



HAL
open science

Formalisation et modélisation du mouvement en Langue des Signes Française : pour une approche kinésio-linguistique des productions gestuelles

Léa Chevretil

► To cite this version:

Léa Chevretil. Formalisation et modélisation du mouvement en Langue des Signes Française : pour une approche kinésio-linguistique des productions gestuelles. Linguistique. Normandie Université, 2022. Français. NNT : 2022NORMR092 . tel-04031982

HAL Id: tel-04031982

<https://theses.hal.science/tel-04031982>

Submitted on 16 Mar 2023

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

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



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité SCIENCES DU LANGAGE - LINGUISTIQUE

Préparée au sein de l'Université de Rouen Normandie

Formalisation et modélisation du mouvement en Langue des Signes Française : pour une approche kinésio-linguistique des productions gestuelles

Présentée et soutenue par
LEA CHEVREFILS

**Thèse soutenue le 24/11/2022
devant le jury composé de**

MME ANNELIES BRAFFORT	DIRECTEUR DE RECHERCHE, UNIVERSITE PARIS 11 PARIS-SUD	Rapporteur du jury
M. CHRISTOPHE PARISSÉ	CHARGE DE RECHERCHE, UNIVERSITE PARIS 10 PARIS-NANTERRE	Rapporteur du jury
M. BRICE GUIGNARD	MAITRE DE CONFERENCES, Université de Rouen Normandie	Membre du jury
MME CORNELIA MULLER	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Europa de Francfort (ALL)	Membre du jury
MME DIANE BEDOIN	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université de Rouen Normandie	Président du jury
M. LAURENT GOSSELIN	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université de Rouen Normandie	Directeur de thèse
MME ALIYAH MORGENSTERN	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE PARIS 3 SORBONNE NOUVELLE	Co-directeur de thèse

Thèse dirigée par LAURENT GOSSELIN (DYNAMIQUE DU LANGAGE IN SITU) et ALIYAH MORGENSTERN (PRISMES)

RÉSUMÉ

Cette thèse propose de reconsidérer l'instabilité du mouvement mise en exergue par les études phonologiques traditionnelles (Goldin-Meadow & Brentari 2017, Millet 2019) en précisant les rapports formels que ce paramètre entretient avec l'emplacement et l'orientation, réunis sous l'appellation de « localisation initiale » (Boutet *et al.* 2016).

L'objectif est d'identifier au sein des productions signées le principe de simplicité motrice naturel et spontané qui régit le corps, lui permettant la réalisation d'actions adaptées aux contraintes tout en restant fluides (Bernstein 1967). Ce processus d'optimisation n'est observable que si d'importants changements de paradigmes sont opérés : la localisation initiale et le mouvement concernent l'ensemble des segments du membre supérieur, allant du bras aux mains, et sont conjointement décrits par un vocabulaire permettant de décliner les possibilités morphologiques du corps : le degré de liberté (Boutet 2008).

C'est en nous insérant dans ce paradigme théorique que nous avons réalisé une analyse d'un corpus semi-dirigé de signeurs de LS française (Chevrefils 2021), enregistré par une caméra ainsi que par un système de captation tridimensionnel, le *Perception Neuron* (Choo *et al.* 2022). La transcription réalisée avec le système Typannot (Doan *et al.* 2015) sur le logiciel ELAN concerne 1573 de l'ensemble des signes recueillis.

Les résultats révèlent que 56,20 % des mouvements nécessitent l'activation d'un unique segment, démontrant que ce paramètre implique majoritairement un déploiement simple d'une configuration corporelle déjà établie par la localisation initiale. Les 43,80 % qui y dérogent sont à examiner au regard du fait que le membre supérieur est une chaîne polyarticulée dont les éléments qui la composent s'influencent mutuellement. Nous avons alors étudié la nature des liens des groupements de degrés de liberté actifs au sein de ces signes pluri-segmentaux et nous avons constaté que plus d'un quart (27,01%) présente des combinaisons de mouvements préférentielles pour le corps (Rosenbaum 2010, Boutet 2018). Cette présence marquée de synergies permet de diminuer l'effort nécessaire pour produire les signes concernés et révèle que les propriétés spécifiques d'auto-organisation et d'économie du corps (Turvey 1990) imprègnent la structuration de la LSF.

Nous avons initié deux types de perspectives liés à ces conclusions. D'une part, nous avons mis en place une méthode de traitement des données cinématiques – basée sur le calcul d'angles 3D – afin de les faire correspondre aux conventions de Typannot. Nous avons pu établir une distinction des degrés de liberté du bras et de l'avant-bras, ainsi que proposé une première quantification de la notion phonologique du flux de propagation du mouvement (Boutet 2008). D'autre part, nous avons engagé l'aspect sémantique des notions employées, permettant de considérer que les groupements de degrés de liberté synergiques jouent un rôle de modulation prosodique alors que ceux non synergiques sont nécessaires à la formation complète du sens. Ces perspectives appliquées et théoriques permettent d'entrevoir l'intérêt d'une kinésio-linguistique qui explore les langues à modalité gestuo-visuelle à partir des contraintes et des organisations biomécaniques de leur médium.

Mots-clés : langue des signes française, phonologie, mouvement, approches dynamiques, capture de mouvement, kinésio-linguistique

ABSTRACT

This thesis proposes to reconsider the instability of movement highlighted by traditional phonological studies (Goldin-Meadow & Brentari 2017, Millet 2019) by clarifying the formal relationships this parameter has with location and orientation, brought together as "initial location" (Boutet *et al.* 2016).

The goal is to identify within the signed productions the natural and spontaneous motor simplicity principle that governs the body, allowing it to perform constraint-adapted yet fluid bodily actions (Bernstein 1967). This optimization process is only observable if important paradigm shifts are made: initial localization and movement both concern all the segments of the upper limb, from the arm to the hands, and are jointly described by a vocabulary which covers all the morphological possibilities of the body - the degree of freedom (Boutet 2008).

We used this theoretical paradigm and conducted the analysis of a semi-directed corpus of French LS signers (Chevrefils 2021), recorded with a camera as well as a three-dimensional captation system, the Perception Neuron (Choo *et al.* 2022). We transcribed 1573 of the collected signs with the Typannot system (Doan *et al.* 2015) on the ELAN software.

The results reveal that 56.20% of the movements involve the activation of a single segment, demonstrating that this parameter mostly involves a simple deployment of a body configuration already established by the initial localization. The other 43.80% should be examined in the light of the fact that the upper limb is a polyarticulated chain whose components influence each other. We then studied the nature of the links in the groupings of active degrees of freedom within these pluri-segmental signs and found that more than a quarter (27.01%) of them present preferential combinations of movements for the body (Rosenbaum 2010). This marked presence of synergies reduces the effort required to produce the signs concerned and reveals that the specific properties of self-organization and economy of the body (Turvey 1990) permeate the structuring of LSF.

We initiated two types of perspectives related to these findings.

On the one hand, we set up a method for processing kinematic data - based on the calculation of 3D angles - in order to match them to Typannot conventions. We were able to establish a first distinction of the degrees of freedom of the arm and the forearm, as well as to propose a first quantification of the phonological notion of the movement propagation flow (Boutet 2008). On the other hand, we considered the semantic aspect of the target notions, and thus found that the groupings of synergic degrees of freedom have a prosodic modulation role while the set of active degrees of freedom within the non-synergic groupings is necessary for the complete formation of meaning.

These applied and theoretical perspectives allow us to highlight a kinesio-linguistic approach that explores gestural-visual languages based on the constraints and biomechanical organization of the body.

Keywords: French sign language, phonology, movement, dynamic approaches, motion capture, kinesio-linguistic

REMERCIEMENTS

À Dominique Boutet, mon premier directeur et mon père scientifique.

J'ai eu la chance de travailler, de me questionner, d'apprendre et de progresser à tes côtés. J'aurais aimé que tout cela dure tellement plus longtemps. J'ai commencé cette thèse avec toi, je l'ai terminée pour toi.

À Laurent Gosselin qui a été le garant de l'Habilitation à diriger des recherches de Dominique Boutet en 2018, et qui a accepté de reprendre la direction de ce travail. C'est pour moi un honneur. Merci pour la bienveillance et la précision des conseils prodigués.

À Aliyah Morgenstern pour son intelligence vive et généreuse, pour son dynamisme communicatif. Merci d'avoir assuré avec conviction la codirection de cette thèse. Merci de m'avoir spontanément aidée et soutenue avec autant de justesse.

À Brice Guignard, biomécanicien spécialiste du contrôle moteur, qui m'a expliqué sans relâche les particularités de cette discipline. Merci de ta patience, de ton attention aux détails et de ton encadrement de grande qualité.

À Cornelia Müller, Christophe Parisse, Annelies Braffort et Diane Bedoin qui ont accepté d'être membres de mon jury de thèse.

À Mehmet-Ali Akinci, directeur du laboratoire DYLLIS, pour ton soutien et pour l'attention portée aux besoins des jeunes chercheurs.

À Claudia S. Bianchini qui a écouté avec patience mes interminables interrogations sur le mouvement et qui a su y répondre par de judicieux conseils.

À Marco Pensalfini pour avoir pris un temps considérable afin d'aider une doctorante qui lui était pourtant inconnue.

À Marco L. Bianchini qui a été d'un secours inestimable durant les derniers jours de rédaction.

Au laboratoire Structures Formelles du Langage qui a accueilli plusieurs journées d'enregistrement de corpus et à Marion Blondel et Coralie Vincent pour avoir guidé l'exploitation de mes données.

À mes collègues du groupe de recherche GestualScript, Claudia S. Bianchini, Claire Danet, Patrick Doan, Morgane Rébulard, Adrien Contesse et Chloé Thomas. Les réunions du vendredi et les journées de workshop m'ont montré à quel point la recherche, c'est une affaire d'équipe.

À tous les jeunes docteurs et à tous les doctorants du laboratoire DYLLIS, Hayat, Cléo, Gosia, Aline, Louise, Violaine... À ceux qui ont vaillamment soutenu leur thèse et à ceux qui sont toujours en course avec courage.

À Chloé, ensemble, nous avons participé à des conférences, présenté des posters, organisé des journées d'étude, préparé des cours... et bâti une solide amitié.

Au groupe discord « PHD STUDENTS », source inépuisable de soutien et de motivation.

À la région Normandie, qui a financé cette thèse durant trois ans et huit mois.

Le rendu du manuscrit marque indubitablement la fin d'un long parcours. Ces quatre années auront éveillé en moi un engagement réel et déterminé pour le développement de la linguistique des langues signées, et plus largement pour celui des études gestuelles.

Chaque aboutissement laisse place à un nouveau départ avec toutes celles et ceux qui me sont proches.

C'est pour cela que je n'oublie pas :

Mes chers parents que je remercie pour leur écoute, leurs conseils, leurs idées lumineuses et leurs relectures minutieuses. La confiance que vous me portez me donne le courage d'avancer.

Ma grande sœur, Shoshana. C'est en te regardant et en t'imitant que j'ai appris à m'ouvrir au monde. Ton sens de la créativité est sans limites. Merci de m'avoir tant apporté.

Ma seconde famille, les Bittan, qui me renforcent par leur chaleur et leur bienveillance.

Clémence, auprès de qui j'ai grandi et qui a fait naître en moi l'amour de la langue des signes.

Léna, mon amie de toujours. Je ressors changée après chaque moment avec toi. Musique, littérature, féminisme... Tout y passe !

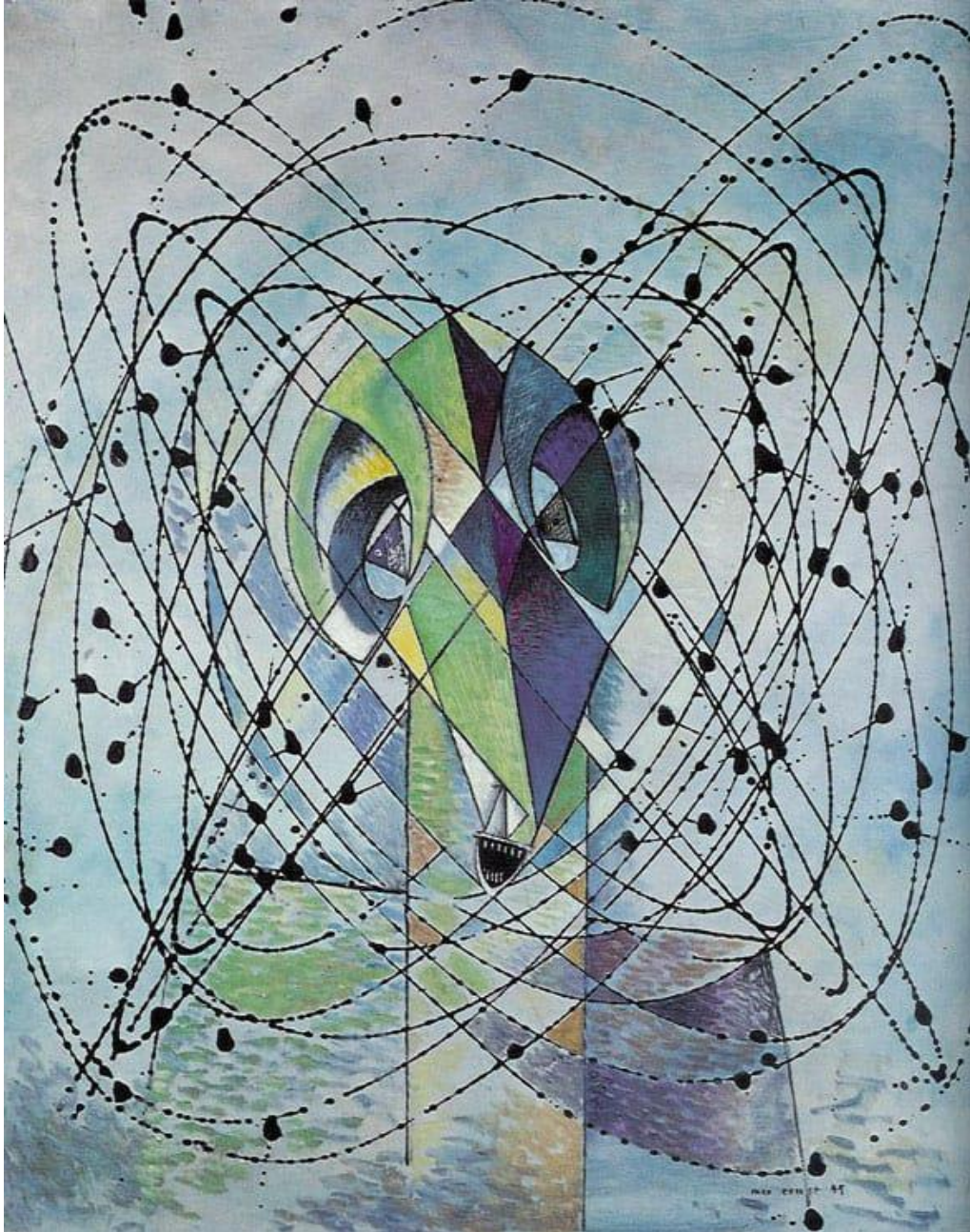
Alex, qui est toujours si empressé d'aider.

Lola, pour sa douceur et sa délicatesse. Elle paraît loin, l'époque où nous étions assises ensemble sur les bancs de la fac d'histoire de l'art. Bientôt, ce sera moi qui viendrai à ta soutenance de thèse !

Les chaptaliens, une équipe phénoménale à laquelle je suis profondément attachée.

Yohann, mon époux. Je te remercie pour ta sensibilité et ta tendresse, ton humour et ton amour. Tu sais me porter, me supporter et me transporter. Tu m'offres un soutien sans faille depuis bientôt huit ans. Il nous reste toute une vie à partager.

À Dominique Boutet,



« Jeune homme intrigué par le vol d'une mouche non euclidienne »
(Max Ernst, 1940)

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
ABSTRACT	IV
REMERCIEMENTS	VI
TABLE DES MATIÈRES	XII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. PHONOLOGIES DU MOUVEMENT	7
<i>1.1. Spécificités de la linguistique des langues signées</i>	7
1.1.1. Le corps.....	7
1.1.1.1. Racine de l'iconicité.....	8
1.1.1.2. Espace de signation.....	11
1.1.1.3. Base d'un système phonologique.....	13
1.1.2. Le mouvement.....	16
1.1.2.1. Caractéristiques linguistiques principales.....	16
1.1.2.2. Rôle prosodique.....	20
1.1.2.3. Observations et réflexions actuelles.....	23
1.1.3. Réflexions phonologiques.....	26
1.1.3.1. Séquentialité et bornage.....	26
1.1.3.2. Autonomie des postures.....	30
1.1.3.3. À la recherche du mouvement disparu.....	31
<i>1.2. L'approche kinésiologique</i>	34
1.2.1. Description des articulations du membre supérieur.....	35
1.2.1.1. Structure de l'analyse descriptive.....	35
1.2.1.2. Articulation du bras.....	38
1.2.1.3. Articulation de l'avant-bras.....	40
1.2.1.4. Articulation de la main.....	43
1.2.2. Changement de géométrie.....	45
1.2.2.1. Contraintes d'amplitude.....	45
1.2.2.2. Mouvement conjoint involontaire.....	46
1.2.2.3. Géométrie non euclidienne sphérique.....	48
1.2.3. Restructuration des paramètres « manuels ».....	51
<i>1.3. Il court, il court, le mouvement</i>	53
1.3.1. Distinguer les différents types de mouvement.....	53

1.3.1.1. Transferts de mouvement.....	53
1.3.1.2. Déplacement ou transfert total ?	56
1.3.2. Flux du mouvement.....	57
1.3.2.1. Types de flux.....	57
1.3.2.2. Règles de transfert de mouvement	59
1.3.2.3. Catégorisation sémantique	61
CHAPITRE 2. SCRIPTURALITÉS ET MOUVEMENT	65
2.1. <i>Représenter graphiquement le corps en mouvement</i>	65
2.1.1. Nécessités linguistiques.....	65
2.1.2. Présentation des différents systèmes dédiés aux langues signées	68
2.1.2.1. Représentations picturales.....	68
2.1.2.2. Système d'écriture.....	73
2.1.2.3. Systèmes de transcription.....	75
2.1.3. Une autre perspective : le mouvement dansé	80
2.1.3.1. Pas après pas	80
2.1.3.2. Individuer le geste dansé.....	82
2.1.3.3. Modèle géométrique	86
2.1.4. Synthèse	89
2.2. <i>Proposition de renouvellement, le projet Typannot</i>	91
2.2.1. Du point de vue au cadre de référence	91
2.2.1.1. Types de cadres de référence	92
2.2.1.2. Pour un cadre de référence intrinsèque et multiple	96
2.2.2. Typannot : principes et méthodes de construction	99
2.2.2.1. Glyphes génériques et composés	99
2.2.2.2. Perspectives du projet Typannot : le clavier virtuel	104
2.2.3. Caractéristiques compositionnelles du mouvement	106
2.2.3.1. Flux, emprise et portée.....	106
2.2.3.2. Impulsion et amplitude.....	107
2.2.3.3. Figures perspectives et dynamique	107
CHAPITRE 3. TECHNOLOGIE EN MOUVEMENT.....	111
3.1. <i>Évolution des outils de capture du mouvement</i>	111
3.1.1. À la conquête du mouvement	111
3.1.1.1. Objectivité de l'appareil photographique.....	112
3.1.1.2. Rendre perceptible l'invisible	114
3.1.1.3. Individualiser le mouvement.....	115

3.1.2. Bases théoriques de la cinématique articulaire.....	118
3.2. <i>Descriptif des systèmes de capture du mouvement</i>	122
3.2.1. Capture de mouvement sans marqueur.....	122
3.2.1.1. Leap Motion Controller	122
3.2.1.2. Kinect.....	125
3.2.2. Capture de mouvement optoélectronique	128
3.2.2.1. Marqueurs actifs et marqueurs passifs	128
3.2.2.2. Vicon et Optitrack.....	132
3.2.3. Capture de mouvement embarquée	133
3.2.3.1. Capteur magnétique et exosquelette.....	133
3.2.3.2. Unité de mesure inertielle	135
3.2.4. Synthèse	139
3.3. <i>Apports de la technologie</i>	140
3.3.1. Évolutions paradigmatiques	140
3.3.1.1. Vidéo et outils computationnels.....	141
3.3.1.2. Accès aux données tridimensionnelles.....	142
3.3.2. Revue des corpus de Langue des Signes Française.....	143
3.3.2.1. Corpus vidéo	144
3.3.2.2. Corpus couplés avec de la capture de mouvement.....	145
3.3.2.3. Problématiques liées au traitement des corpus.....	146
3.3.3. Analyses basées sur le mouvement : bornage des réalisations signées et gestuelles....	148
3.3.3.1. Cinématique et (a)télicité.....	148
3.3.3.2. Kinésiologie et imperfectivité.....	150
CHAPITRE 4. THÉORIES DYNAMIQUES DU CONTRÔLE MOTEUR.....	156
4.1. <i>Production du mouvement corporel</i>	156
4.1.1. Approche cognitiviste.....	156
4.1.1.1. Dualisme corps/esprit.....	157
4.1.1.2. Système en boucle fermée.....	158
4.1.1.3. Théorie du schéma	159
4.1.2. Approche dynamique	161
4.1.2.1. Individu et environnement	162
4.1.2.2. Systèmes complexes : auto-organisation et émergence	164
4.1.2.3. Contraintes régulatrices du comportement moteur	167
4.2. <i>Optimisation du mouvement corporel</i>	168
4.2.1. Récurrence et stabilité motrices.....	169
4.2.1.1. Mouvements morphocinétiques	170

4.2.1.2. Mouvements topocinétiques	171
4.2.2. Acte moteur : un travail d'équipe	172
4.2.2.1. Forces physiques	172
4.2.2.2. Synergies préférentielles	175
4.2.3. Optimisation du mouvement en langue des signes française	178
4.2.3.1. Économie linguistique.....	178
4.2.3.2. Localisation initiale (LOCini) et mouvement (MOUV)	180
4.2.3.3. Pour une simplification motrice de la forme des signes.....	183
CHAPITRE 5. MISE EN PLACE ET EXPLOITATION D'UN CORPUS DE LANGUE DES SIGNES FRANÇAISE	190
5.1. <i>Structure et organisation</i>	190
5.1.1. Matériel utilisé.....	190
5.1.1.1. Description du système de capture mouvement.....	191
5.1.1.2. Critères de sélection	195
5.1.2. Protocole d'enregistrement.....	200
5.1.2.1. Contenu et métadonnées du corpus.....	200
5.1.2.2. Déroulé de l'enregistrement.....	203
5.2. <i>Corpus vidéo CLM-MOCAP</i>	206
5.2.1. Exploitation sur ELAN.....	206
5.2.1.1. Contenu du <i>template</i>	206
5.2.1.2. Mise en pratique.....	213
5.2.1.3. Durée du travail de transcription.....	215
5.2.2. Traitement par script Python	216
5.2.2.1. Format des bases de données de référence.....	217
5.2.2.2. Traitement de la LOCini	218
5.2.2.3. Traitement du MOUV	221
5.2.2.4. Traitement conjoint de la LOCini et du MOUV	228
5.3. <i>Exploitation du corpus de capture de mouvement CLM-MOCAP</i>	233
5.3.1. Export et synchronisation des données.....	234
5.3.1.1. Fichier de sortie : BVH Biovision.....	234
5.3.1.2. Synchronisation des enregistreurs.....	238
5.3.2. Pré-traitement des données 3D	240
CHAPITRE 6. DU CORPS AU SIGNE	244
6.1. <i>Relations entre LOCini et MOUV : le dénouement</i>	244
6.1.1. Retours sur le travail effectué.....	244

6.1.1.1. Objets de l'analyse	244
6.1.1.2. Méthodologie de recherche	248
6.1.2. Résultats tirés du traitement sous Python	251
6.1.2.1. Hétérogénéité des placements initiaux (LOCini)	251
6.1.2.2. Quantité et temporalité des degrés de liberté actifs (MOUV)	258
6.1.2.3. Relation entre les degrés de liberté actifs (LOCini et MOUV)	266
6.1.3. Caractérisation d'une économie structurelle	269
6.1.3.1. Tout est une question d'organisation	270
6.1.3.2. Entre simplicité et économie	272
6.2. <i>Vers une reconnaissance automatique des DDLs</i>	277
6.2.1. Traitement des données	277
6.2.1.1. Exposition de la méthodologie utilisée	278
6.2.1.2. Système de référence	281
6.2.1.3. Applications théoriques aux DDLs	283
6.2.2. Exploitation des scripts et exportation des résultats	288
6.2.2.1. Utilisation des scripts MATLAB	288
6.2.2.2. Résultats DDLs du bras	292
6.2.2.3. Résultats DDLs de l'avant-bras	294
6.2.3. Limites et ouvertures	299
6.2.3.1. Retour sur le système de MoCap employé	299
6.2.3.2. Retour sur la méthode employée	303
6.3. <i>Pour une kinésio-linguistique</i>	306
6.3.1.1. Inconstance phonologique	307
6.3.1.2. Synergie et sémantique	310
CONCLUSION	319
BIBLIOGRAPHIE	331
LISTE DES FIGURES	350
LISTE DES TABLEAUX	364
ANNEXES	368

INTRODUCTION

Les langues des signes (LS) sont des langues à modalité visuo-gestuelles. Étudier ce type de modalité revient à s'intéresser à un phénomène universel. Universalité ne signifie pas unicité : le nombre de LS répertoriées dans le monde, 157 à ce jour¹, démontre à lui seul le lien de ces langues à la culture des aires linguistiques auxquelles elles sont rattachées. Cette diversité se perçoit par une hétérogénéité des signes usités selon la région dans laquelle la langue est employée. La nature des signes est d'ailleurs un marqueur social fort, comme le sont l'accent ou le vocabulaire pour les LV. L'universalité dont il est question ici est d'une autre nature. Elle provient du médium par lequel les signes sont produits : le corps.

Le corps en tant qu'organisme vivant, est un objet animé situé dans le temps et dans l'espace. Que ce soit pour interagir avec l'environnement ou pour communiquer du sens, il faut que celui-ci se mette intentionnellement en *mouvement*. Générer du mouvement n'est pas une opération anodine. L'action la plus simple exige une coordination millimétrée des parties du corps qu'elle engage. Fléchir le bras afin de balancer le membre supérieur vers l'avant suffit à créer un déplacement du centre de gravité de la masse corporelle. Le corps n'a alors d'autres choix que de déplacer simultanément tout ou partie de cette masse corporelle dans le sens opposé afin de préserver sa position stable dans l'environnement physique. Un mouvement engendre donc une nécessité et une potentialité d'autres mouvements, et la complexité semble croître de manière exponentielle. La multiplicité des données à coordonner contraste pourtant avec l'apparente aisance avec laquelle le corps se meut dans l'espace. Cette singularité a engendré une exploration des mécanismes du contrôle des mouvements humains au sein de différentes disciplines telles que les sciences cognitives, la biomécanique ou encore la kinésiologie. Introduisons certains des phénomènes qui ont été mis au jour par ces recherches à l'aide d'un exemple simple et concret.

Un verre est placé à l'envers sur une table et vous souhaitez y verser de l'eau. Il n'y a d'autre choix que de prendre le verre et de le retourner. Sans que cela soit une démarche consciente, vous renverserez d'abord votre main qui sera alors en pronation complète, le pouce vers le bas, avant de vous saisir du verre. Un mouvement de pivot permettra alors à la fois de remettre votre

¹ <https://www.ethnologue.com/subgroups/sign-language> consulté le 13/07/2022

main et le verre dans le bon sens. Verre à la main, il ne reste plus qu'à vous servir (Rosenbaum 2009).

Cette simple mise en situation témoigne de deux phénomènes inhérents à la production gestuelle. D'abord, il s'agit du fait que l'*anticipation* participe à toute action. La main ne saisit pas le verre dans la posture qui est la plus évidente ou la plus confortable. Elle effectue une première rotation qui engendre une posture initiale peu commode, puis – une fois le verre en main – une seconde rotation est réalisée afin d'arriver à une posture finale parfaitement stable. L'eau peut alors être servie en toute sécurité.

Cette anticipation est possible grâce à deux types d'information sensorielle. Le premier type repose sur la vision. L'observation du contexte environnemental permet d'enregistrer l'ensemble des informations sensorielles mises à disposition. L'organisation, le placement ou encore la forme des différents objets à manipuler sont autant d'indices qui vont influencer et conditionner le mouvement qui suit. Le second type d'information relève de la proprioception. Le système nerveux central reçoit continuellement des données concernant – entre autres – les positions de l'ensemble des articulateurs. Grâce à cela, le cerveau obtient une représentation cohérente de la posture du corps et donc du mouvement nécessaire à exécuter pour qu'il puisse interagir avec son environnement.

Une fois anticipé, le mouvement doit être réalisé. Lors de cette réalisation, un autre phénomène advient, celui de l'*optimisation* (Latash 1993). Pour le comprendre, il faut au préalable savoir que le corps est un organisme complexe possédant un nombre élevé, voire indéfini de configurations de mouvement possibles relatives à une unique action (Bernstein 1967). Afin de pouvoir sélectionner une seule de ces configurations, le corps a développé une stratégie du moindre effort. Sauf contraintes particulières, ce sera systématiquement le mouvement le plus simple qui sera privilégié. Cette stratégie a plusieurs avantages. En plus d'être efficace en termes de réactivité et de temps d'exécution, elle permet de minimiser l'activité du système nerveux central et de réduire la dépense en énergie des segments effecteurs ; l'organisme est alors plus rapidement disponible et alerte pour gérer la suite des événements et les exécuter.

Dans le cadre d'une communication en LS, le corps est générateur d'un flux de mouvement qui s'articule en séquences ordonnées de telle manière qu'elles produisent du sens. C'est alors une autre discipline qui s'est emparée des LS comme objet d'étude : les sciences du langage. Même si l'exemple précédent nous montre que pour fonctionner correctement, l'organisme anticipe et restreint la complexité de chacune des actions effectuées, dans le contexte disciplinaire propre

aux sciences du langage, le mouvement est cependant traité selon un angle distinct spécifique. Voyons ce qu'il en est.

À partir de 1960 et depuis lors, les signes sont décomposés en paramètres (Stokoe 1960). Concernant les paramètres manuels, la conception la plus courante est de prendre en compte la configuration, l'emplacement, l'orientation et le mouvement de la main. Ce dernier est le seul à être dynamique et à opérer des changements permanents. En réponse à cette inconstance, son traitement au sein des modèles phonologiques et des systèmes graphiques (fig. 0.1) s'est concentré sur une conception visuelle de la trace que la main crée, parfois accompagnée de ses positions en début et en fin de signe afin de la situer dans l'espace.



Figure 0.1 – Pérennisation de la trace laissée par la main au cours du signe [EN FORME], ainsi que le type de réalisation graphique pouvant en est tiré (Boutet *et al.* 2018 : 418)

De manière générale, les études linguistiques des LS se sont jusqu'ici concentrées sur la perception du mouvement, laissant de côté ce qui relève de sa production. La trajectoire de la main est alors considérée comme un résultat, et non en tant que témoin des actions motrices corporelles. La trajectoire est oublieuse du corps, qui disparaît derrière une empreinte fractionnée de lui-même.

Marquant alors une rupture face aux approches traditionnelles qu'il a lui-même initiées, Stokoe (1991) rappelle que le mouvement n'est pas l'apanage des LS ; à l'instar des autres disciplines traitant du mouvement, celui-ci doit aussi être décrit dans son contexte corporel, c'est-à-dire selon l'ensemble mains, avant-bras, bras composant les membres supérieurs. Il s'agit, pour l'auteur, du seul moyen de décrire un signe de manière précise et juste.

Ces considérations ne trouvent pas immédiatement d'échos dans l'univers des sciences du langage. Néanmoins, Boutet (2001) constitue une « approche kinésiologique de la gestualité et

des LS » similaire, qui sera plus largement développée (Boutet 2008, 2018). L'analyse proposée est centrée sur l'ensemble des segments d'un même membre selon un repérage dont le référentiel est interne au corps : l'unité utilisée est le degré de liberté (DDL), terme employé en biomécanique afin de nommer les possibilités de mouvement d'un segment.

Faire le pont entre plusieurs disciplines spécialisées dans la production motrice permet de rappeler le geste à son encours, et non plus à la trace figée qu'il a déposée dans l'espace. Cette approche kinésiologique replace alors la gestualité dans sa structuration articulaire ; s'appuyant pour cela sur le signifiant, la gestualité du corps, dont les contraintes, mais aussi les affordances (Gibson 1977) permettent de produire du signifié.

C'est à l'intérieur de ce nouveau paradigme encore peu exploité qui relie le corps et le signe que nous engageons notre travail de thèse. L'objectif est de découvrir si le principe de simplification motrice naturel et spontané qui régit les mouvements (Turvey 1990) est toujours présent au sein de productions en LS. Pour cela, nous avons enregistré un corpus de LS Française (LSF) composé de monologues et dialogues élicités par dix sourds signeurs et capté à l'aide d'un système de capture de mouvement (MoCap) et d'une caméra HD (Chevrefils 2021²). Nous y réalisons une analyse formelle qui se concentre sur la transcription des paramètres de l'emplacement et de l'orientation – réunis sous l'appellation de localisation initiale (Boutet 2010) – ainsi que du mouvement. L'idée directrice est que ces paramètres sont au cœur du déploiement du signe : la localisation initiale relèverait d'une posture physique qui, par les emplacements spécifiques et cadrés des segments, tendrait à limiter les ajustements nécessaires au phénomène perceptible qu'est le mouvement.

Si la présence de rapports de simplification motrice est démontrée, c'est plus largement l'existence d'une influence directe de la structure corporelle sur celle des signes qui est décelée. Le corps serait alors, en plus du vecteur de la forme des LS, le milieu dans lequel les signes se construisent, s'organisent et se transforment en unités sémantiques.

Cette thèse s'ouvre sur trois chapitres d'états de l'art dont l'intention est de présenter les différentes évolutions épistémologiques concernant le paramètre du mouvement ainsi que d'exposer les contextes théoriques, scientifiques et matériels qui seront les nôtres tout au long de ce travail. Les trois chapitres suivants développent en détail nos productions et travaux

² Le corpus vidéo peut être consultable à l'adresse suivante : <https://hdl.handle.net/11403/clm-mocap>

personnels, englobant nos hypothèses de recherche, le cadre méthodologique ainsi que l'ensemble de nos résultats et analyses.

