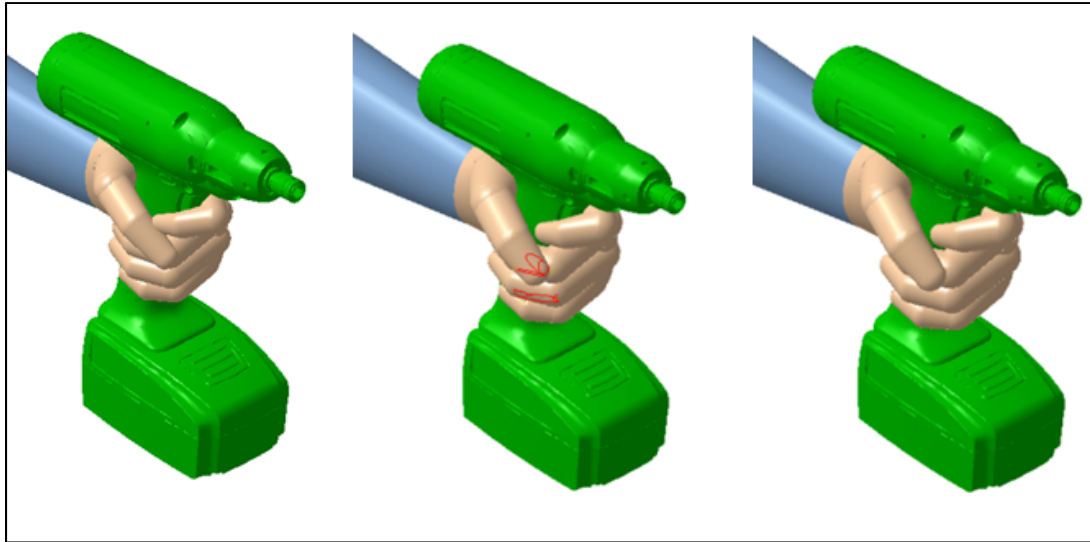


Figure 3.20 : Préhension perceuse, F5, H50 et H95

Dans l'ensemble les préhensions sont considérées plausibles. Cependant, alors que la plausibilité n'est que peu ou pas discuté quand il s'agit d'une préhension palmaire, tel qu'exercé sur un gros tournevis (Figure 3.19) ou une perceuse (Figure 3.20), elle l'est lors de préhension de précision. Cela s'explique par la corrélation observée entre la taille de la main et la distance entre le centre de la main et le repère de l'outil. Cette distance d'un mannequin d'anthropométrie H50 est plus grande que celle pour un F5 et plus petite que celle pour un H95. Donc, lorsque l'on applique la distance d'un H50 sur un F5, celle-ci est trop grande, et inversement la distance est trop courte pour le H95. On observe clairement le phénomène à la Figure 3.17.

Même si la préhension proposée est imparfaite, par exemple en raison d'un bout de doigt qui pénètre dans l'outil, elle sera ajustée par le moteur de positionnement. Par conséquent on considère que la préhension moyenne H50 peut être transférée à n'importe quelle anthropométrie.

## CHAPITRE 4

### APPARIEMENT, RECALAGE ET TRANSPOSITION

L'objectif du présent mémoire s'intéresse à définir une ou plusieurs préhensions de références sur des outils qui seront connus par le moteur de positionnement. Cependant, l'objectif global est de savoir appliquer une bonne préhension à un outil inconnu par le logiciel. Cela demande de s'intéresser à la transposition de l'information de l'outil connu vers un outil inconnu mais géométriquement similaire, tel que montré sur la Figure 4.1. Bien que ne faisant pas partie du cœur du présent mémoire, une courte discussion sur la résolution de cette problématique est présentée afin d'éclairer la suite du projet.

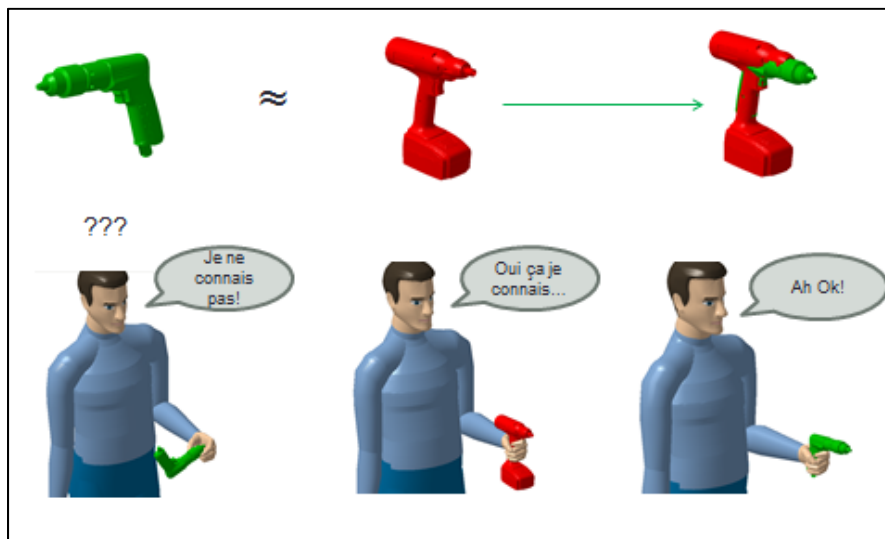


Figure 4.1 : Démarche basée sur la similarité géométrique, le recalage des objets appariés et la transposition de la préhension

La solution envisagée comporte plusieurs étapes. Lorsqu'une préhension doit être générée sur un outil inconnu, la première étape est de rechercher une géométrie similaire au sein de la base de données. Par la suite, l'outil inconnu est recalé sur l'outil de référence auquel il a été apparié, en tenant compte de la préhension qui sera appliquée. Finalement, la préhension de l'outil de référence est transposée au nouvel outil.






#### **4.1 Recherche d'une géométrie similaire et appariement**

La recherche de géométrie similaire peut être assimilée à un moteur de recherche, mais au lieu de se concentrer sur le texte ou les images comme Bing ou Google, il effectue ses recherches sur des géométries dans l'espace. Si l'industrie se montre intéressée par le concept, cela se justifie par un impact économique possible non négligeable. La réutilisation des informations antérieures devient plus facile, et réduit considérablement les coûts de conception.

Dassault Systèmes a choisi en 2010 d'acquérir la société Exalead (3DS, 2010), un spécialiste de moteurs de recherche destinés aux entreprises. Puisque le projet concerne DS, quelques essais ont été effectués avec Exalead OnePart pour savoir s'il peut convenir à la tâche, à savoir, reconnaître des outils géométriquement similaires.

Très succincts, les essais ont été réalisés avec certains outils de la base de données et quelques autres modèles récupérés sur internet. Tous les modèles fournis au logiciel étaient au format STL. Aucune autre information n'a été donnée, et donc aucune information n'a été utilisée autre que la géométrie du modèle. Les outils qui ont été choisis pour l'essai sont les clés plates, les clés mixtes, les marteaux et les clés allen.

Si le logiciel est capable d'offrir un grand score de similarité entre différentes clés plates géométriquement proches, il est aussi capable de ne trouver aucun lien entre deux marteaux, et par contre trouver une corrélation entre ce dernier et une clé allen (Figure 4.2).

					
3D Similarity score	78		Unsimilar	Unsimilar	85
3D Similarity score (mirror)	78		Unsimilar	Unsimilar	84
BB min	24.52 mm	13.7 mm	11.97 mm	36.01 mm	20.16 mm
BB mid	61.56 mm	31.4 mm	67.12 mm	36.01 mm	47.96 mm
BB max	305 mm	178 mm	149.92 mm	225 mm	248 mm
BB diagonal	312.11 mm	181.27 mm	164.7 mm	230.69 mm	253.4 mm






					
3D Similarity score	Unsimilar		53	50	Unsimilar
3D Similarity score (mirror)	Unsimilar		53	50	Unsimilar
BB min	36 mm	24.96 mm	11.55 mm	9.25 mm	31.2 mm
BB mid	135 mm	118.68 mm	50 mm	44 mm	124.04 mm
BB max	349.1 mm	299.6 mm	122 mm	106 mm	311.42 mm
BB diagonal	376.02 mm	323.22 mm	132.35 mm	116.99 mm	336.66 mm

Figure 4.2 : Essais avec Exalead OnePart

La recherche avec Exalead OnePart n'utilise pas seulement la géométrie 3D mais aussi différentes caractéristiques, telles que le nom de la pièce, le matériau, etc. Dans le cadre de la présente recherche, les modèles utilisés sont sous le format STL, qui correspond à une représentation facétisée du « boundary representation » (B-Rep) du modèle géométrique. Pour cette raison, il est fort probable que de meilleurs résultats peuvent être attendus lorsque les outils ont une plus grande quantité d'informations avec eux.

Bien entendu, il existe des concurrents à Exalead, tels que Geolus, PartSolution, 3D PartFinder, qu'il pourrait être intéressant d'évaluer.

Outre les solutions commerciales disponibles, des activités de recherche ont cours. Par exemple, Princeton a une page web spécifique à la classification de modèle 3D utilisant de l'apprentissage-machine (Princeton Vision & Robotics Labs (2018)).

La solution retenue devra permettre de retrouver, au sein de la base de données d'outils connus, un outil géométriquement similaire au nouvel outil, inconnu. Si cette étape se déroule bien, un outil de référence est apparié à l'outil inconnu. Par la suite, il faut procéder au recalage des outils en tenant compte de la préhension et transférer celle-ci vers l'outil inconnu.

## 4.2 Recalage et transposition

Le recalage de deux objets similaires mais non identiques peut mener à de multiples solutions valables. Par exemple, le recalage de deux clés mixtes de tailles différentes peut-être réalisé en faisant coïncider les têtes fermées (Figure 4.3 a)), les centroïdes (Figure 4.3 b)), ou les têtes ouvertes (Figure 4.3 c)). Dans le présent projet, la préhension de référence devrait être prise en compte dans le choix de la solution.

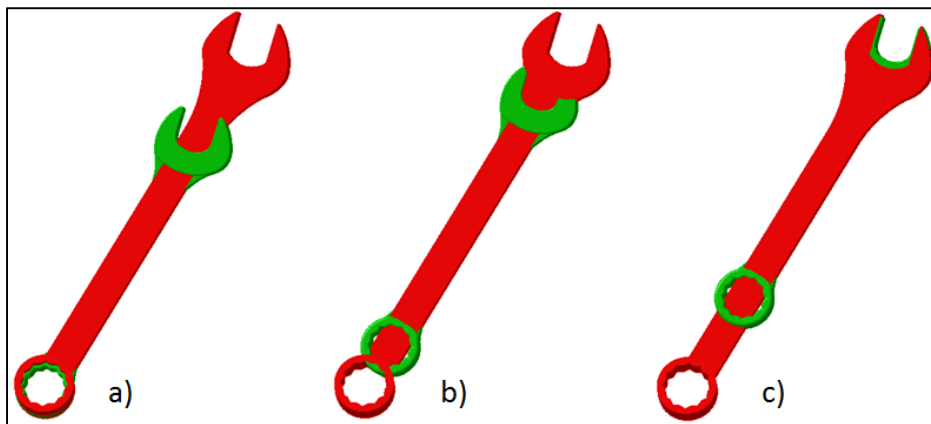


Figure 4.3 : Plusieurs solutions possibles, a) coïncidence des têtes fermées, b) coïncidence des centroïdes, c) coïncidence des têtes ouvertes.

### 4.2.1 Quels indices ?

Les indices doivent permettre de faire coïncider le nouvel outil sur l'outil de référence, et ce en prenant en compte la position de la préhension. En effet, faire coïncider les deux outils sans prendre en considération la préhension pourrait mener à un décalage de la préhension



sur le nouvel outil. Prenons pour exemple deux clés plates de longueur différentes (Figure 4.4). On peut les faire coïncider par une extrémité ou une autre. Or les deux solutions n'aboutiront pas au même résultat de transposition de la préhension.

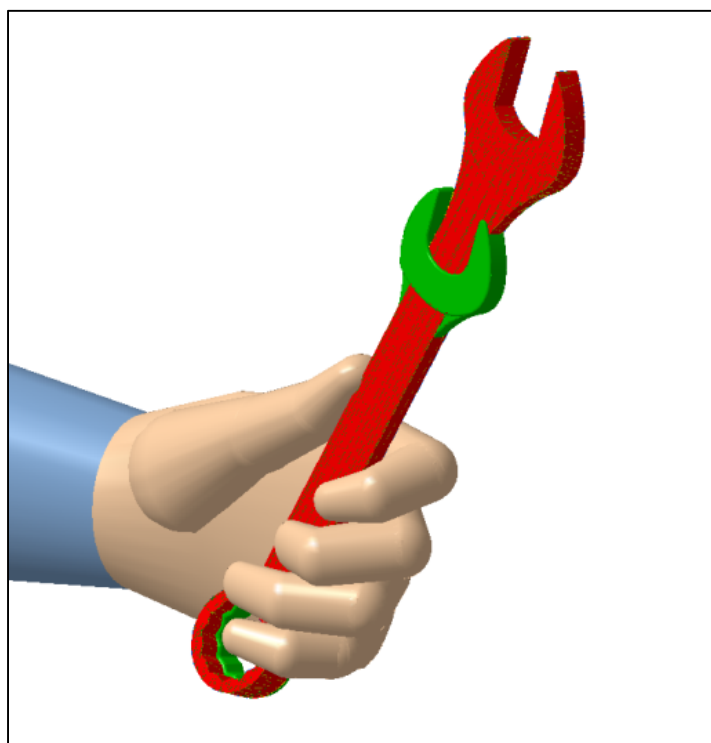


Figure 4.4 : Clés plates superposées

On comprend donc qu'il existe une difficulté liée à la différence géométrique entre les outils : plus ou moins longs, plus ou moins gros, plus ou moins orientés, etc.

Aussi, il est possible que le type de préhension fasse intervenir un choix lors du recalage. Par exemple, un utilisateur effectuant un « power grasp » sur un outil tel qu'une clé plate aurait tendance à vouloir maximiser le couple, et donc prendre l'outil au plus éloigné de la zone d'action. Au contraire, un « dexterous grasp » est utilisé lors d'une tâche de précision, et un utilisateur choisirait possiblement de se rapprocher de la zone d'action (Figure 4.5).

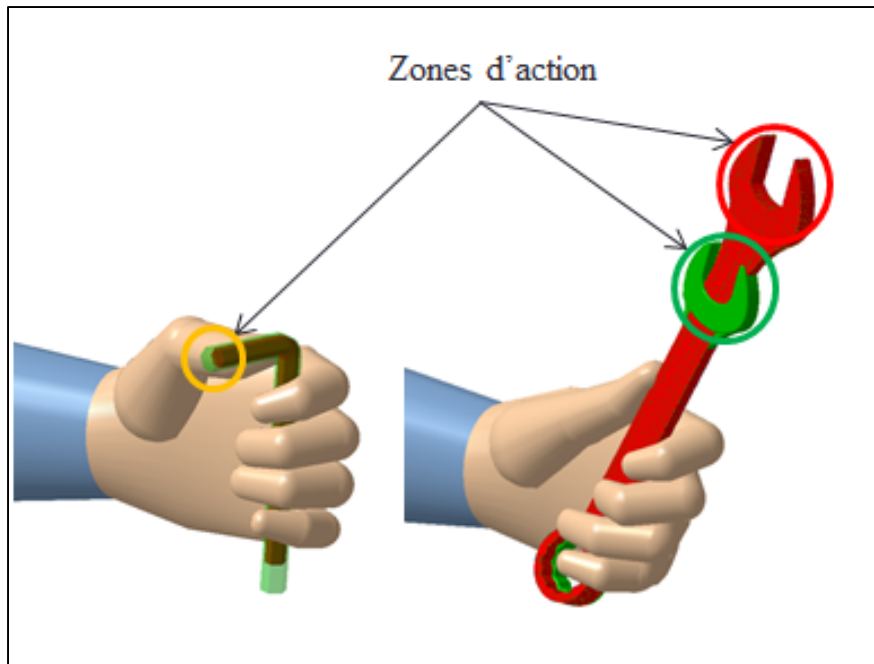


Figure 4.5 : Transposition de la préhension sur l'outil en fonction du type de préhension

#### 4.2.2 Combien d'indices?

Un objet libre dans l'espace possède 6 DDL, 3 translations et 3 rotations. Lorsque l'objet doit être mis en position par rapport à un autre objet de cet espace, certaines liaisons peuvent être appliquées. Lorsque l'on applique une liaison entre 2 objets, cela bloque certains DDL de l'un par rapport à l'autre.

Il existe différents types de liaisons simples :

- Une liaison appui plan (plan/plan) supprime 1 translation et 2 rotations.
- Une liaison pivot glissant (cylindre/cylindre) supprime 2 translations et 2 rotations.
- Une liaison rotule (sphère/sphère) supprime 3 translations.

D'autres types de liaisons simples :

- Ponctuelle (sphère/plan)
- Linéaire (cylindre/plan)
- Linéaire annulaire (sphère/cylindre)

Il est donc nécessaire que l'outil de référence comprenne des indices qui devront pouvoir être retrouvés sur l'outil inconnu, qui seront par la suite mis en correspondance avec ceux de l'outil de référence. Afin d'illustrer le principe envisagé, voici un exemple avec une clé plate.

### Outil de référence

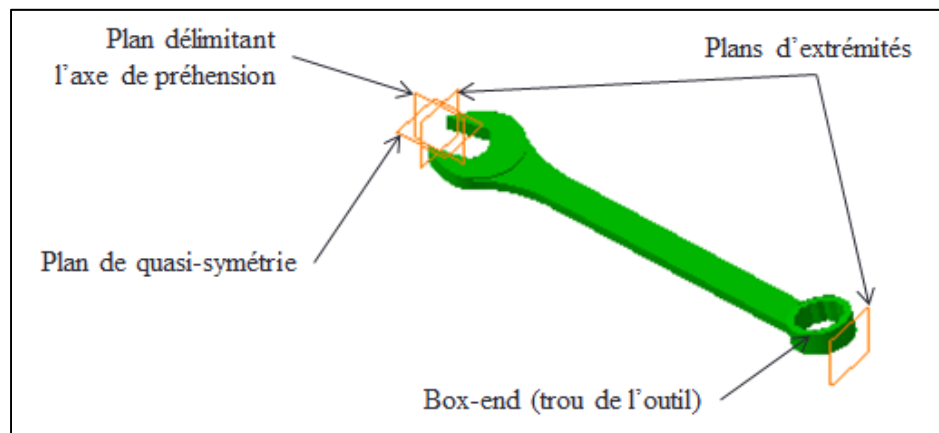


Figure 4.6 : Exemple d'éléments géométriques à prévoir pour le recalage, clé plate de référence

- On retrouve 4 plans. (Figure 4.6)
  - Un plan de quasi-symétrie (ignorant le box end)
  - Un plan délimitant l'axe de préhension
  - Deux plans délimitant les extrémités. On a besoin de délimiter les deux côtés, car l'outil peut être saisi de deux manières.

Il est à noter que les indices choisis sur l'outil de référence, dans ce cas-ci, sont des plans. Cela ne sera pas nécessairement le cas avec tous les outils. Par contre, afin d'éviter des problèmes de recalage dû à une mise en place hyperstatique, l'idée est d'offrir un maximum

de liberté sur l'outil de référence. Cependant, dans certains cas, tels que la gâchette d'une perceuse, il est nécessaire que l'indice soit précis, en l'occurrence, un point sur la gâchette.

### Nouvel outil

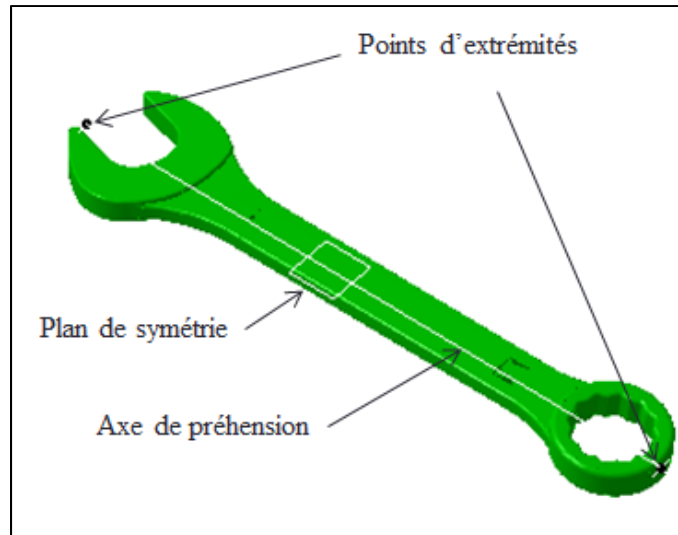


Figure 4.7 : Exemple d'éléments géométriques à extraire pour le recalage, clé plate inconnue

- On devra être capable de retrouver (Figure 4.7) :
  - Un plan de symétrie (ignorant le box end)
  - Un axe de préhension
  - Deux points, aux extrémités

Grâce à ces indices, on peut recalcr le nouvel outil sur l'outil de référence. Cependant, en appliquant les contraintes précédemment énoncées, deux solutions sont possibles (Figure 4.8). C'est dû au fait que la contrainte du plan de symétrie peut être appliquée dans un sens comme dans l'autre.

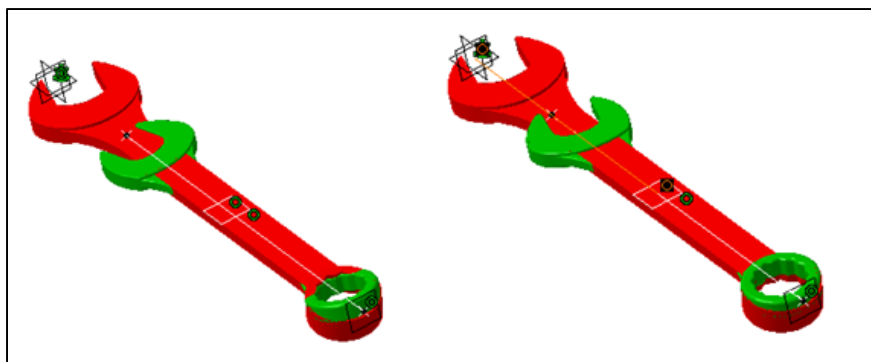


Figure 4.8 : Clés plates, deux solutions de recalage

Afin de n'avoir qu'une seule bonne et unique solution, il est nécessaire d'ajouter une nouvelle contrainte, par exemple, l'angle formé par les extrémités. L'annexe 2 propose des indices géométriques de recalage pour les différents outils de la base de données.

#### 4.2.3 Comment retrouver les indices ?

Si les indices de l'outil de référence sont définis dans la base de données, il faut retrouver les indices équivalents sur l'outil inconnu, et toute la difficulté est là. En effet, si certains indices, comme des plans de symétrie ou des axes, devaient être aisément retrouvés, il n'en est pas de même pour tous les indices. Prenons un exemple avec la perceuse (Figure 4.9).

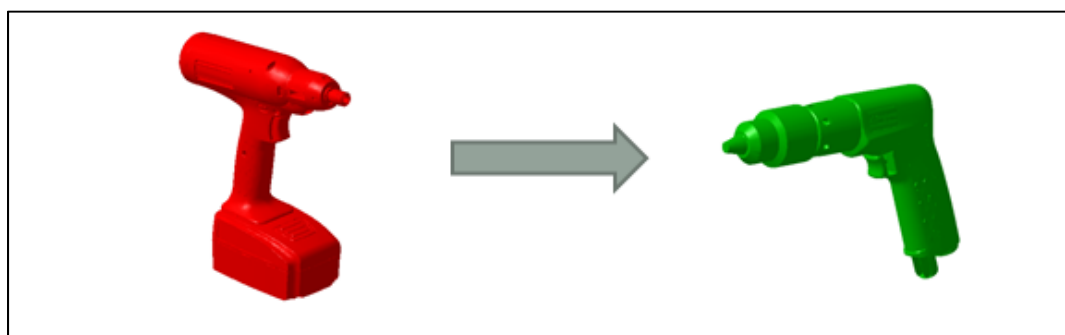


Figure 4.9 : Appariement de deux perceuses

Un « minimum bounding box » permet de récupérer le plan de symétrie, et l'axe de préhension peut-être retrouvé en réalisant une régression sur les points milieux de plusieurs

sections de la poignée. La dernière contrainte nécessaire est un point sur la gâchette (Figure 4.10). Puisque l'une des contraintes du projet est de demander le minimum d'information à l'utilisateur, lui demander où se trouve la gâchette n'est pas une solution idéale.