Plus précisément, le premier chapitre décrit l'importance du mouvement au sein des productions en LS et le contenu des analyses phonologiques qui ont été réalisées. Nous reviendrons sur l'intuition de Stokoe (1991) qui met au jour la présence d'une contradiction, celle d'étudier une langue du corps sans prendre en compte les mécanismes de ce dernier, et nous décrivons en détail l'approche kinésiologique de Boutet (2015), qui constitue le socle théorique de notre recherche.

Le deuxième chapitre aborde la problématique du mouvement du point de vue de sa représentation graphique. Nous verrons que seuls des systèmes basés sur un mode de description visuo-spatial ont été mis en place jusqu'ici. Ce mode de description faisant l'impasse sur la caractérisation des structures qui sous-tendent les formes observées, l'équipe de recherche GestualScript a créé un système typographique basé sur une approche phonétique articulatoire corporelle appelé Typannot. Ce système typographique correspond à nos besoins en termes d'exploitation de corpus.

Au regard de ce renouvellement phonologique et typographique concernant le mouvement, les systèmes de capture de mouvement (MoCap) ont pour nous un intérêt particulier. Le troisième chapitre aborde donc l'évolution de ces technologies et présente un état de l'art des familles de systèmes existants, nous permettant d'exposer les raisons du choix du *Perception Neuron V2* pour la création de notre corpus de thèse.

Le quatrième chapitre présente le lien hypothétique que nous formulons entre les mécanismes de production et d'optimisation du corps humain, et la relation de complémentarité facilitante entre la posture et la mise en mouvement des signes.

Le cinquième chapitre décrit la procédure exhaustive de captation de notre corpus ainsi que le processus de traitement de la localisation initiale (i.e. orientation et mouvement du membre supérieur) et du mouvement sur le logiciel ELAN, ainsi que celle des données cinématiques.

Enfin, le sixième et dernier chapitre formalise les liens entre les paramètres étudiés. Cela permet d'exposer la définition que nous donnons de la simplicité formelle et de poser les bases d'un nouveau type d'économie linguistique qui est propre aux LS. Le chapitre conclut sur les intérêts et les perspectives que présente une *kinésio-linguistique*, néologisme disciplinaire qui recouvre l'union entre la kinésiologie qui s'intéresse au niveau corporel décrivant la façon dont les possibilités articulatoires du corps sont dynamiquement organisées, et la linguistique, qui s'applique à décrire les manières dont ces organisations corporelles forment des structures signifiantes au sein de la langue, qu'elle soit vocale ou signée.

CHAPITRE 1. PHONOLOGIES DU MOUVEMENT

Les mouvements phonatoires qui permettent d'émettre les mots ne sont pas directement observables, alors que les mouvements articulatoires qui permettent de produire des signes le sont : c'est au cœur de cette caractéristique que réside la spécificité des LS qui nourrit depuis plusieurs décennies les études linguistiques les concernant. Ce premier chapitre examine les différentes fonctions linguistiques que ce corps en mouvement déploie selon des vecteurs communs à l'expérience du monde et à l'expression langagière. Nous nous concentrerons ensuite sur l'étude phonologique des signes, et plus particulièrement sur le statut accordé au paramètre du mouvement. Deux tendances se démarquent : l'une qui considère le mouvement comme non phonologique puisque déductible de la description des entités statiques qui l'encadrent (Van der Hulst 1993, Hayes 1993), alors que l'autre établit comme essentielle la prise en compte du mouvement et énonce l'importance de le considérer à travers les contraintes anatomiques imposées à l'ensemble des segments du membre supérieur (Stokoe 1991, Boutet 2008).

1.1. Spécificités de la linguistique des langues signées

La nécessité innée d'échanger et d'interagir avec autrui est le fondement sur lequel reposent toutes les LS. L'enfant sourd dont les parents sont entendants représente le schéma familial majoritaire, correspondant à 90 et 95 % des cas selon Hoffmeister & Wilbur (1980). Une trentaine d'années plus tard, ce taux demeure le même, Dubuisson & Grimard (2006) l'estimant également à 90 %. Une personne sourde se retrouve donc constamment face à un environnement qu'elle ne perçoit que partiellement ; elle doit composer avec les sens auxquels elle a accès, la vue, le toucher et la proprioception. La langue signée prend forme à partir et autour de ces sens et du corps qui s'anime selon des règles grammaticales stabilisées, poussant les études linguistiques phonologiques à se réinventer.

1.1.1. Le corps

Qu'une langue puisse être vocale ou signée est aujourd'hui une évidence. Pourtant, un lien supposé entre la parole et la conscience a longtemps mis à mal cette reconnaissance accordée aux LS : les gestes réalisés par les sourds ne pourraient exprimer qu'imparfaitement la pensée humaine, la parole seule assurant pleinement cette fonction. De plus, le fait que les articulateurs gestuels sont acteurs de la communication a engendré une assimilation entre les LS et la

pantomime (Cuxac *et al.* 1985) qui présentent pourtant une utilisation du corps et de l'espace tout à fait distincts. C'est finalement la démonstration que les signes sont composés d'unités distinctives minimales (Stokoe 1960) qui permettra de faire entrer pleinement les LS dans le champ de la linguistique.

1.1.1.1. Racine de l'iconicité

La pantomime est une pratique artistique qui consiste à reproduire des situations réelles ou imaginées d'interactions avec des personnes ou des objets. Ces personnes ou objets sont absents, mais semblent perceptibles grâce à la gestuelle de l'artiste. Pour cela, le corps du mime est mis intégralement au service de la représentation : une montée d'escalier fictive présente des caractéristiques physiques que l'art du mime rend manifestes de la tête jusqu'aux pieds. Exprimer les effets que le monde physique a sur le corps nécessite une appropriation de l'espace dans une étendue temporelle suffisamment longue pour que le spectateur accumule les indices visuels lui permettant de reconstruire pleinement l'invisible.

Pour les LS, le fonctionnement est tout autre. Le signeur n'utilise pas l'intégralité de son corps pour communiquer. Seule la partie haute du corps - comprenant les membres supérieurs, le torse et la tête - est sollicitée. De plus, l'intercompréhension doit être et *est* immédiate, la fluidité de la communication est donc primordiale. L'espace dans lequel les signes émergent et se déploient est restreint et conditionné par la zone physique atteignable par les mains. Néanmoins, si la confusion entre le discours signé et la création gestuelle pantomimique reste forte, cela est dû au fait que les LS utilisent des formes renvoyant de manière iconique aux référents représentés par ces signes (Cuxac 2000, Cuxac & Sallandre 2007, Fusellier-Souza 2006).

Au sein des langues vocales (LV), prenons ici le français, il n'y a pas de rapport *direct* entre une réalisation acoustique telle que [vwatyʁ] et le signifié auquel il renvoie. Mais pour la langue des signes française (LSF), le signifiant [VOITURE] (fig. 1.1.) recourt à la manière dont on se représente un conducteur qui manipule le volant d'une voiture. Il y a un lien motivé entre signifiant et signifié.



Figure 1.1 – Réalisation du signe [VOITURE] (signeur 6 signe 106³, vidéo [1.1](#))

Cela est dû à la capacité du corps à imiter l’environnement, ou en tout cas les *parties jugées pertinentes* de cet environnement. Dans notre exemple, il n’y a aucune reproduction de la forme de la carrosserie ou de l’intérieur de la voiture. Par un procédé de synecdoque – figure rhétorique par laquelle le tout est exprimé par une de ses parties – le volant suffit à représenter l’ensemble de la voiture. Pour exprimer une action comme [monter dans le métro], un type de structure spécifique est utilisé, les *proformes*. Un proforme est un « signe linguistique dont le signifiant est une configuration manuelle conventionnelle (et donc arbitraire, au sens de Saussure (1967), même si elle est généralement motivée et iconique), représentant une entité déjà mentionnée ou non dans le discours. Le proforme ne prend donc pleinement son sens qu’en contexte et s’apparente de ce point de vue aux pronoms des langues vocales. » (Collomb *et al.* 2018 : 2). Donnons un exemple. La fig. 1.2 présente un signeur dont l’index et le majeur de la main droite sont crochetés tandis que la main gauche oppose le pouce aux autres doigts. Un mouvement permet de qualifier l’interaction entre ces deux éléments : l’index et le majeur de la main droite se posent sur le pouce de la main gauche.

³ Les chronophotographies et vidéos des signes de LSF au sein de ce manuscrit sont tirées de notre corpus de thèse (présenté chapitre 5).



Figure 1.2 – Réalisation du signe [MONTER DANS LE VÉHICULE] (signeur 3 signe 246, vidéo [1.2](#))

Ce signe est considéré comme un transfert de situation (Cuxac 2000), c'est-à-dire une réalisation qui donne à voir une action de déplacement d'un agent, soit l'animé qui exécute l'action, par rapport à un locatif, soit le lieu impliqué par le procès. La main droite indique qu'il s'agit d'une personne dont les jambes sont courbées ; la main gauche décrit un espace rectangulaire ; le mouvement relie ces deux entités en spécifiant l'action « entrer dans ». Cependant, selon la définition de proforme donnée ci-dessus, pour obtenir des précisions sur l'identité de l'actant et sur le lieu où il se trouve, il faut remonter le fil du discours. Parmi les signes précédant celui reproduit à la fig. 1.2, nous trouvons un déictique indiquant [JE] (signe 229) et le signe standard de [MÉTRO] (signe 244). Ces indications sémantiques sont ici présupposées à travers les proformes, équivalents au syntagme verbal signifiant « je m'assois dans le métro ». Nul besoin de mimer l'entrée dans la rame ou l'installation sur le siège : un seul et unique mouvement suffit à représenter l'ensemble de ces actions. Cela rappelle que les LS se sont développées en suivant un principe de « démembrement symbolique » (Boutet *et al.* 2010 : 64) du corps qui s'oppose au « maintien d'une globalité » corporelle caractérisant la pantomime (*ibid.* : 67).

Des règles rigoureuses et partagées unissent le corps du signeur et son espace. Ce lien fort affecte jusqu'à la syntaxe de ces langues. En LS, elle relève principalement d'un agencement des signes « Sujet Objet Verbe » comme c'est le cas pour le turc ou le latin. Le fait que l'action trouve sa place à la fin de la proposition et que les données spatio-temporelles se retrouvent au début marque l'importance de l'aspect visuel des LS (Le Corre 2007), mais pas seulement. Il semble en effet que si un signeur précise d'abord le contexte et les acteurs de l'action avant de la décrire, c'est parce que les LS se structurent dans l'espace. La spatialité propre aux LS doit être comprise dans la logique relationnelle qui est la leur. Cette logique n'admet pas de liens

entre deux entités si ces deux entités ne sont pas, au préalable, identifiées et situées. En d'autres mots, il n'est pas possible en LS de placer un objet sans avoir défini le support sur lequel il repose. On sait que tout système informatique fonctionne de cette manière-là : ce n'est qu'une fois que la machine sait que $A = 2$ et $B = 4$ qu'elle a la capacité de résoudre le calcul $A + B$. Ce serait le schéma rationnel logique que suivent les LS, combiné avec une modalité de productions langagières gestuo-visuelles.

1.1.1.2. Espace de signation

L'utilisation de la partie supérieure de son corps par le signeur scinde l'espace en deux : une partie de cet espace se trouve à la portée des mains sans que le signeur n'ait à se déplacer ou à exercer un quelconque allongement forcé de ses membres.

La portion d'espace accessible au signeur constitue « l'espace de signation ». Pour Millet (2019), cet espace permet de construire un discours linguistiquement pertinent au travers de zones « pré-sémantisées » (ibid. : 95) (fig. 1.3). Selon la zone dans laquelle se déploie le signe, ce dernier génère d'emblée des informations sur ses fonctions sémantiques.

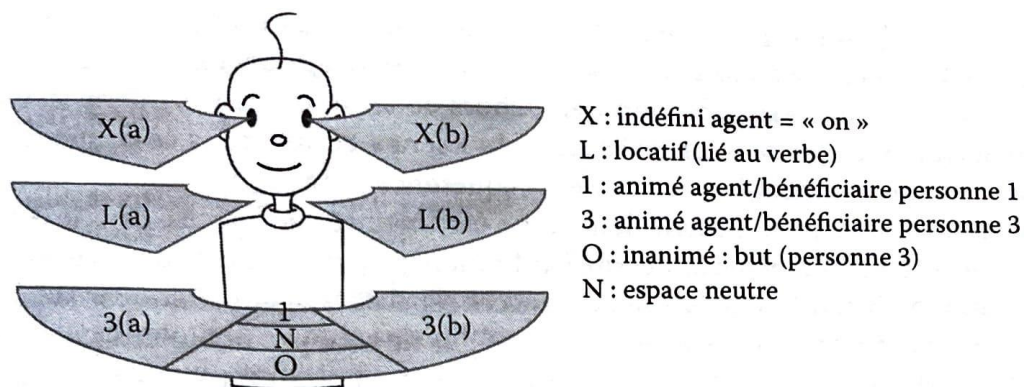


Figure 1.3 – Visualisation de la structuration de l'espace de signation (Millet 2019 : 127)

L'espace neutre (N) est le seul à ne pas être sémantiquement chargé. Cet espace a plusieurs usages, comme la réalisation des signes sous leurs formes de citation (forme hors contexte des verbes). L'espace frontal en contact ou proche du corps (1) est lié à la 1^{ère} personne [JE], agent ou bénéficiaire de l'action. Les espaces latéraux (3(a) et 3(b)) sont liés à la 3^e personne [IL] ou [ELLE], agent ou bénéficiaire de l'action. L'espace lié à la 2^e personne [TU] n'apparaît pas dans ce schéma, car il dépend de la localisation de l'interlocuteur dans l'espace réel du signeur. Ces trois zones servent à la flexion des verbes directionnels. Un verbe comme [DONNER] a, dans sa forme de citation, un mouvement qui part de l'espace neutre. Pour signifier le syntagme

[JE TE DONNE], si le bénéficiaire est présent, le mouvement – doublé d’un investissement du regard – part de l’espace (1) pour rejoindre la position de ce bénéficiaire. Si le bénéficiaire n’est pas présent ou s’il s’agit du syntagme [JE LUI DONNE], le mouvement part de l’espace 1 pour atteindre l’espace 3(a) ou 3(b). C’est le cas de la fig. 1.4 qui met en jeu un agent actant et deux bénéficiaires absents. Le premier bénéficiaire est situé dans l’espace 3(b) et le second dans l’espace 3(a).



Figure 1.4 – Réalisation des signes [DONNER L’ALLIANCE] (signeur 7 session 2 signes 293-294, vidéo [1.3](#))

L’espace le plus éloigné au niveau du buste (O) est lié à la 3^e personne concernant un inanimé qui est objet (vers lequel est dirigé le procès) de l’action. Les espaces à hauteur du cou (L(a) et L(b)) sont rattachés aux locatifs, c’est-à-dire aux lieux impliqués par le procès. Enfin, les espaces en périphérie de la partie supérieure de la tête (X(a) et X(b)) sont liés à la 3^e personne [ON] agent ou bénéficiaire indéfini de l’action.

Millet (2019 : 143) précise que ces espaces « peuvent se recréer, mais ils peuvent également disparaître totalement au profit d’une construction libre d’espaces nécessaires à la cohésion narrative ». Une zone peut être utilisée au bénéfice d’une autre si le discours est assez riche pour apporter les informations grammaticales manquantes ou potentiellement ambiguës. Ce qui reste primordial est la *cohérence* de l’utilisation des zones de l’espace de signation tout au long d’un discours.

Cet espace de signation permet aussi l’expression de deux types de temporalité (fig. 1.5). Le temps de l’énoncé s’écoule sur le plan frontal (fig. 1.24) par rapport au signeur. Cette expression du temps n’impliquant pas l’énonciateur, il est utilisé de manière explicite par le traçage d’une ligne ou encore par le placement de différents signes arrimés à l’axe temporel. Le second plan, sagittal par rapport au signeur, correspond à un axe temporel ancré dans l’énonciation. Cet axe

est orienté : pour la LSF, le passé se situe vers l'arrière tandis que le futur est indiqué vers l'avant.

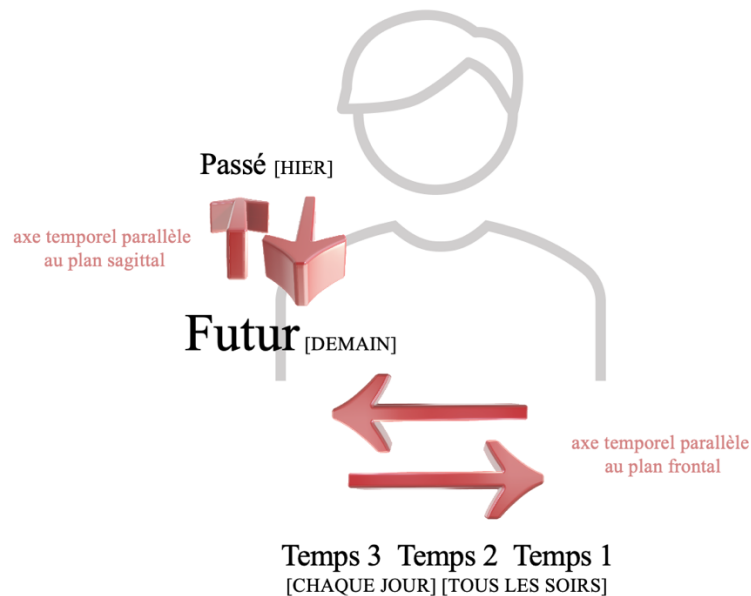


Figure 1.5 – Plan frontal et plan sagittal par rapport au corps servant l'expression de la temporalité

Ces quelques règles élaborées autour d'un corps-référent n'ont pu être dégagées avant que les LS n'aient été reconnues en tant que systèmes linguistiques organisés. Cette reconnaissance remonte à 1960 (Stokoe 1960) pour l'*American Sign Language* (ASL).

1.1.1.3. Base d'un système phonologique

Outre son intérêt proprement scientifique, le travail de décomposition des signes de l'ASL par Stokoe en 1960 relevait d'une motivation particulière : susciter la reconnaissance des langues des signes par la communauté des linguistes comme de celle du grand public.

Au début des années 1960, la linguistique américaine est encore sous l'influence du distributionnalisme, théorie qui s'attache à décrire les LV dans une optique strictement comportementale. Stokoe s'attèle alors à montrer qu'une décomposition de type phonologique est également pertinente lorsqu'il s'agit de décrire l'ASL. Trois composantes nécessaires à la formation de signes sont alors isolées. Stokoe les nomme « *aspects* ».

Le premier aspect, appelé « *designator* », concerne la forme de la main. L'auteur recense dix-neuf configurations (annexe A.1). Afin de concevoir cet inventaire, Stokoe a recouru aux configurations de la main utilisées pour la dactylogogie (représentations gestuelles des lettres de l'alphabet) de l'ASL. Son approche est holistique dans la mesure où l'auteur considère que des formes de main qui présentent peu de différences relèvent d'une même configuration. C'est

le cas pour les lettres A, S et T qui sont considérées comme formées de configurations semblables, la position du pouce n'étant pas jugée pertinente (fig. 1.6). Sa classification implique donc qu'en ASL les configurations de main [A] [S] ou [T] ont une même représentation phonologique /A/.

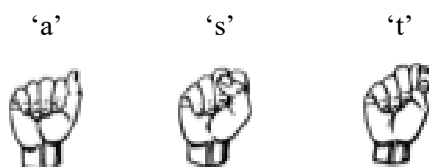


Figure 1.6 – Dactylogogie en ASL des lettres A, S et T

Le deuxième aspect, appelé « *tabula* », se concentre sur l'emplacement de la main par rapport au corps du locuteur. Ces emplacements sont au nombre de douze (annexe A.2). Il peut s'agir du cou, du torse ou encore de l'espace « neutre » devant le signeur.

Le troisième aspect, « *signation* », spécifie le mouvement de la main. Cet aspect est le plus finement décrit selon vingt-quatre types de mouvements (annexe A.3), rassemblés en groupes d'actions. Des indications sur l'orientation de la main seront ensuite ajoutées (Stokoe 1965). L'auteur ne considère pas l'orientation comme un paramètre à part entière, mais comme un sous-ensemble de la *signation*.

L'ensemble des unités constituant ces aspects sont pour Stokoe des équivalents aux phonèmes. En LV, l'identification des phonèmes s'est faite en construisant des paires minimales, c'est-à-dire des paires de mots dont le sens ne se différencie que par un seul son. Ce n'est qu'une fois qu'une paire minimale ayant ce son comme base commune est avérée que celui-ci prend le statut de phonème. Des études traitant des LS ont été menées suivant ce même processus de recensement des paires minimales⁴. Concernant la LSF, citons à titre d'exemple les signes [INTELLIGENT] et [SENTIR] qui se distinguent par l'emplacement de la main (sur le front pour le premier, sur le nez pour le second) ; les signes [PARDON] et [COURRIEL] qui présentent une différence de configuration (main plate pour le premier et main en poing avec le pouce écarté pour le second) ; les signes [PUNIR] et [TRAVAILLER] se distinguent par leur mouvement, unique pour l'un et répété pour l'autre (Millet 2004).

⁴ Tartter & Fischer (1992) présentent des paires minimales concernant l'ASL ; Brentari *et al.* (2018) celles concernant la langue des signes britannique ; Sandler (2012) celles observables au sein de la langue des signes israélienne.

Le travail mené à partir de 1960 s'applique à mettre au jour les similitudes structurelles existantes entre les signes et les mots, afin de justifier l'appartenance des LS à la famille des langues : tout comme la combinaison de phonèmes engendre des morphèmes en LV, la combinaison de *chérèmes* permet la formation de *kinèmes*.

Cela étant dit, bien que la reconnaissance des LS n'ait plus jamais été remise en question, les *aspects* de Stokoe ont engendré et engendrent encore des débats à plusieurs niveaux. Citons sans les creuser davantage les discussions autour du terme « paramètre » utilisé à partir de 1979 (Klima & Bellugi 1979) en lieu et place d'*aspect*, ou celles entourant le terme *prime* en lieu et place de *chérème*⁵.

Signalons également que de nombreux inventaires différents ont été proposés rassemblant de quarante à plus de soixante-quinze configurations de la main (Friedman 1977, Battison 1978, Klima & Bellugi 1979, Boutora 2008). Une des propositions les plus récentes, celle de Millet (2019 : 46), recense quarante-et-une configurations.

Klima & Bellugi (1979) enrichissent le découpage paramétrique des signes en ajoutant des paramètres qualifiés de « mineurs » – comme le contact de la main sur une autre partie du corps ou sur l'autre main, ou encore la disposition des mains entre elles – par opposition aux paramètres « majeurs » qui correspondent aux trois aspects dégagés par Stokoe, auquel on ajoute celui de l'orientation, considérée depuis Battison (1973) comme un paramètre à part entière. Le changement de statut de ce dernier suscite encore aujourd'hui bien des discussions. Battison fonde son point de vue sur l'existence de paires minimales basées strictement sur l'orientation de la paume dans l'espace ; pour la LSF, nous pouvons citer les signes [MAISON] et [DEMANDER] qui se distinguent seulement par l'orientation des paumes, dirigées vers le sol pour l'un et vers le signeur pour l'autre. Brentari (1998) stipule toutefois qu'il existe *trou peu* de paires minimales basées sur l'orientation pour que cette dernière soit considérée comme pleinement autonome. Millet (2019) considère l'orientation comme un paramètre véritable tout en rappelant qu'il demeure complexe à isoler, car conditionné aux autres paramètres.

Les expressions faciales pouvant modaliser, compléter ou spécifier un signe, sont aussi analysées, leur statut oscillant entre celui d'un paramètre véritable pour Moody (1983) ou d'une donnée lexicale non pertinente pour Millet (2019), car soumise au contexte discursif.

Il en sera de même pour le mouvement tantôt considéré comme paramètre phonologique tantôt considéré comme une phase de transition entre deux emplacements. Nous en détaillerons les

⁵ Le terme « phonème » issu des LV sera finalement retenu malgré sa référence au son.

motifs en section 1.1.3, mais avant cela voyons quel rôle joue le mouvement au sein des productions signées.

1.1.2. Le mouvement

Parmi les quatre paramètres manuels – que sont la configuration, l’orientation, l’emplacement et le mouvement – trois sont inhérents à la présence même de la main. Supposons que le membre supérieur soit ballant, le long du buste. Même dans cette position de repos, la main présente une configuration (composée de doigts légèrement courbés), un emplacement (le côté de la cuisse) et une orientation (paume vers la cuisse). Seul le mouvement, ou toute tension musculaire, n’est pas présent *de fait*. Il relève d’une volonté et d’un effort particulier. Or, tout signe comporte un mouvement, qui est *nécessaire* pour créer du sens (Wilbur 1993, Millet 2019). Sa présence systématique et sa saillance perceptive le placent d’ailleurs au cœur de l’étude de la prosodie des LS et de l’existence potentielle d’une démarcation entre le geste et le signe.

1.1.2.1. Caractéristiques linguistiques principales

Pour Miller (2000 : 102), le mouvement a trois caractéristiques saillantes :

- 1) La géométrie
- 2) La temporalité
- 3) La séquentialité

La première caractéristique concerne la forme de la trajectoire dessinée dans l’espace par la main.

À ce propos, Millet (2019) recense trois types de mouvement : le mouvement manuel interne, le mouvement strictement articulateur et le mouvement articulateur iconique (tab. 1.1).

Tableau 1.1 – Trois types de mouvements (reproduction de Millet 2019 : 72)

MVT strictement articulateur		MVT manuel interne	MVT articulateur iconique
Ponctuel	Tracé		
De haut en bas [PLUIE]	De l’avant-bras vers la main [DANGEREUX]	Configurations E > 5 [FLEUR]	Mouvement sinusoïdal de la gauche vers la droite [MER]
Bref sur le front [SAVOIR]	Du nez vers l’extérieur Configurations 5 > bec de canard [LOUP]		Mouvement en zigzag du haut vers le bas [LIRE]
Bref sur le front [POURQUOI]	De l’intérieur vers l’extérieur [CHÔMAGE]	Configurations 5 > E de l’extérieur vers le signeur [PRENDRE]	

Le mouvement strictement articulatoire (première colonne) se subdivise en *mouvement ponctuel*, correspondant à un mouvement du poignet, et en *mouvement tracé*, correspondant à une action motrice du bras ou de l'avant-bras. Seule cette dernière sous-catégorie engendre un déplacement de la main, transportée d'un point de départ à un point d'arrivée, et donc une trajectoire. Ce type de mouvement, que l'on peut observer au sein d'un signe tel que [SAVOIR] (fig. 1.7), « permet d'articuler le geste et le sens, puisque [...] sans mouvement, il n'y a pas de signe » (*ibid.* : 82).



Figure 1.7 – Réalisation du signe [SAVOIR] (signeur 9 signe 083, vidéo [1.4](#))

Le mouvement manuel interne (deuxième colonne) concerne le changement de configuration ; il est donc réalisé au niveau des phalanges. Le mouvement articulatoire iconique (troisième colonne) désigne la production d'une trajectoire particulière en lien avec la forme du référent qui en est le moteur, ajoutant de la complexité au mouvement réalisé (sinusoïde ou en zigzag). C'est le cas pour le signe [MER] dont la réalisation gestuelle est motivée par rapport au signifié avec une représentation de l'aspect onduleux des vagues (fig. 1.8) (Millet 2019 : 72).

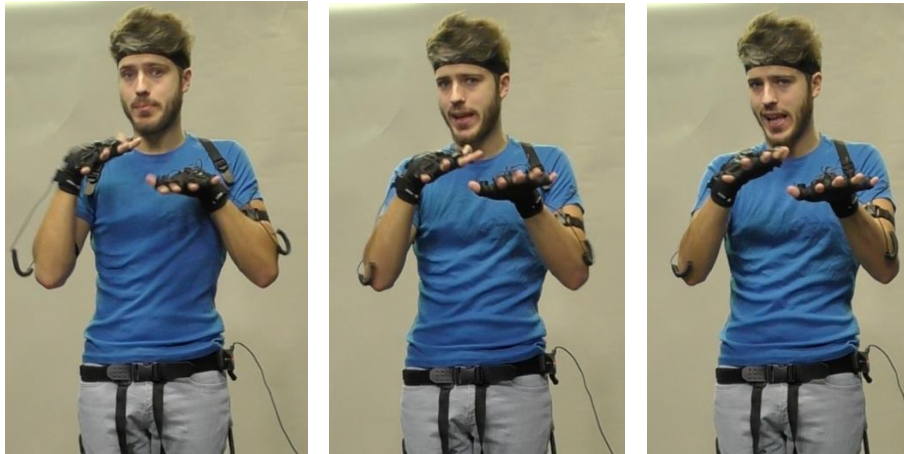


Figure 1.8 – Réalisation du signe [MER] (signeur 2 signe 201, vidéo [1.5](#))

Les formes des trajectoires existantes ont été recensées par Braffort (1996) pour la LSF (tab. 1.2). L’auteure s’est basée pour ce faire sur les signes du dictionnaire de Moody (1986). Son inventaire, succinct, atteste cependant d’une certaine régularité du mouvement. Braffort remarque d’ailleurs que les mouvements «les plus simples à réaliser sont aussi les plus fréquents» (*ibid.* 1996 : 73), avec en premières places la droite et l’arc⁶. Il faut néanmoins rappeler que les signes chargés iconiquement sont ceux qui présentent la plus grande hétérogénéité de formes, or, ce ne sont pas les plus représentés dans les dictionnaires.

Tableau 1.2 – Fréquences d’apparition des différentes classes de mouvement répertorié à partir de Moody (1986) (Braffort 1996 : 73)

Classe	%
droite	42,9
arc	26,1
statique	17,3
cercle	10,9
complexe	2,8

La deuxième caractéristique concerne la temporalité du mouvement. Wilbur & Malaia (2008) démontrent que des caractéristiques de débit issues du paramètre du mouvement permettent de distinguer et de catégoriser des phénomènes sémantiques tels que la télélicité (section 3.3.3).

La temporalité d’un mouvement concerne aussi les potentielles répétitions. En ASL, la nominalisation d’un verbe s’effectue par un procédé de reduplication et de diminution de

⁶ La catégorie « statique » regroupe les signes qui présentent bien un mouvement (manuel interne ou strictement articulateur), mais pas de trajectoire.

l'amplitude du mouvement. C'est le cas des verbes [SIT] et [CLOSE WINDOW], dont le mouvement est redoublé et diminué pour obtenir respectivement les noms [CHAIR] et [WINDOW] (Supalla & Newport 1975, Brentari 1998). La répétition peut aussi se faire au niveau du signe lui-même, ce qui marque alors l'accord d'un objet pluriel. Le signe de LSF [INVITER] réalisé plusieurs fois de suite signifie que plusieurs personnes sont invitées (fig. 1.9).

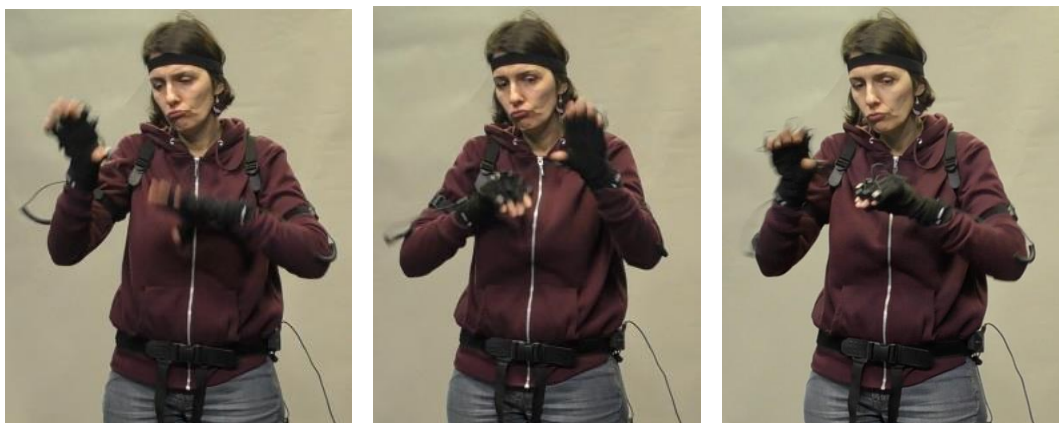


Figure 1.9 – Réalisation du signe [INVITER DES PERSONNES] (signeur 3 signe 320, vidéo [1.6](#))

La dernière caractéristique touche à la séquentialité. Il s'agit d'une dimension du mouvement que n'a pas pris en compte Stokoe (1960). Pour l'auteur, les *chérèmes* (phonèmes gestuels) se forment simultanément.

“The sign-morpheme, however, unlike the word, is seen to be not sequentially but simultaneously produced. Analysis of the sign cannot be segmented in time order but must be aspectual.” (Stokoe 1960 : 20)

« Le signe-morphème, cependant, à la différence du mot, est considéré comme n'étant pas produit de manière séquentielle, mais simultanée. L'analyse du signe ne peut être segmentée dans l'ordre du temps, mais doit être aspectuelle. » (Traduction personnelle, Stokoe 1960 : 20)

Un signe occupe un créneau temporel unique et le mouvement n'est pas analysé en termes de source et de cible, mais est décrit dans sa constitution interne. Le fait de considérer que ses entités se déploient simultanément des signes sera critiqué par Liddell (1984) (mais aussi par Sandler 1986, Liddell & Johnson 1989, Perlmutter 1992), qui considèrent que le mouvement occupe bel et bien deux créneaux temporels adjoints ; à ce titre, il peut être spécifié de manière séquentielle. Cette séquentialité pourrait être observée au travers des phases de maintien d'une posture qui encadrent le mouvement (§1.1.3.1), à l'instar des consonnes qui entourent une voyelle dans les LV.

Ce parallèle avec les syllabes des LV ira en se prolongeant, marquant la place prépondérante que le mouvement tient au cœur de la réalisation signée.

1.1.2.2. Rôle prosodique

En linguistique des LV, la prosodie regroupe des traits dits suprasegmentaux, tels que l'accent, le ton, l'intonation ou encore le rythme. Le découpage de ces traits se fait au niveau de la syllabe plutôt qu'à celui du phonème.