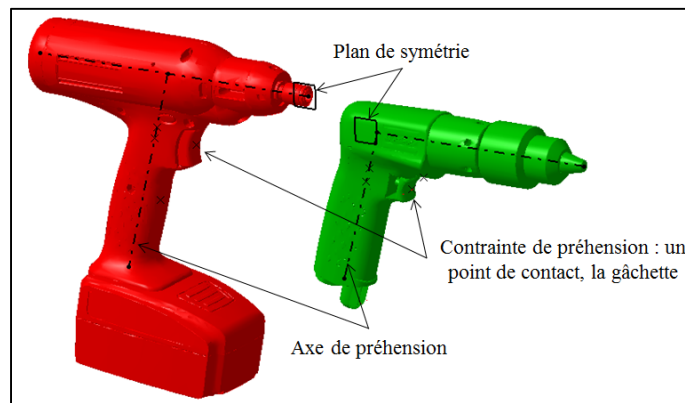


Figure 4.10 : Correspondance des indices, perceuse

Finalement, lorsque tous les indices sont retrouvés, il est possible de recaler correctement l'outil inconnu sur l'outil de référence en vue d'y transposer la préhension (Figure 4.11).

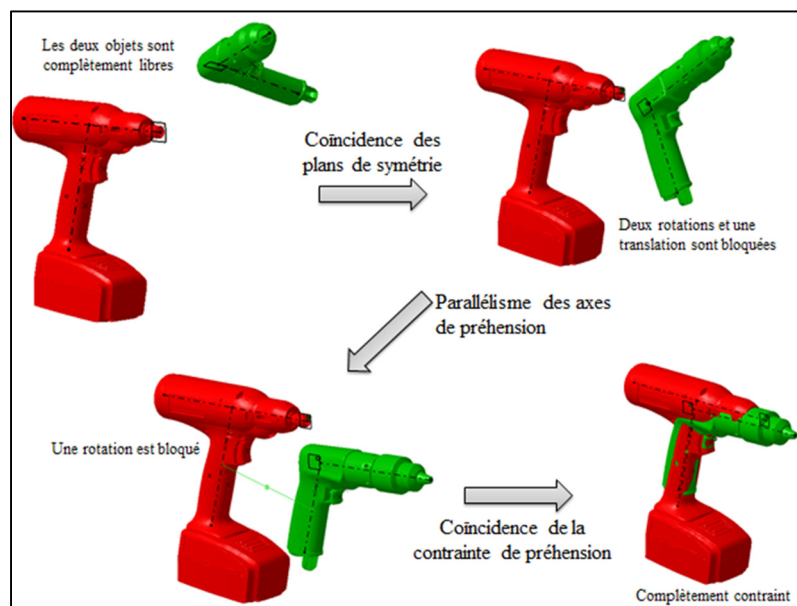


Figure 4.11 : Recalage des deux perceuses

On peut observer sur la Figure 4.12 qu'une fois les indices de recalage retrouvés et mis en coïncidence, la préhension transférée au nouvel outil est tout autant plausible que sur l'outil de référence.

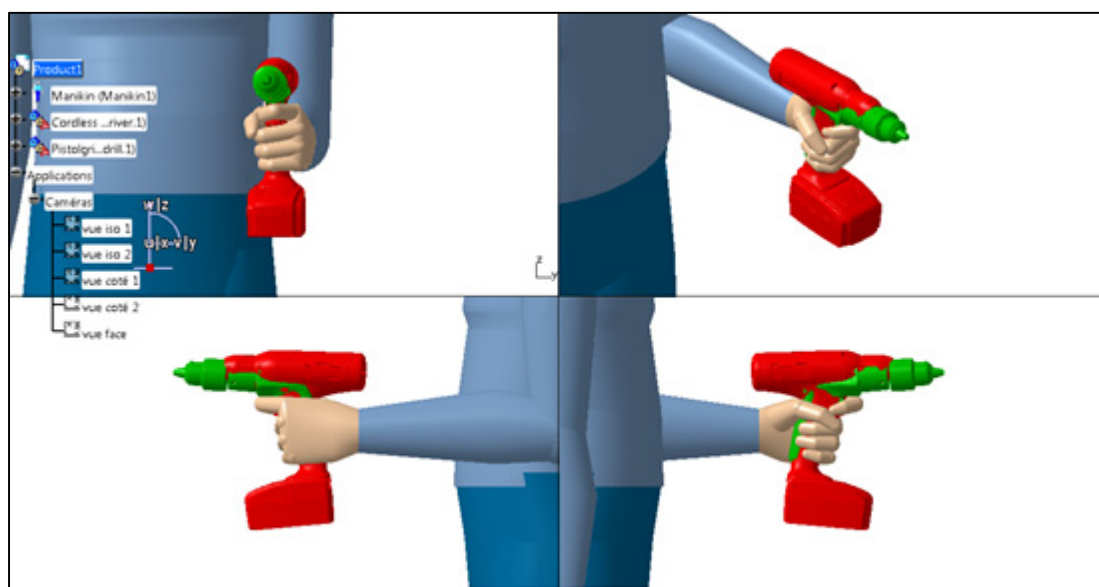


Figure 4.12 : Préhension transposée vers une perceuse initialement inconnue

Voici en Figure 4.13 quelques exemples de transposition sur d'autres outils. Il est à noter que pour les exemples figurant sur les Figure 4.12 et Figure 4.13, on suppose que la recherche d'outils de géométries similaires a fonctionné, donc que l'outil inconnu est désormais associé à un outil de la base de données. Aussi, on suppose que le recalage a été réalisé d'une manière satisfaisante.

Chacun des exemples montre que la transposition de la préhension de référence vers le nouvel outil fournit une préhension plausible.

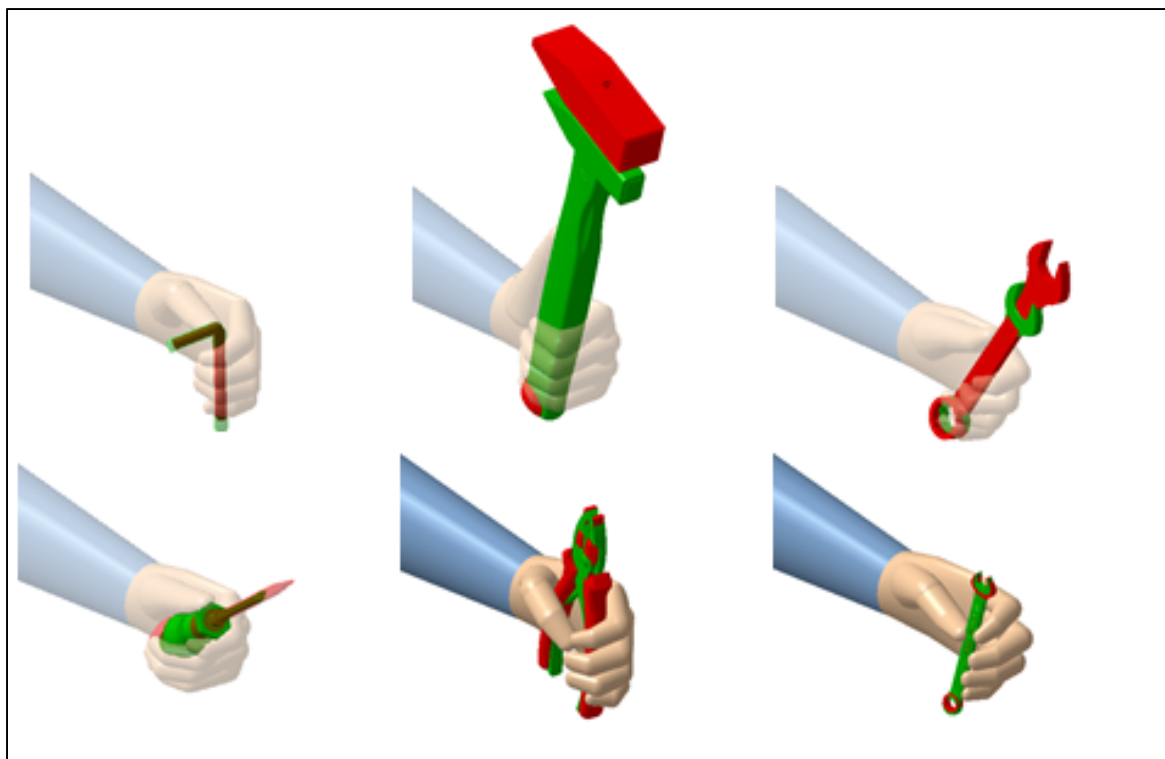


Figure 4.13 : Exemples de transposition vue superposée

Les figures Figure 4.14 à Figure 4.20 permettent d'apprécier les préhensions transposées en vue côte à côte des figures Figure 4.12 et Figure 4.13.



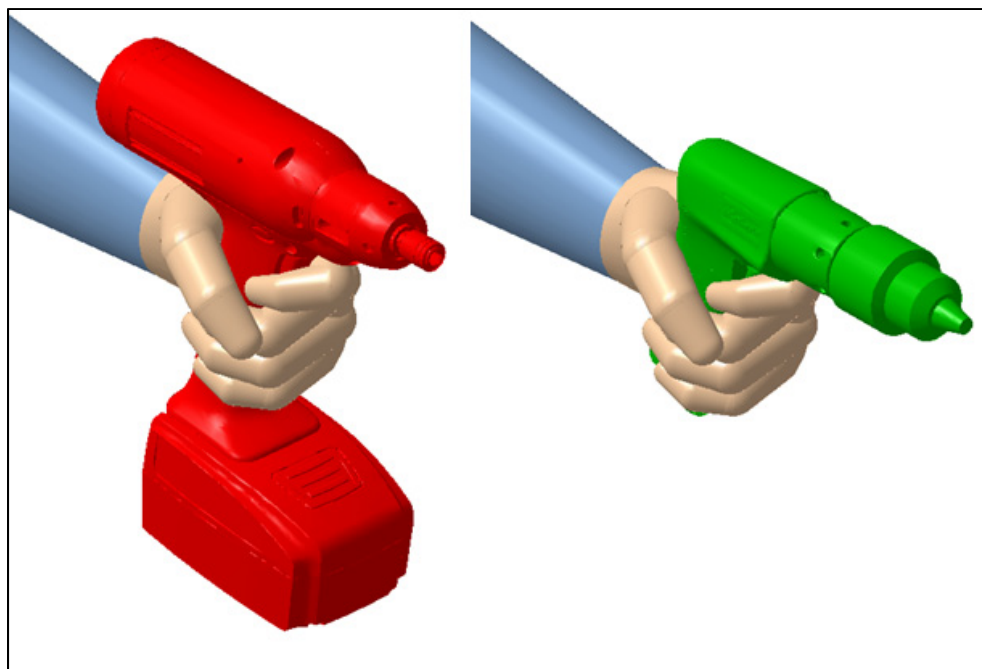


Figure 4.14 : Transposition perceuse

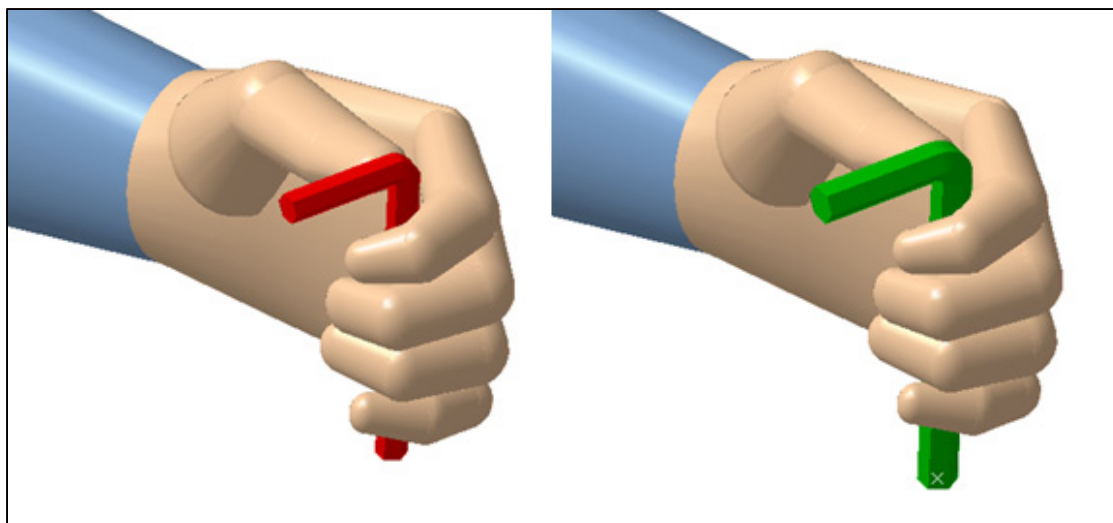


Figure 4.15 : Transposition clé allen

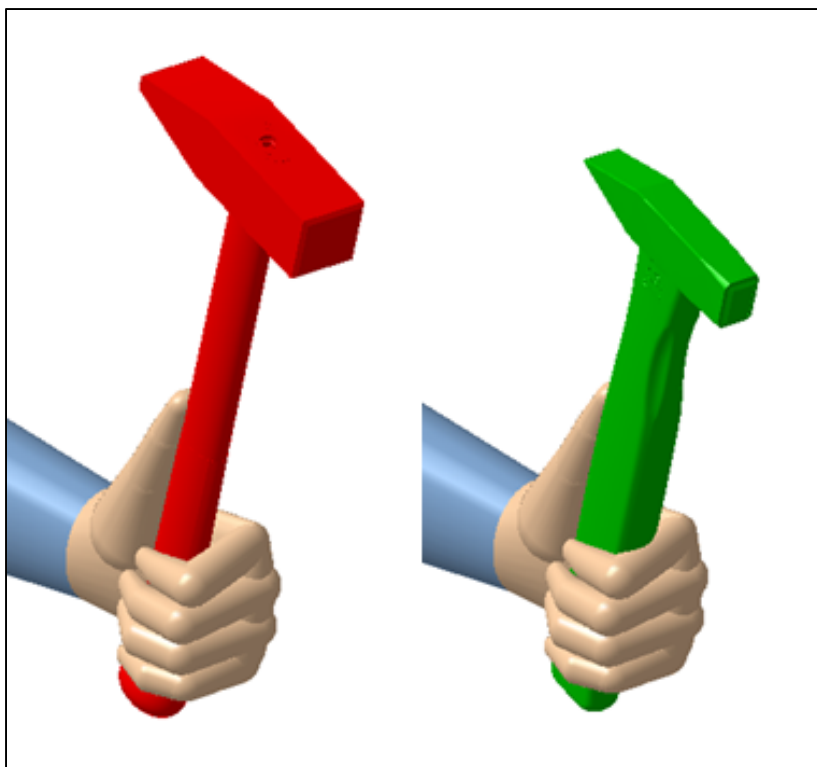


Figure 4.16 : Transposition marteau

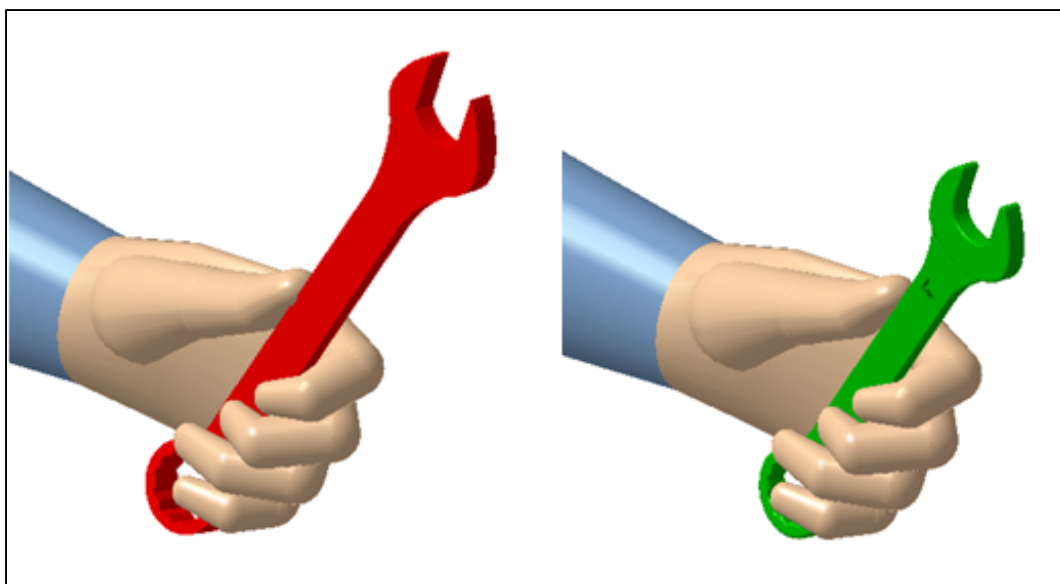


Figure 4.17 : Transposition clé mixte

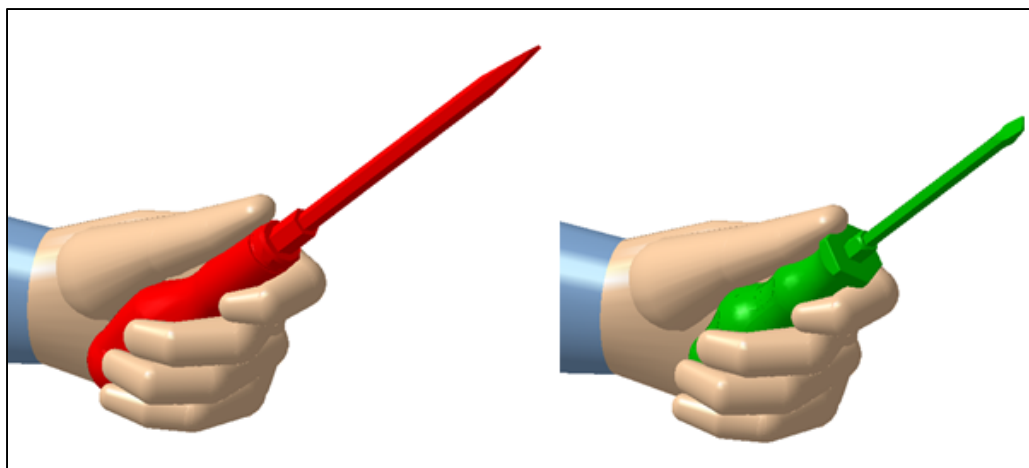


Figure 4.18 : Transposition tournevis

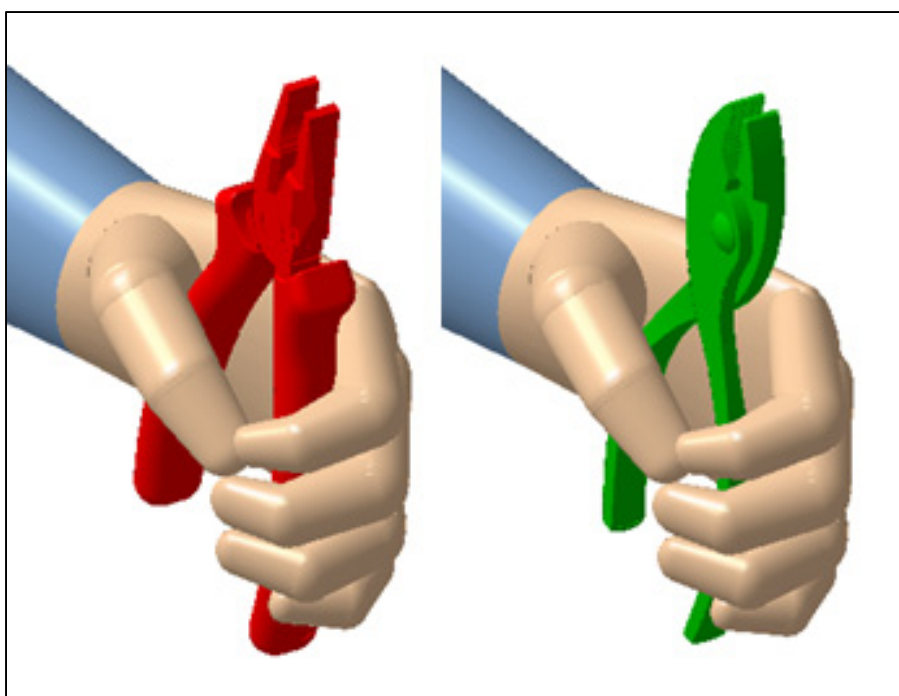


Figure 4.19 : Transposition pince

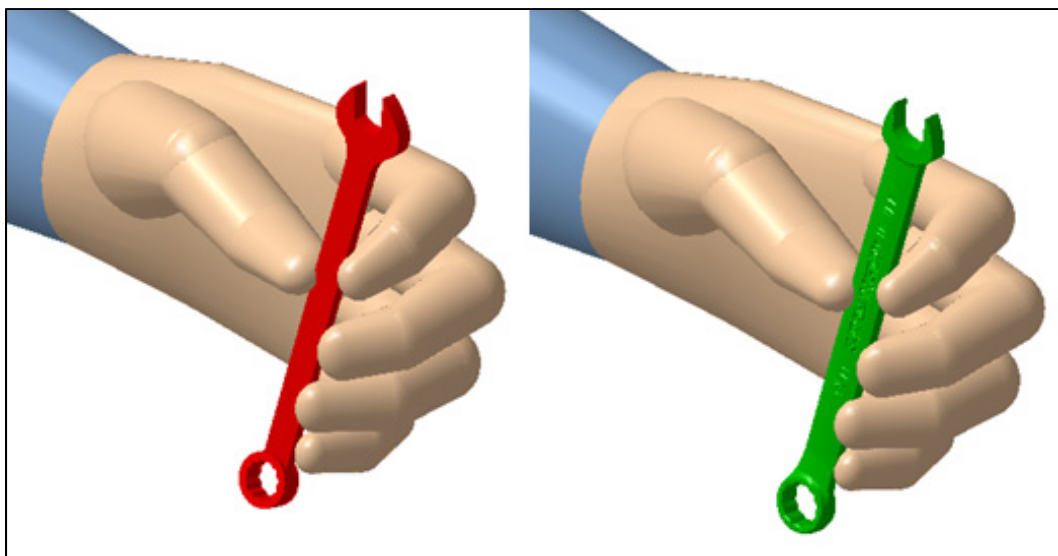


Figure 4.20 : Transposition petite clé mixte

L'examen de l'ensemble de ces cas montre clairement que, si l'appariement et le recalage sont réalisés correctement, la préhension de référence, une fois transposée au nouvel outil, demeure plausible.

## CONCLUSION

Le présent mémoire discute d'une nouvelle approche afin de proposer à un mannequin virtuel une préhension visuellement plausible sur un outil inconnu. Afin d'y parvenir, nous avons évalué une solution consistant à utiliser des objets typés au sein d'une base de données, dont l'information de préhension est transposée à un objet inconnu, mais géométriquement similaire.

La base de données pour les essais est composée de 12 outils usuels de l'industrie. Certains des outils ayant plusieurs fonctions, il a fallu considérer que plusieurs préhensions sont à prévoir pour chaque outil de la base de données. Les préhensions sont enregistrées au sein de la base de données avec la position et l'orientation de la main par rapport à l'outil, ainsi qu'avec les angles articulaires de la main du mannequin. Le premier objectif spécifique est donc atteint.

Afin de s'assurer que l'anthropométrie n'avait qu'un impact limité sur la préhension, nous avons effectué des essais avec trois anthropométries différentes, soit un homme au 50<sup>ème</sup> centile, une femme au 5<sup>ème</sup> centile et un homme au 95<sup>ème</sup> centile. Les essais ont d'abord consisté à réaliser 10 préhensions avec chacune des trois anthropométries sur l'outil perceuse. Cela nous a permis d'observer des corrélations entre la taille de la main et la position de la main sur l'outil, ainsi que des corrélations entre la taille de la main et certains angles articulaires. Cependant, les corrélations étant faibles, nous avons ensuite souhaité vérifier si le transfert d'une préhension moyenne issue d'un homme au 50<sup>ème</sup> centile pouvait rester plausible avec une anthropométrie différente. Afin de s'en assurer, nous avons validé auprès de l'équipe d'experts la plausibilité de ces différentes préhensions. Il a été conclu que la préhension réalisée avec un homme au 50<sup>ème</sup> centile peut être transférée à d'autres anthropométries en demeurant plausible. Le deuxième objectif spécifique est atteint. On remarque toutefois, surtout pour les objets de petite taille, que la plausibilité de la préhension obtenue dépend du niveau de précision souhaité. En effet, le transfert vers une plus petite anthropométrie montre un éloignement de l'outil du centre de la main, de sorte que les doigts

du mannequin pénètrent dans l'objet. À l'inverse, lorsque le transfert se déroule vers une plus grande anthropométrie, l'outil se rapproche du centre de la main, et certains des doigts ne touchent plus parfaitement l'outil.

Par la suite, nous souhaitons déterminer si la solution, qui consiste à apparier un outil géométriquement similaire au nouvel outil au sein de la base de données d'objets typés, puis à transférer l'information de préhension de l'objet de la base de données vers le nouvel objet, peut fonctionner. Dassault Systèmes ayant son propre moteur de recherche géométrique, nous l'avons évalué sommairement. Bien que certains résultats respectent nos attentes, d'autres nous laissent penser qu'il reste du travail à effectuer afin de garantir les résultats.