Une syllabe comprend une attaque et une rime, soit respectivement une consonne à l'initial de la syllabe et un/des phonème(s) qui lui succède. La rime peut elle-même se diviser en un noyau et une coda. Une syllabe possédant une coda est dite fermée et bimorique⁷ (fig. 1.10 syllabe 1), et une syllabe sans coda est dite ouverte et monomorique (fig. 1.10 syllabe 2). La sonorité de la syllabe est croissante jusqu'à ce qu'elle atteigne un pic généralement représenté par une voyelle, puis elle décroît jusqu'à la fin de la syllabe. La voyelle est donc l'élément central et nécessaire de la prosodie des LV.

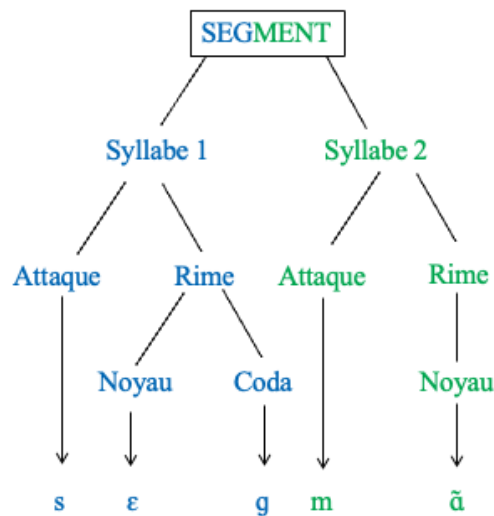


Figure 1.10 – Découpage syllabique du morphème « SEGMENT »

En LS, c'est le mouvement qui est considéré comme exerçant une influence sur la prosodie des signes, notamment la modification de l'amplitude. Un parallèle entre la voyelle et le mouvement peut être fait : le rôle de la voyelle est de rendre le mot sonore alors que celui du mouvement est de rendre le signe visible (Sandler 1993, Corina 1990, Brentari 1993, Perlmutter 1992, Liddell 1984).

⁷ Une more est une unité *tonique* permettant de distinguer les syllabes légères (monomériques), des syllabes lourdes (bimériques).

Brentari (1998) cherche à rendre compte de la *saillance perceptive* du mouvement en LS en mettant en place un modèle prosodique. Au sein de ce modèle, les composantes d'un signe sont divisées en deux catégories : les traits inhérents (angl. *inherent features* ou IF) qui correspondent aux caractéristiques statiques, et les traits prosodiques (angl. *prosodic features* ou PF) qui portent la sonorité du signe et qui correspondent aux caractéristiques dynamiques. Les IF comprennent la description de la forme de la main (HS) et le lieu de l'articulation (POA). Les PF accueillent les caractéristiques dynamiques d'un signe (fig. 1.11).

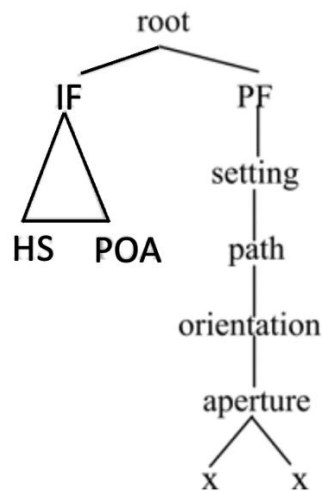


Figure 1.11 – Traits inhérents (IF) et traits prosodiques (PF) ainsi que leurs caractéristiques respectives (Brentari 2012 : 25)

Les PF sont à la fois simultanés (verticalité de la branche) et séquentiels (les « x » soulignent la présence de créneaux temporels distincts). Les nœuds qui composent cette branche sont organisés selon les changements qui ont lieu sur l'articulation la plus proximale – la plus proche du buste – aux changements qui ont lieu sur l'articulation la plus distale, la plus éloignée du buste. Ce sont ces traits dynamiques du mouvement qui correspondent aux unités basiques de la prosodie en LS. En fonction des nœuds actifs (ceux impliqués dans l'articulation du mouvement), différents mouvements peuvent être réalisés :

- 1) un mouvement qui engendre un changement par rapport aux valeurs des trois plans du corps⁸ (angl. *setting*). Ce type de mouvement est exercé par le bras et/ou l'avant-bras ;
- 2) un mouvement à trajectoire (angl. *path*), soit un mouvement réalisé au niveau de l'avant-bras.

⁸ Nous le verrons §1.2.1.1, le corps peut être divisé en trois plans : frontal (avant-arrière), sagittal (droite-gauche) et transversal (haut-bas). Un *setting* implique que la main a changé de valeur, passant par exemple d'un emplacement controlatéral à un emplacement ipsilatéral.

Ces deux premiers types de mouvements sont les plus visuellement saillants, les plus « sonores » en quelque sorte.

3) un changement d'orientation (angl. *orientation*) situé au niveau du poignet ;

4) un changement d'ouverture (angl. *aperture*) qui concerne les doigts.

Ces deux derniers types de mouvements sont considérés comme secondaires, car leur saillance perceptive est plus faible.

Dans ce modèle prosodique, il ne peut y avoir qu'un seul changement de configurations ou d'orientation au sein d'un signe. Pour les cas où il y en aurait plusieurs, comme pour les mouvements de trille, de pianotement, de hochement ou encore de tremblement des doigts, le mouvement est considéré comme *non décomposable*. Si le mouvement est non décomposable, il n'y a alors qu'un seul mouvement et donc qu'une seule syllabe (Stack 1988 ; Liddell & Johnson 1989 ; Brentari 1990, 1998). Mais pour Miller (2000) et Blondel (2003), caractériser ces mouvements comme étant non décomposables ne permet plus de rendre compte des aspects prosodiques pouvant s'y manifester. En se basant sur l'analyse des productions poétiques en LSF, les auteurs avancent alors l'argument contraire : les répétitions sont non seulement dénombrables, mais leur durée a une incidence sur la portée rythmique du signe. Une analyse moraïque (de l'aspect tonique) leur permet, par exemple, de repérer la présence de mouvements de transitions internes.

La version poétique du signe [SE PROMENER] présente des mouvements vers le bas qui sont plus saillants, plus accentués, que les mouvements vers le haut (Blondel 2004 : 10), alors que la réalisation poétique de [SE BALANCER]⁹ ne présente pas de différence rythmique entre les répétitions de ses mouvements. Pour le premier il s'agirait d'un mouvement unidirectionnel répété et séparé par un mouvement de transition interne (fig. 1.12 (a)) et pour le second il s'agirait d'un unique mouvement qui est bidirectionnel (fig. 1.12 (b)).

⁹ Les signes [SE PROMENER] et [SE BALANCER] sont tirés du poème « La promenade », créé et performé par un groupe d'enfants sourds dirigé par Karine Feuillebois enseignante spécialisée et animatrice ; ou du poème « Automne » créé par Nadia Haouam, professeure de LS (Blondel 2004).

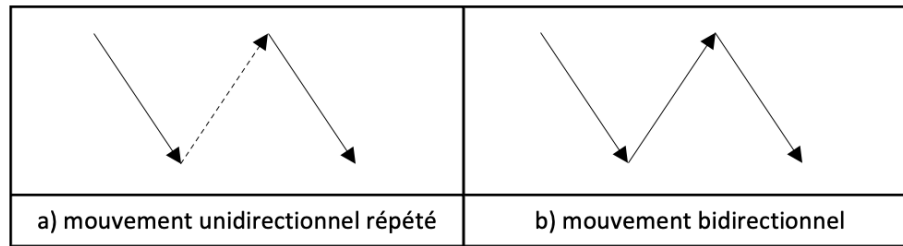


Figure 1.12 – a) Mouvement de transition interne, et b) pas de mouvement de transition (reproduction de Blondel 2004 : 12)

Ces études montrent que le mouvement et sa dynamique jouent le rôle de saillance au sein du signe, qu'elle soit perceptuelle pour Brentari (1998) ou rythmique pour Miller (2000) et Blondel (2004). Le mouvement constitue une source d'informations quant à la structure des signes, mais aussi, nous allons le voir, quant à la part gestuelle des LS.

1.1.2.3. Observations et réflexions actuelles

Les gestes sont des productions corporelles réalisées dans le but d'être vues et de transmettre de l'information. Si on considère bien que les LV intègrent la gestuelle (McNeill 1992, Kendon 2004), il semble raisonnable de supposer qu'une co-verbalité existerait aussi au sein des LS. Cette possibilité pose immédiatement une question : où s'arrête le signe et où commence le geste ? La réponse est d'autant moins immédiate qu'il n'y a pas de changement de modalité de production et de réception. Le verbal (le signe) relève de la modalité gestuo-visuelle tout comme le coverbal le serait.

Une première hypothèse considère que la gestualité prend forme à travers les expressions du visage. Parmi la généralité des gestes faciaux, Emmorey (1999) isole ceux ayant une fonction grammaticale, permettant par exemple de marquer les structures syntaxiques (comme les sujets ou les pronoms relatifs). Ces expressions « affectives et évaluatives » (*ibid.* : 151) peuvent apparaître lors d'un changement de référentiel ou de personnage. Dans la fig. 1.13, deux personnages sont représentés se serrant la main. Si le changement d'orientation du buste et le déplacement du membre supérieur droit indiquent déjà qu'il s'agit de deux personnes distinctes, l'ajout des expressions faciales et de la contraction des épaules précisent les émotions opposées ressenties par les deux personnages.



Figure 1.13 – Deux personnages se serrent la main, l’un est enjoué et l’autre a la mine renfrognée. À gauche [TENDRE LA MAIN] (signeur 3 signe 138, vidéo [1.7](#)) ; à droite [SERRER LA MAIN] (signeur 3 signe 140, vidéo [1.8](#))

Emmorey soutient donc que les gestes sont non manuels, et donc non concomitants aux signes, qui sont eux, principalement manuels.

Une autre hypothèse veut que la LS et le geste partagent les mêmes segments corporels effecteurs. C’est le cas de Duncan (2005) lorsqu’il étudie la langue des signes taïwanaise (TSL). Pour ce chercheur, la gestualité s’exprime majoritairement à travers le paramètre de la configuration manuelle. Pour le démontrer, l’auteur a mis en place un protocole d’observation de production auprès de neuf signeurs. En TSL, la présence d’un animal est figurée – sous sa forme de citation – par trois doigts (pouce, index, majeur) ouverts et légèrement courbés. Pourtant, trois sur les neuf signeurs natifs de la TSL ont, pour représenter un chat qui monte à l’intérieur d’un tuyau vertical, choisi d’utiliser une configuration différente. Le premier a utilisé une configuration pour laquelle seuls l’index et le majeur sont légèrement courbés, le deuxième n’a tendu que l’index, et le troisième a tendu son index et son majeur (fig. 1.14).



Figure 1.14 – Différentes configurations qui représentent un chat qui grimpe un tuyau : (a) l’index et le majeur sont légèrement courbés, (b) l’index est tendu, (c) l’index et le majeur sont tendus (Duncan 2005 : 303-304)

Cette différence suggère une influence du contexte du discours sur la configuration, démontrant la possibilité de la présence d'un gradient qui serait gestuel. Pour Duncan, le geste et le signe sont coproduits, les deux fonctionnant en « tandem » (*ibid.* : 300).

Schembri *et al.* (2005) soutiennent l'hypothèse que la part gestuelle apparaîtrait non pas au niveau de la configuration, mais à celui des paramètres de l'emplacement et du mouvement. Afin de vérifier cette hypothèse, les auteurs ont comparé la production de locuteurs anglophones non signeurs se trouvant dans l'obligation de décrire des scènes à l'aide de leurs mains et non de leur voix, avec des signes produits par des signeurs natifs de l'ASL. La configuration est la composante pour laquelle il y a le moins de similarités entre les deux groupes de participants, ce qui démontre que ce paramètre appartient à un ensemble catégorique spécifique à l'ASL. En revanche, une nette ressemblance a pu être observée en ce qui concerne l'emplacement et le mouvement entre les gestes silencieux (Goldin-Meadow 2015) produits par les locuteurs anglophones et ceux des signeurs ASL. Si les gestes inventés et réalisés par les locuteurs ayant l'interdiction de parler présentent les mêmes caractéristiques de position et de mouvement que les signes ASL, cela démontrerait que ces deux paramètres relèvent du geste. Goldin-Meadow & Brentari (2017) mentionnent qu'il ne s'agit pas dans cette étude de gestes spontanés équivalents aux gestes qui se réalisent en co-production avec la parole, mais de gestes portant l'intégralité de la fonction de communication. L'étude d'Emmorey *et al.* (2013) puis celle d'Emmorey (2015) confirment tout de même cette hypothèse en observant par neuro-imagerie l'hémisphère du cerveau sollicité lors de la description d'images par les signeurs ASL sourds. Les signes lexicaux (fig. 1.15 (a)) engagent des zones de l'hémisphère gauche, essentiellement dédiées à la production et à la compréhension du langage. Ce qui n'est pas le cas lors de la production de verbes de localisation et de mouvement (fig. 1.15 (b)) (*ibid.* : 475).



Figure 1.15 – (a) Signe lexical de [LIGHT] et (b) construction de classificateur de la lumière posée sur la table (Emmorey 2013 : 519)

Goldin-Meadow & Brentari (2017) déclarent qu'il est nécessaire de se tourner vers les technologies de capture de mouvement (MoCap) pour parvenir à une plus grande finesse d'analyse des paramètres de l'emplacement et du mouvement : « nous pensons que les progrès dans l'analyse du mouvement et de l'emplacement dans le signe vont nécessiter de nouveaux outils. Par exemple, nous pouvons utiliser l'analyse du mouvement¹⁰ » (Goldin-Meadow & Brentari 2017 : 16).

Mais, malgré le fait que le mouvement soit indispensable à toute production signée et qu'il soit au cœur des questionnements actuels concernant la structuration profonde des LS – allant jusqu'à nécessiter une prise en main de méthodes de captation et d'analyse pleinement adaptées, pensées et orientées vers le mouvement – son statut de paramètre phonologique est remis en question.

1.1.3. Réflexions phonologiques

Liddell (1984) propose d'étudier la dimension séquentielle des signes. Pour l'auteur, au mouvement, succède et précède une phase de tenue, pendant laquelle tous les articulateurs sont immobiles. Ce bornage met au jour l'aspect déductible du mouvement, devenu simple phase de transition, qui finit par perdre son statut phonologique. Pourtant, Stokoe (1991) publie un article qui va à contre-courant de cet abandon du mouvement. L'auteur propose une approche phonologique au sein de laquelle le mouvement est non seulement étudié selon son contexte corporel entier, mais aussi comme étant autant central que *simple*.

1.1.3.1. Séquentialité et bornage

Pour Liddell (1984), et à la différence de Stokoe (1960), la séquentialité est un élément pertinent sur le plan phonologique.

Pour appuyer cette observation, Liddell & Johnson (2011) prennent l'exemple du signe chronophotographié (§3.1.1.2) [CHICAGO] (fig. 1.16).

¹⁰ “[...] we suspect that progress in the analysis of motion and location in sign is going to require new tools. For example, we can use motion analysis.” (Goldin-Meadow & Brentari 2017 : 16)

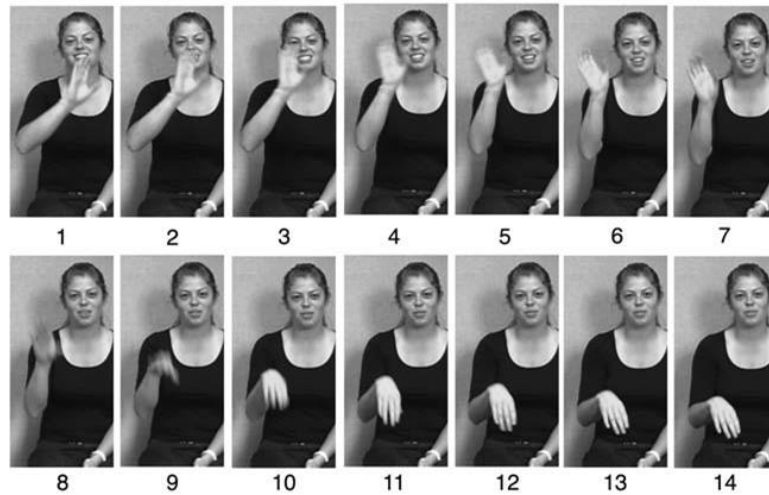


Figure 1.16 – Chronophotographie de la réalisation du signe ASL [CHICAGO] (Liddell & Johnson 2011 : 411)

Les auteurs proposent une représentation organisationnelle de ce signe sous la forme de structures segmentales sublexicales (fig. 1.17). Les composantes – configuration (HC), emplacement (PL), orientation (FA) et non manuel (NM) – peuvent apparaître de manière séquentielle et indépendamment les unes des autres.

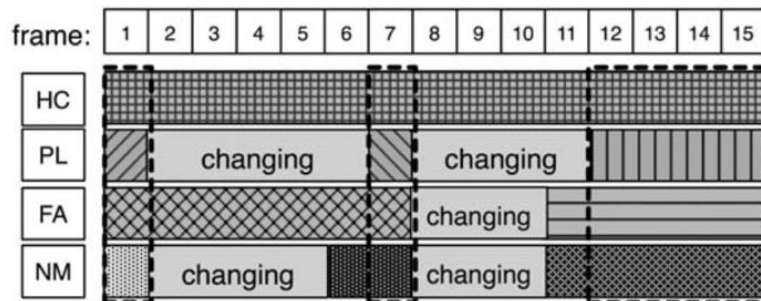


Figure 1.17 – Organisation séquentielle du signe ASL [CHICAGO] en fonction de quatre composantes structurelles (Liddell & Johnson 2011 : 417)

Dans cette représentation organisationnelle, des cases contiennent le terme « changement » (angl. *changing*). Elles représentent les phases où la composante (i.e. le paramètre) concernée est en mouvement. On remarquera d'ailleurs que ce sont les numéros d'images concernées par un changement (de 2 à 6 et de 8 à 11) qui sont floues dans la fig. 1.16, alors que d'autres ne le sont pas.

Les cases avec un fond quadrillé ou en pointillés représentent des moments de relative stabilité durant lesquels aucun changement marquant n'est observable. Ces phases de stabilité peuvent être communes à l'ensemble des composantes ; c'est le cas à trois reprises durant le déroulé de

ce signe (encadrés en pointillés). Ce sont ces trois moments qui correspondent aux images nettes de la figure 1.16 (1, 7 et de 12 à 15).

“We refer to such momentary alignments of features as postural gestures and view them as one of the basic building blocks of signs” (Liddell & Johnson 2011: 417)

« Nous nous référons à de tels alignements momentanés de caractéristiques comme des gestes posturaux et les considérons comme l'un des éléments de base des signes. »
(Traduction personnelle, Liddell & Johnson 2011 : 417)

Liddell & Johnson rendent autonome le segment « tenue » (angl. *hold*), durant lequel le mouvement est comme suspendu un instant. C'est sur cette base que se construit leur modèle « *Hold and Movement* » (Liddell & Johnson 1989) : la séquentialité des signes est portée par l'encadrement du segment *movement* par des segments *hold*.

Le modèle *Hand Tier* de Sandler (1989) reprend cette organisation séquentielle et distingue de la même manière un segment de tenue, nommé ici localisation (angl. *location*) et un segment de mouvement.

Dans ce modèle, le segment localisation (fig. 1.18) est constitué de deux nœuds, configuration et emplacement. La configuration est composée de l'orientation de la paume et de la forme de la main. La sélection des doigts permettant de composer la forme de main ne peut pas varier au cours d'un même signe. En revanche, l'aperture et l'orientation de ces mêmes doigts le peuvent. Le nœud de l'emplacement permet de spécifier où se trouve la main dominante (tronc, tête, main dominée, espace neutre). L'emplacement majeur ne peut pas changer au sein d'un signe ; s'il y a mouvement, ce sont les emplacements mineurs (i.e. des spécifications de l'emplacement majeur préalablement sélectionné) qui sont modifiés.

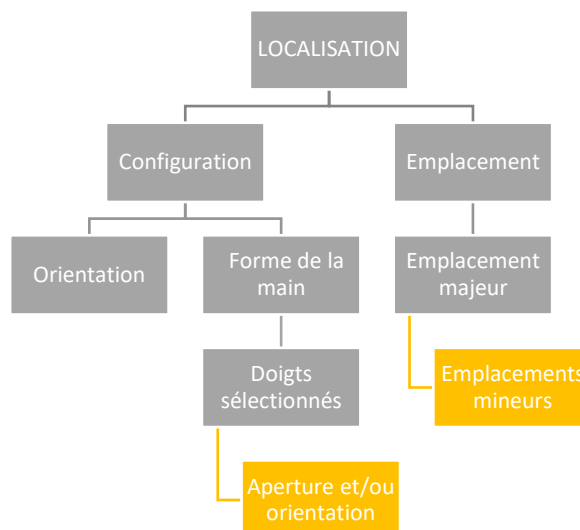


Figure 1.18 – Décomposition du segment « localisation » du modèle *Hand Tier* de Sandler (1989)

Le segment mouvement est aussi divisé en deux nœuds distincts séparant les mouvements primaires des mouvements secondaires (fig. 1.19).

Les mouvements primaires sont « à trajectoire » si la main a changé d’emplacement mineur, ou « local » si c’est l’aperture et/ou l’orientation des doigts qui a été modifiée. Quant aux mouvements secondaires, ils concernent les mouvements d’oscillation des doigts.

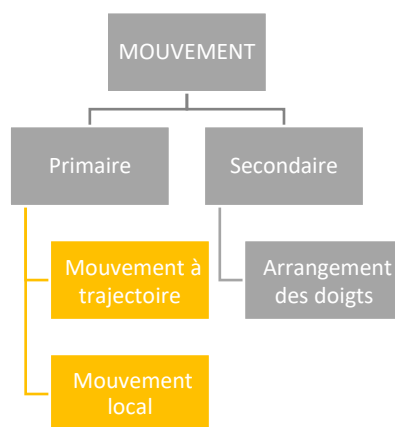


Figure 1.19 – Décomposition du segment « mouvement » du modèle *Hand Tier* de Sandler (1989)

Un point important est à soulever quant aux caractéristiques de cette division en deux segments : la détermination de la nature des mouvements primaires (cases jaune fig. 1.19) est déjà entièrement donnée par les spécifications qui se situent au sein du nœud de localisation (cases en jaune fig. 1.18). Van der Hulst (1993) met alors en exergue la contradiction de ce modèle : même si Sandler (1989) considère le mouvement comme un segment à part entière, la

double spécification en début et en fin de signe des emplacements mineurs et de l'aperture et/ou orientation des doigts (fig. 1.18 en jaune) rend le mouvement tout à fait *déductible*.

Hayes (1993) reprend alors ce principe initié par Sandler et pose les jalons d'un système d'analyse *sans* mouvement.

1.1.3.2. Autonomie des postures

Pour mettre en place un système qui ne contient pas de segment mouvement, Hayes (1993) se tourne vers les analyses des LV. Pour l'auteur, en phonologie des LV, la plupart des caractéristiques sont statiques, et celles qui sont dynamiques peuvent être ramenées, pour les besoins de l'analyse, aux deux caractéristiques statiques qui les composent. C'est le cas de la caractéristique dynamique [+descendant] qu'il est possible de fractionner en deux caractéristiques statiques séquentielles [+haut] et [-haut]. Hayes suppose qu'il peut en être de même pour la description des affriquées, consonnes composées d'une phase occlusive durant laquelle le flux d'air est bloqué suivi d'une phase de relâchement telle que /tʃ/. La caractéristique dynamique de [+libération retardée] peut être remplacée par les caractéristiques statiques de l'arrêt, et d'une fricative.

Pour l'auteur, un même raisonnement peut s'appliquer aux LS. Pour le démontrer, Hayes reprend les travaux de Sandler (1989), en augmentant encore la place accordée aux descriptions de phénomènes statiques. Les mouvements secondaires sont alors décrits dans leur alternance de configurations et les mouvements primaires à trajectoire sont retracés en termes d'emplacement initiaux et finaux en tenant compte de chacune des postures intermédiaires liées aux changements de position de la main. Pour aider à différencier des mouvements rectilignes des mouvements arqués, l'auteur s'inspire des travaux de Nagahara (1988). Celui-ci propose d'utiliser des systèmes de coordonnées différents selon la forme du mouvement. Un système de coordonnées cartésiennes (fig. 1.20 (a)) permettrait d'indiquer qu'il s'agit d'une droite, alors qu'un système de coordonnées polaire (fig. 1.20 (b)) décrirait une trajectoire arquée.

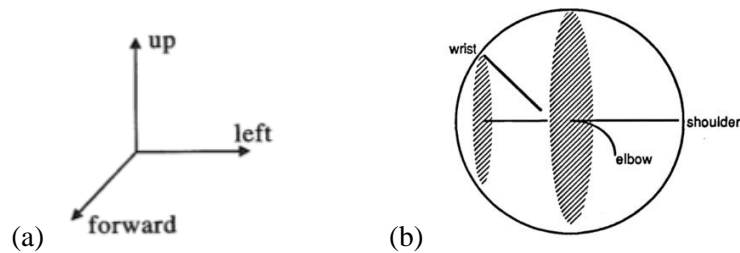


Figure 1.20 – (a) Système de coordonnées cartésiennes qui permet de décrire les droites et (b) système de coordonnées polaires qui permet de spécifier les mouvements arqués (Hayes 1993 : 223)

La suppression du segment mouvement a deux conséquences principales : la séquentialité ne se trouve plus dans la succession des segments de tenue et de mouvement, comme c'était le cas pour Liddell & Johnson (1989) et Sandler (1989), mais dans l'usage de valeurs différentes au niveau de l'emplacement et de l'aperture/orientation (Van der Hulst 1993, Channon 2002). De surcroît, ce n'est plus l'aspect dynamique des traits articulatoires qui est mis de l'avant, mais les *postures que ces changements induisent*. Les postures constituent dès lors la part résultante et signifiante de la segmentation.

1.1.3.3. À la recherche du mouvement disparu

La décomposition des mouvements dynamiques en autant de composantes statiques le constituant est un parti pris partagé (Hayes 1993, Van der Hulst 1993, Uyechi 1996, Channon 2002). Cependant, Stokoe publie en 1991 un article qui s'inscrit à contre-courant de cette tendance. Pour lui, ce n'est pas le mouvement en lui-même qui pose un problème dans le développement de la phonologie des LS, mais les choix théoriques pris pour étudier ce paramètre. Ces choix théoriques posent d'ailleurs tout autant problème concernant le paramètre de l'orientation.

“Orientation works well for geographers and navigators, from which it was purloined; but a signer's fingers and hands are far too mobile to supply anything like cardinal directions, and the number of all of the directions in three-dimensional space happens to be infinite. No wonder orientation becomes intractable. » (Stokoe 1991 : 109)

« L'orientation fonctionne bien pour les géographes et les navigateurs, à qui elle a été arrachée ; mais les doigts et les mains d'un signeur sont beaucoup trop mobiles pour fournir quoi que ce soit qui ressemble à des directions cardinales, et le nombre de toutes les directions dans l'espace tridimensionnel se trouve être infini. Il n'est pas étonnant que l'orientation devienne inanalysable. » (Traduction personnelle, Stokoe 1991 : 109)

Rappelons-nous, l'orientation a été l'objet de nombreuses interrogations quant à son statut de paramètre : d'abord non considérée comme un paramètre (Stokoe 1960), elle a parfois été

ramenée à une sous-catégorie de la configuration, de l'emplacement et du mouvement (Stokoe 1965, Crasborn & van der Kooij 1997, Brentari 1998, mais aussi plus récemment Millet 2019) ou considérée comme un paramètre à part entière (Battison 1974, Klima & Bellugi 1979).

Pourtant, la réponse se trouve dans les fondements de ce que Stokoe (1991) nomme la « phonologie-sémantique ».

Au sein de la phonologie-sémantique, un signe est une association entre un agent - ce qui exerce l'action - et un verbe, l'action elle-même. L'agent des signes est traditionnellement considéré comme étant la main. Il s'agit là, pour Stokoe, d'une première erreur.

“Most phonologies of sign language now in the literature accept hands of all kinds as members but draw the line there. Like private clubs they exclude certain other kinds of agents. [...] The way out of the maze that these garden paths have all led into is to consider not just the hand but the whole upper limb, or limbs.” (Stokoe 1991 : 108-109)

« La plupart des phonologies de la langue des signes présentées actuellement dans la littérature acceptent les mains de toutes sortes comme membres, mais s'arrêtent là. Comme des clubs privés, elles excluent certains autres types d'agents. [...] La façon de sortir du labyrinthe dans lequel ces chemins ont tous mené est de considérer non seulement la main, mais l'ensemble du membre supérieur, ou des membres. » (Traduction personnelle, Stokoe 1991 : 108-109)

Pour démontrer quels sont les intérêts de prendre en compte l'ensemble du membre supérieur plutôt que la main seule dans la description, Stokoe prend pour exemples les signes tirés de l'ASL [YES] (fig. 1.21) et [STUPID] (fig. 1.22).



Figure 1.21 – Réalisation du signe ASL [YES]

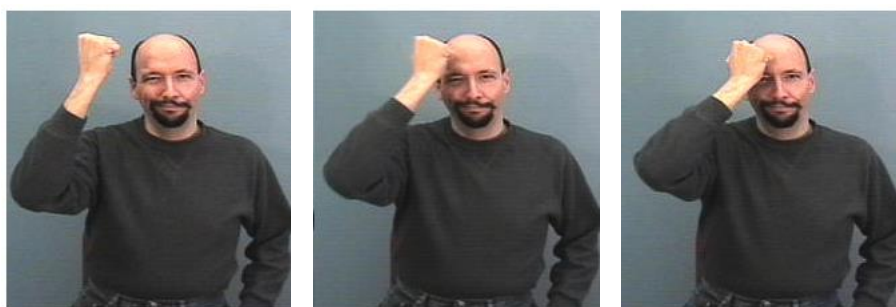


Figure 1.22 – Réalisation du signe ASL [STUPID]

En phonologie traditionnelle, ces deux signes sont considérés comme ayant le même agent, la même configuration en « poing fermé ». Cette affirmation devient fausse ou partielle à partir du moment où c'est la configuration de l'ensemble du membre supérieur qui est considérée. En phonologie-sémantique, l'agent de [YES] est le résultat d'une flexion des doigts, mais aussi de la rotation du bras vers l'extérieur, de la flexion de l'avant-bras au niveau du coude et d'une pronation complète (paume vers le bas). Quant à l'agent de [STUPID], il est le résultat d'une flexion des doigts, de la rotation du bras vers l'intérieur en adduction légère, d'une flexion plus forte du coude et d'une supination (paume vers le haut). Ces deux agents n'ont donc que la flexion des doigts en commun (tab. 1.3 colonnes 1 et 2).

Les verbes (mouvements) sont aussi différents : il s'agit d'une flexion de la main pour l'un et d'une flexion de l'avant-bras pour l'autre (tab. 1.3 colonnes 3 et 4).

Tableau 1.3 – Mise en exergue des points communs et des différences entre les noms de [YES] et de [STUPID] (le symbole Ø signifie que les segments concernés ne sont pas en mouvement)

	Agent de [YES]	Agent de [STUPID]	Verbe de [YES]	Verbe de [STUPID]
Main	Flexion des doigts		Flexion	Ø
Avant-bras	Légère flexion et pronation	Forte flexion et supination	Ø	Flexion
Bras	Abduction et rot. ext.	Adduction et rot. int.	Ø	Ø

Cette description physiologique fine présente plusieurs avantages.

- Le corps est décrit à partir d'un vocabulaire qui lui est propre, celui issu de la biomécanique. Ce lexique, composé de termes déclinant toutes les possibilités morphologiques du corps existe déjà et est largement pratiqué.
- La description des agents englobe celle des trois paramètres statiques. Les informations relatives à la configuration des doigts se trouvent à la première ligne du tab. 1.3, celles de l'orientation sont relatives à la description de la pronation-supination de l'avant-bras

(deuxième ligne) et celles de l'emplacement se retrouvent au sein des informations de la deuxième et de la troisième ligne.

- Les mouvements sont décrits avec le même vocabulaire que celui utilisé pour les agents. Le socle de la description n'est plus la présence ou l'absence de trajectoire, mais bien la réalité physique entière du phénomène dynamique.

Pour Stokoe, considérer ce que le corps fait et qui le fait est un procédé aussi simple¹¹ qu'efficace.

“The literature of sign linguistics is full of complaints that the movements of signing are more difficult to describe than its handshapes. Not so.” (Stokoe 1991 : 110)

« La littérature de la linguistique des signes est pleine de plaintes selon lesquelles les mouvements du langage gestuel sont plus difficiles à décrire que ses formes de mains. Ce n'est pas le cas. » (Traduction personnelle, Stokoe 1991 : 110)

Pour l'auteur, les voies ouvertes par la phonologie sémantique sont d'un abord plus accessible que les approches traditionnelles. Elles permettront de surmonter l'écueil maintes fois signalé dans la littérature scientifique, celui de la difficulté de décrire le mouvement.

Mais malgré l'apport de ce type d'analyse dans les études des LS, cette perspective de renouvellement des descriptions est longtemps restée marginale (Calbris 1990).

Ce n'est qu'à partir des années 2000 que sera véritablement développé ce que Stokoe pointe du doigt dans cet article de 1991¹². Boutet (2001, 2005, 2008, 2018), va se pencher sur l'importance de redonner au corps en mouvement sa place de créateur du sens. Pour ce faire, Boutet va créer des passerelles entre la linguistique et la kinésiologie, champ disciplinaire qui cherche à décrire et à comprendre les principes et les mécanismes du mouvement à un niveau anatomique, biomécanique et physiologique.

1.2. L'approche kinésiologique

Pour Boutet (2015), le sens naît des possibilités d'articulation du corps. Il est donc nécessaire de recentrer le corps et la dynamique motrice au cœur de la description des LS et l'auteur propose à travers son approche kinésiologique une description articulo-squelettique des membres supérieurs. Cela nécessite des changements paradigmatiques majeurs. Le premier changement touche à l'utilisation d'un vocabulaire issu de la biomécanique, comme a

¹¹ En huit pages, Stokoe utilise dix-huit fois l'adjectif « simple » ou l'adverbe « simplement ». Ce nombre important d'occurrences laisse transparaître la portée de son message : la phonologie de LS n'est pas aussi compliquée qu'on a pu se le laisser croire jusqu'à présent.

¹² Aucune référence de l'article de Stokoe (1991) n'est faite dans les travaux de Boutet.

commencé à l'expérimenter Stokoe (1991). Une connaissance poussée du fonctionnement articulaire du membre supérieur démontre qu'il faut dès lors abandonner la géométrie habituellement utilisée pour concevoir l'espace environnant au profit d'une géométrie adaptée aux mouvements du corps humain. L'ensemble de ces changements pousse à une restructuration des paramètres tels qu'ils sont établis traditionnellement.

1.2.1. Description des articulations du membre supérieur

Le membre supérieur est la partie du corps humain allant de l'articulation de l'épaule (i.e., articulation scapulo-humérale) à la phalange la plus distale des doigts. Une terminologie précise se basant sur une position anatomique de référence du corps humain a permis de décrire de manière précise et invariable les possibilités de mouvements de l'épaule et du bras, de l'avant-bras ainsi que de la main et des doigts.

1.2.1.1. Structure de l'analyse descriptive

Le corps humain est composé de membres, eux-mêmes composés de segments. Le membre supérieur est composé de trois segments : bras, avant-bras et main (doigts compris). Ces segments sont attachés au tronc par la ceinture scapulaire, composée de la scapula et de la clavicule. Les segments éloignés de ce dernier sont caractérisés comme étant « distaux », ceux rapprochés de ce point d'attache sont considérés comme « proximaux » (fig. 1.23).

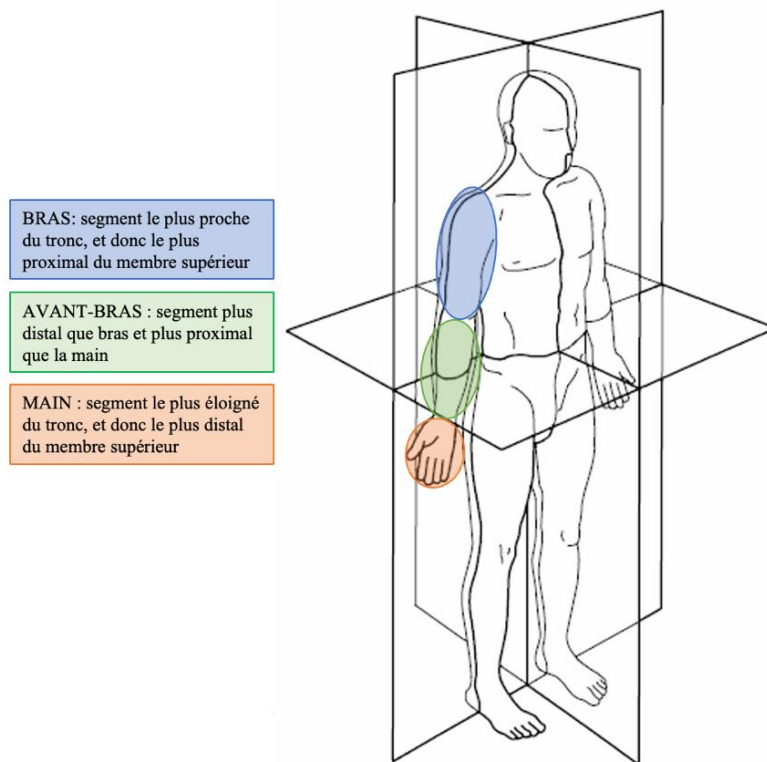


Figure 1.23 – Proximité de chaque segment du membre supérieur avec le tronc

Par exemple, l’articulation du coude est dite « proximale » par rapport à l’articulation du « poignet » puisqu’elle est plus proche de l’articulation de l’épaule que ne l’est le poignet (qui est l’articulation la plus distale du membre en dehors des articulations métacarpo-phalangiennes au niveau des doigts).

Il existe une position particulière du corps humain qui a été considérée comme étant la posture anatomique de référence : le sujet est debout, les pieds vers l’avant légèrement écartés, les bras légèrement écartés du corps, avec les paumes vers l’avant (comme dans la fig. 1.23). À partir de cette posture, trois plans convergeant vers un point imaginaire où est rassemblée toute la masse d’un corps – le centre de gravité – ont été établis : le plan frontal, le plan sagittal et le plan transversal (fig. 1.24). Ces plans permettent de diviser l’espace occupé par le corps : avant/arrière, gauche/droite, haut/bas.

Il faut aussi désigner les mouvements qui se déroulent dans les six sections déterminées par ces trois plans. Pour cela, des axes forment des lignes autour desquelles un segment va effectuer une rotation. Ces axes partent du centre de gravité formé par le croisement des plans et sont également au nombre de trois : l’axe antéro-postérieur, l’axe longitudinal et l’axe sagittal (fig. 1.24) (Watkins 2017). Il est possible d’exemplifier les rotations réalisées autour de ces axes avec, par exemple, le geste co-verbal « oui ». Lors de sa réalisation, la tête tourne autour

de l'axe sagittal ; pour réaliser un « non », la tête tourne autour de l'axe longitudinal ; pour le « tilt » signifiant « je ne sais pas », la tête tourne autour de l'axe antéro-postérieur.

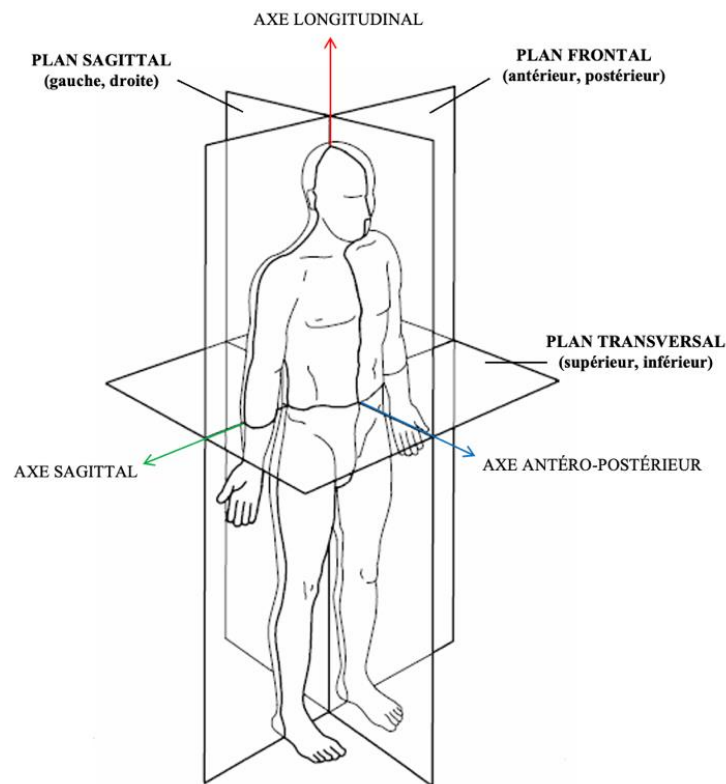


Figure 1.24 – Systèmes de référence anatomique à trois plans et trois axes

Cet ensemble de trois plans et de trois axes représente la structure grâce à laquelle chaque mouvement réalisable peut être uniformément repéré. Il faut ensuite les nommer.

Ces possibilités de mouvement sont englobées sous la notion de degré de liberté (DDL). Un DDL – un mouvement de rotation autour d'un des axes de l'espace – est composé d'une amplitude angulaire qui lui est propre et de deux pôles. Ces pôles, qui sont les extrémités de mouvement atteignables par le segment, donnent d'ailleurs le nom au DDL concerné. Il existe trois types de DDLs.

Le DDL « flexion-extension » suit le plan sagittal et tourne autour de l'axe du même nom. Un mouvement de flexion a pour effet de diminuer l'angle entre les segments d'un même membre. Lorsque l'avant-bras est en flexion il se rapproche du bras et l'angle correspondant à l'écart entre le vecteur de l'orientation de chaque segment (ici bras et avant-bras) au niveau du coude diminue donc. À l'inverse, l'extension augmente l'angle au niveau de l'articulation en mouvement en alignant les segments d'un membre : lorsque l'avant-bras est en totale extension, il se trouve dans le même alignement que le bras.

Le DDL de l'« abduction-adduction » suit le plan frontal et effectue des rotations autour de l'axe sagittal. Les mouvements d'abduction s'éloignent du buste, alors que les mouvements d'adduction s'en rapprochent.

Enfin, le DDL de la rotation intérieure-extérieure est défini par rapport au plan transversal. Si le segment converge au centre du plan, alors il s'agit d'une rotation intérieure, s'il s'approche des extrémités alors c'est une rotation extérieure qui est effectuée. Ce DDL correspond à une rotation autour de l'axe longitudinal.

Voyons maintenant à quels segments appartiennent ces DDLs et quelles sont leurs caractéristiques.

1.2.1.2. Articulation du bras

Voyons les rotations pouvant être effectuées par le bras (fig. 1.25).

L'articulation gléno-humérale est de type sphéroïde. Cela signifie qu'une tête convexe – la tête de l'humérus – vient s'emboîter dans une cavité concave, ici la glène de la scapula.

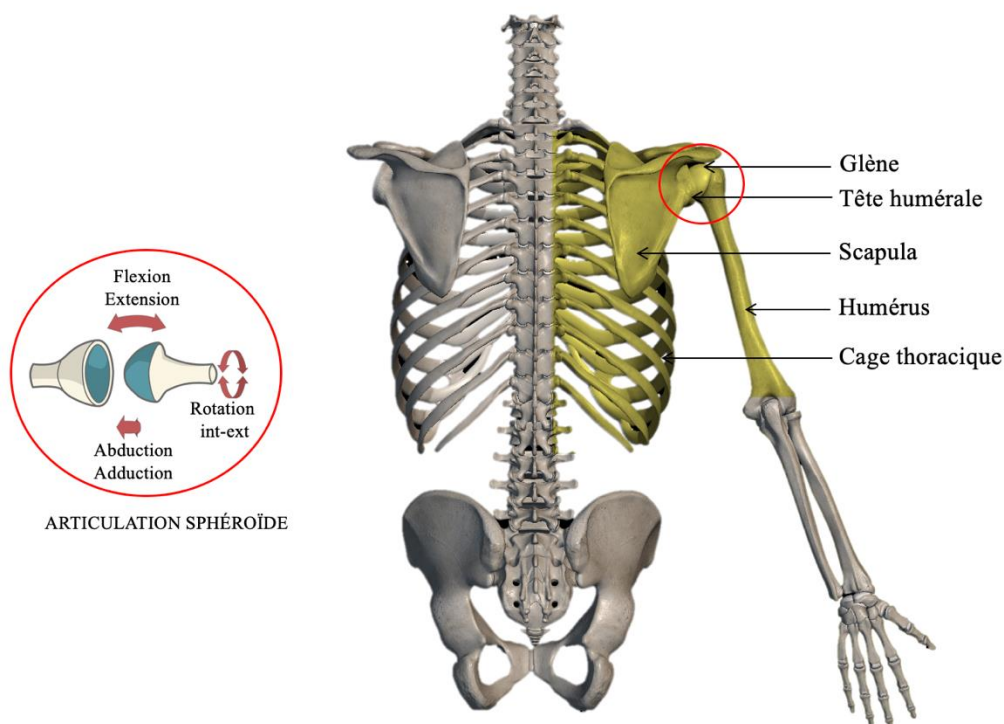


Figure 1.25 – Vue postérieure du squelette du tronc et du membre supérieur droit en position anatomique de référence. En jaune, les os qui participent à l'articulation scapulo-thoracique et à l'articulation gléno-humérale

Ce type d'articulation permet une grande mobilité puisqu'elle autorise trois DDL auxquels s'ajoute un mouvement de circumduction, c'est-à-dire la mise en mouvement simultanée des trois DDL (Kapandji 2005 : 144).

Le DDL de la flexion-extension est exécuté dans un plan sagittal, autour de l'axe sagittal. La flexion permet de basculer le bras jusqu'à 180° vers la face antérieure (avant) du corps ; l'extension est de plus faible amplitude puisqu'elle atteint 50° maximum (fig. 1.26).

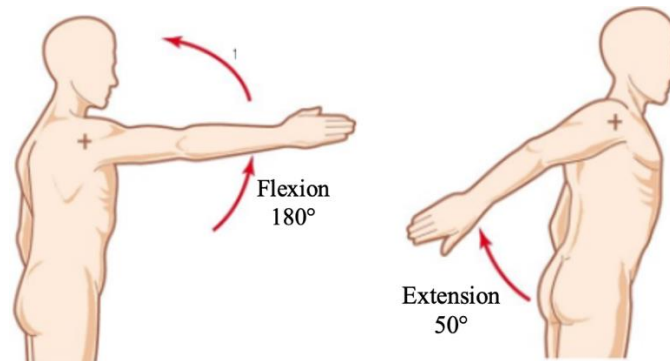


Figure 1.26 – DDL « flexion-extension » du bras et ses amplitudes (Kapandji 2004 : 7)

L'abduction-adduction est un mouvement permettant d'éloigner ou d'approcher le membre du corps dans un plan frontal et autour de l'axe antéropostérieur. L'abduction est considérable, avec une amplitude angulaire de 180°, tout comme la flexion. D'ailleurs, dans les deux cas (flexion et abduction), le membre supérieur se retrouve au-dessus de la tête. En position de référence (bras le long du corps), l'adduction est, de fait, bloquée par le buste. Il est nécessaire pour dégager le DDL d'effectuer une extension ou une flexion du bras. L'adduction reste tout de même de faible amplitude, atteignant 30° (fig. 1.27).

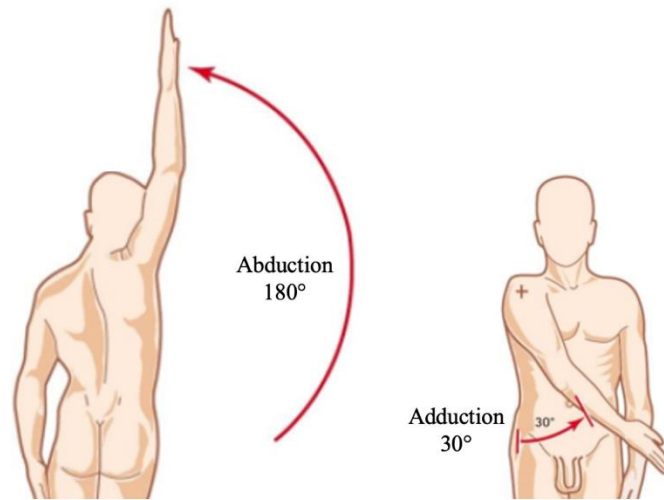


Figure 1.27 – DDL « abduction-adduction » du bras et ses amplitudes (Kapandji 2004 : 7-8)

Enfin, la rotation intérieure-extérieure relève d'un cas particulier puisque la conséquence de rapprochement ou d'éloignement touche l'avant-bras et non le bras (fig. 1.28).

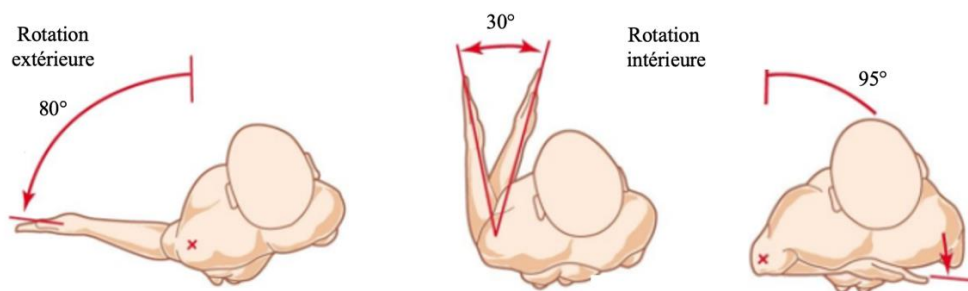


Figure 1.28 – DDL « rotation intérieure-extérieure » et ses amplitudes (Kapandji 2004 : 11)

Cela est dû au fait que la tête de l'humérus ne tourne pas par rapport à la glène comme pour les autres DDL ; son axe de rotation passe par l'os et l'humérus pivote sur lui-même. L'extrémité distale de l'os est attachée à l'ulna et au radius de l'avant-bras ; ce sont eux qui se déplacent dans l'espace. Le fait que ce mouvement soit visible sur l'avant-bras aura des conséquences sur notre choix d'appropriation des DDL.

Le complexe articulaire de l'épaule permet donc deux mouvements de translation (scapula sur la cage thoracique) et trois mouvements de rotation (humérus et glène).

1.2.1.3. Articulation de l'avant-bras

Le coude est un complexe articulaire qui réunit l'humérus et les deux os de l'avant-bras, le radius (os antéro-latéral) et l'ulna (appelé autrefois cubitus, os postéro-médial de l'avant-bras) (fig. 1.29). Cette articulation, dite trochléenne, est composée de deux articulations :

l'articulation huméro-ulnaire (la trochlée humérale est emboîtée dans la cavité de l'ulna) et l'articulation huméro-radiale (le capitulum de l'humérus est enchâssé dans la tête radiale). Cet ensemble ne permet la création que d'un seul DDL, la flexion-extension.

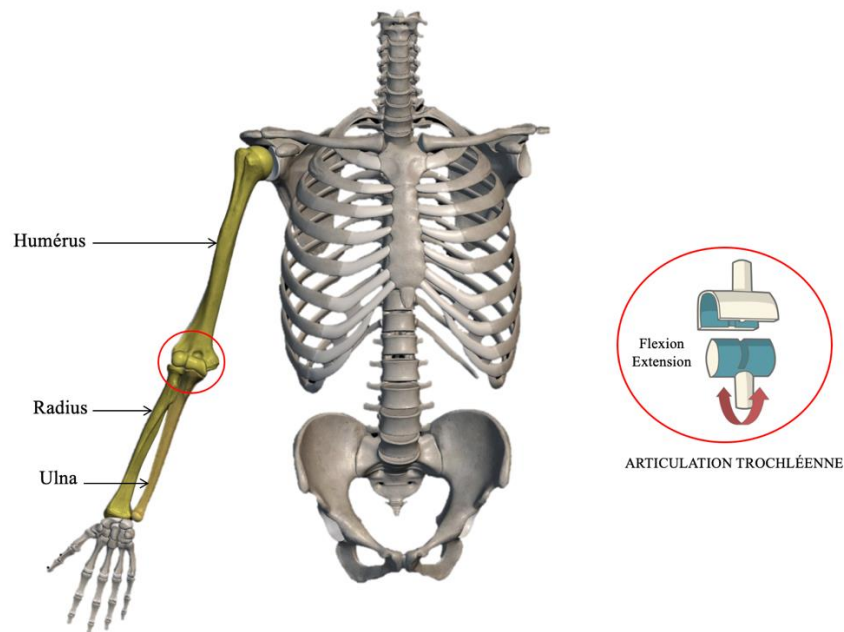


Figure 1.29 – Vue antérieure du complexe articulaire de l'avant-bras dans la position anatomique de référence

Si la flexion de l'avant-bras sur le bras a une amplitude de 145° maximum, il n'existe pas d'amplitude absolue pour l'extension, sauf chez certains sujets qui parviennent à produire une hyper-extension pouvant atteindre 10° (Kapandji 1997 : 102) (fig. 1.30).

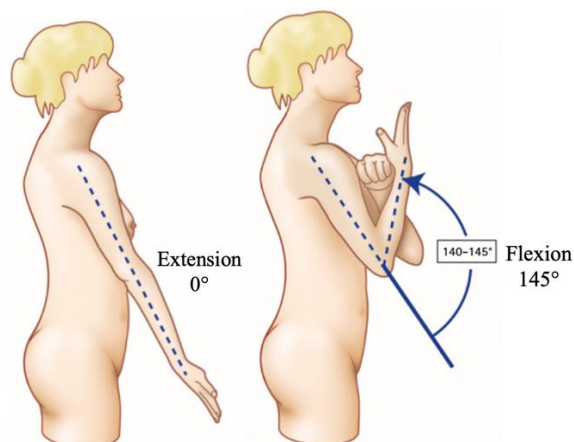


Figure 1.30 – DDL « flexion-extension » et son amplitude (Kapandji 2004 : 99)

Le coude n'est pas la seule articulation permettant à l'avant-bras de se mouvoir. Le binôme radio-ulnaire permet la formation d'un autre DDL, celui de la prono-supination (fig. 1.31). À partir de la position neutre (pouce orienté vers le haut), la supination atteint 90° et la pronation 85°.

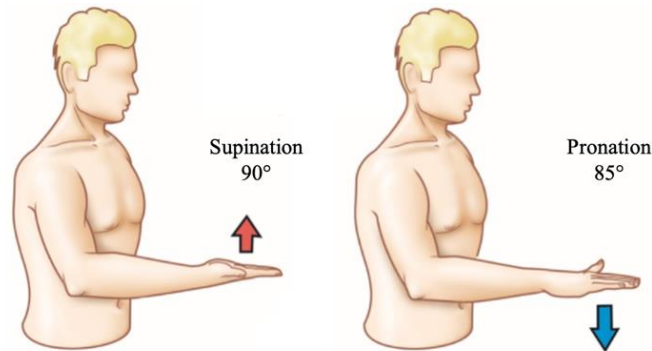


Figure 1.31 – DDL « prono-supination » et son amplitude. La flèche présente sur chaque schéma correspond à l'orientation de la paume de main (Kapandji 2004 : 107)

Tout comme la rotation intérieure-extérieure du bras, dont les axes de rotation passent transversalement à l'articulation, les axes de la prono-supination suivent de manière longitudinale le radius et l'ulna. L'ulna est un os fixe alors que le radius est un os mobile : en pronation, le radius passe par-dessus l'ulna (fig. 1.32).



Figure 1.32 – Basculement du radius sur l'ulna durant un mouvement de pronation (vidéo [1.9](#))

La répercussion de la rotation de ce DDL est perceptible sur la main : la main ne peut se mettre en position de supination ou de pronation sans que l'avant-bras ne se meuve dans un même temps, et *vice versa*. La légère différence d'amplitude est due au croisement du cubitus et du radius qui apparaît lors de la pronation. Le radius a une forme courbe, ce qui lui permet de « passer par-dessus » le cubitus emportant avec lui des muscles fléchisseurs qui à leur tour forment un « matelassage musculaire » (Kapandji 1997 : 112) maintenant l'os légèrement vers l'arrière.

1.2.1.4. Articulation de la main

La main est un ensemble composé de plusieurs complexes articulaires. L'articulation du poignet sera présentée dans un premier temps, puis ce seront les doigts, le pouce et les articulations qui leur sont propres.

Le poignet permet de joindre le radius à l'os du carpe. Cette articulation, dite condylienne (fig. 1.33) permet le déploiement de deux DDL : la flexion-extension et l'abduction-adduction.

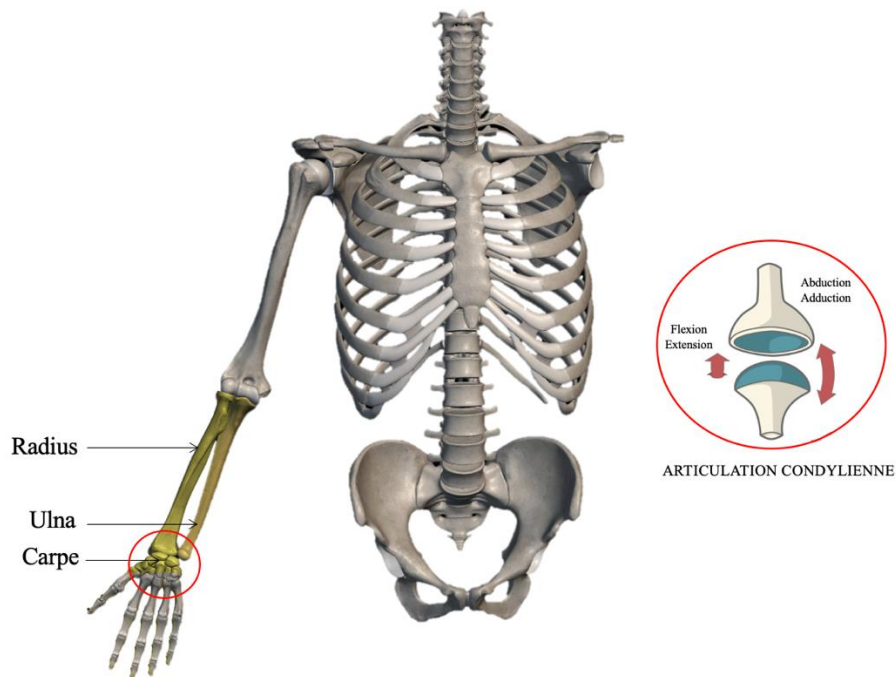


Figure 1.33 – Vue antérieure du complexe articulaire de la main, en position anatomique de référence

La flexion et l'extension présentent des amplitudes qui sont équivalentes, la butée articulaire étant à 85° (fig. 1.34).

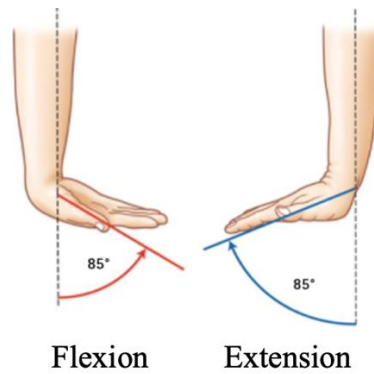


Figure 1.34 – DDL « flexion-extension » de la main et son amplitude (Kapandji 2004 : 151)

L'abduction est le DDL le plus faible en ce qui concerne l'amplitude puisqu'il ne dépasse pas 15° (fig. 1.35). L'amplitude de l'adduction peut être mesurée selon différents axes (suivant la paume, le poignet ou les doigts), Kapandji (1997 : 142) retient 45° comme amplitude de référence.

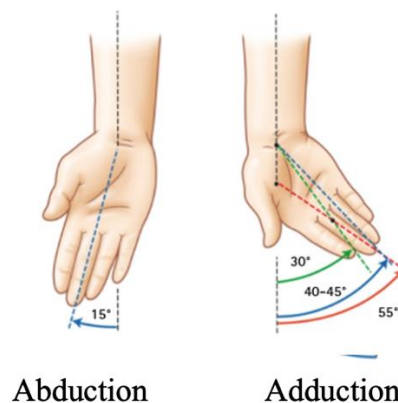


Figure 1.35 – DDL « adduction-abduction » de la main et ses amplitudes, en prenant trois références différentes (la paume en rouge, le poignet en bleu et les doigts en vert) (Kapandji 2004 : 151)

Il faut aussi souligner le fait que le radius réalise la jonction avec la main. La prono-supination permet en effet à la main de s'orienter dans l'espace. Il s'agit alors pratiquement d'un basculement de DDL d'un segment à un autre, puisque l'orientation de la paume vers le haut ou vers le bas est décrite comme relevant d'une rotation de la main et non de l'avant-bras, ce qui se retrouve dans les analyses gestuelles (Calbris 2011).

Voyons maintenant comment les DDL que nous venons de décrire permettent au corps de s'exprimer dans un espace à trois dimensions, en tenant compte des contraintes d'ordre physiologique imposées par la mitoyenneté des segments.

1.2.2. Changement de géométrie

Les DDLs ont une incidence les uns sur les autres : la mise en mouvement d'un DDL peut provoquer une diminution d'amplitude voire une disparition d'un autre DDL ; ou encore, il est possible que l'action consécutive de deux DDLs déclenche - sans que cela ne soit volontaire - la mise en mouvement d'un troisième DDL. Le fonctionnement de ce type d'interdépendance, d'abord incompris, a nécessité de passer d'une géométrie plane à une géométrie sphérique, adaptée aux mouvements corporels.

1.2.2.1. Contraintes d'amplitude

La contiguïté des DDL entraîne l'apparition de mouvements diadochaux, mais cela peut aussi diminuer l'amplitude d'un DDL, voire le supprimer. Kapandji (1997 : 142) relève trois contraintes d'amplitude qui caractérisent les rapports entre les DDL de la main.

La première stipule que plus la main se rapproche de la flexion-extension maximale, plus l'axe de rotation de l'abduction-adduction diminue, au fur et à mesure que les ligaments se tendent.

Boutet (2018 : 106-107) schématise ainsi cette contrainte :

Quand Flex/Exten_{main} ↗ alors Abd/Add_{main} ↘

La deuxième contrainte manuelle touche seulement le pôle adduction. Celui-ci est plus ample en position de supination qu'en position de pronation.

Quand Pro_{main} ↗ alors Add_{main.lim.} 25°-30°

La troisième contrainte touche la flexion-extension manuelle. Tout comme l'adduction, ce DDL est de moindre amplitude lorsque le poignet est en pronation.

Quand Pro_{main} ↗ alors Flex/Exten_{main} ↘

Le DDL de la prono-supination est aussi contraint dans le cas suivant. L'amplitude de la pronation est de 85° lorsque l'avant-bras est perpendiculaire au bras, mais plus l'avant-bras fléchit, plus l'amplitude de la pronation diminue. Cette diminution apparaît à partir d'une flexion de 120° de l'avant-bras, et ce jusqu'à sa butée articulaire, l'amplitude est alors divisée par deux (45°).

Quand Flex_{av-bras} ↗ alors Pro_{main.lim.} 45°

La coïncidence des axes de rotation a aussi une incidence particulière sur les DDL : soit elle augmente l'amplitude d'un DDL, soit elle le supprime.

Dans la position anatomique de référence (bras le long du corps), les DDL de la rotation intérieure-extérieure et de la prono-supination sont alignés. Cet alignement permet à ces deux DDL de s'additionner l'un à l'autre : au mouvement de pronation ou de supination vient

s'ajouter la rotation intérieure ou extérieure. Il est alors possible pour la main de faire un tour sur elle-même (rotation de 360°). Il en va de même lorsque le membre supérieur est en position d'abduction à 90°. Ceci montre qu'un maximum dans une position particulière n'est pas le même dans une autre position.

Enfin, en cas de flexion ou d'extension manuelle totale, survient un alignement des axes de rotation de l'abduction-adduction et de prono-supination. Ce mécanisme de perte d'un DDL est connu sous l'appellation « blocage de cardan » (« *gimbal lock* ») (Amadi & Bull 2010).

En somme, plus nombreux sont les DDLs qu'il nous est possible d'actionner, plus les possibilités de mouvements sont importantes. Chaque segment n'est pas libre de ses mouvements, qui peuvent être contraints ou facilités par ses voisins qui lui sont plus distaux ou proximaux, ou même par ses propres DDLs.

1.2.2.2. Mouvement conjoint involontaire

Lorsque deux DDLs d'une même articulation sont activés sur deux plans différents et de manière successive, un troisième DDL est automatiquement activé. Voyons plus en détail ce phénomène (fig. 1.36) :

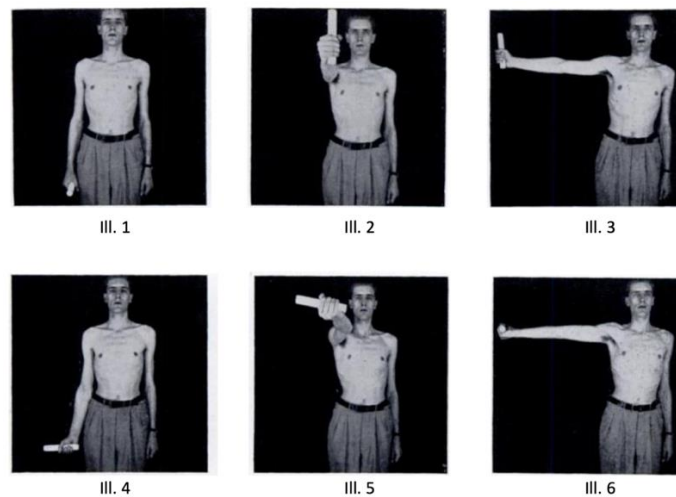


Figure 1.36 – La main commence avec la paume vers l'intérieur et termine avec la paume vers l'extérieur, et ce, sans avoir effectué une supination durant le mouvement (Mac Conaill 1948 : 323)

En ill.1, le membre supérieur est allongé le long du corps, la paume de la main orientée vers celui-ci. Le premier mouvement (ill.2) relève d'une flexion de 90° du bras. C'est ensuite une abduction de 90° qui est réalisée (ill.3), puis une adduction permet au membre supérieur de retrouver sa place initiale (ill.4). Or, cette dernière illustration montre que la main est désormais

ournée vers l'avant. Le membre a effectué une rotation extérieure, sans que le sujet l'ait volontairement ou consciemment réalisée.

MacConaill appelle ces deux mouvements successifs des mouvements diadochaux. Ce terme provient du grec *diadochos* signifiant *succéder* à et insiste sur la notion de séquentialité qui est nécessaire à ce mécanisme automatique. Le changement de direction de la main est appelé « rotation involontaire conjointe ». L'auteur ajoute qu'il n'est pas possible de réaliser ces mouvements diadochaux plusieurs fois, sans que le membre ne soit bloqué (à chaque répétition de mouvements diadochaux, une nouvelle rotation conjointe apparaît ; or l'épaule ne peut pas réaliser une rotation de 360°) (ill. 5 et 6 de la fig. 1.36). Pour pouvoir effectuer des mouvements circulaires répétitifs – comme lors de la nage en crawl – il faut compenser la rotation conjointe par une rotation adjointe. Il est alors possible de réaliser des cycles ergonomiques, c'est-à-dire des mouvements sensiblement identiques et répétés au cours du temps.

Longtemps incompris, ce mécanisme¹³ est considéré comme un paradoxe par Codman (1934). MacConaill (1948) parvient à éclairer ses contemporains en explicitant et schématisant le fonctionnement des mouvements du bras. Pour ce faire, l'auteur représente l'ensemble de la surface que la partie distale de l'humérus (proche du coude) comme recouvrant une portion de *sphère*. Dans la fig. 1.37, le point O représente donc l'articulation scapulo-humérale et le triangle rectangle ABC représente la surface que le coude peut atteindre.