Dans l'hypothèse où la recherche de géométries similaires fonctionne, nous avons évalué une méthode afin de recalcr l'objet inconnu sur l'objet de référence, en tenant compte de la préhension à effectuer. La méthode consiste à définir au préalable sur les objets typés des éléments géométriques simples, comme des plans de symétrie, qui sont significatifs pour la préhension. Puisque seuls les objets de la base de données contiendront ces éléments au préalable, il faudra aussi automatiquement retrouver des éléments géométriques équivalents sur l'outil inconnu. De là, la mise en coïncidence de ces éléments géométriques permet d'effectuer le recalage des deux outils appariés. Les essais de recalage de l'outil typé et de l'outil inconnu basés sur la mise en correspondance de ces éléments géométriques permettent d'observer qu'une préhension transposée de l'objet typé vers le nouvel objet est tout à fait plausible. Le quatrième objectif spécifique est donc atteint.

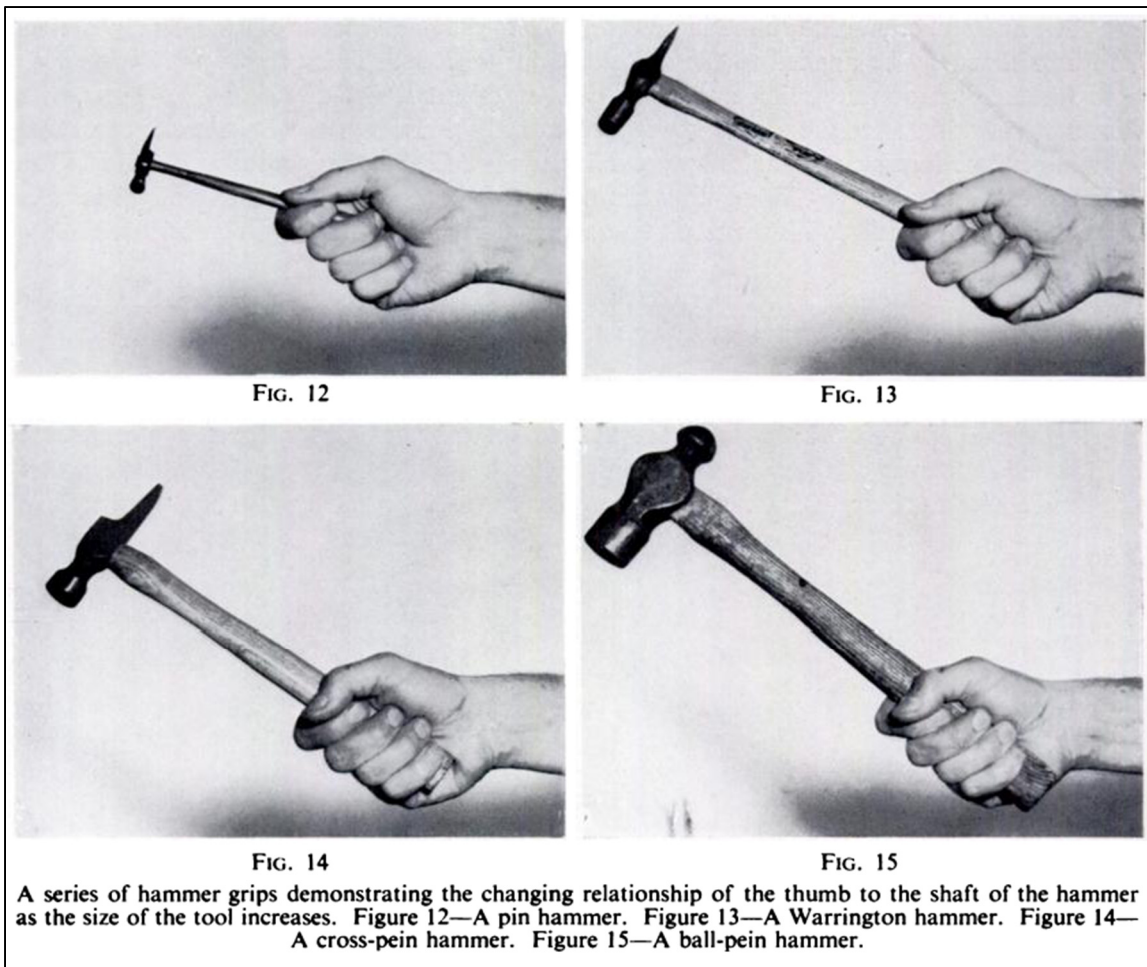
Globalement, nous avons évalué une approche très prometteuse capable de générer automatiquement une préhension plausible pour un outil inconnu. Cependant, l'étape de recherche de géométries similaires, ainsi que l'étape du recalage des outils appariés nécessitent un travail plus approfondi. L'objectif général du projet est atteint.

## RECOMMANDATIONS

Bien que les objectifs du projet aient été atteints, beaucoup de travail reste à faire. D'abord, la solution envisagée ne devrait pas être exploitée seule, mais accompagnée d'un algorithme de génération de préhension. Celui-ci serait en mesure d'améliorer la préhension de référence offerte par notre solution, mais aussi de réaliser les préhensions n'ayant pas de référence, tel que l'action d'appuyer sur un bouton.

Ainsi, la solution présentée dans ce mémoire nécessite de pouvoir comparer la géométrie de modèles, afin de retrouver et apparier une référence. Nous avons testé la solution de Dassault Systèmes, EXALEAD ONEPART, et nous avons remarqué que celle-ci ne parvient pas au résultat souhaité dans tous les cas. Cependant, les essais ont été très succincts, et doivent être approfondis pour affirmer que la solution de DS peut ou non effectuer adéquatement la recherche de géométrie similaire. Aussi, sans compter qu'il existe d'autres moteurs de recherche 3D (CIMdata, 2013) qui pourraient être évalués, une multitude de techniques existent pour l'évaluation de similarité 3D qui pourraient être explorées (Cardone, 2003) (Briere-Cote, 2012). Une approche assez récente utilisant l'apprentissage par réseau de neurones profond pourrait avoir un certain potentiel pour le projet, car celle-ci permet la classification des objets 3D dans leurs catégories respectives, tels que marteau, vélo, maison, cheval (Princeton Vision & Robotics Labs, 2018).

Afin de proposer une solution industrielle, il faudra déterminer les familles d'outils souhaitées (ex. : clés plates) ainsi que la quantité d'outils pour chaque famille. Napier (1956) souligne l'évolution de la position du pouce en fonction de la taille d'un marteau (Figure\_0 2), ce qui démontre l'intérêt de considérer différentes tailles d'outil pour une même famille. Aussi, le nombre de préhensions à fournir par objet dépendra du nombre d'actions inhérentes à l'outil, mais aussi de la considération ou non des actions de type communes, tel que pousser tirer, saisir, transporter.

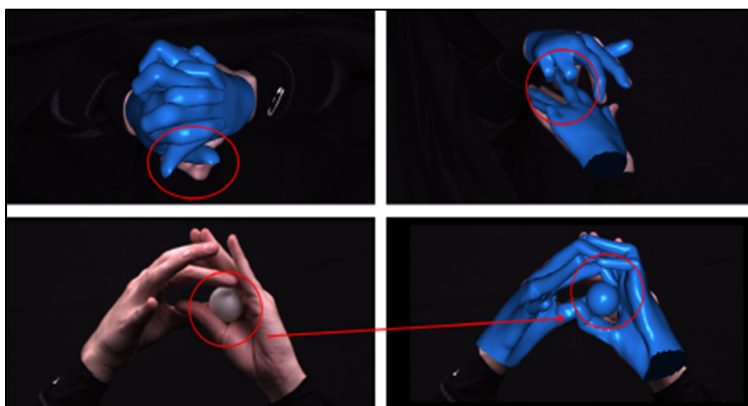


Figure\_0 2 : Plusieurs tailles de marteau engendrent différentes préhensions. Tirée de Napier (1956)

Afin de disposer de préhensions de référence le plus réaliste possible, ainsi qu'en raison du nombre probablement important d'objets différents à considérer pour une base de données d'une solution industrielle, il pourrait être intéressant de capturer les préhensions réalisées par un sujet humain sur les différents objets à considérer. Une méthode à considérer consiste à utiliser un système de mesure optoélectronique. Plusieurs caméras filment simultanément un évènement, où les différents éléments à identifier portent plusieurs capteurs visibles par les caméras, qui permettront de réaliser une triangulation afin de les positionner dans l'espace. Cette solution permet d'observer tout type d'évènement et est assez facile à mettre en place, mais un risque existe : un capteur pourrait se retrouver dans une position où trop peu de caméras le verraient, et dans ce cas sa position serait faussée tel qu'on peut l'observer



sur la Figure\_0 3 (Ballan, 2012). Savescu (2006) a choisi d'ajouter un cyberglove (Figure\_0 4) au sujet afin de pallier cette limitation.



Figure\_0 3 : exemple d'erreur avec un système optoélectronique, tirée de Ballan 2012



Figure\_0 4 : Cyberglove. Tirée de <http://www.cyberglovesystems.com/>

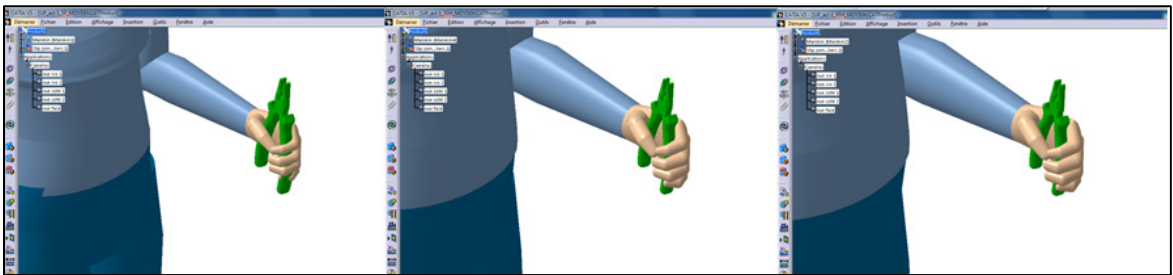
Enfin, il pourrait être pertinent d'explorer la possibilité d'exploiter les corrélations modérément fortes observées lors des tests statistiques afin de corriger automatiquement la préhension proposée en fonction de l'anthropométrie du mannequin virtuel, tel qu'exposé à l'annexe III.



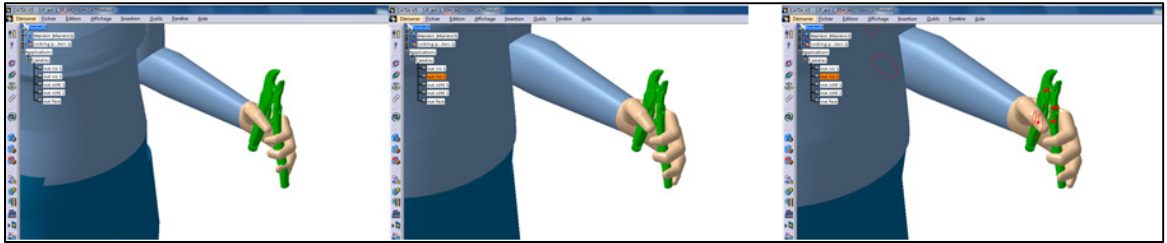
## ANNEXE I

### Préhensions moyennes H50 transposées à F5 et H95

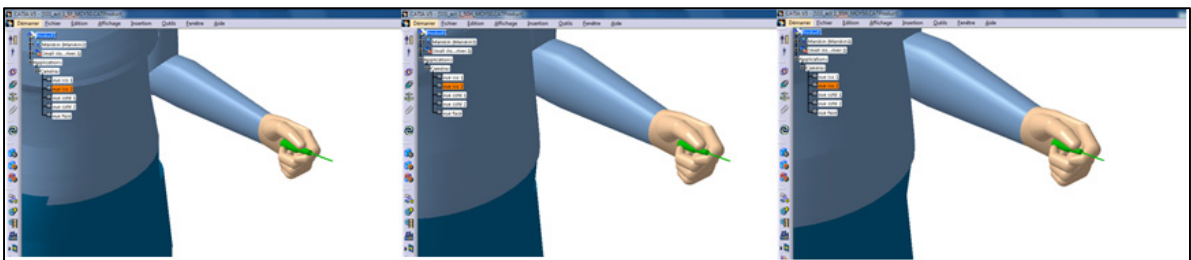
Pour chacune des figures suivantes, l'image de gauche correspond au F5, celle du milieu au H50, et l'image de droite au H95. L'examen des images suggère que la préhension de référence définie pour une anthropométrie H50 peut être transposée aux anthropométries F5 et H95 et demeurer plausible.