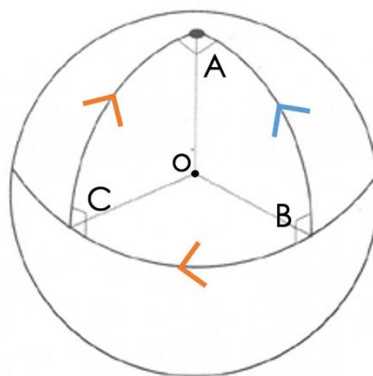


Figure 1.37 – Triangle rectangle créé dans un espace à géométrie non plane permettant l'explication schématisée des mouvements involontaires

Le segment [OB] représente le bras en position de repos et le segment [OA] représente la position finale. Il existe deux chemins menant à cette position finale : le chemin partant de la

¹³ Ce type de mouvement involontaire peut aussi advenir sur l'avant-bras : l'avant-bras est placé en flexion de 90° (angle droit par rapport au bras) avec la main en position intermédiaire le pouce vers le haut. Lors d'une rotation intérieure puis une flexion de l'avant-bras, la main se retrouve alors en supination, le pouce pointant vers la droite.

flèche orange et celui partant de la flèche bleue. Si le bras suit la flèche bleue, alors il effectue un unique mouvement de translation le long de [BA] pour parvenir à la position finale. S'il suit les flèches orange, alors le segment effectue un mouvement de translation le long de [BC] puis une fois parvenu à un angle C, il en réalise un second le long de [CA].

Ce triangle équilatéral à trois angles droits représente parfaitement le mécanisme de la rotation involontaire. Or, il n'est pas possible de schématiser l'amplitude du mouvement de l'épaule par un triangle tracé sur une surface *plane* dans la mesure où il est impossible de former un triangle avec trois angles rectangles (fig. 1.38).

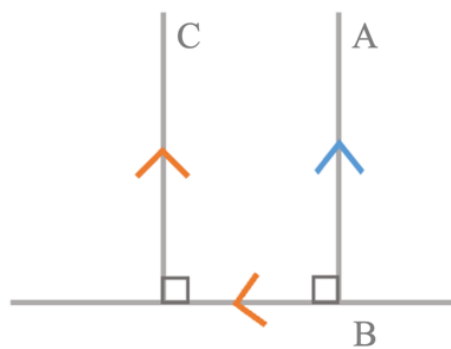


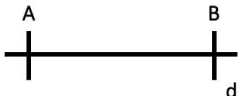
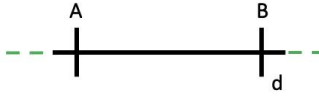
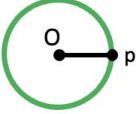
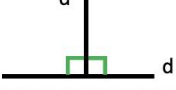
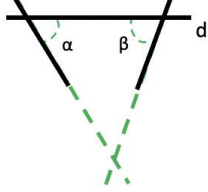
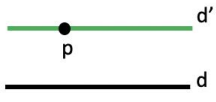
Figure 1.38 – Tentative de création d'un triangle rectangle créé dans un espace à géométrie plane

Pour créer de telles formes géométriques (fig. 1.37) capables de reproduire les mécanismes des articulations, il faut alors passer de la géométrie euclidienne, à la géométrie non euclidienne sphérique.

1.2.2.3. Géométrie non euclidienne sphérique

Les bases de la géométrie classique ont été mises en place vers -330 av. J.-C., par le mathématicien Euclide. Son livre « Les éléments d'Euclide » permet de donner un cadre commun qui unifie le savoir mathématique de son temps. Pour cela, il pose un ensemble de définitions (le point est « ce dont la partie est nulle », indécomposable, ou encore la droite est « une longueur sans largeur »), de notions communes (« des choses égales à une même chose sont égales entre elles », « le tout est plus grand que la partie », etc.) et de postulats, présentés en tab. 1.4. L'ensemble de ces définitions, notions communes et postulats prennent le nom d'axiome.

Tableau 1.4 – Cinq postulats d’Euclide et schémas correspondants

<p>I. Entre deux points, il est toujours possible de tracer une droite</p>	
<p>II. Une droite tracée entre deux points peut être prolongée indéfiniment</p>	
<p>III. Partant d’un point et d’une longueur, il est toujours possible de tracer un cercle</p>	
<p>IV. Tous les angles droits sont égaux entre eux</p>	
<p>V. Si une droite, tombant sur deux droites, fait les angles intérieurs du même côté plus petits que de droits, ces droites, prolongées à l’infini, se rencontrent du côté où les angles sont plus petits que droits</p>	
<p>V'. Par un point donné, il n’est possible de mener qu’une et une seule droite parallèle à une droite donnée</p>	

Si l’ensemble de ces affirmations est aussi simple qu’intuitif, elles n’en restent pas moins non démontrables. De fait, les résultats qui en découlent – les théorèmes – sont tout aussi indémontrables : c’est la nature évidente des notions communes et des postulats qui fait office de justification.

Dans la géométrie euclidienne, les propriétés des formes bidimensionnelles sont étudiées par rapport à des surfaces *planes*. Cette géométrie régit aujourd’hui encore notre manière de concevoir l’espace, de le mesurer et de le quantifier ; elle est adoptée par la plupart des modèles descriptifs des LS et de la gestualité humaine. La forme la plus simple que peut réaliser un signeur est de tracer une ligne droite avec sa main.

Or, se pose la question de la pertinence de surfaces non planes. Cette réflexion naît de l’observation que le monde n’est pas une surface plane, mais une surface sphérique en trois dimensions. Dans cet espace, les droites¹⁴ forment des demi-cercles ou des cercles autour d’une sphère. Cela engendre un changement important : toutes les droites se coupent en deux points

¹⁴ Les droites relèvent ici des plus courts chemins qui joignent deux points de l’espace considéré.

(fig. 1.39), il est donc impossible dans ce type de géométrie de construire des parallèles¹⁵. Le cinquième postulat d'Euclide se trouve réfuté par la géométrie sphérique pensée par Riemann (1867)¹⁶.

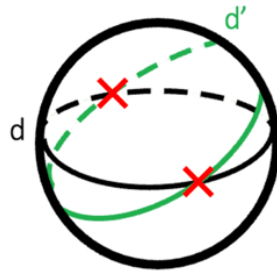


Figure 1.39 – Deux droites se coupant en deux points selon une géométrie sphérique

L'existence de géométries non euclidiennes ne réfute pas l'ensemble de la géométrie d'Euclide, mais précise qu'il en existe d'autres, tout aussi viables et pouvant servir à décrire d'autres types de réalité que celle liée à la bidimensionnalité d'une surface plane. C'est en effet le cas avec la géométrie sphérique qui s'adapte au fonctionnement de nos articulations, qui opèrent des rotations autour des axes. En reprenant la comparaison avec la planète Terre, nous pouvons faire un parallèle intéressant : le chemin le plus court pour aller en avion de Paris à Montréal ne relève pas d'une droite telle que pensée en géométrie euclidienne, mais d'une courbe. Il en va de même pour les mouvements du corps humain : pour tracer une courbe dans l'espace, il suffit de solliciter un seul DDL, en l'occurrence la rotation extérieure (fig. 1.40).

¹⁵ Les parallèles à l'équateur ne sont pas des droites dans ce contexte-là : seules les droites qui tournent autour du centre (les véritables circonférences) sont à considérer. Or, si toute circonférence coupe toute autre circonférence en deux points, alors il n'existe pas de parallèles.

¹⁶ Il existe d'autres géométries non euclidiennes, comme la géométrie hyperbolique pensée par Lobatchevski (1837) dans laquelle il existe une infinité de droites parallèles.



Figure 1.40 – Réalisation du signe [MUSCLÉ] (signeur 3 signe 003, vidéo [1.10](#))

En revanche, pour réaliser une droite non courbe, cela est plus complexe et présupposera la mise en action de plusieurs DDL répartis sur au moins deux segments. Pour l'exécution de la ligne droite réalisée en fig. 1.41, trois DDL sont activés : celui de la rotation extérieure, de l'extension de l'avant-bras et de la flexion du bras.

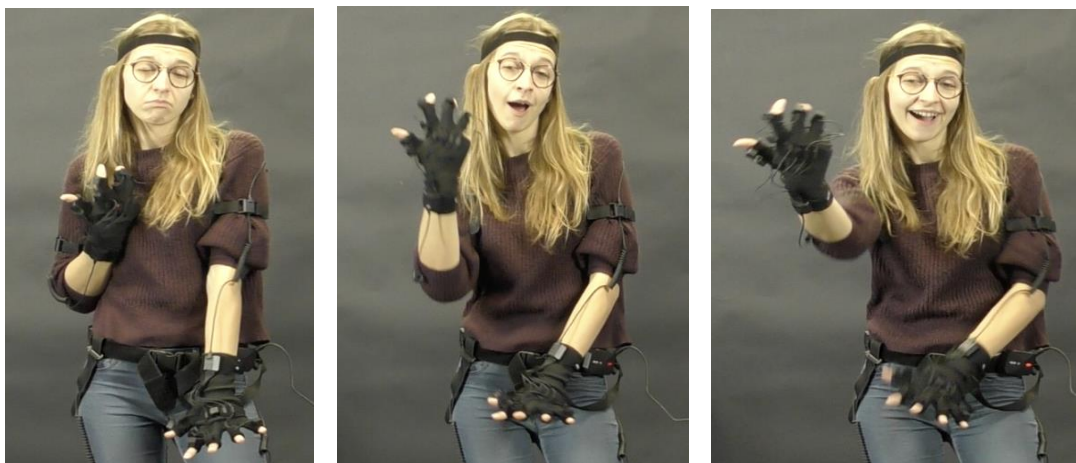


Figure 1.41 – Réalisation du signe [RICHE] (signeur 5 signe 052, vidéo [1.11](#))

Le membre supérieur constitue donc un ensemble articulé aux parties distinctes, observables en géométrie sphérique, indissociables et qui ont toutes un rôle précis à jouer dans le déroulé du geste ou du signe (Danet *et al.* 2020).

1.2.3. Restructuration des paramètres « manuels »

Selon une description traditionnelle d'un signe, l'emplacement des mains sur la fig. 1.42 serait la suivante : les mains sont placées au niveau de la tête du signeur, la paume vers l'arrière.



Figure 1.42 – Réalisation du signe [FERMETURE DES PORTES] (signeur 9 signe 046, vidéo [1.12](#))

Le paramètre de l'emplacement, comme tous les autres paramètres manuels, ne permet de décrire que la position des mains et seulement de celles-ci. Pourtant, les bras et les avant-bras ont aussi une position marquée : le premier est en légère flexion, le second est en flexion et en rotation extérieure, apportant en partie les valeurs sémiotiques des mains.

Si seuls les DDLs de cette dernière sont donnés, son emplacement et son orientation ne peuvent pas être définis sans ambiguïtés. Les exemples (a) et (b) de la fig. 1.43 présentent tous deux des mains droites en pronation, mais dont les emplacements et les orientations sont tout à fait différents.

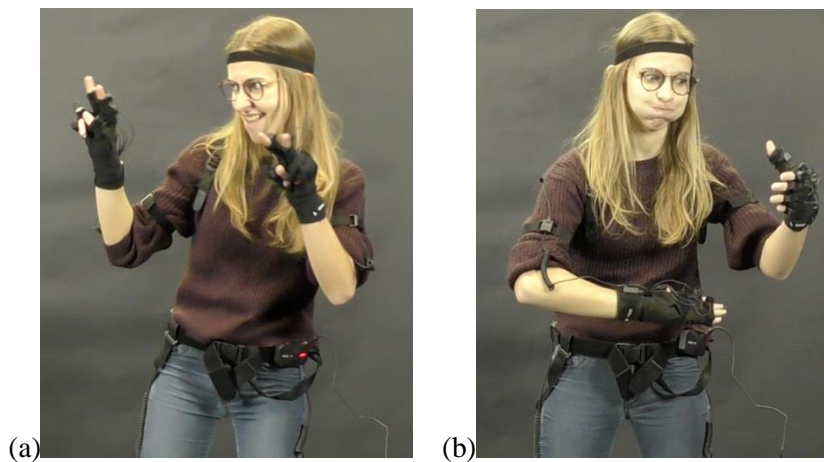


Figure 1.43 – La main droite du signeur est en pronation complète pour la réalisation de (a) [SE REGARDER] et de (b) [NIVEAU QUI MONTE] (signeur 5 signes 020 et 089)

Alors, si la configuration reste inchangée, l'emplacement et l'orientation sont remplacés par la notion de « localisation initiale », désormais appelée LOCini. La LOCini décrit la position prise par l'ensemble des segments du membre supérieur avant le déploiement du signe (Boutet *et al.* 2018) : elle concentre les informations relatives à l'orientation et à l'emplacement ; elle les

étend non seulement à la main, mais aussi à l'avant-bras et au bras. Prendre en compte le membre supérieur rappelle le fait que la main ne se déplace pas seule et par elle-même dans l'espace. La main, qui se trouve à l'extrémité du membre supérieur porte l'aspect visuel du déplacement, mais c'est bien l'ensemble du membre supérieur qui crée cet espace de déploiement. Pour le mouvement, désormais appelé MOUV¹⁷, ce n'est pas le nom, mais le concept même qui est redéfini. En plus du fait que le MOUV est aussi étendu à l'ensemble des segments du membre supérieur, il est décrit à travers sa réalité structurelle et proprioceptive. Ce n'est qu'à partir de ces changements paradigmatiques que Boutet met en exergue une nouvelle caractéristique du mouvement : le flux.

1.3. Il court, il court, le mouvement

L'étude des règles biomécaniques régulant les mouvements du membre supérieur a amené Boutet à s'intéresser aux possibilités de circulation du mouvement à travers les différents segments : une transformation d'un DDL peut provoquer la variation de plusieurs autres DDLs sur les segments adjacents. Ce mouvement interne est alors composé d'un « centre organisateur » qui dirige le mouvement, et de répercussions prenant la forme de *déplacements* et de *mouvements transférés*. Ces mouvements internes, appelés *flux*, ne sont pas générés aléatoirement, mais sont régis par des règles permettant de les catégoriser, voire de les prédire (Boutet 2018 : 9).

1.3.1. Distinguer les différents types de mouvement

L'analyse de plusieurs segments durant le déroulé d'un signe ou d'un geste rend le terme de « mouvement » trop vague parce que trop englobant. Il est nécessaire de distinguer, et donc de labelliser, les mouvements « actifs » des mouvements « subits ». Leur distinction nécessite l'identification du segment à l'origine du mouvement.

1.3.1.1. Transferts de mouvement

Trois cas de figure permettent à un segment de changer de localisation dans l'espace.

¹⁷ La contraction MOUV est utilisée pour faire référence au mouvement en tant que paramètre descriptif des LS et de la gestuelle tel que Boutet le conçoit. Le terme « mouvement » englobe en revanche le paramètre manuel classique et plus largement toute variation de position des segments du corps.

D'abord, cela peut être dû à une activation d'un de ses DDLs. C'est le cas de la main dans la fig. 1.44, qui active deux de ses DDLs – la flexion-extension et la prono-supination – lui permettant de se délocaliser.

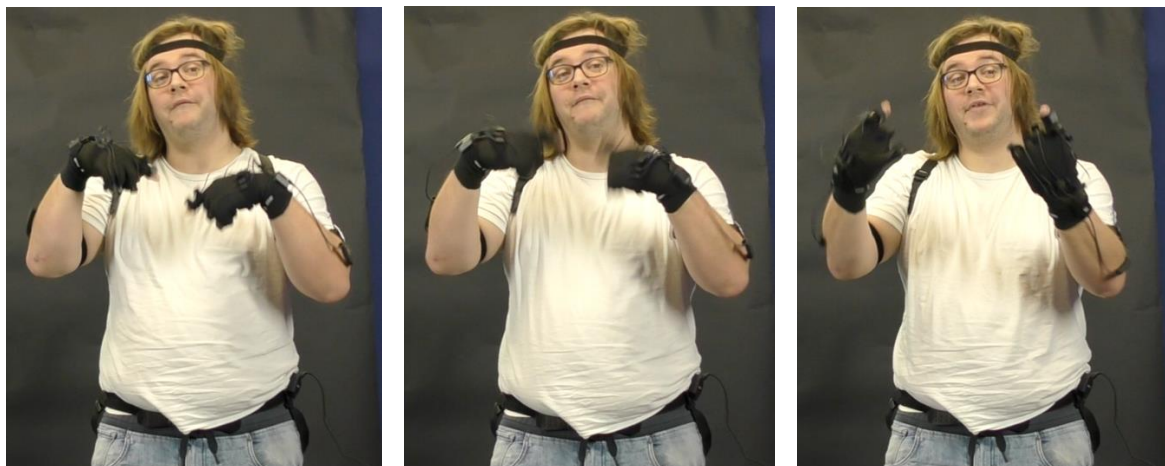


Figure 1.44 – Réalisation du signe [ALLER] (signeur 6 signe 110, vidéo [1.13](#))

Il s'agit ici d'une rotation « autour d'au moins un degré de liberté du segment considéré sans que ce mouvement soit dû à un autre degré de liberté d'un autre segment. » (Boutet 2018 : 43), soit de ce que Boutet appelle un *mouvement propre*.

Les mouvements propres peuvent agir sur le segment même qui l'effectue, comme c'est le cas ci-dessus, mais peut aussi entraîner des variations pour un *autre* segment. Dans la fig. 1.45, la flexion de l'avant-bras entraîne effectivement celle du bras.

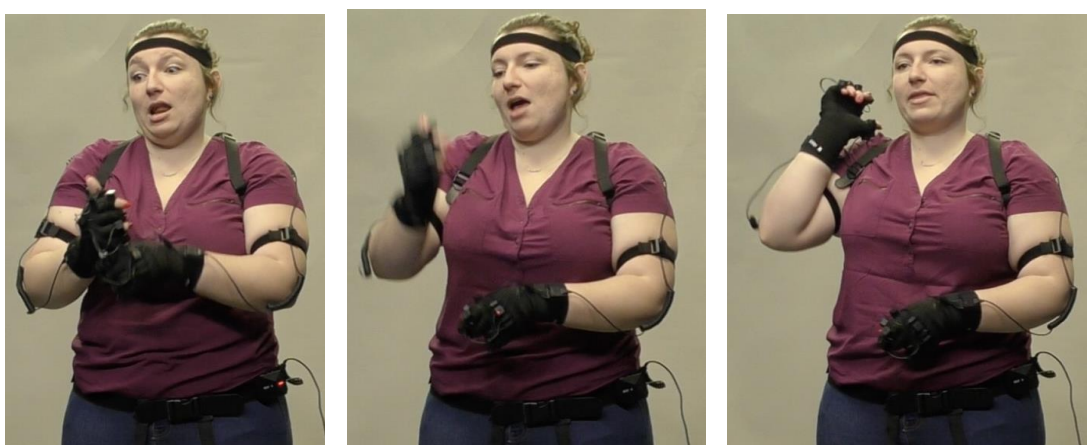


Figure 1.45 – Réalisation du signe [ANNÉE DERNIÈRE] (signeur 1 signe 123, vidéo [1.14](#))

Dans ces cas-ci, il s'agit d'un *transfert de mouvement*, car le changement de DDLs de l'avant-bras s'est partiellement transféré sur le bras. Le transfert de mouvement est défini par Boutet

comme « toutes les rotations autour d’au moins un axe d’un des degrés de liberté du segment considéré dues au mouvement d’au moins un autre degré de liberté. » (Boutet 2018 : 43).

Enfin, un segment peut changer d’emplacement dans l’espace sans actionner un seul de ses DDLs : il s’agit alors d’un *déplacement*. Ce type de mouvement est fréquent puisqu’il advient dès qu’il y a transformation d’au moins un DDL sur un segment proximal. Par exemple, si un DDL de l’avant-bras est activé, la main sera entraînée dans sa course. C’est le cas pour la fig. 1.46). Si le segment ne présente aucune variation de DDL, mais qu’il se délocalise tout de même alors il s’agit bien d’un déplacement. La position plus ou moins proximale ou distale d’un segment joue un rôle dans ce type de mouvement. Même si la main est animée par un mouvement propre, le bras et l’avant-bras peuvent rester immobiles. Cependant, si le bras réalise un quelconque mouvement propre le long de ses DDLs, il entraîne avec lui l’avant-bras et la main, leur faisant subir un déplacement dans l’espace (sauf si leur mouvement est volontairement contraint). Si les trois segments peuvent avoir un mouvement propre, seuls l’avant-bras et la main, qui sont respectivement plus distaux que le bras et l’avant-bras, peuvent se déplacer.

Dans les fig. 1.46 et 1.47, les mains actives relèvent en tout point à la définition biomécanique du déplacement : elles ne présentent aucune variation de DDL bien qu’elles attestent d’une délocalisation entre le début et la fin du signe.

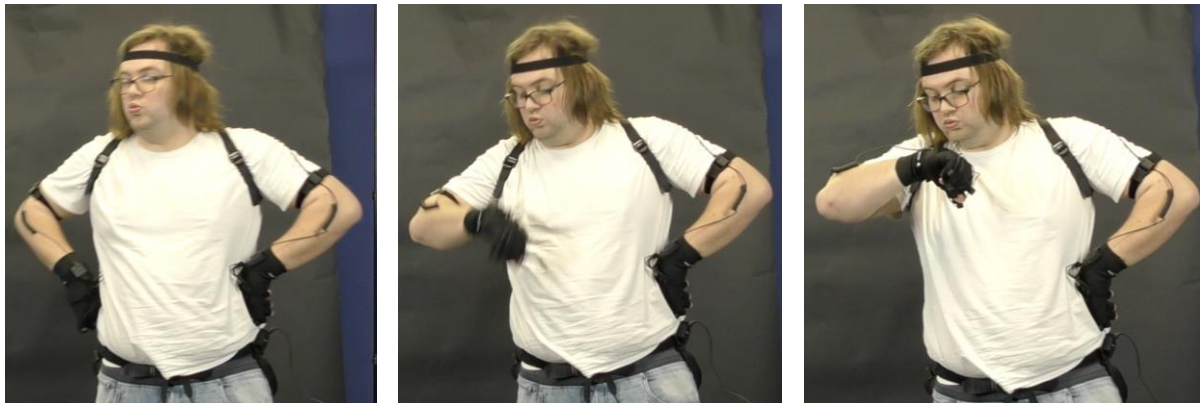


Figure 1.46 – Réalisation du signe [REGARDER L’HEURE] (signeur 6 signe 092, vidéo [1.15](#))

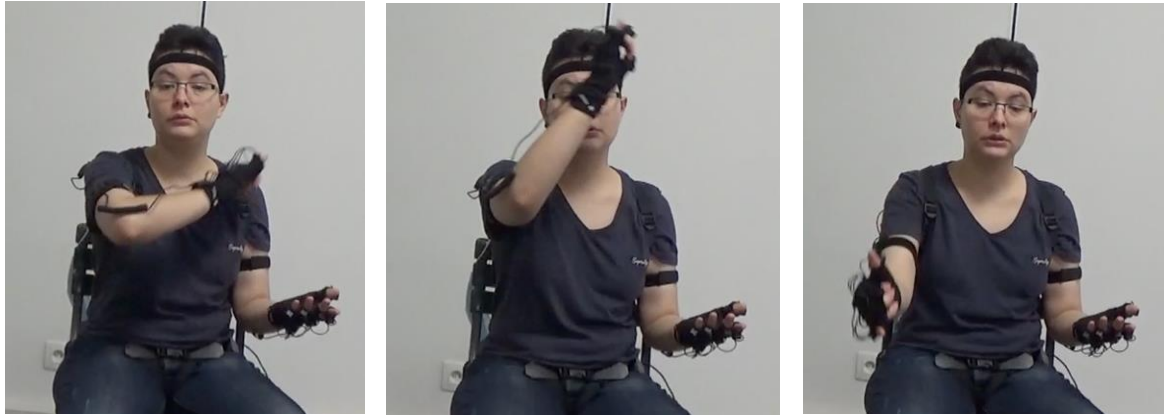


Figure 1.47 – Réalisation du signe [JUSQU’À] (signeur 10 signe 174, vidéo [1.16](#))

Dans les deux cas, les mains (droites) ont translaté dans l’espace sans qu’il n’y ait de DDL en transformation, pourtant, une différence fondamentale sépare ces deux réalisations. Pour la saisir, il faut introduire la notion de *transfert total* de mouvement.

1.3.1.2. Déplacement ou transfert total ?

Pour la réalisation de [REGARDER L’HEURE], la LOCini et la configuration de la main n’influent pas sur le sens du signe. Il serait par exemple possible de « regarder l’heure » avec l’avant-bras et la main en supination (si tant est que le cadran de la montre ait été au préalable placé sur la face antérieure du poignet) ; ou avec une main fléchie jusqu’à la butée articulaire par rapport à l’avant-bras, ou encore sans que la main ne soit apparente. Il serait aussi possible de « regarder l’heure » avec une main dans une configuration différente avec les doigts dépliés ou le poing serré. Dans tous ces cas de figure, la signification du signe perdure.

En revanche, pour le signe [JAMAIS], si ces deux paramètres sont modifiés - LOCini et configuration - la signification du signe est alors toute autre. Nous pouvons inverser les pôles de la position de la main pour le vérifier :

Si la main demeure en pronation (paume vers le bas), alors il s’agit bien du signe [JAMAIS] ; mais si la main est placée en supination (paume vers le haut), la réalisation s’apparenterait plus au signe [PAS LA PEINE]¹⁸.

Un lien de sens perdure donc entre la main qui n’est pas animée d’un mouvement propre – mais dont l’emplacement et la configuration portent une part de la signification – et le mouvement de l’avant-bras qui porte l’autre part de cette même signification.

¹⁸ <http://www.sematos.eu/lsf-p-pas+la+peine-8418.html>

Enfin, si le segment qui n'a pas de mouvement propre ne participe pas à la signification du signe, alors il s'agit bien d'un *déplacement* ; si le segment n'a pas de mouvement, mais qu'il participe tout de même à la signification du signe ou du geste, alors il s'agit d'un *transfert total*. Ce « principe d'identité sémantique » (Boutet 2018 : 45) relève de la première règle permettant de reconnaître le déplacement d'un mouvement totalement transféré.

La seconde règle concerne la direction du mouvement : pour qu'il y ait transfert total de mouvement, il faut que la position de départ soit maintenue tout au long du signe à l'exception du pôle qui *aurait été* en mouvement. Un test permet de saisir concrètement cette règle de direction : dans le cadre de la réalisation du signe [JAMAIS], si l'avant-bras est bloqué (maintenu par l'autre main) et que seule la main peut réaliser ce mouvement, quel serait-il ? Le seul pôle permettant la création du sémantisme attaché au signe [JAMAIS] est l'adduction (mouvement en direction de l'auriculaire). Ce pôle est réalisé sur le plan frontal, en s'éloignant du corps, tout comme l'est la rotation extérieure portée par l'avant-bras. Un mouvement totalement transféré reprend donc la même direction du pôle qui *aurait été* en mouvement si le segment avait réalisé un mouvement propre. Si la première règle (principe d'identité sémantique) permet de montrer que le segment qui ne bouge pas participe tout de même à la signification du signe, cette seconde règle démontre qu'il peut même en être l'impulseur.

Connaitre l'impulseur d'un mouvement est l'un des moyens permettant de déceler le flux de propagation du mouvement, notion centrale dans l'approche kinésiologique.

1.3.2. Flux du mouvement

Pour Boutet, le geste ou le signe ont un encours non seulement en termes de phase, mais aussi en tant que « déroulement d'un événement qui a une signification » (Boutet 2018 : 9).

Pour observer chacun des trois types de flux, il faut savoir de quelle règle est issu le lien de causalité entre les mouvements internes observés. Identifier le mouvement interne qui se propage à travers le membre supérieur permet ainsi de différencier des formes gestuelles visuellement proches, mais ayant des significations différentes (Morgenstern *et al.* 2021).

1.3.2.1. Types de flux

Dans les cas où il y a bien un transfert de mouvement à travers le membre supérieur, il y a un flux. Si le centre initiateur du mouvement se situe dans les segments les plus distaux (tels que la main et les doigts) pour se diffuser vers les segments les plus proximaux (avant-bras et bras),

alors il s'agit d'un flux disto-proximal. Dans la fig. 1.48, la pronation de la main entraîne une extension puis une rotation intérieure-extérieure de l'avant-bras, et enfin une abduction du bras.



Figure 1.48 – Réalisation du signe [FINI] (signeur 3 signe 142, vidéo [1.17](#))

Si, à l'inverse, c'est un segment proximal qui est l'initiateur du mouvement et que le transfert se dirige vers l'extrémité distale du membre, il s'agit d'un flux proximo-distal. Dans la fig. 1.49, le bras réalise une adduction, qui se propage en une rotation de l'avant-bras pour finir avec une pronation de la main.

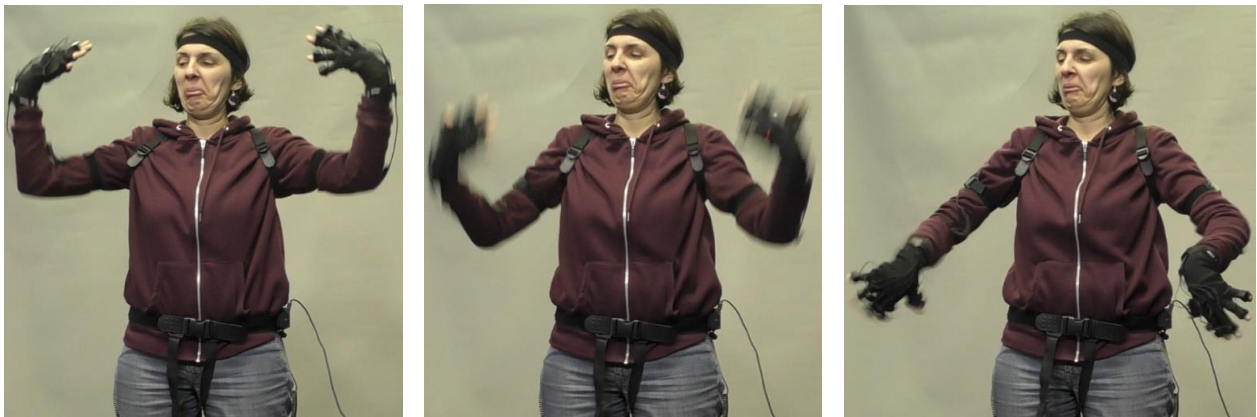


Figure 1.49 – Réalisation du signe [SECOUER LES MAINS] (signeur 3 signe 132, vidéo [1.18](#))

Il peut aussi ne pas y avoir de flux. C'est le cas lorsqu'il y a un seul DDL activé, sans transfert. Dans la fig. 1.50, la prono-supination répétée est le seul DDL activé.



Figure 1.50 – Réalisation du signe [SONNERIE] (signeur 7 session 1 signe 022, vidéo [1.19](#))

Enfin, un cas plus complexe peut se présenter : plusieurs segments sont en mouvement, mais aucun décalage temporel n'est perceptible. Si le mouvement des segments est synchrone, il est alors nécessaire d'ajouter, à l'observation du décalage temporel, une seconde caractéristique menant à la distinction du flux.

Il s'agit de la distinction du segment organisateur du geste ou du signe. Cet indice touche au nombre de DDLs en mouvement : « moins le nombre est important, plus on se rapproche du segment à l'origine du geste » (Boutet 2018 : 49), du « segment substrat » (Boutet 2018 : 86). Si l'origine du geste ou du signe est connue, alors le flux l'est aussi, il s'agit ici d'un flux *structurel* (et non temporel) disto-proximal.

Voyons désormais les règles qui permettent de savoir si deux mouvements sur deux segments ont bien un rapport de causalité, font bien partie d'un même mouvement qui se propage.

1.3.2.2. Règles de transfert de mouvement

La première règle de transfert de mouvement est la *règle de géométrie*. Cette règle ne favorise pas un flux particulier à travers le membre supérieur, comme ce sera le cas pour les règles suivantes, mais présente une première condition : il s'agit du parallélisme entre les axes de rotation. Boutet (2018 : 50) énonce que pour qu'il y ait transfert il faut que « l'axe de rotation du pôle en mouvement soit parallèle et adjacent à celui ou ceux sur le(s)quel(s) le mouvement sera transféré ». Dans le cadre de la posture de la fig. 1.51, ce sont les axes de la flexion-extension (tiges bleues) qui sont parallèles et donc susceptibles de transferts de mouvement.

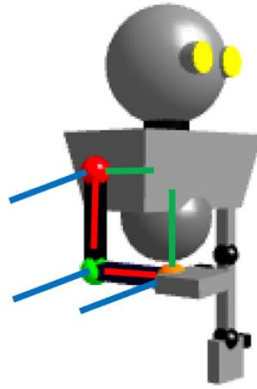


Figure 1.51 – Parallélisme des axes de rotation : les tiges bleues représentent les DDLs de la flexion-extension, les vertes ceux de l’abduction-adduction et les rouges ceux de la rotation intérieure-extérieure et de la prono-supination

La deuxième règle est la *règle diadochale* (Boutet 2018 : 50). Lorsqu’un segment actionne simultanément deux DDLs, on peut alors avoir un mouvement conjoint involontaire d’un troisième DDL sur un autre segment. Le mouvement volontaire (les deux DDLs actionnés sur une même articulation) est appelé « mouvement diadochal » et le mouvement de répercussion sur une rotation longitudinale est nommé « mouvement conjoint involontaire » (§1.2.2.2).

La troisième règle est celle qui met à l’œuvre la masse des segments en mouvement. Cette règle pose la diffusion du mouvement comme naissant principalement des segments les plus épais, vers les segments les plus fins. Van Ingen Schenau (1989) présente une étude portant sur l’ordre d’activation des muscles lors d’une activité sportive. Cette analyse est rendue possible par l’utilisation de caméras haute vitesse, de capteurs de force ainsi que d’électromyogrammes¹⁹. Le premier geste sportif étudié est le saut vertical effectué avec les deux jambes. Pour sauter, le centre de gravité du corps doit prendre une direction verticale. Ce mouvement est considéré comme balistique, car il est « explosif » et nécessite assez de force pour pouvoir translater la masse corporelle. Des simulations ont ensuite été réalisées pour atteindre une hauteur de saut optimale ou un transfert optimal de la puissance musculaire à la puissance de pédalage en cyclisme. Les résultats montrent qu’une séquence musculaire temporelle organisée proximo-distale est nécessaire pour atteindre le pic de performance, qui débute en haut de la cuisse pour remonter jusqu’aux pieds.