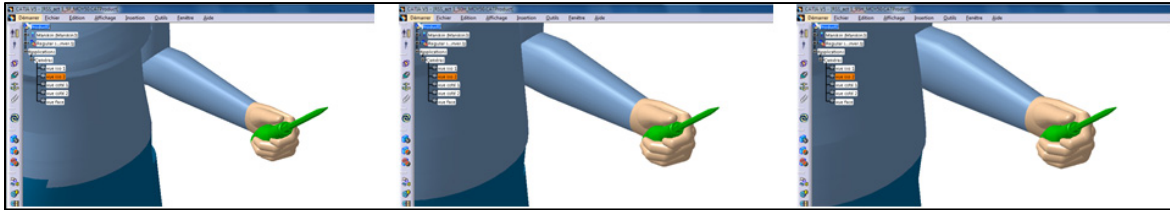
Figure\_I 1 : Préhension de l'action inhérente, pince, F5, H50 et H95



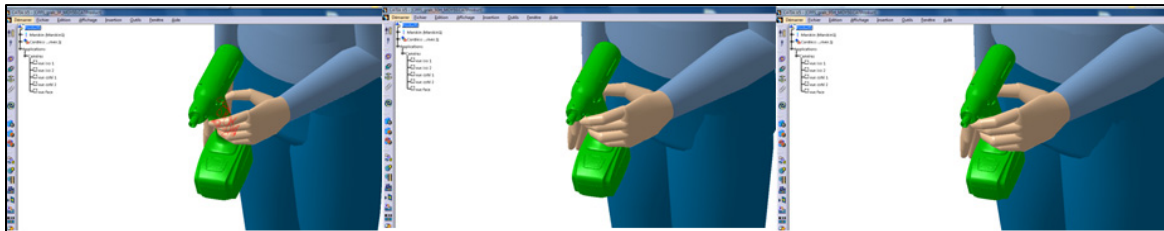
Figure\_I 2 : Préhension de l'action inhérente, pince-étail, F5, H50 et H95



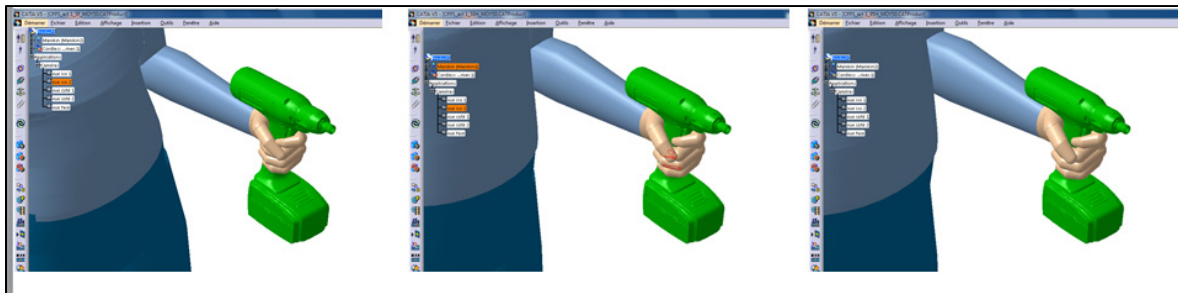
Figure\_I 3 : Préhension de l'action inhérente, petit tournevis, F5, H50 et H95



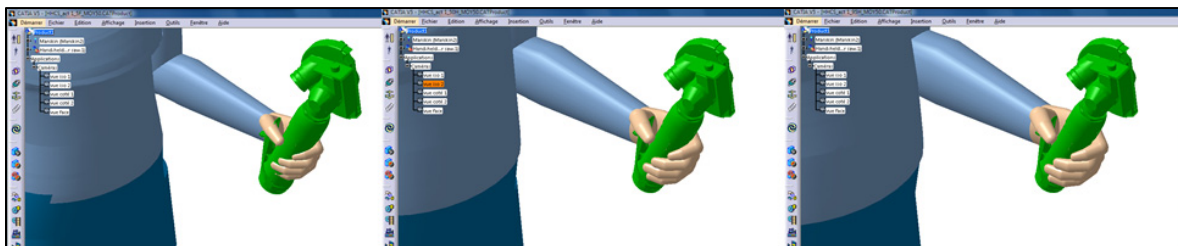
Figure\_I 4 : Préhension de l'action inhérente, gros tournevis, F5, H50 et H95



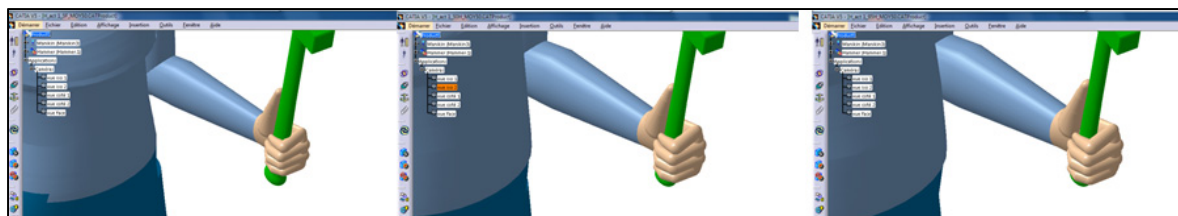
Figure\_I 5 : Préhension "saisir", visseuse électrique, F5, H50 et H95



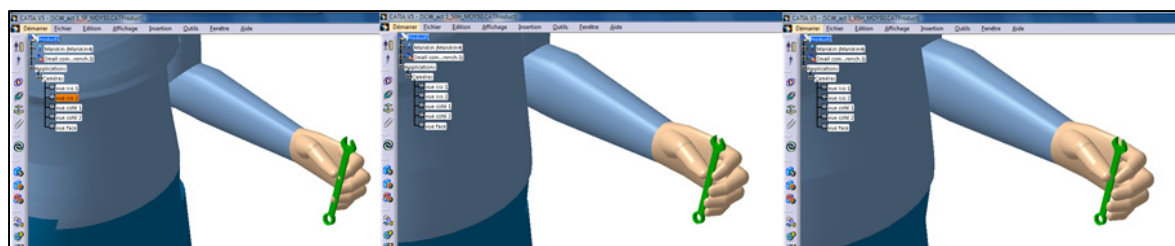
Figure\_I 6 : Préhension de l'action inhérente, visseuse électrique, F5, H50 et H95



Figure\_I 7 : Préhension de l'action inhérente, scie circulaire, F5, H50 et H95



Figure\_I 8 : Préhension de l'action inhérente, marteau, F5, H50 et H95



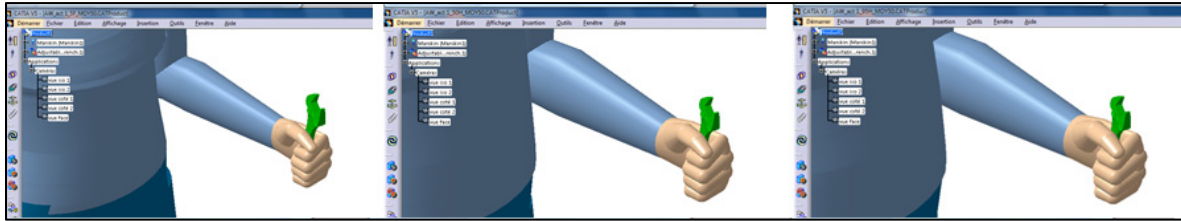
Figure\_I 9 : Préhension « visser », petite clé plate, F5, H50 et H95



Figure\_I 10 : Préhension « visser tirer coté ouvert », clé plate, F5, H50 et H95



Figure\_I 11 : Préhension « visser tirer coté fermé », clé plate, F5, H50 et H95



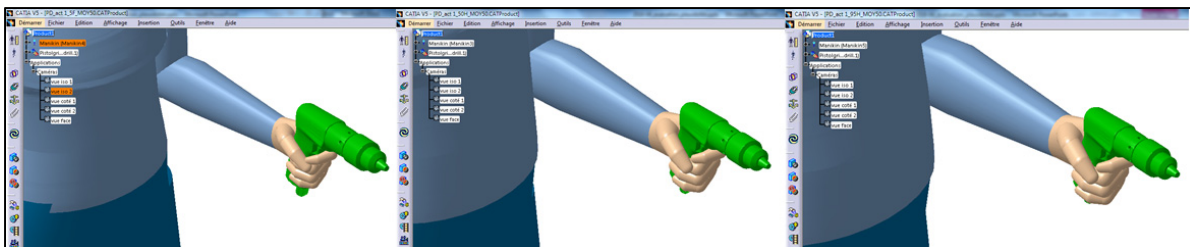
Figure\_I 12 : Préhension « visser pousser », clé à molette, F5, H50 et H95



Figure\_I 13 : Préhension « visser tirer », clé à molette, F5, H50 et H95



Figure\_I 14 : Préhension « visser tirer », clé allen, F5, H50 et H95



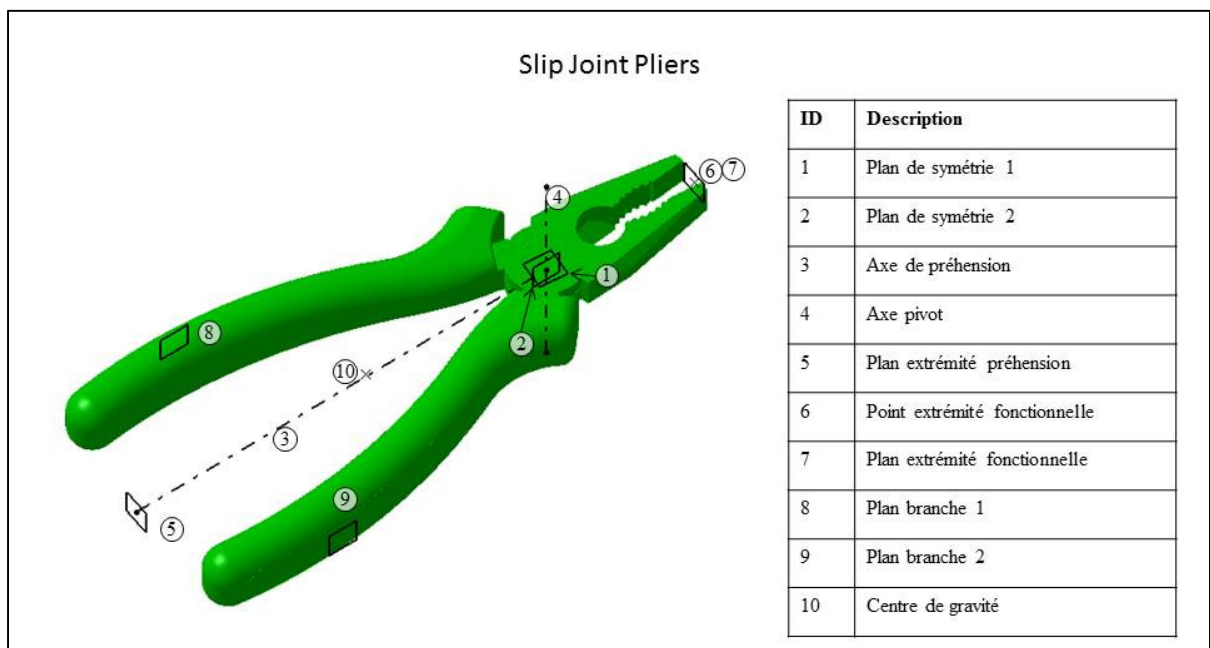
Figure\_I 15 : Préhension de l'action inhérente, perceuse, F5, H50 et H95