“From the above mentioned simulations it was clear that utilization of the work capacity of muscles in ballistic movements requires a sequence in action of the joints. This requirement for increasing extension velocities explains why this sequence is

¹⁹ Outil de mesure positionné à l’intérieur du muscle, ou sur l’épiderme permettant d’enregistrer le faible courant électrique émanant des contractions musculaires et d’évaluer le fonctionnement des nerfs et des muscles.

directed from relatively large proximal segments to the relatively light distal segments (a type of inertial constraint).” (Van Ingen Schenau 1989 : 319)

« Les simulations mentionnées ci-dessus ont montré clairement que l’utilisation de la capacité de travail des muscles dans les mouvements balistiques nécessite une séquence en coordination des articulations. Cette exigence d’augmentation des vitesses d’extension explique pourquoi cette séquence est dirigée des segments proximaux relativement grands vers les segments distaux relativement légers (un type de contrainte inertielle). » (Traduction personnelle, Van Ingen Schenau 1989 : 319)

Cette règle inertielle est due au fait qu’il existe un gradient de masse descendant entre le bras, l’avant-bras et la main. Dumas *et al.* (2007) stipulent que ce gradient est de 2,3 % pour le bras, de 1,5 % pour l’avant-bras et de 0,55 % pour la main. La coordination musculaire proximo-distale répond donc à une pente inertielle qui existe le long des membres supérieurs et inférieurs. Elle est particulièrement présente et fonctionnelle dans le cadre de mouvements balistiques, car elle permet de diffuser la force nécessaire jusqu’aux segments agissant tout en permettant de réduire le nombre de DDLs redondant dans ces extrémités.

Enfin, la *règle de structure* ou *règle de la butée* (Boutet (2018 : 49) indique que plus un DDL se rapproche de sa butée articulaire, donc de son extrême, plus la potentialité d’un transfert de mouvement sur le segment adjacent et proximal est importante. L’effet de cette deuxième règle serait alors contraire à la première puisque l’amplitude des DDLs de l’ensemble main/doigts étant bien plus faible, les butées sont plus rapidement atteintes. Le mouvement se trouve « bloqué » par cette butée, et n’aurait de choix que de changer de segment pour pouvoir continuer sa course. C’est alors un flux disto-proximal qui est favorisé ici.

Les mouvements qui apparaissent au sein d’un geste ou d’un signe et qui ne relèvent pas d’une de ces quatre règles de transfert constituent alors des mouvements indépendants.

Voyons maintenant comment l’observation du flux et du centre organisateur d’un mouvement permettent de distinguer des formes qui sont pourtant visuellement ressemblantes.

1.3.2.3. Catégorisation sémantique

Boutet a exploré des phénomènes gestuels, en particulier les catégories sémantiques liées à la négation épistémique et au geste de présentation (Boutet & Morgenstern 2020). Bien que ces deux gestes aient des fonctions bien distinctes – le premier exprimant une incapacité et le second permettant d’ajouter des informations au discours – leurs caractéristiques formelles respectives ont été décrites de manière similaire (Calbris 1990, Kendon 2004). Que ce soit au niveau de la configuration ou du mouvement perçu, les deux réalisations paraissent effectivement

semblables : la main est ouverte les doigts étendus, en supination, l'avant-bras effectue une rotation extérieure et une extension (fig. 1.52).

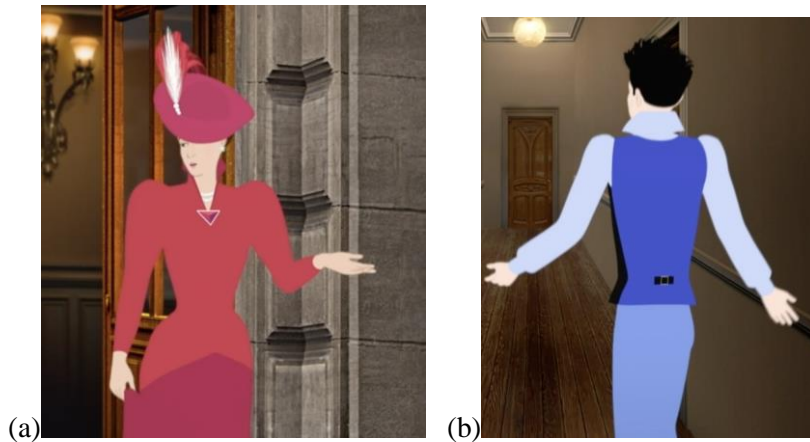


Figure 1.52 – (a) Geste de présentation et (b) geste de négation épistémique (extraits de *Dilili à Paris* de Michel Ocelot, tirés de Boutet & Morgenstern 2020 : 12)

Pourtant, une différence marquante permet de distinguer ces deux réalisations : l'une trouve ses racines dans le bras et l'autre, sur la main.

Le geste de négation épistémique est effectivement d'origine brachiale. Le mouvement débute dans le bras avec une extension, et se propage à travers une rotation extérieure pour se terminer par une supination de la main : le flux est proximo-distal.

Pour le geste de présentation, le mouvement débute de la main qui réalise une supination, ce qui entraîne l'avant-bras dans un mouvement de rotation extérieure. Nous avons donc un flux disto-proximal.

Si ce sont les mêmes DDLs qui sont exploités, le flux est, lui, opposé.

Cela dit, le flux ne définit pas totalement la nature d'un geste. Selon les différentes réalisations contextuelles d'un geste ou d'un signe, le flux peut s'inverser. Il est en effet possible qu'un geste de négation épistémique présente un flux qui est habituellement lié au geste de présentation (disto-proximal). « Le geste pourra alors être interprété comme « la présentation d'une réalité extérieure à laquelle je ne peux rien ». » (Boutet 2018 : 53). La signification est alors un composite entre les deux formes gestuelles. Si la relation forme/sens n'est pas unique, le flux permet d'informer une partie du sens.

Ce poids donné au flux dans l'approche kinésiologique rend pour Boutet le mouvement et sa dynamique interne essentiels à l'analyse du geste.

BILAN DU CHAPITRE 1

Ce chapitre a permis de dépeindre les évolutions théoriques qui ont touché au statut phonologique du mouvement, d'abord considéré comme l'unique *paramètre phonologique dynamique* aux côtés de l'emplacement, de la configuration et de l'orientation (Stokoe 1960, Stokoe 1965). Plus tard, Liddell et Johnson (1989) ont envisagé le mouvement et la tenue comme des *segments* constituant les signes. Au sein de leur système segmental phonologique, les auteurs considèrent alors que tout mouvement débute et se conclut par des phases de tenues qui accueillent la description des modifications paramétriques ayant lieu durant les phases dynamiques.

C'est à partir de là que le statut phonologique du mouvement est remis en cause : puisque les phases statiques en début et fin de signes décrivent *déjà* les changements d'emplacement, d'orientation et/ou de configuration qui ont lieu d'une tenue à une autre, il n'est plus nécessaire de spécifier les caractéristiques dynamiques du mouvement telles que la direction ou la forme. Le mouvement devient alors une *phase transitionnelle* non pertinente à la description (Hayes 1993).

En parallèle de ces considérations, une tout autre démarche théorique est en éclosion. Pour Stokoe (1991), ce n'est pas la trajectoire de la main, mais le déploiement articulaire entier de l'ensemble du membre supérieur qui doit être étudiée. Les mêmes propositions, laissées au stade d'ébauche théorique par Stokoe, constituent l'approche kinésiologique de Boutet (2008). À travers cette approche, l'auteur souligne la pertinence d'intégrer aux analyses les déterminants physiologiques touchant aux possibilités de mouvement des segments (DDLs). Le mouvement est alors corporellement recontextualisé. Ces changements amènent Boutet à recomposer les paramètres manuels traditionnels. L'orientation et l'emplacement sont réunis sous la notion la localisation initiale (LOCini) ; la prise en compte de l'ensemble bras, avant-bras et main détermine une nouvelle caractéristique du mouvement (MOUV), le flux de propagation. Le mouvement n'est donc plus considéré à travers le prisme de la trace que la main laisse dans l'espace, mais selon un encours kinésiologique ayant une pertinence phonologique. Si l'ensemble de ces études phonologiques proviennent de l'impulsion engendrée par la création du système chéologique de Stokoe (1960), celui-ci a aussi initié un autre volet de l'étude linguistique des LS, qui a trait cette fois-ci aux systèmes de notation.

CHAPITRE 2. SCRIPTURALITÉS ET MOUVEMENT

La création d'alphabets, puis l'utilisation de l'API (alphabet phonétique international), a permis à la partie sonore de toute LV d'être transposable à l'écrit. La transcription graphique des langues vocales consiste à opérer la conversion d'une chaîne phonique qui se déroule dans le temps en une chaîne graphique qui se déploie dans l'espace. Cela est rendu possible par l'unilinéarité du temps. Le déploiement dans la quadridimensionnalité de l'espace-temps impliqué par les LS, rend cette adaptation impossible.

Un travail de création de systèmes de notation adaptés aux LS débute alors dès le XVIII^e siècle. Ce sont ensuite de nombreux systèmes de notation des signes qui sont mis au point. Mais malgré cette diversité, un aspect transversal caractérise l'ensemble de ces systèmes : le paramètre du mouvement est constamment réduit à la seule trajectoire de la main dans l'espace. Mais cette notion de trajectoire n'est-elle pas le reflet d'une conceptualisation restrictive de ce paramètre ?

2.1. Représenter graphiquement le corps en mouvement

Étudier et comprendre la structuration d'une langue ne peut se faire sans l'identification au préalable des variables qui la composent. Il s'agit de répertorier l'ensemble des unités distinctives de la chaîne parlée permettant de produire un changement sémantique par commutation. Une fois la liste des phonèmes déterminée, il faut leur associer une représentation graphique.

2.1.1. Nécessités linguistiques

Selon la perspective structurale, analyser les LS nécessite de transcrire des enregistrements vidéo en LS sous une forme écrite. Cette transcription est en général le produit d'une technique d'annotation par gloses (angl. *gloss-based notation*) : le discours en LS est transcrit en LV. Il peut s'agir de la LV dominante du pays dans lequel est pratiquée la LS étudiée ou de l'anglais, langue internationale. Il faut cependant noter que le processus de *transcription* d'une LS en LV (changement de modalité), s'apparente à un processus de *traduction* (changement de langue). Cela pose plusieurs problèmes. D'abord, la cohérence et la systématisme sont mises à mal. Le choix de la transcription-traduction la plus adaptée est partiellement arbitraire et est attaché au contexte discursif.

“Use of glosses can therefore be deceptive, as it suggests that the semantics of the spoken language word or phrase chosen for the gloss overlaps with the semantics of

the sign (Frishberg, 1983; Johnston, 2008; Frishberg et al., 2012). Such a full overlap might occur in some cases, but certainly not in all. Most signs therefore have multiple translation variants in a spoken language, but only one variant can be chosen as the gloss.” (Crasborn 2015 : 77)

« L'utilisation de gloses peut donc être trompeuse, car elle suggère que la sémantique du mot ou de la phrase de la langue parlée choisie pour la glose chevauche la sémantique du signe (Frishberg, 1983 ; Johnston, 2008 ; Frishberg et al., 2012). Un tel chevauchement complet peut se produire dans certains cas, mais certainement pas dans tous. La plupart des signes ont donc plusieurs variantes de traduction dans une langue parlée, mais une seule variante peut être choisie comme glose. » (Crasborn 2015 : 77)

Les données sont donc lacunaires dans la mesure où les gloses n’informent que sur le sens du signe, et non sur sa forme. Prenons pour exemple les deux réalisations signées suivantes (fig. 2.1 et 2.2).



Figure 2.1 – Réalisation du signe [LÀ] (signeur 3 signe 124, vidéo [2.1](#))



Figure 2.2 – Réalisation du signe [MOI] (signeur 7 session 1 signe 023, vidéo [2.2](#))

Les contextes respectifs de ces deux signes permettent de gloser le premier signe [LÀ] et le second [MOI]. Si on ne se base que sur ces gloses, et sans retourner aux données vidéos sources, il sera compliqué de requêter ces réalisations comme faisant partie de la famille des déictiques²⁰. Afin de combler cette lacune, des « ID-gloses » (angl. *Identifying Gloss*) (Johnston 2008) ont été introduits dans la transcription-traduction. Ce complément d’analyse est composé d’un mot de LV permettant non pas de traduire un signe, mais de le labelliser. Pour les réalisations des fig. 2.1 et 2.2, ce sera respectivement « [PT : DEM] » (PT pour pointage et DEM pour démonstratif) et « [PT : PRO] » (PRO pour pronom) qui seront notés. Il devient alors possible de requêter et de lister toutes les occurrences de pointages existantes dans le corpus vidéo sans avoir à le consulter de nouveau.

Malgré ce gain de profondeur d’analyse, il n’est toujours pas possible de différencier formellement ces deux pointages. Le premier est un pointage canonique réalisé avec l’index tendu et les autres doigts fermés, alors que le second met en jeu l’ensemble doigts. Les ID-gloses sont donc agrémentées d’indications supplémentaires, concernant principalement les configurations. Par exemple, la configuration avec l’index et le majeur ouvert est appelée « V-shape » (Calbris 2003) ; celles avec tous les doigts ouverts est appelée « 5-hand » (Johnson & Liddell 1989). Mais ce type d’appellation des configurations ne lève pas toutes les ambiguïtés puisque ces noms font directement référence à la forme des doigts utilisés dans la dactylogogie de l’ASL. Or, aucune dactylogogie n’est semblable. Par exemple, le « H » au sein de la dactylogogie de l’ASL – formé par l’index et le majeur étendus et collés – s’avère être le « N » de la dactylogogie en LSF. Des erreurs ou des confusions peuvent alors émerger au sein des

²⁰ Les requêter est possible si l’intégralité des déictiques existants en français sont au préalable recensés et définis comme étant des déictiques.

corpus transcrits. La même vigilance serait d'ailleurs nécessaire en ce qui concerne les autres paramètres manuels et non manuels qui composent les signes.

Les gloses et id-gloses sont considérées comme un biais pour l'analyse des LS parce qu'elles troublent le lien entre les données brutes et l'analyse (Bianchini 2021). Pour travailler sur des analyses de LS sans qu'elles ne soient contaminées par d'autres langues, il est donc nécessaire de concevoir un système graphique dédié qui puisse « produire un enregistrement écrit permanent des événements de communication, permettant une analyse et une ré-analyse », mais aussi de « présenter des informations sous diverses formes, afin que l'on puisse identifier des régularités qui peuvent ne pas être évidentes tout en observant directement le comportement en question » (Hoiting *et al.* 2002 : 64)²¹.

2.1.2. Présentation des différents systèmes dédiés aux langues signées

Plusieurs motivations peuvent être à l'origine de tentatives de représentation graphique des LS : préserver ou diffuser ces langues ; les doter d'un système d'écriture exploitable par la communauté Sourde ; ou encore mettre en place des systèmes de transcription répondant aux besoins exprimés à la section précédente.

2.1.2.1. Représentations picturales

À partir de l'idée qu'il est préférable de s'éloigner de la description écrite du signe, Valade (1854) publie un ouvrage dans lequel il énonce pourquoi il est important de représenter la LS par ce qu'il nomme la « *symmographie* » (Valade 1854 : 46). Pour l'auteur, il serait possible de figurer un signe et son mouvement dans une unique image. Pour cela, le dessin doit être épuré, réduit « à son expression la plus simple » (*ibid.* : 47) :

- Les articulateurs participant au geste.
- La disposition de ces articulateurs.
- L'expression physiologique du signe (expressions du visage).

Pour ce qui est du mouvement, il suffit de représenter la trajectoire créée par le déplacement de la main.

« En effet, si le dessin est impuissant à représenter l'action pendant qu'elle s'opère, il la saisit du moins à son origine et à sa terminaison. Or, si l'on imagine que l'organe ou

²¹ «The goal of all transcription is to produce a permanent, written record of communicative events, allowing for analysis and re-analysis. [...] to present information in various forms, so that one may identify regularities that may not be evident while directly observing the behavior in question.» (Hoiting *et al.* 2002 : 64)

les organes en mouvement laissent derrière eux la trace de leur passage, on concevra que le dessin peut représenter cette trace, et voilà le mouvement décrit. » (Valade 1854 : 45)

Le dessin est alors agrémenté d'un système de flèches et d'une numérotation permettant de connaître la direction du mouvement, la distance du corps, la hauteur à laquelle le mouvement s'exécute et son amplitude.

Valade n'a fait qu'exposer ces principes sans les mettre en pratique ; Brouland (1855) et Pélissier (1856) (fig. 2.3) poursuivront la proposition *symmographique* de Valade en créant des dictionnaires imagés. Les signes y sont bien consignés par le biais d'un unique dessin reproduisant le signeur d'un point de vue frontal ou latéral, selon les besoins de lisibilité de la posture ou du mouvement qui y est associé.



Figure 2.3 – Représentation d'une page du dictionnaire de Pélissier (1856 : 11)

En 1880, un professeur de dessin en Oklahoma, Hadley, entreprend de donner une forme scripturale à une LS, celle des Indiens des Plaines²² (LSIP). Sa démarche prend cependant place

²² Il ne s'agit pas ici d'une LS développée par la communauté sourde, mais par les peuples composant les communautés amérindiennes. Leurs disparités de cultures ont engendré une hétérogénéité de langues. Fait étonnant

en dehors du monde de la surdité ; elle a pour but de diffuser et de promouvoir la parole religieuse tout en fournissant diverses tribus amérindiennes une écriture pictographique destinée à être lue par tous, sans égard à la langue parlée. Comme Valade, Hadley pense que les mots offrent une solution imparfaite pour la description de LSIP ; il réalise alors un ensemble de dessins servant à noter les unités signifiantes de cette langue. Son travail rassemble plusieurs centaines d'illustrations graphiques qui rappellent la méthode *symmographique* de Valade ; elle reste aujourd'hui encore la principale contribution à l'étude de la LSIP. La perspective utilisée dans les dessins de Hadley est celle d'un observateur extérieur : pour le signe [FEARS] (première ligne, fig. 2.4) il s'agit d'un observateur placé latéralement par rapport au signeur, tandis que pour le signe [PURE] (deuxième ligne, fig. 2.4), il est placé de face. Déterminer le point de vue est moins évident lorsqu'un zoom important est réalisé sur les mains comme pour les signes [MAN] et [WARM] (première et dernière lignes, fig. 2.4). Ces signes présentent à l'évidence des configurations similaires et des orientations différentes. Il est cependant difficile de savoir dans quels cas la paume est orientée vers le signeur et dans quels cas elle est orientée vers l'extérieur.

et unique, aucune de ces LV n'en a supplanté une autre pour devenir une langue principale de communication. La multiplicité ne permettant pas de compréhension mutuelle, une LS commune et partagée s'est alors créée. Son utilisation généralisée est attestée au XVIII^e siècle, mais encore aujourd'hui, ni le lieu précis de la naissance de cette langue ni l'époque où elle a commencé à se mettre en place ne sont attestés. Cette LS, bien que destinée à une utilisation co-occurrence avec une LV, s'est richement développée, et ce, en partie par jeux d'influences avec l'ASL (Déléage 2013).



Figure 2.4 – Traduction de psaumes religieux en LSIP réalisée par Hadley (1893) (tiré de Déléage 2013 : 68)

Certes, la réduction d'informations permet une reproduction des signes plus aisée, mais elle peut engendrer une certaine ambiguïté. Cela dit, la reproduction des formes complètes (i.e. avec la présence de la partie supérieure du corps) est efficace, car elle offre une reconnaissance immédiate du signe. Les qualités de ce mode de représentation lui permettent d'ailleurs de perdurer puisqu'on le retrouve dans les productions de dictionnaires actuels (fig. 2.5).



Figure 2.5 – Représentations graphiques d'un dictionnaire bilingue LSF/français (I.V.T. éditions, collection thématique 2003 : 145)

Dans cet extrait du dictionnaire de l'I.V.T., on retrouve différents types de représentations graphiques du mouvement. Pour le signe [ÊTRE MALIN], les mains sont représentées deux fois. Celles dont les contours sont fins représentent la posture initiale du signe et celles dont les traits sont plus épais marquent la posture finale. Pour le signe [ÊTRE IDIOT], le membre supérieur n'est représenté qu'une fois puisque, le mouvement circulaire étant réalisé, les positions initiale et finale sont similaires. Pour le signe [ÊTRE CALÉ], l'amplitude du mouvement est trop faible pour nécessiter une représentation doublée du membre supérieur. La différence majeure avec les productions précédentes se situe dans le fait que ces images ne sont plus produites à la main, mais à l'aide de logiciels – tel que Photosigne (Dalle-Nazébi *et al.* 2010 : 109) – qui permettent d'extraire automatiquement des images à partir de vidéos préalablement enregistrées. Les reproductions pictographiques n'ont finalement que peu évolué depuis Valade : ces modélisations visuo-spatiales sont un moyen pratique de retrouver la forme produite, sans qu'un entraînement quelconque ne soit nécessaire pour en permettre la lecture. Cela dit, bien que ce mode de représentation désigne des formes explicites et visibles et rende compte d'une réalité observable, il s'agit de signes produits isolément qui ne reflètent pas l'ensemble des variantes possibles induites par les coarticulations ou par la nature du message

transmis. De plus, bien que les flèches permettent de redynamiser artificiellement les postures figées, elles ne transmettent pas d'informations sur la dynamique du mouvement.

2.1.2.2. Système d'écriture

D'abord dédié à la notation de la danse, le système de Sutton (1995) se déploie en variantes tournées vers le mime, le sport, mais aussi les LS avec *SignWriting*. Sutton cherche à mettre en place une écriture des LS qui soit utilisable au quotidien par la communauté des Sourds.

Le système est fondé sur un ensemble de symboles appelés des glyphes (i.e. une représentation graphique du signe typographique), déterminés selon le découpage paramétrique manuel et non manuel des signes. Pour chacun des 500 glyphes prototypiques, il existe de nombreuses variations permettant d'atteindre un total de 37 000 glyphes. Lors de l'écriture d'un signe, les glyphes doivent être agencés dans un espace graphique, une vignette, qui représente l'espace de signation (Bianchini 2012). Tout comme l'agencement des lettres forme des mots, la composition des glyphes forme des signes. Toutefois, les glyphes – à la différence des lettres – sont iconiquement motivés : l'aspect des glyphes rappelle celui des formes qu'ils reproduisent, avec un cercle pour le visage ou des traits fins pour les doigts (fig. 2.6).

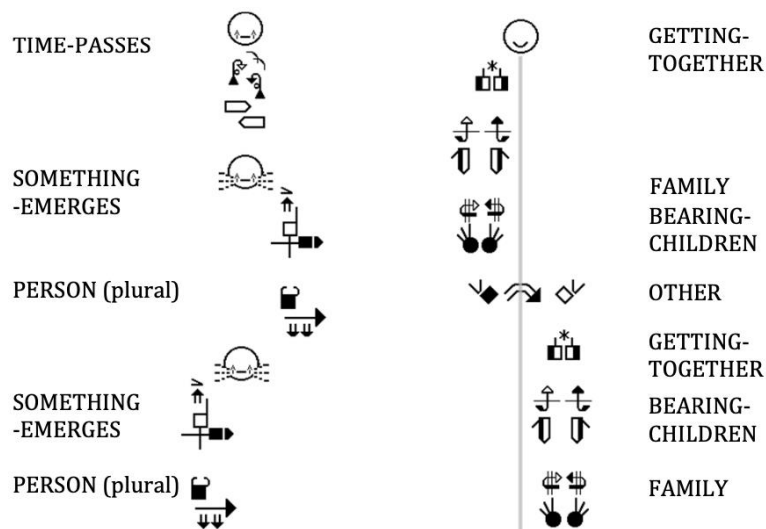


Figure 2.6 – Extrait de notation en SignWriting (Boyes-Braem 2012 : 417)

Aucune syntaxe, aucun ordre, ne prédétermine l'agencement de ces glyphes. Ce sont leurs relations de proximité, une fois placées dans la vignette, qui importent. La cohérence par rapport à la réalité corporelle permet une représentation visuelle et instantanée du signe.


Le point de vue choisi est celui du producteur du signe - et non celui d'un observateur extérieur comme précédemment - qui regarde ses propres réalisations. Cette perspective offre une aisance

de notation quand le scripteur est aussi le signeur. Mais lorsque ce n'est pas le cas, le scripteur doit alors réaliser un effort cognitif pour transposer la configuration corporelle par rapport à celle du signeur, ou encore réaliser lui-même le signe puis le calquer sur une feuille ou sur un écran (fig. 27).









Figure 2.7 – (a) Réalisation d'un pointage dirigé vers la gauche du point de vue du scripteur et (b) notation en SignWriting de ce même pointage, les glyphes concernant les paramètres manuels se situent vers la droite du point de vue du scripteur²³

Néanmoins, le choix de cette perspective ne représente pas une règle immuable. Par exemple, des 132 configurations de SignWriting engageant le pouce, 72 sont le fruit d'une fusion entre deux points de vue (Bianchini 2012).






Pour être plus précis, considérons le glyphe de configuration : . La paume de la main, représentée par le rectangle, est de couleur blanche. Dans le système SignWriting, cela signifie que le signeur voit sa paume tournée vers lui. Or, les doigts sont situés sur le côté du rectangle blanc : cela signifie, ici, que les doigts sont orientés vers la gauche du signeur, et donc que, de fait, la paume est aussi orientée vers la gauche du signeur. Il y a donc bien un mélange de deux perspectives qui est motivé par un souci de lisibilité et d'aisance de reproduction dudit glyphe. Ce manque peut être considéré comme une fragilité relative au point de vue choisi.

La représentation du mouvement est basée sur ce que le producteur voit :

- les doubles flèches servent à noter les mouvements verticaux  (comme sur la fig. 2.7) et curvilignes  sur un plan vertical ;
- les flèches simples servent à représenter les mouvements rectilignes  ou curvilignes  réalisés sur le plan horizontal ;
- les flèches barrées permettent de transcrire les mouvements droits  ou curvilignes  définis sur le plan diagonal (Bianchini 2012 : 267).

²³ Photographie et transcription tirées de <https://www.signwriting.org/> (consulté le 05/05/2022)

Il est possible de compléter ces informations spatiales par des indications concernant la dynamique du mouvement :

- le contact, qui peut être simple *, double, ** ; triple ***, avec prise +, avec battement #, léger ⊖ ou encore appuyé ⊕ ;
- le mouvement des doigts, qui peut porter sur la phalange entière ^ ou seulement sur sa partie médiane • ;
- le rythme, qui peut être lent , rapide , tendu ~ ou encore relâché ∞ ;
- la coordination temporelle entre les mains, qui peut être synchronisée , alternée , séquentielle , ou graduelle ⊙.

Ces choix de SignWriting concernant la représentation du mouvement, en font un « système fondé sur la trace, c'est-à-dire sur l'évolution du mouvement à partir d'un point initial » (*ibid.* : 161), ce qui ne permet pas de vraiment analyser le processus du mouvement, mais simplement de le déduire. La déduction n'étant pas un gage d'exactitude, cette manière de représenter le mouvement pose problème lorsque la représentation graphique est pensée sous l'angle de la description utilisée pour la recherche linguistique.

2.1.2.3. Systèmes de transcription

Tôt au XIX^e siècle, l'importance de dissocier LV et LS a été pressentie par Bébien, pionnier de l'apprentissage des jeunes sourds.

« Or, l'on tenterait vainement de décrire des signes mimiques avec des mots. Cependant, si l'on veut rapprocher, comparer, combiner ces signes, et surtout, si l'on veut conserver et transmettre les résultats d'un travail si précieux, il faut un moyen de peindre ces signes, de les fixer sur le papier. » (Bébien 1825 : 7).

Entre 1817 et 1825, Bébien met au point une méthode de transcription à partir d'un système phonologique embryonnaire composé de 187 caractères regroupés selon différents paramètres. Parmi ces caractères, 68 concernent le mouvement. Concentrons-nous sur ces derniers.

Pour représenter la direction et la trajectoire du mouvement, Bébien utilise le symbole de la roue. La position de la roue donne la direction du mouvement (fig. 2.8 colonne A) et son taux de déformation indique le niveau de courbure du mouvement (fig. 2.8 colonnes B, C et D).

Caractères indicatifs du mouvement. ^{5. 1.}					
Mouvement	A Simples	B Courbes	C Circulaires	D Obliques	
De gauche à droite	⊖	⊖	⊖	⊖	De gauche à droite et en arrière
	⊖	⊖	⊖	⊖	..... et en avant
De droite à gauche	⊕	⊕	⊕	⊕	De droite à gauche et en arrière
	⊕	⊕	⊕	⊕	..... et en avant
De bas en haut	⊖	⊖	⊖	⊖	De bas en haut et à droite
	⊖	⊖	⊖	⊖	..... et à gauche
De haut en bas	⊕	⊕	⊕	⊕	De haut en bas et à gauche
	⊕	⊕	⊕	⊕	..... et à droite
En avant	⊖	⊖	⊖	⊖	En avant et en bas
	⊖	⊖	⊖	⊖	..... et en haut
En arrière	⊕	⊕	⊕	⊕	En arrière et en haut
	⊕	⊕	⊕	⊕	..... et en bas

Figure 2.8 – Tableau à double entrée présentant les symboles des trajectoires et directions des mouvements (partie 1) (Bébian 1825 : 8)

Des symboles permettent d'indiquer si la main se contracte, se ferme ou ondule dans l'espace de signation (fig. 2.9).

Mouvements de contraction	⊖	Mouvements ondulans	⊖
..... d'extension	⊕	..... serpentans	⊖
..... propres (a) C O O K		..... de progression	⊖
(b) ⊖ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕		..... de tremblement	⊖

Figure 2.9 – Formes du mouvement (partie 2) (Bébian 1825 : 8)

Enfin, d'autres symboles permettent de spécifier ce que Bébian appelle l'« accens modificatif » (fig. 2.10), c'est-à-dire la dynamique du mouvement lent ou vif, bref ou prolongé, successif ou réitéré, en tenant compte lorsque nécessaire de la synchronie entre les deux mains.

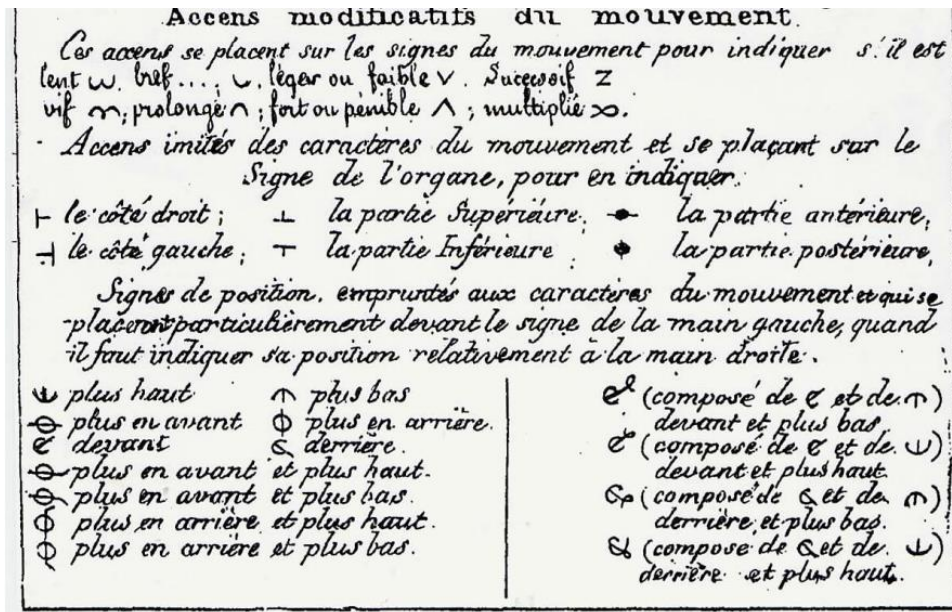


Figure 2.10 – Accens, dynamique du mouvement (partie 3) (Bébian 1825 : 8)

La transcription d'un signe se compose linéairement de gauche à droite en commençant par le segment qui est en mouvement, suivi des différentes caractéristiques de ce mouvement. De manière facultative, l'expression du visage peut être ajoutée. L'ensemble de ce travail est resté à l'état de théorie, à peine mise en pratique.

C'est bien plus tard, en 1960, grâce à Stokoe, qu'un véritable système phonologique (ou *cherologic*) de l'ASL est créé. La *Stokoe Notation* tient compte des trois aspects caractérisant l'ASL : l'emplacement, la configuration et le mouvement. À chacune des unités constituant l'un de ces aspects sont associés des symboles, qui sont au nombre de 55²⁴. La transcription d'un signe suit une syntaxe linéaire exprimant, dans l'ordre, l'emplacement et la configuration, le mouvement et l'orientation. Pour ces deux derniers, les symboles sont respectivement placés en exposant et en indice de celui indiquant la configuration (fig. 2.11).

²⁴ À partir de 1965, il faut ajouter 9 autres symboles, qui concernent le paramètre de l'orientation (Stokoe 1965).

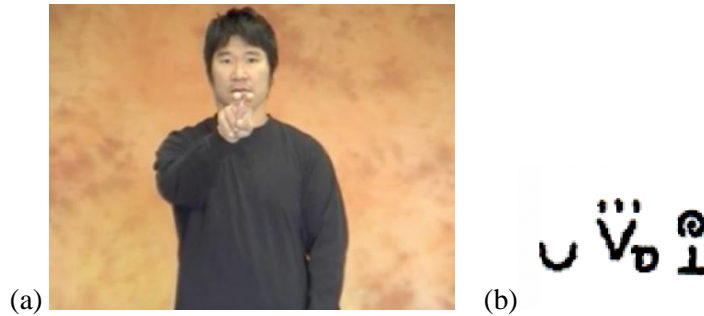


Figure 2.11 – (a) Réalisation du signe ASL [SNAKE] et (b) sa représentation en Stokoe Notation

Les symboles sont iconiques en ce qui concerne le paramètre de l'emplacement : on peut y déceler la forme arquée du haut (∩) et du bas (∪) du visage, l'aspect rectangulaire du tronc ([]) ou longiligne des bras (√) (annexe A.2). En ce qui concerne les formes de main, les symboles sont majoritairement des caractères latins faisant référence à la dactylogologie de l'ASL (annexe A.1).

Le mouvement est le paramètre le plus détaillé (annexe A.3) et est essentiellement décrit selon quatre catégories :

- les directions pour les mouvements à trajectoire ;
- les mouvements des poignets et ceux qui produisent un changement de configuration ;
- les interactions entre la main et la partie du corps avec laquelle elle est en contact, ou les interactions entre les deux mains ;
- la dynamique temporelle du mouvement comme la vitesse ou la répétition.

Le point de vue du producteur est ici employé. Les points de référence sont le corps du signeur (i.e. « s'approchant du signeur », « s'éloignant du signeur »), la main dominante (i.e. « ouverture », « fermeture »), ou la main dominée (i.e. « se sépare », « s'approche »).

Si ce système a permis aux LS d'être introduites dans le domaine de la linguistique (§1.1.1.3), quelques critiques ont néanmoins été émises à son encontre. Cette notation ne permet de coder que ce qui se rapporte aux mains, empêchant ainsi la représentation des paramètres non manuels comme l'expression faciale, le regard ou encore la posture. Autre réserve, le système a été conçu à partir d'éléments provenant d'une LS spécifique, l'ASL, freinant son adoption par un large spectre des LS.

C'est ce manque d'exhaustivité et d'universalité qui a motivé la création d'un autre système de représentation linéaire mis en place en 1989. Il s'agit de la HamNoSys, acronyme pour *Hambourg Notation System* (Prillwitz *et al.* 1989). Ce système formé par 214 symboles a été spécifiquement conçu pour faciliter la transcription de corpus vidéo, orientée vers l'étude linguistique des LS. Les paramètres sont transcrits en suivant une syntaxe précise : symétrie

(i.e. si les deux mains sont nécessaires à la formation du signe), paramètres non manuels, configuration, position des mains, emplacement et mouvement (fig. 2.12).

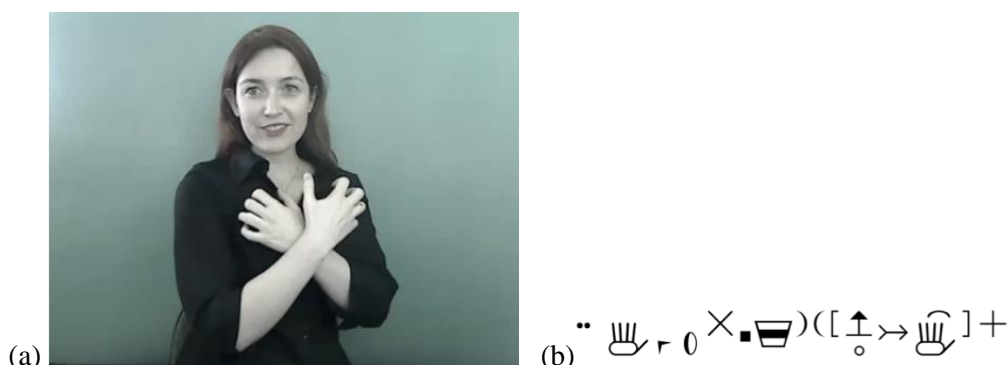


Figure 2.12 – (a) Réalisation du signe ASL [BEAR] et (b) sa représentation graphique en HamNoSys

Le traitement du mouvement reste inchangé. Il est possible de distinguer les mouvements à trajectoire (droit \rightarrow , en arc $\rightarrow\curvearrowright$, sinusoïdal $\rightarrow\sim$, circulaire \curvearrowright) des mouvements locaux (changement de configuration ou d'orientation $\rightarrow\rightarrow$, mouvements au niveau de l'avant-bras $\rightarrow\updownarrow$) et d'en indiquer l'amplitude par un cercle placé sous la flèche. Ce cercle peut être vide, indiquant que le signe est de petite amplitude \rightarrow , ou plein indiquant qu'il est de grande amplitude \rightarrow . Les aspects dynamiques, toujours identiques, sont à noter après la flèche. Le mouvement peut alors être noté comme rapide ($\rightarrow*$) ou lent ($\rightarrow-$).

La visée de HamNoSys est internationale. Aucune référence à une LS ou à une LV particulière n'est faite. De plus, le système n'est pas figé, il reste possible d'ajouter des glyphes concernant notamment les expressions faciales. Notons cependant que la recherche de précision d'HamNoSys a engendré un morcellement important des signes, si bien que les transcriptions de longs discours s'avèrent lourdes à réaliser comme à déchiffrer, le système perdant de ce fait en lisibilité et en employabilité (Boyes-Braem 2012).

Cette présentation de systèmes graphiques des LS montre une certaine similitude et récurrence dans le traitement graphique mais aussi théorique du mouvement. Il existe pourtant diverses possibilités de représentations du corps dynamique dans l'espace, comme le montre par exemple les systèmes graphiques de la danse. D'ailleurs, bien que cette dernière utilise le corps dans sa globalité afin de mêler performance et esthétique, la danse présente des similitudes avec la production de signes : il s'agit dans les deux cas d'objets sémiotiques qui transmettent de l'information par la rythmique des mouvements corporels.

2.1.3. Une autre perspective : le mouvement dansé

Le corps est l'outil de la danse, qu'elle soit individuelle ou collective, réalisée à des fins de rituel ou de divertissement. Universelle, la danse connaît des formes variées d'expression selon le contexte culturel dans lequel elle prend place. Il existe un certain nombre d'archives concernant celles pratiquées en Occident, provenant dans un premier temps de notations réalisées par des maîtres de danse et de ballets. L'expression corporelle y est retranscrite d'un point de vue interne au corps, se différenciant de la perspective externe choisie au sein des systèmes des LS.

2.1.3.1. Pas après pas

Le premier ouvrage décrivant des mouvements dansés est l'*Orchésographie* d'Arbeau (1589). L'auteur énumère et regroupe sur une page, à la verticale à la manière d'une partition de musique, les pas à réaliser (fig. 2.13 (a)). Ce procédé de notation à la fois typologique et symbolique permet au danseur de connaître le *tempo* précis avec lequel il doit réaliser une succession de pas. Nulle précision n'est cependant donnée quant à la direction à prendre dans l'espace. De plus, malgré la présence de quelques illustrations (fig. 2.13 (b)), les pas à réaliser, bien que nommés, ne sont pas décrits rendant nécessaire de connaître au préalable le vocabulaire spécifique à la danse dont il est question.

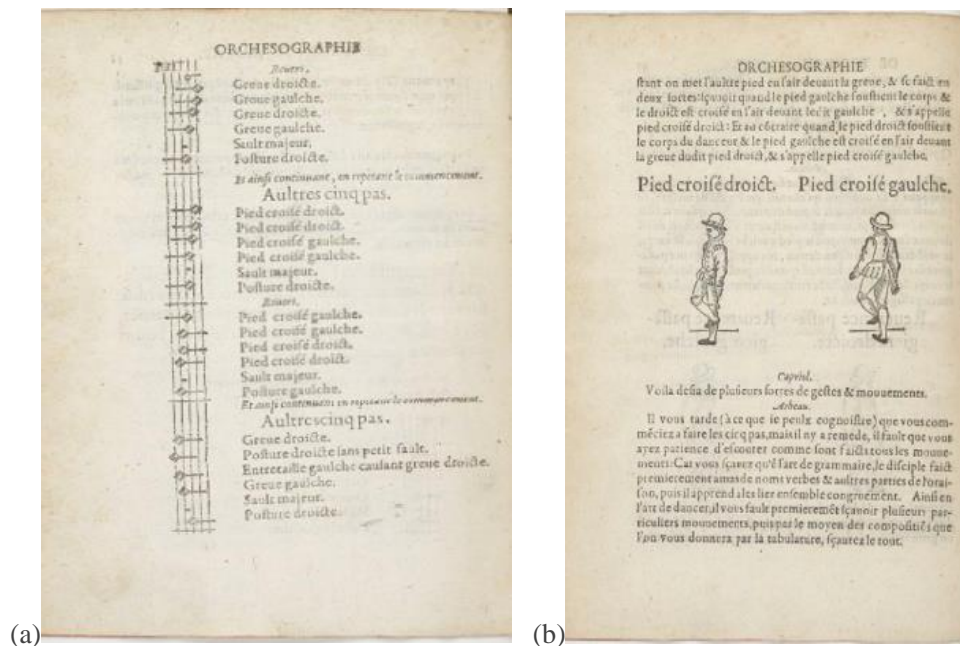


Figure 2.13 – (a) Extrait de la notation d'Arbeau et (b) extrait des explications écrites et dessinées des pas concernés (Arbeau 1589 : 44/ 54)

En 1661, Louis XIV fonde l'Académie royale de danse afin de pouvoir favoriser la création des compagnies ou des troupes de danse, ainsi que leur circulation à travers l'Europe. Un maître de ballet de cette académie, Beauchamp, établit une codification écrite de la « belle danse », accompagnant la musique baroque. Ce travail est repris et publié par Feuillet en 1700 (fig. 2.14 (a)). Dans cette version de notation de Beauchamp, la feuille de papier représente la scène observée selon une perspective aérienne. Le haut de la page est réservé à la portée musicale qui a retrouvé son horizontalité ; la position théorique du public se situe hors champ pour ainsi dire, en deçà du bas de la feuille. Sur la feuille elle-même, en bas, le corps des danseurs est représenté par un demi-cercle surmonté d'un trait horizontal. Si le demi-cercle est simple il s'agit d'un homme, s'il est double il s'agit d'une femme. Le chemin à parcourir est ponctué de barres correspondant aux mesures de la musique et d'informations concernant les pas à effectuer. Seule la forme du pied est symbolisée : elle est composée d'un cercle, représentant le talon, qui est associé à une ligne figurant le pied et son orientation (fig. 2.14 (b)). Dans le cadre des chorégraphies, cette représentation est agrémentée de signes symbolisant des actions précises telles que glisser, tomber ou sauter.

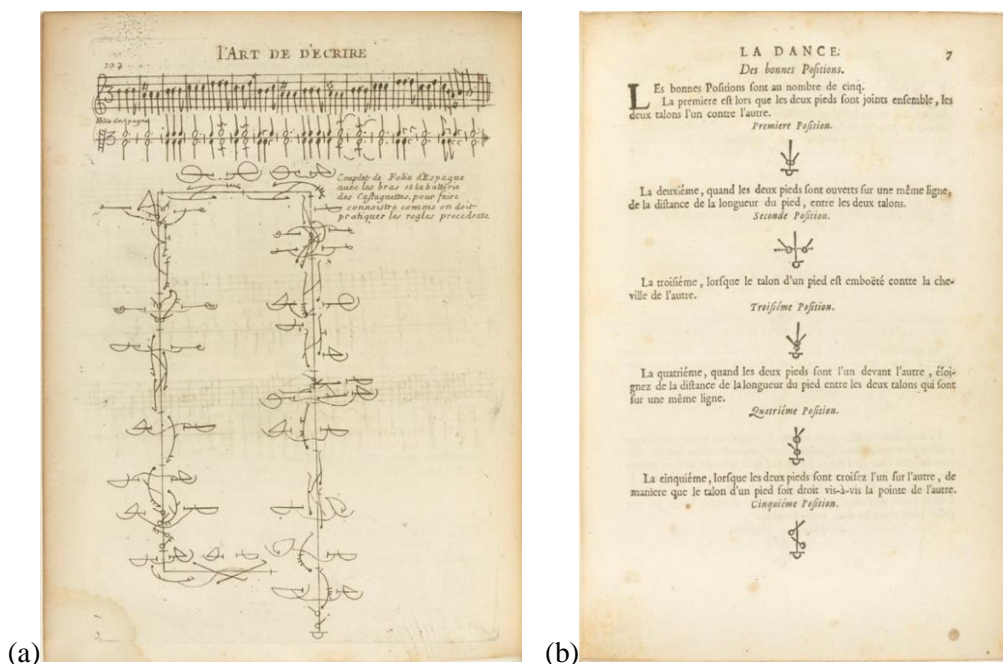


Figure 2.14 – (a) Extrait de la notation de Feuillet et (b) symboles utilisés pour représenter le pied (Feuillet 1701 : 102/7)

Avec ce type de description chorégraphique, le danseur a connaissance du parcours à effectuer dans l'espace, de l'orientation de ses pas, de leurs successions et de la relation qu'ils entretiennent avec la musique. La linéarité de la notation permet d'avoir une vision globale des

pas qui s'enchainent, mais le corps, à peine esquissé à son point de départ, demeure absent tout au long de la performance qu'il doit accomplir.

En 1852, Saint-Léon propose une nouvelle méthode qui s'inspire des productions d'Arbeau tout en lui reprochant de noter la danse « en toutes lettres et en langage ordinaire » (Saint-Léon 1852 : 9). Saint-Léon est le premier à proposer un système de notation dans lequel le corps, schématisé, apparait dans sa globalité. Son système est composé d'une portée dont cinq lignes sont réservées aux positions des jambes, et une ligne est placée au-dessus pour celles de la tête, du buste et des bras. Cette notation est placée en amont de la partition de musique, de manière que notes et mouvements concordent (fig. 2.15).



Figure 2.15 – Notation de Saint-Léon (Saint-Léon : 50)

Néanmoins, le corps représenté dans la méthode de Saint-Léon n'est rien de plus qu'un ensemble de segments articulés plus ou moins morcelés, pouvant prendre une position ou une autre : il n'est qu'un simple support à la réalisation dansée. Les recherches graphiques du XX^e siècle prendront une nouvelle direction épistémologique en développant des théories concernant le mouvement corporel en amont de la création de nouveaux systèmes de notations.

2.1.3.2. Individuer le geste dansé

En 1928, Laban cherche à expliciter des normes scientifiques permettant de décrire et d'analyser le mouvement humain. Pour ce théoricien et danseur, deux notions – intrinsèquement liées – composent la dynamique corporelle. La première, qu'il nomme la kinesphère, modélise l'espace abstrait dans lequel le corps peut se déployer (fig. 2.16).

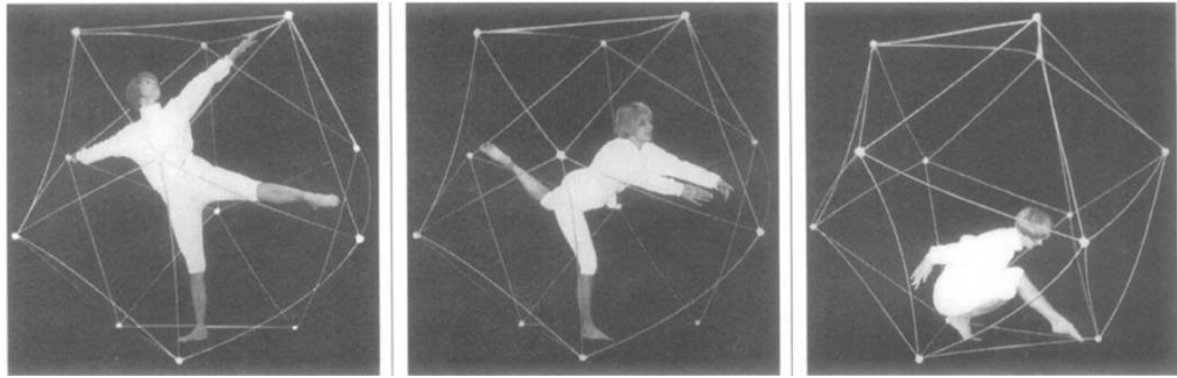


Figure 2.16 – Structure icosaédrique représentant le kinesphère Block (1998)

Cet espace est matérialisé par un volume physique à trois dimensions, déterminé par la longueur des jambes et des bras du danseur, rappelant l'espace de signation des LS (§1.1.1.2). Le corps et la kinesphère sont intrinsèquement liés : si le danseur se déplace, il en va de même pour la kinesphère. Le danseur ne se meut plus par rapport à la scène sur laquelle il se trouve, mais par rapport à sa kinesphère, et donc, par conséquent, par rapport à son propre corps. Le référentiel est désormais interne.

La kinesphère est complétée par une seconde notion définitoire du mouvement, la dynamosphère. Celle-ci permet d'interroger la façon dont le corps concentre son *énergie* pour ensuite la *déployer* et réaliser un geste dansé. Quatre facteurs permettent d'évaluer ce niveau d'énergie (fig. 2.17) :

- 1) l'espace du mouvement, qui permet de différencier un mouvement direct d'un mouvement flexible ;
- 2) le temps du mouvement, qui permet de reconnaître un mouvement soutenu d'un mouvement soudain ;
- 3) le flux du mouvement, qui permet de distinguer un mouvement contrôlé d'un mouvement libre ;
- 4) le poids du mouvement, qui permet de différencier un mouvement dont la touche est ferme d'une touche plus légère.

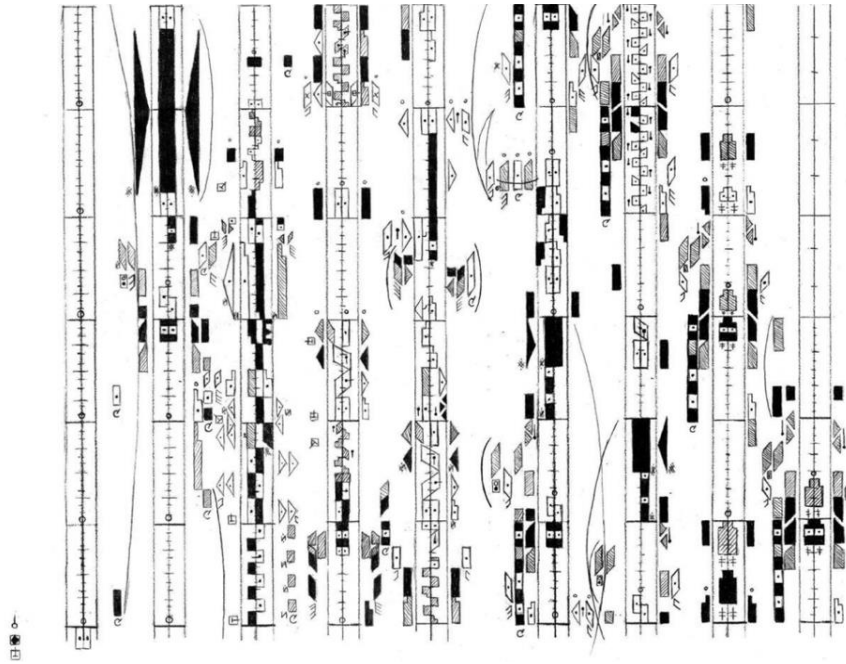


Figure 2.18 – Extrait de la Labanotation (Kleida 2018 : 34)

Ces colonnes sont agrémentées de symboles. Le rectangle sert à représenter le danseur au centre de sa kinesphère : la forme géométrique se déforme en fonction de la direction du mouvement ; change de motif en fonction de la hauteur due et est étiré ou rétréci selon le temps mis par le danseur pour réaliser son mouvement. Une autre série de symboles est quant à elle tirée de la théorie de l'effort préalablement exposée. À partir du schéma représentant les vecteurs d'effort dans un espace à quatre dimensions (fig. 2.17), seuls les vecteurs pertinents dans l'observation du mouvement sont alors conservés (fig. 2.19) :

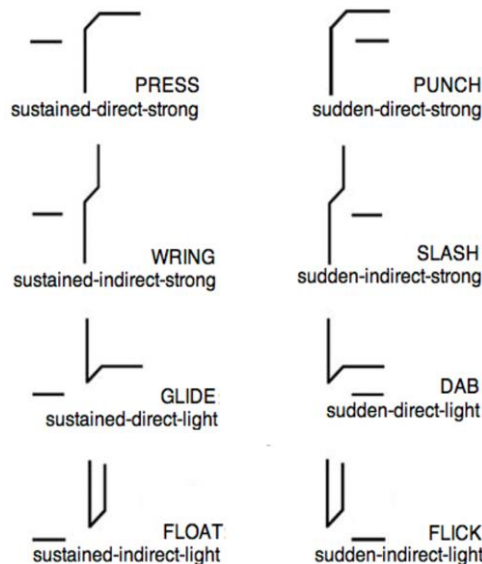


Figure 2.19 – Exemples de la notation de l’effort utilisée pour décrire huit combinaisons d’actions (Knight & Simmons 2014 : 269)

La notation de Laban rappelle que le corps offre un potentiel de mouvement infini. Pour parvenir à exprimer une émotion ou un sentiment précis, il faut individuer le mouvement, le rendre particulier. Cette individuation se fait par l’effort qui y est appliqué. Lorsqu’un bras se déploie, il suit effectivement une trajectoire, mais c’est la conséquence d’efforts internes et invisibles qui mettent en forme le geste tel qu’on le réceptionnera.

2.1.3.3. Modèle géométrique

Une autre manière de considérer et de représenter le mouvement dansé est proposée par deux théoriciens de la danse, Eshkol et Wachman (1958). Ici, le fonctionnement du corps comme objet polyarticulé constitue le principe fondamental du système de notation. Bien qu’utilisé principalement pour la notation de la danse. Le système de Eshkol-Wachman a été conçu de manière à pouvoir être appliqué à n’importe quel mouvement humain. Pour permettre cela, le corps est traité selon sa structure articulaire : chaque membre est considéré pour ce qu’il est, c’est-à-dire une composition de segments reliés par des articulations. Les mouvements réalisés par ces segments sont pensés à l’aide de coordonnées sphériques (faisant référence à la géométrie non euclidienne présentée §1.2.2.3). Une articulation représente le centre d’une sphère et le segment auquel elle est reliée incarne le rayon de cette sphère (fig. 2.20 (a)).

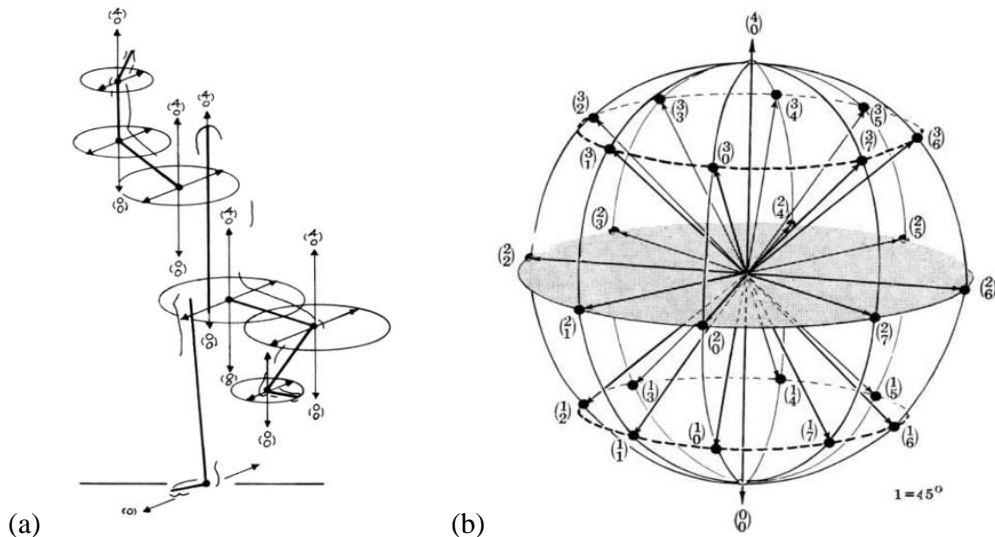
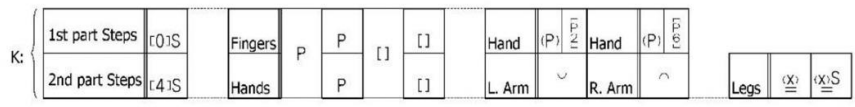


Figure 2.20 – (a) Ensemble des systèmes de référence pour chaque segment du corps et (b) zoom sur un de ces référentiels exprimé selon deux chiffres représentant deux plans, vertical et horizontal, par rapport au sol (Eshkol & Harries 2011 : 2/5)

Pour arriver à ses fins, le modèle Eshkol-Wachman définit deux valeurs de coordonnées sur la surface de la sphère ; une est perpendiculaire et l'autre parallèle au sol et toutes deux passent par le centre de la sphère. Ces rayons sont considérés comme les positions de départ pour les mesures. Tous les 45° , un nouvel intervalle est spécifié, représentant une nouvelle position possible. Cette procédure permet d'obtenir, pour le segment du bras, six positions sur le plan horizontal et quatre sur le plan vertical (fig. 2.20 (b)). Les mouvements sont représentés comme des transitions entre les coordonnées initiales et finales. Par exemple, le bras droit peut avoir une position de départ en $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ (i.e. le long du buste) et une position d'arrivée en $\begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}$ (i.e. perpendiculaire au buste).

S'il s'agit de noter une partition dansée, l'ensemble de ces informations est retranscrit sur des grilles dont les lignes horizontales sont propres à chaque segment du corps tandis que les lignes verticales indiquent les unités de temps (fig. 2.21). La lecture de ces grilles se fait de gauche à droite.

LIGHT AND FIRE



M=120 I.

Left Arm	(0)	(0)↑4	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Hand		P	(P)	[]	P	(P)	[]	P	(P)	[]	P	(P)	[]	
Forearm	(6)	∨ ↑(2)	(6)	∨ ↑(2)	(6)	∨ ↑(2)	(6)	∨ ↑(2)	(6)	∨ ↑(2)	(6)	∨ ↑(2)	(6)	∨ ↑(2)
Right Arm	(0)	∨	∧	[]	(1)	∧	[]	(2)	∧	[]	(3)	∧	[]	
Head	(5)	(0)↓2		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Right Leg	(1)	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Left Leg	(1)	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Front	(0)		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)

Figure 2.21 – Notation de la danse « Light and Fire » (Al-dor 2019 : 13)

Le remplissage des cases dépend du type de mouvement réalisé. Prenons les exemples présentés (fig. 2.22). Dans le cas du mouvement (a) → (b), seul le bras effectue une rotation ; pour l’enchaînement (a) → (c), il s’agit de l’avant-bras ; et pour le mouvement (a) → (d), ce sont cette fois-ci les deux segments qui bougent simultanément. L’observation des notations situées à la droite des schémas corporels démontre que le modèle différencie les mouvements volontaires des mouvements dépendants : seules les cases relatives au segment qui est réellement en mouvement, et non emporté par l’action du segment qui lui est proximal, doivent contenir de l’information.

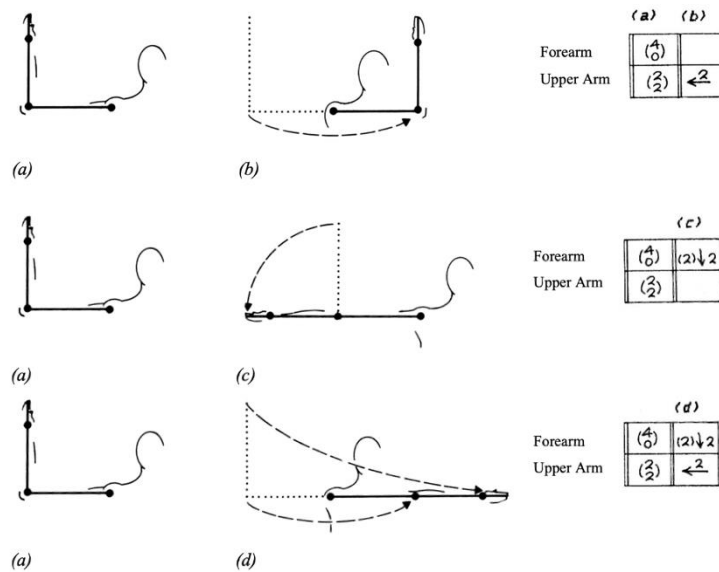




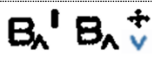
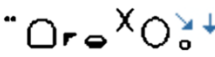
Figure 2.22 – Différents types de mouvements et leurs notations au sein du système Eshkol-Wachman (Eshkol & Harries 2011 : 3-4)

Dans le cadre des systèmes dédiés aux LS, aucune distinction de ce type n'est proposée, puisque seule la main est prise en compte, en tout cas jusqu'à l'approche kinésiologique de Boutet (2008).

2.1.4. Synthèse

L'évolution positive des systèmes de notations proposés à la communauté scientifique ne fait pas de doute. Néanmoins, dans aucun de ces systèmes ce processus n'a été orienté vers le traitement du paramètre du mouvement qui est toujours envisagé comme une forme tracée par la main dans l'espace (tab. 2.1).

Tableau 2.1 – Différents systèmes de notations des LS avec leur objectif premier, le point de vue qu'ils ont adopté et leur représentation graphique du signe [MAISON] (dont les caractéristiques du mouvement sont en bleu)

Système	But	Point de vue	Notation du signe [MAISON]
Syrmographie (1854)	Sauvegarde/ Transmission	Observateur	
SignWriting (1995)	Écriture	Producteur (exceptions pour quelques configurations)	
Notation de Bébien (1825)	Transcription	Observateur	/
Notation de Stokoe (1960)	Transcription	Producteur	
HamNoSys (1989)	Transcription	Producteur	

Il semblerait que la cause de la vision restrictive de la performativité des LS tient au point de vue adopté, alternant entre celui du producteur et celui de l'observateur. Ces positionnements renvoient à une perspective *visuelle* et *spatiale* à partir de laquelle on note ce qui est vu et non ce qui est produit. Or, dans au moins un autre domaine pour lequel la notation du mouvement corporel est essentielle, la danse, d'autres méthodes de notations du mouvement ont été explorées.

Dans le cadre de la danse, le corps et son mouvement ont été pensés *en amont* du geste dansé. Pour Laban, le corps se déploie selon un rapport constant à la gravité : le danseur, en s'y opposant ou en s'y abandonnant, individualise son geste. Cette analyse qualitative de l'amplitude du geste et la forme du mouvement est possible parce que le corps est considéré comme le point de référence de l'analyse :

« Quittant l'espace perspectif de la scène pour explorer la danse en plein air, il allait d'abord se concentrer sur le corps. C'était d'emblée renverser le point de vue classique sur l'espace de la danse, en faisant du corps même le référent principal à l'organisation des espaces. Un point de vue extérieur ne vient plus organiser le geste. » (Perrin 2016 : 5)

Il en va de même pour la notation de Eshkol-Wachman qui modélise le mouvement dansé comme des combinaisons et coordinations de possibilités articulaires, musculaires et physiologiques. Ce modèle géométrique permet à l'utilisateur d'observer et de noter le mouvement de manière objective, en toute connaissance du fonctionnement corporel entier. Le corps humain est considéré comme une chaîne de segments articulés ; il existe autant de

systèmes de référence que d'articulations corporelles. Ce sont ici des modélisations et des conceptualisations du mouvement *internes* au corps qui sont proposées.

Cela n'est pas sans rappeler l'approche kinésiologique de Boutet (2008, 2018), présentée en partie 1.2, qui cherche à être au plus près des gestes et à donner la possibilité de les décrire, de rendre compte du mouvement de chacun des segments selon leur dynamique propre et les liens qu'ils entretiennent entre eux. Cela permet à la forme gestuelle d'être revisitée. Il ne s'agit plus désormais d'une conception visuelle de trajectoire, mais plutôt de DDLs sur lesquels un mouvement se déploie le long du membre supérieur. C'est en suivant ces caractéristiques qu'un groupe de recherche met en place un nouveau système de transcription des LS se détachant de la ligne directrice suivie jusqu'ici.

2.2. Proposition de renouvellement, le projet Typannot

Les travaux de l'équipe de recherche GestualScript²⁵ contestent l'omniprésence de modélisations des signes réduites au seul point de vue externe, c'est-à-dire limité aux seuls effets produits par le geste. Le système de transcription Typannot mis au point par GestualScript interroge les possibilités articulaires du corps dynamiquement organisées à travers un cadre de référence intrinsèque, permettant de repenser les caractéristiques pertinentes à prendre en compte pour le paramètre du mouvement (Chevrefils *et al.* 2021).

2.2.1. Du point de vue au cadre de référence

Le « point de vue » est le lieu à partir duquel on regarde quelque chose ; le « cadre de référence » désigne quant à lui le référentiel utilisé pour localiser un objet à l'intérieur d'un lieu ou d'un emplacement détaché et indépendant de celui qui regarde. Autrement dit, il s'agit de décrire et conceptualiser la reconnaissance d'une figure par rapport à un fond (Le Guen 2011) : la figure représente l'objet que l'on souhaite localiser, et le fond relève de ce qui permet de localiser ladite figure. Concernant les LS, c'est le choix d'un cadre de référence intrinsèque qui permet, nous le verrons, d'établir une constance et une pérennité dans l'axe d'analyse des signes.

²⁵ GestualScript est une équipe de recherche associée à l'École Supérieure d'Art et Design (ESAD) d'Amiens et au laboratoire Dynamique du Langage in Situ (DyLIS) de l'Université de Rouen Normandie. Les contributeurs du projet sont *Dominique Boutet, Claudia S. Bianchini, Patrick Doan, Claire Danet, Morgane Rébulard, Adrien Contesse, Chloé Thomas et Léa Chevrefils.

2.2.1.1. Types de cadres de référence

Levinson (1996) décrit trois types de cadres de référence : absolu, intrinsèque et relatif.

Le cadre de référence *absolu* prend comme point de référence l'environnement. Son rapport à la spatialité est absolu puisqu'il ne peut être modifié, et ce, quels que soient les changements de localisation de l'objet. Ce cadre de référence s'exprime par le biais des points cardinaux : Est, Ouest, Nord et Sud (Brown & Levinson 1993, Le Guen 2011). Dans la fig. 2.23, le panier - qui représente la « figure » à reconnaître - se situe à l'Est du ballon – objet qui incarne le « fond » permettant d'accéder à cette reconnaissance. Si ce cadre de référence paraît peu habituel dans les langues occidentales, il n'en est pas tout à fait absent. Le cadre de référence absolu est notamment utilisé pour spécifier l'orientation des habitations par rapport au lever et au coucher du soleil (« cette maison est située plein Sud »).