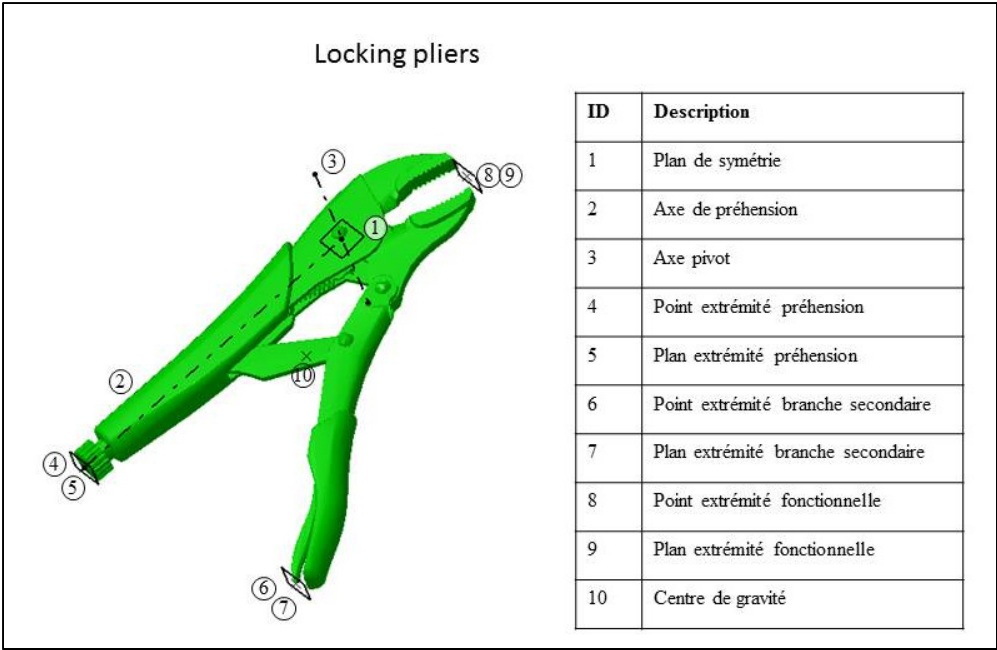
## ANNEXE II

### Indices de recalage des outils

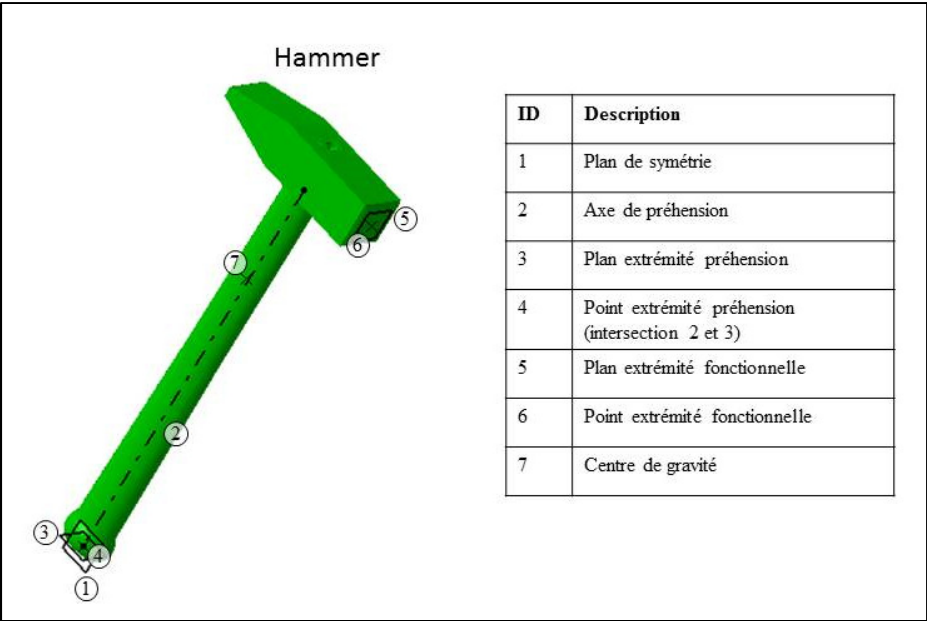
Afin de proposer une préhension de référence à un outil inconnu, l'approche consiste à transférer l'information de préhension préalablement définie pour un outil de référence vers l'outil inconnu. Afin d'y parvenir, une étape de recalage entre l'outil de référence et le nouvel outil doit être réalisée. Cette étape consiste à extraire automatiquement des indices géométriques de recalage du nouvel outil, et de faire coïncider ces indices avec ceux de l'outil de référence, préalablement défini. Cette annexe présente une suggestion d'indices pour les outils de référence.



Figure\_II 1 : Indices d'une pince

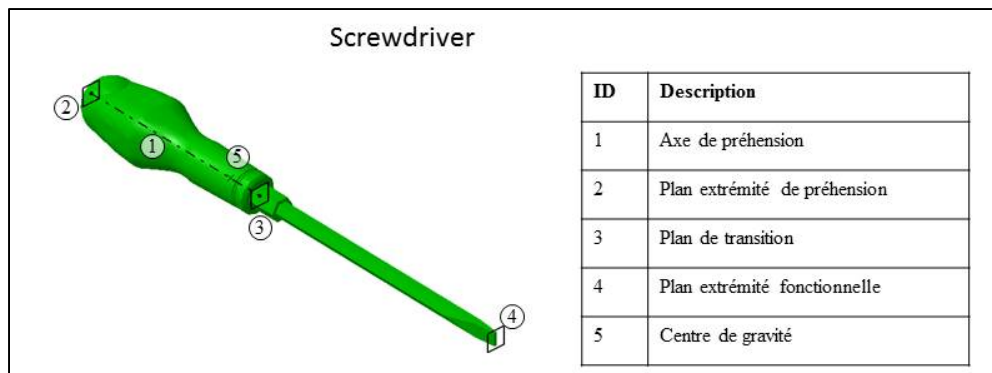


Figure\_II 2 : Indices d'une pince-étau

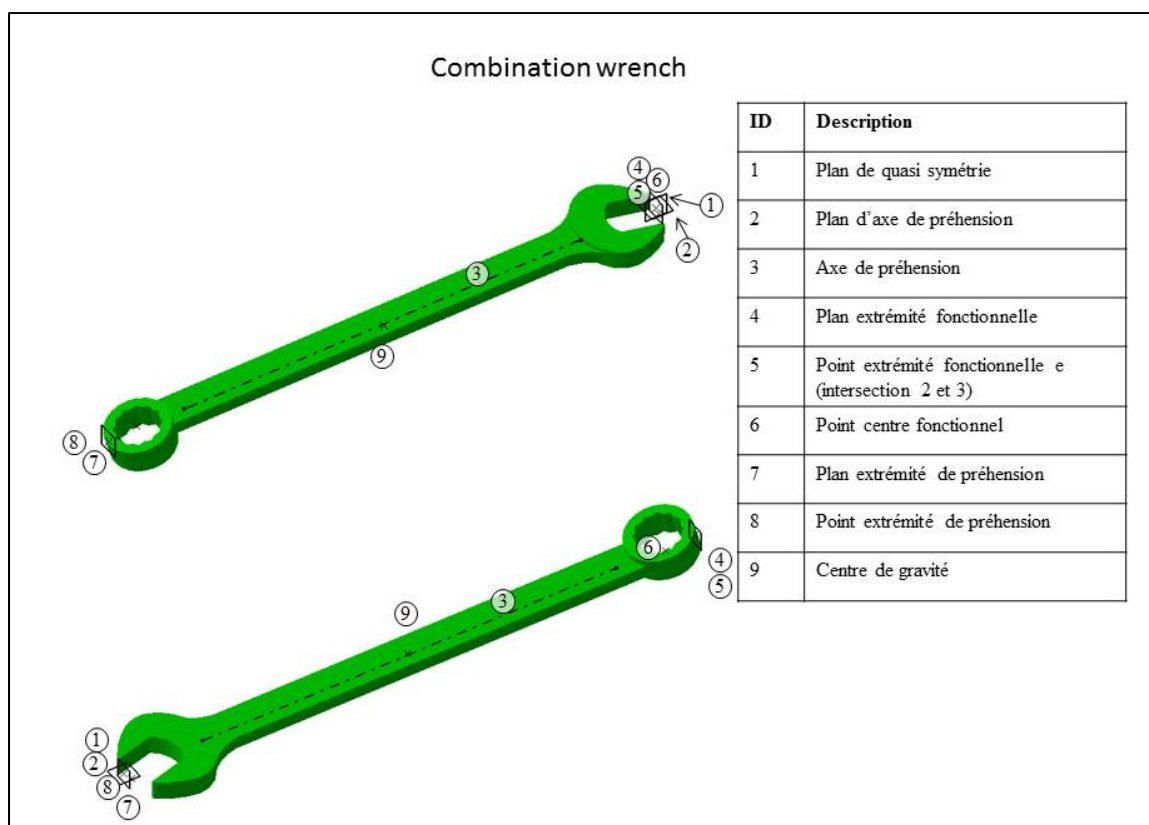


Figure\_II 3 : Indices d'un marteau

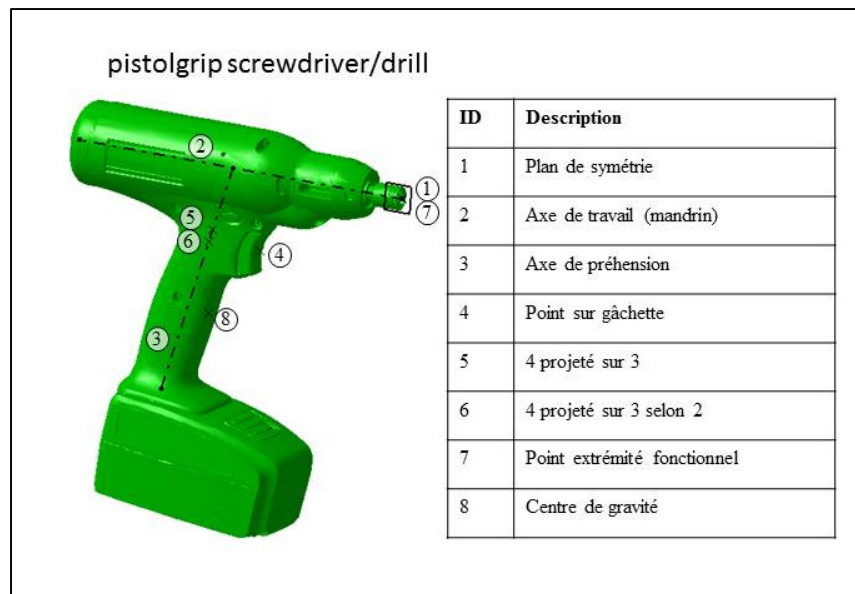




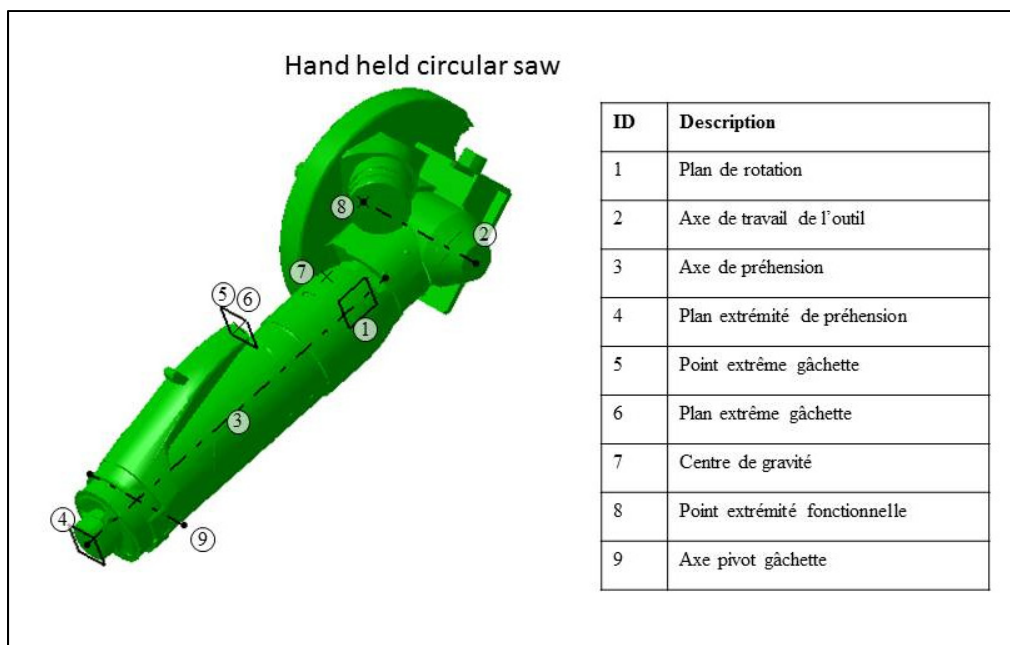
Figure\_II 4 : Indices d'un tournevis



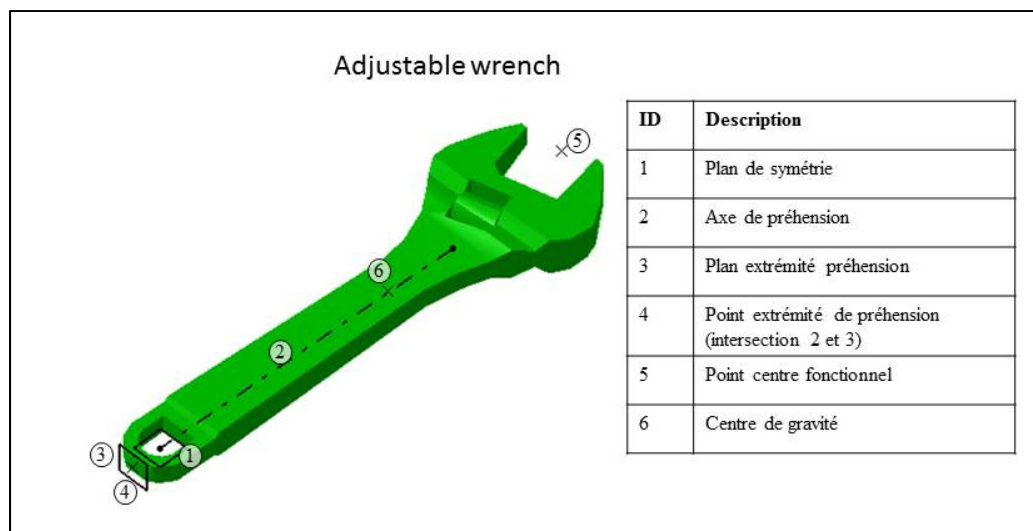
Figure\_II 5 : Indices d'une clé plate



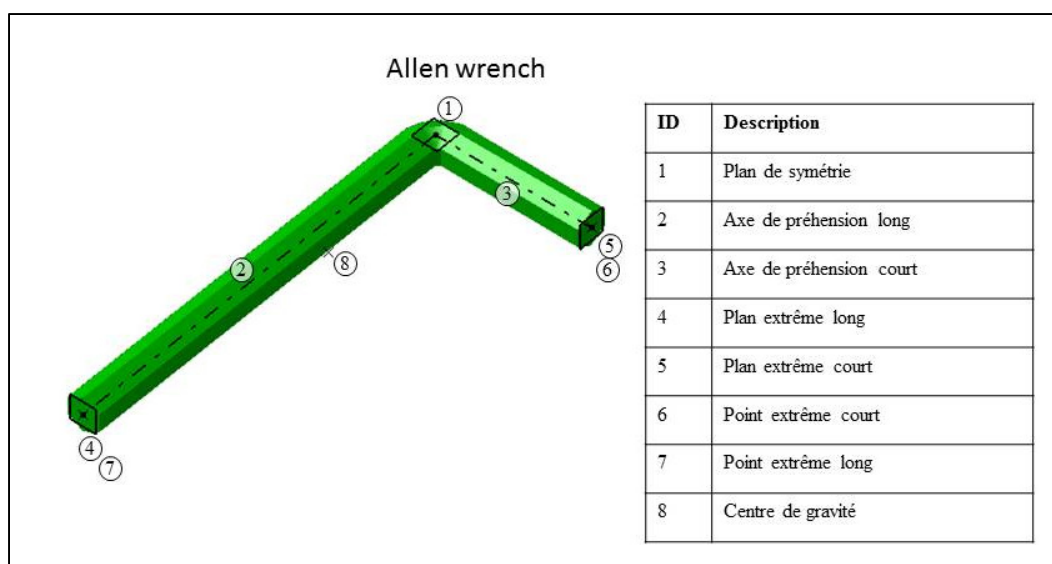
Figure\_II 6 : Indices d'une perceuse



Figure\_II 7 : Indices d'une scie circulaire



Figure\_II 8 : Indices d'une clé à molette



Figure\_II 9 : Indices d'une clé allen



### ANNEXE III

#### Possibilité de correction de la position selon l'anthropométrie

Lors de la discussion ayant pour objectif de vérifier la plausibilité visuelle de la transposition de la préhension définie pour H50 vers d'autres anthropométries, il a été conclu globalement que les préhensions restaient plausibles, malgré les pénétrations des doigts dans certains objets, notamment dans le cas de la petite clé plate. Cependant, lors de l'analyse statistique évaluant l'effet de l'anthropométrie sur la préhension, une corrélation modérément forte a été observée pour la position selon l'axe x, qui correspond à la position du centre de préhension de la main mesurée suivant l'axe x du repère de l'outil. Nous nous sommes donc intéressés à vérifier si le moteur de positionnement pourrait ajuster la position de la main selon l'anthropométrie afin d'améliorer la plausibilité de la préhension suggérée. Un essai a été réalisé afin d'observer si une correction pourrait être effectuée en tenant compte de l'anthropométrie. C'est cet essai qui est présenté ici.



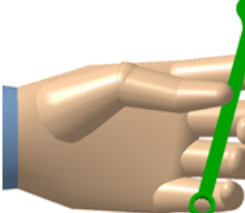

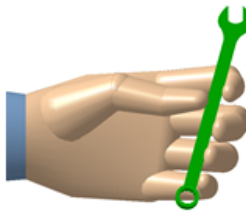

Les mesures définissant la préhension sont aux nombres de 26 : 20 angles articulaires, 3 de positions et 3 d'orientations. Les mesures de position et d'orientation correspondent à la mesure entre le repère de l'objet, et le repère de la main. Lorsque nous parlons de la position selon X, c'est selon l'axe X du repère de l'objet.

Pour tester la correction, la méthode suivante a été appliquée :

- Les essais statistiques sur la perceuse ont permis d'identifier une corrélation modérément forte selon X.
- Le modèle linéaire de la corrélation (voir chapitre 3) est :
$$Position\ X\ (mm) = 85,319 + 0,229 * Longueur\ Main\ (mm)$$
- Connaissant X pour le H50 de chaque outil, on peut déterminer un modèle linéaire pour chaque outil, utilisant la même pente du modèle établie avec la perceuse (0,229).
- Exemple avec la petite clé plate :
  - pos x = 106,8 mm (déterminée avec H50)

- Nouvelle pos x (F5) = 101,2 mm
- Nouvelle pos x (H95) = 109,4 mm

La figure ci-dessous permet de comparer les préhensions proposées avec et sans la correction pour les cas F5 et H95. On peut visuellement conclure que les préhensions corrigées sont davantage plausibles que celles non corrigées. De là, on peut raisonnablement considérer qu'il pourrait être pertinent d'approfondir cette piste afin d'améliorer la préhension de référence proposée en fonction de l'anthropométrie du mannequin.

	F5	H50	H95
Sans correction Pos x=106,8			
Avec correction	Pos x= 101,2 	Pos x= 106,8 	Pos x= 109,4 

Figure\_III 1 : Possibilité de correction de la position selon l'anthropométrie

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 3DS (1997). Dassault Systemes Signs Definitive Agreement to Acquire Deneb. Repéré à <https://www.3ds.com/press-releases/single/dassault-systemes-signs-definitive-agreement-to-acquire-deneb/>
- 3DS (1999). Dassault Systèmes signs definitive agreement to acquire SAFEWORK. Repéré à <https://www.3ds.com/press-releases/single/dassault-systemes-signs-definitive-agreement-to-acquire-safework/>
- 3DS (2000). Dassault Systemes signs agreement to acquire EAI-DELTA from EAI. Repéré à <https://www.3ds.com/press-releases/single/dassault-systemes-signs-agreement-to-acquire-eai-delta-from-eai/>
- 3DS (2010). Dassault Systèmes annonce l'acquisition d'Exalead. Repéré à <https://www.3ds.com/fr/communiqués-de-presse/detail-des-communiqués-de-presse/dassault-systemes-acquires-exalead/>
- Ballan, L., Taneja, A., Gall, J., Van, G. L., Pollefeys, M. (2012). Motion capture of hands in action using discriminative salient points. *Computer Vision-ECCV 2012*. Springer, pp. 640–653.
- Briere-Cote, A., Rivest, L., & Maranzana, R. (2012). Comparing 3D CAD models: Uses, methods, tools and perspectives. *Computer-aided Design and Applications*, 9(6), 771-794.
- Cardone, A., Gupta, S. K., & Karnik, M. (2003). A Survey of Shape Similarity Assessment Algorithms for Product Design and Manufacturing Applications. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 3(2), 109.
- CIMdata (2013). 3D Geometric Search. Repéré à [http://enfinio.com/wp-content/uploads/2014/01/3D\\_Geometric\\_Search\\_13Mar2013.pdf](http://enfinio.com/wp-content/uploads/2014/01/3D_Geometric_Search_13Mar2013.pdf)
- Ciocarlie, M., & Allen, P. (2009). Hand Posture Subspaces for Dexterous Robotic Grasping. *The International Journal of Robotics Research*, 28, 7, 851-867.
- Clemedicine (2017). Membre supérieur. Repéré à <https://clemedicine.com/7-membre-superieur/>
- Cooney, W. P. & Chao, E. Y. (1977). Biomechanical analysis of static forces in the thumb during hand function. *J Bone Joint Surg Am*, 59, 27–36.
- Cutkosky, M. R., & Howe, R. D. (1990). Human grasp choice and robotic grasp analysis. *Dextrous robot hands*, 1, 5-31.

- DataAbuledu (2014). Squelette de main humaine. Repéré à <http://data.abuledu.org/wp/?LOM=22393>
- Edubourse (2000). Dassault Systèmes crée DELMIA, première marque au monde de e-Manufacturing pour l'entreprise digitale. Repéré à <https://www.edubourse.com/finance/actualites.php?actu=3989>
- Edwards, S. J., Buckland, D. J. & McCoy-Powlen, J. (2002). *Developmental & functional hand grasps*. Thorofare, NJ: Slack.
- Elliott, J. M. & Connolly, K. J. (1984). A classification of manipulative hand movements. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 26: 283–296. doi:10.1111/j.1469-8749.1984.tb04445.x
- Feix, T., Romero, J., Schmiedmayer, H.B., Dollar, A.M. & Kragic, D. (2015). The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(1)
- Gordon, C. C. (1990). *1988 anthropometric survey of U.S. army personnel: Methods and summary statistics : final report 1987-1988*. Springfield, Va: National Technical Information Service.
- Kamakura, N., Matsuo, M., Ishii, H., Mitsuboshi, F., & Miura, Y. (1980). Patterns of Static Prehension in Normal Hands. *American Journal of Occupational Therapy*, 34(7), 437-445.
- Kang, S. B. & Ikeuchi, K. (1992). Grasp recognition using the contact web. *Intelligent Robots and Systems (1)*, 194–201
- Kapandji, A. I., Poilleux, F. C. (1980). *Physiologie articulaire. : membre supérieur*. Paris: Maloine.
- Kroemer K. H. (1986). Coupling the hand with the handle: an improved notation of touch, grip, and grasp. *Human factors* (28) 337–339
- Li, Y., Fu, J. L., & Pollard, N. S. (2007). Data-Driven Grasp Synthesis Using Shape Matching and Task-Based Pruning. *Ieee Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13, 4, 732-747.
- Lister, G. (1977). *The hand: Diagnosis and surgical indications*. Edinburgh: Churchill Livingstone.



- Light, C. M., Chappell, P. H., & Kyberd, P. J. (2002). Establishing a Standardized Clinical Assessment Tool of Pathologic and Prosthetic Hand Function: Normative Data, Reliability, and Validity. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83, 776-783.
- Lyons, D. (1985). *A generalisation of: a simple set of grasps for a dextrous hand*. Amherst, Mass: Univ. of Massachusetts, Dept. of Computer and Information Science, Lab. for Perceptual Robotics.
- Miyata, N., Hironom, T. & Maeda, Y. (2013). Grasp Database that Covers Variation of Contact Region Usage. In *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2013 IEEE International Conference on*. pp. 2635–2640.
- Napier, J. R. (1956). The prehensile movements of the human hand. *Bone & Joint Journal*, 38(4), 902-913.
- Norman, D. (2013). *The design of everyday things*. New York: Basic Books.
- Pitarch, E. P. (2007). *Virtual human hand: Grasping strategy and simulation*. (thèse de doctorat, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelone, Espagne)
- Princeton Vision & Robotics Labs (2018). Princeton ModelNet. Repéré à <http://modelnet.cs.princeton.edu/>
- Revol, M., Binder, J.-P., & Danino, M. A. (2012). *Manuel de chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique*. Montpellier: Sauramps médical.
- Savescu, A. (2006). *Analyse et modélisation du mouvement de préhension*. (thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, Villeurbanne, France)
- Schlesinger G. (1919). Der mechanische Aufbau der künstlichen Glieder. Dans Borchardt M., Hartmann K., Leymann, Radike R., Schlesinger, Schwiening (eds) *Ersatzglieder und Arbeitshilfen*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Shiraki, Y., Nagata K., Yamanobe N., Nakamura A., Harada K., Sato D. & Nenchev D. N. (2014). Modeling of everyday objects for semantic grasp. *Robot and Human Interactive Communication, 2014 RO-MAN: The 23rd IEEE International Symposium on*. pp. 750–755.
- Slocum, D. B., & Pratt, D. R. (1946). Disability evaluation for the hand. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 28, 491-5.