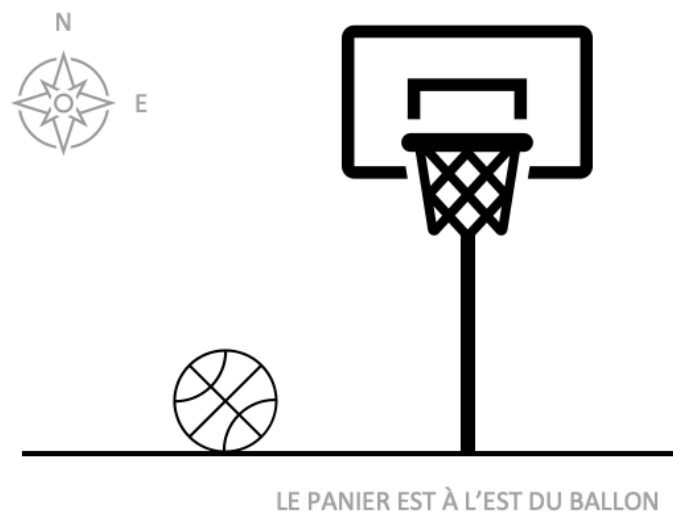


Figure 2.23 – Cadre de référence absolu

Le cadre de référence *intrinsèque* est centré sur l'objet lui-même, il est lié aux propriétés inhérentes de cet objet et à un système de coordonnées qui lui est propre. Ce système de coordonnées peut être choisi arbitrairement pour faciliter l'étude du comportement de l'objet en question. Par exemple, dans le métro, lorsque la descente ne se fait pas du côté habituel, une annonce vocale prévient les passagers « à cette station, descente à gauche ». « Gauche » fait référence à la gauche de la rame de métro par rapport à son sens de déplacement. Ces caractéristiques sont accessibles aisément par les passagers, qui peuvent alors s'orienter du bon côté.

Dans la fig. 2.24, le panier a une partie haute et basse, un côté gauche et un côté droit qui lui sont propres. Le ballon se trouve en bas à droite par rapport au système de coordonnées du panier.

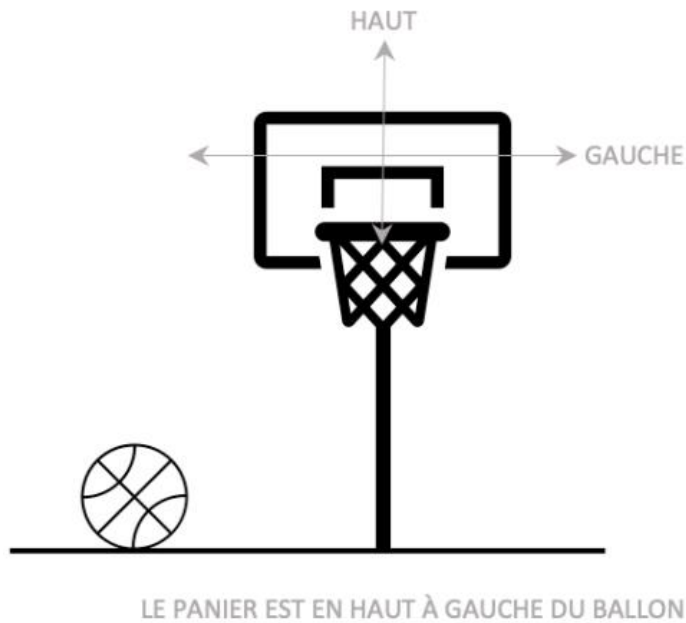


Figure 2.24 – Cadre de référence intrinsèque

Enfin, le cadre de référence *relatif* est divisible en point de vue égocentré et en point de vue allocentré. S’il s’agit d’un point de vue égocentré, le système de coordonnées est celui du locuteur. L’**observateur 1** (fig. 2.25) peut indiquer que « le panier est derrière le ballon ». Si celui-ci se déplace en position 2, alors il énoncera : « le panier est devant le ballon ».

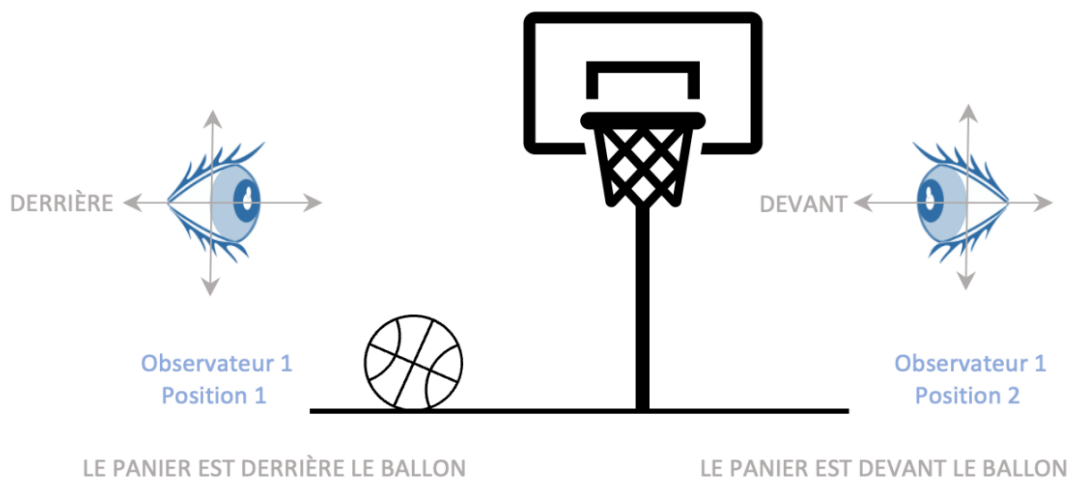


Figure 2.25 – Cadre de référence relatif, point de vue égocentré

S'il s'agit d'un point de vue allocentré (fig. 2.26), l'**observateur 1** emprunte le point de vue de l'**observateur 2** et par conséquent son système de coordonnées. L'observateur peut déclarer « le panier est devant le ballon ».

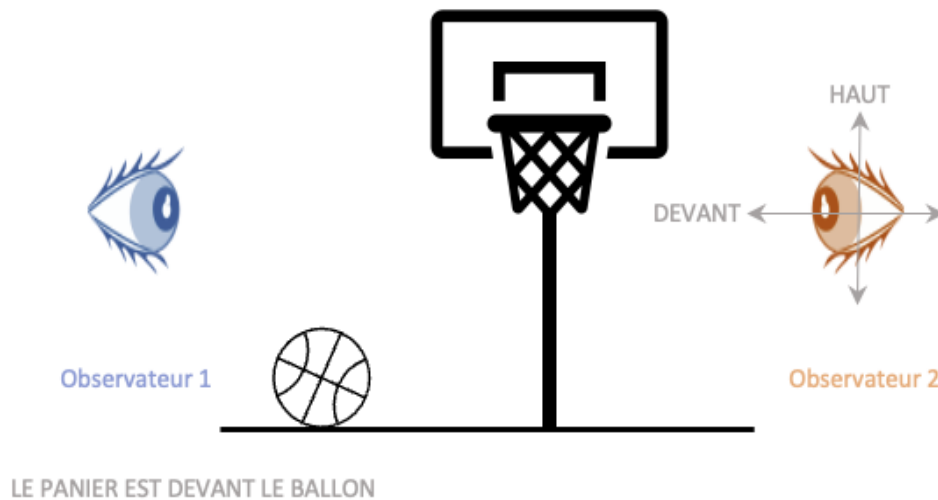


Figure 2.26 – Cadre de référence relatif, point de vue allocentré

Ce cadre de référence - majoritairement adopté pour l'étude des gestes et des LS - est aussi le plus fréquent dans les langues indo-européennes (Pederson *et al.* 1998). Brown & Levinson (1993) ont cherché à savoir si cette prédominance était universelle en mettant au jour les systèmes de description spatiale de langues non indo-européennes. L'une des langues les plus analysées est une variété de maya parlé au Mexique, le tzeltal. Pour identifier dans quelle mesure un cadre de référence est privilégié par rapport à un autre, des tests ont été effectués avec des locuteurs de tzeltal et des locuteurs néerlandais. L'un des stimuli présentés aux locuteurs est celui-ci (fig. 2.27) : une flèche est placée sur la table 1, le sujet la regarde, puis doit effectuer un demi-tour de 180° pour se trouver face à la table 2. Sur celle-ci se trouvent deux flèches. La consigne est alors d'identifier sur la table 2 la flèche correspondant à celle de la table 1. Le sujet ayant un cadre de référence absolu devrait choisir la flèche la plus rapprochée. Le sujet ayant un cadre de référence relatif devrait choisir la flèche la plus éloignée.

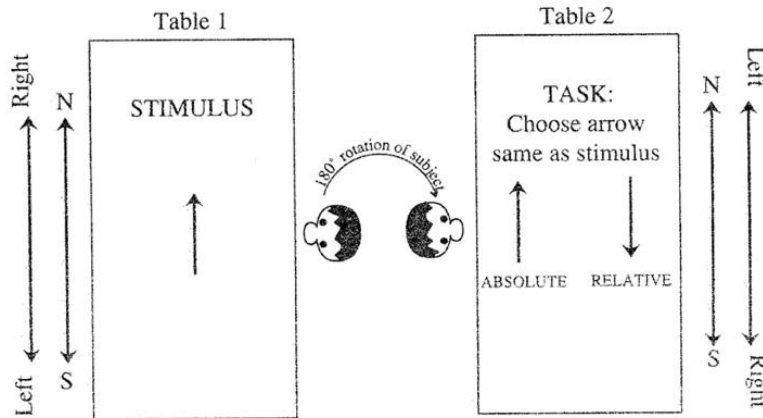


Figure 2.27 – Test de reconnaissance de l'utilisation d'un cadre de référence spécifique (Levinson 1996 : 113)

Ce test et ceux qui ont suivi ont tous montré des résultats similaires. Plus de 90 % des sujets parlant le tzeltal ont désigné la flèche la plus proche d'eux, démontrant l'utilisation d'un cadre de référence absolu : les emplacements sont principalement décrits en termes de coordonnées fixes, et non par rapport à l'individu. Cela dit, ce ne sont pas les coordonnées des points cardinaux qui sont utilisées verbalement pour décrire les références spatiales entre les objets, mais plutôt des notions de « montée » (Nord), de « descente » (Sud) et de « traversée » (Ouest et Est). Ces termes sont liés à la nature du territoire où vivent les locuteurs de tzeltal interrogés : le terrain descend vers le Nord à partir de la haute extrémité Sud du territoire. Cette forte inclinaison est utilisée comme base conceptuelle du système. Les notions indo-européennes comme celles de gauche et de droite sont absentes de cette langue.

Des différences sont aussi observables dans les langues australiennes de l'Arrernte (Pederson *et al.* 1998). Le choix d'un cadre de référence absolu a été observé dans la parole comme dans la gestuelle des locuteurs. Dans une population où le cadre de référence relatif est le plus répandu, pointer à droite pour deux personnes en face, revient à pointer dans deux directions opposées (fig. 2.28 (a)). Pour une population avec un cadre de référence absolu majoritaire, cela revient à pointer dans la même direction (fig. 2.28 (b)).



Figure 2.28 – Acte de pointer « à droite », (a) selon un cadre de référence relatif et (b) selon un cadre de référence absolu (Le Guen 2011 : 298)

Des représentations différentes de l'orientation dans l'espace et des relations entre les entités se trouvent aussi dans d'autres langues, comme celle du Guugu Yimithirr, langue aborigène d'Australie. Haviland (1993) documente le discours d'un locuteur relatant deux fois la même expérience passée. Le seul élément qui diffère entre les deux allocutions concerne l'orientation spatiale du locuteur. Durant le premier récit, le mouvement d'Ouest en Est est représenté gestuellement comme un mouvement d'éloignement du corps ; durant la seconde narration, ce même mouvement est représenté par un geste allant de gauche à droite. Ces gestes, réalisés sans être accompagnés de mots évoquant la direction cardinale, montrent que l'utilisation du cadre de référence absolu n'est pas simplement due à un effort de coordination avec l'énoncé.

2.2.1.2. Pour un cadre de référence intrinsèque et multiple

La diversité des cadres de référence (i.e. absolu, intrinsèque, relatif) et la non-universalité du cadre de référence relatif égo-centré pousse l'équipe GestualScript à contester la légitimité de son utilisation dans un contexte de transcription des productions gestuelles et signées. À ce propos, Boutet (2015) présente les avantages et la pertinence de l'utilisation d'un cadre de référence qui serait à la fois « intrinsèque et multiple » (*ibid* : 116). Expliciter les raisons de ce choix permet de comprendre ce que la notion d'« intrinsèque multiple » recouvre.

Une description égo-centrée (i.e. point de vue du producteur) engendre des pluralités de codage là où il y a similarité de position. Prenons les positions de la main droite de ces trois signes (fig. 2.29) :



Figure 2.29 – Les trois positions de la main droite sont différentes d’un point de vue égocentré, et similaires d’un point de vue intrinsèque (signeur 4 signes 004, 104 et 184)

Selon un codage égocentré classique, la main droite se trouve :

- en haut à droite du locuteur paume vers l’avant pour [BANDEROLE] ;
- à gauche du locuteur avec la paume vers la gauche pour [IL N’Y A PAS] ;
- devant le locuteur avec la paume vers le bas pour [HEURE].

Ce sont trois positions et orientations différentes qui sont données ici.

Or il y a un autre moyen de préciser la position de la main dans l’espace. Il faut pour cela prendre en compte l’ensemble articulaire dont la main n’est que l’extrémité : le membre supérieur. L’intégration de l’avant-bras et du bras dans le codage permet à chaque segment d’être analysé avec précision par rapport à son voisin direct. Pour l’ensemble de ces trois cas, la main droite se trouve en *pronation* par rapport à l’avant-bras. La description de l’avant-bras (par rapport au bras) et du bras (par rapport au tronc) permet ensuite de différencier l’emplacement de ces trois signes.

Nous l’avons vu, décrire la main en termes de DDLs est chose commune en étude biomécanique ou anatomique, mais l’exclusivité de la main comme élément porteur de sens au sein des études linguistiques n’a pas permis l’appropriation de ce type de description qui, pourtant, révèle un point crucial : les différences de placements de la main n’ont de réalité que pour une analyse réduite à la modalité visuelle. Certes, visuellement, la main n’est effectivement jamais dans une même position, mais biomécaniquement, quel que soit le signe, la main entretient la même relation avec l’avant-bras. Cette stabilité biomécanique touche l’ensemble des DDLs. Que ce soit pour l’emplacement ou pour le mouvement, la flexion-extension de la main (fig. 2.30 axe (BB’)) est toujours effectuée dans un plan perpendiculaire à la paume (i.e. plan frontal), alors

que l'abduction-adduction (fig. 2.30 axe (AA')) est toujours réalisée dans le plan de la paume (i.e. plan sagittal).

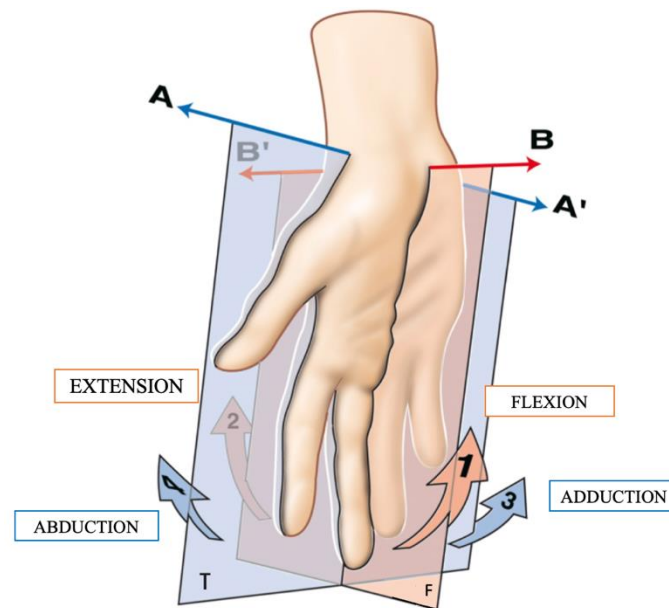


Figure 2.30 – Deux plans sagittal (S, orange) et frontal (F, bleu) sur lesquels se forment deux DDLs, la flexion-extension et l'abduction-adduction de la main (adapté de Kapandji 2018 : 149)

Ce schéma d'analyse peut être appliqué à l'avant-bras par rapport au bras, et au bras par rapport au tronc ; il s'agit donc d'un codage intrinsèque (interne au segment), mais aussi multiple (relatif à chaque segment composant le membre supérieur).

Le deuxième argument soulevé en faveur d'un cadre de référence intrinsèque est le suivant : une description égocentrée de l'orientation et de la configuration mêle en réalité *deux* cadres de référence.

Pour l'orientation, il y a en effet un « passage implicite » (*ibid* : 119) d'un cadre de référence relatif à un cadre de référence intrinsèque puisque le fait même de faire référence à la *paume* revient à utiliser le système de coordonnées propre à la main – la paume étant la face ventrale de la main – et donc d'utiliser un terme qui est intrinsèque au segment. À l'utilisation du terme « paume » sont ajoutés des repères qui se positionnent par rapport aux coordonnées du locuteur (vers le haut, vers le bas, etc.), il s'agit ici bien d'un cadre de référence égocentré.

Pour ce qui est de la position des doigts (poing fermé, main ouverte, *etc.*), il s'agit d'une description entièrement intrinsèque : la main est ouverte ou fermée par rapport à elle-même et non par rapport au corps du locuteur.

Enfin, le dernier argument touche à la transformation des données : il est possible de convertir des données codées selon un cadre de référence intrinsèque en données égocentrées. En

revanche, les spécifications « main en face du locuteur, paume vers l'avant » ne peuvent pas être converties en données intrinsèques, car lacunaires.

Le changement de cadre de référence et la prise en compte du membre supérieur dans sa globalité sont les fondements, élaborés à partir de l'approche kinésiologique de Boutet (2008, 2018), de la création de Typannot (Doan *et al.* 2015).

2.2.2. Typannot : principes et méthodes de construction

Le travail de décomposition des LS en éléments de bas niveau établi par l'équipe GestualScript s'est basé sur des principes de généricité, de bonne lisibilité, de scriptularité facilitée et de modularité (Contesse *et al.* 2022). Pour cela une première visualisation linéaire de l'information décomposée se fait au travers d'un nombre limité de symboles. Une seconde visualisation – qui représente une synthèse de ces symboles – prend une forme corporelle schématisée. Afin de permettre une prise en main aisée des notions biomécaniques que ces choix théoriques recouvrent, une interface de saisie adaptée a été mise au point.

2.2.2.1. Glyphes génériques et composés

Le système Typannot tient compte des paramètres kinésiologiques constituant les LS : la configuration (*Handshape*), la position initiale des membres supérieurs (*LOCini*), le mouvement (*MOV*), et l'expression du visage (*Mouth action* et *Eye action*) (Danet *et al.* 2020). Afin de répondre au premier principe de conception, la généricité, une architecture d'information commune a été développée pour représenter les caractéristiques de tous ces paramètres (fig. 2.31) :

niveau d'information 1 - le paramètre ;

niveau d'information 2 - les parties composant le paramètre ;

niveau d'information 3 - les variables de chacune des parties ;

niveau d'information 4 - les valeurs attribuées à chacune des variables.

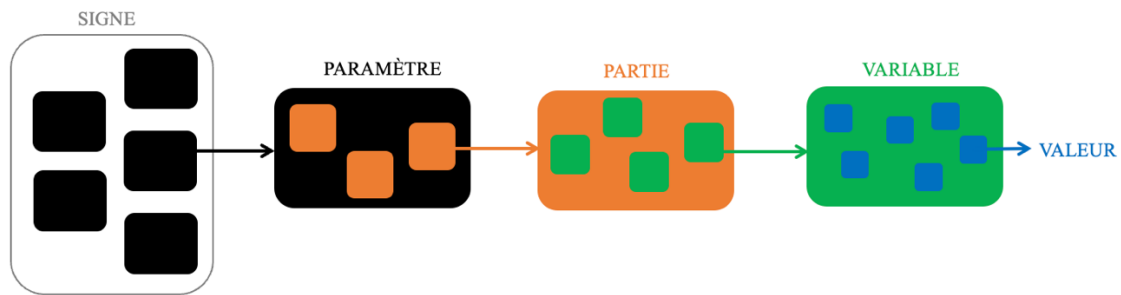


Figure 2.31 – Schématisation des quatre niveaux d'information

Il s'agit d'une décomposition dont la granularité croissante permet l'identification d'un inventaire de traits formels décomposés, et donc de mettre en place une liste de *primitives exhaustives*. Pour la LOCini, les informations individualisées retenues sont celles-ci :

- niveau d'information 1 – LOCini, membre supérieur droit ou membre supérieur gauche ;
- niveau d'information 2 – Bras, avant-bras, main ;
- niveau d'information 3 – Flexion-extension, abduction-adduction, rotation intérieure-extérieure ou prono-supination ;
- niveau d'information 4 – Quatre crans possibles par pôle, et une valeur neutre.

À ces caractères sont ensuite associés des dessins de caractères de premier niveau, des glyphes génériques (tab. 2.2).

Tableau 2.2 – Glyphes génériques de la LOCini²⁶ (traduit à partir de Chevrefils *et al.* 2021)

PARAMÈTRE	PARTIES	VARIABLES	VALEURS
 LOCINI	 GAUCHE DROITE	 BRAS AVANT-BRAS MAIN	 ADDUCTION ABDUCTION EXTENSION FLEXION ROTATION INT/EXT
			 MOINS 1 ZERO PLUS 1 MOINS 2 PLUS 2 MOINS 3 PLUS 3 MOINS 4 PLUS 4

L'identification de la valeur « zéro » se base sur une position « neutre » des segments bien précise (fig. 2.32).

²⁶ La rotation intérieure-extérieure et la prono-supination sont incluses dans un unique glyphe générique.

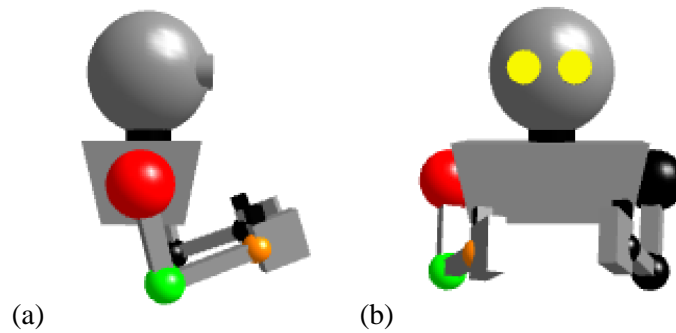


Figure 2.32 – Position de référence choisie selon (a) une vue transversale et (b) une vue frontale

S’il existe déjà une posture anatomique de référence (i.e. le bras est le long du torse, l’avant-bras est relâché le long des hanches et la main est en supination complète), elle n’est pas adéquate à une analyse de productions signées, les mains ne se trouvant pas à l’intérieur de l’espace de signation. Cette nouvelle posture (i.e. le bras en légère flexion le long du torse (15°), l’avant-bras est en flexion (90°) par rapport au bras ainsi qu’en légère rotation interne (20°) et la main n’est ni en pronation, ni en supination) permet d’être au plus proche de celles produites en LS.

Ces glyphes génériques peuvent se combiner dans une formule articulée en une syntaxe précise : il s’agit d’abord de spécifier s’il s’agit du membre gauche ou droit, puis de décrire la position de chaque segment du plus proximal au plus distal, chacun selon ses DDLs²⁷ (fig. 2.33).



(a) Formule graphématique :

LOCini droit ArmAbd1 ArmFlex0 ForRint1 ForFlex2 ManuPron4 ManuExt2 ManuAbd0

(b) Formule composée de glyphes génériques :



Figure 2.33 – Exemple de formule graphématique concernant le paramètre LOCini du membre droit : derrière chaque glyphe se trouve l’information contenue dans la formule graphématique écrite en caractères latins

Si ce système offre une bonne généralité et modularité des données, la question de leur lisibilité se pose néanmoins. La formule composée de glyphes génériques retranscrit fidèlement, mais

²⁷ Les termes utilisés sont en anglais et contractés, suivant les choix faits par l’équipe de recherche.

de manière abstraite les paramètres. Il est pourtant primordial de préserver la corporalité, la matérialité dans lesquelles les LS trouvent leurs racines, et de permettre au transcritteur de retrouver visuellement le signe ou le geste qu'il analyse. Pour cela, Typannot permet une ligature des glyphes génériques (suivant le même mécanisme que l'assemblage automatique du o et du e pour former le glyphe œ), ce qui nécessite un travail de recherche en design typographique. Une fois la formule finalisée, il est en effet possible de concaténer entièrement les informations et de les représenter comme dans la figure 2.34 :

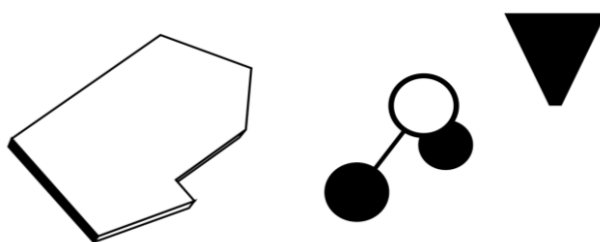


Figure 2.34 – Formule composée concernant le paramètre de la LOCini (voir détails dans le texte)

La main est représentée à gauche, en gros plan afin de montrer son orientation. Ici, la face blanche représente la paume de la main. À droite se trouve la structure générale du membre supérieur dominant. La tête est représentée par le triangle noir et les trois ronds représentent les trois articulations (l'épaule pour le rond plein, le coude pour le rond plein associé par un trait au rond blanc, qui symbolise la main). Il s'agit de la LOCini du membre supérieur droit du signeur en version synthétique et recomposée de celle réalisée et décrite en fig. 2.33. La forme est alors de nouveau identifiable, le corps est retrouvé (fig. 2.35).



Figure 2.35 – Superposition du corps du signeur et de la transcription sous forme de glyphe composé Typannot

Avec Typannot il est donc possible de transcrire selon deux affichages grâce aux deux modes de représentation graphique : une forme générique, pour le niveau analytique, et une forme dite composée, proposant une forme représentationnelle. On touche ici à la scriptibilité de Typannot : rendre les requêtes informatiques réalisables n'est possible que parce qu'à l'intérieur de chaque représentation synthétique est implantée la formule graphématique ainsi que les glyphes correspondants, récapitulant les traits pertinents du signe.

De plus, cela permet pour le chercheur d'appréhender une nouvelle manière de transcrire : il peut désormais tester, expérimenter, interroger ses transcriptions avec son propre corps.

“Through the intrinsic perspective of the articulatory models and a typographic system that combines phonographic and logographic dimensions, GestualScript believes that annotators can develop an intuitive bond with their transcription, not by describing “what SL looks like” but by recognizing “how SL happens” and describing it from the inside.” (Danet *et al.* 2020 : 823)

« Grâce à la perspective intrinsèque des modèles articulatoires et à un système typographique qui combine les dimensions phonographiques et logographiques, GestualScript pense que les annotateurs peuvent développer un lien intuitif avec leur transcription, non pas en décrivant "à quoi ressemble la LS", mais en reconnaissant "comment la LS se produit" et en la décrivant de l'intérieur. » (Traduction personnelle, Danet *et al.* 2020 : 823)

Le travail de transcription pourra alors mener à des interactions entre le corpus des données et le transcripneur, dont le corps sera engagé et mis à contribution.

Pour que tout cela soit possible, il reste encore à mettre au point des interfaces de saisie adéquates, permettant d’apprivoiser de manière efficace le système Typannot et les principes de phonologie articulaire qu’il sous-tend.

2.2.2.2. Perspectives du projet Typannot : le clavier virtuel

Pour répondre à des contextes d’utilisation divers et réduire la difficulté que peut représenter la logique du modèle articulatoire, l’équipe GestualScript a développé un clavier virtuel propre à Typannot. Le « Typannot Keyboard » propose pour chaque paramètre trois types d’interfaces de saisie : une interface paramétrique, une interface gestuelle et une interface par composante²⁸. L’interface paramétrique (fig. 2.36) permet de gérer manuellement les quatre niveaux d’information (paramètre, parties, variables, valeurs). À travers une série de curseurs, il suffit d’attribuer à chaque DDL de chaque segment un cran (compris entre -4 et +4). L’affichage dynamique du glyphe composé et des glyphes génériques permet de visualiser de manière synchrone la résultante des différents crans combinés. Les deux membres supérieurs peuvent être annotés en dégrisant la partie droite de l’interface. Enfin, l'utilisateur peut exporter le glyphe spécifique ou la formule de glyphes génériques dans des logiciels de traitement de texte (Word, TextEdit), de calcul (OpenOffice, EXCEL) ou encore d’annotations (ELAN).

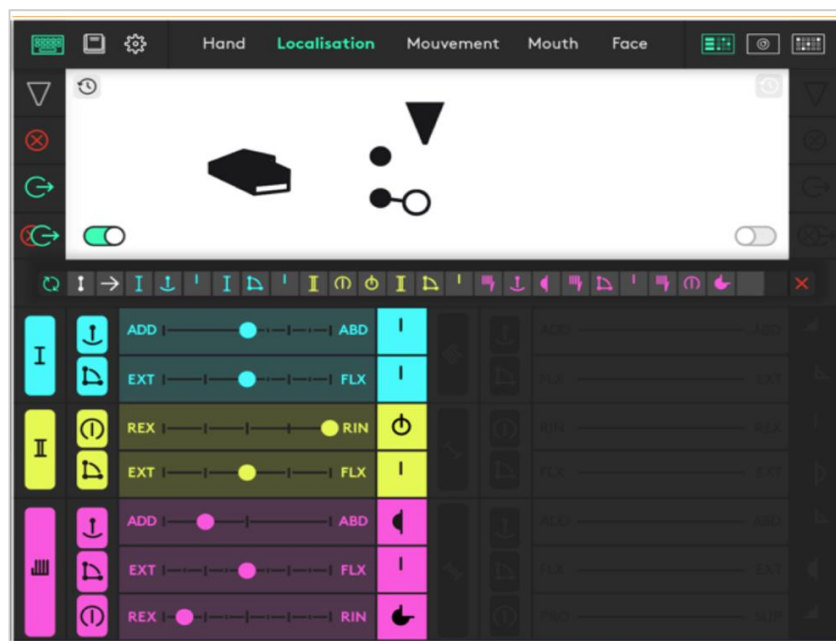


Figure 2.36 – Interface paramétrique (Chevrefils *et al.* 2021)

²⁸ L’interface par composante (*Component Interface*) n’a pas encore été développée.

L'interface paramétrique permet ainsi de comprendre intuitivement les principes du modèle kinésiologique ainsi que de respecter la syntaxe de la formule graphématique. Elle constitue de plus un instrument offrant la possibilité au transcripteur de vérifier que ce qu'il a transcrit avec Typannot correspond effectivement à ses attentes ou à son corpus.

L'interface gestuelle doit être couplée avec un système de capture de mouvement. Cette interface n'est pas encore pleinement développée, seule la version prototypique pour le paramètre de la configuration a été testée (fig. 2.37). Au lieu de paramétrer manuellement chaque niveau d'information comme le requiert l'interface précédente, la main du scripteur est placée au-dessus du capteur et réalise la configuration souhaitée. Une représentation simultanée de la main (écran de gauche) permet de vérifier la qualité de la capture. Un développement informatique permet d'y associer le glyphe correspondant (écran de droite). Des configurations ressemblantes, proches formellement de celle réalisée, sont proposées au transcripteur. Enfin, tout comme avec l'interface précédente, il est possible d'exporter les informations saisies.

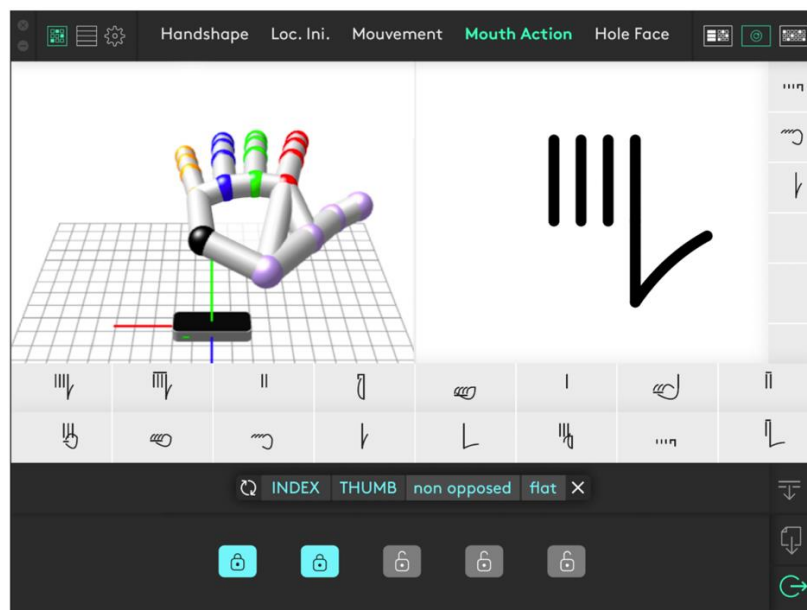


Figure 2.37 – Interface gestuelle pour le paramètre de la configuration (Danet *et al.* 2020 : 1026)

Chaque paramètre requiert un système de MoCap particulier (partie 3.2). Il s'agit de la *Kinect* pour la LOCini, du *Perception Neuron* pour le MOUV, d'*OpenFace* pour EyesAction et de nouveau de la *Kinect* pour les MouthAction. Les systèmes de MoCap choisis pourront évoluer en fonction des dernières évolutions technologiques. L'important est que le système soit portable, qu'il ne soit pas invasif pour la personne captée, que la prise en main par le chercheur soit aisée et que son coût soit raisonnable. Passer par le geste pour l'annotation permet, d'une

part, de garder un enregistrement électronique sous forme de signal exploitable par la suite d'une manière ou d'une autre (digitalisation de l'information) et, d'autre part, d'être plus près du corpus jusque dans sa modalité de production. Le scripteur pourra saisir doublement l'objet étudié : par les données discrètes et phonologiques qui lui sont proposées et par l'expérimentation directe à travers son visage et son corps.

Cette interface gestuelle apporte aussi un début de réponse au problème général du temps de transcription des corpus de LS. Crasborn estime que le facteur temps augmente de 200% par rapport au temps réel pour gloser un corpus (2015 : 80), il faudrait encore multiplier ce résultat pour estimer le temps nécessaire à un travail de transcription. Coupler la transcription à de la capture de mouvement permet la constitution de corpus transcrits à la fois plus abondants et plus longs.

L'interface principale du clavier virtuel ne permet aujourd'hui de sélectionner que quatre des cinq paramètres. Le paramètre du mouvement est encore au stade d'inventaire des unités distinctives mené dans la recherche de Boutet (2018) qui est exposée ci-après.

2.2.3. Caractéristiques compositionnelles du mouvement

Le corps n'est ici pas considéré comme étant assujéti à des formes prédéterminées : il est le milieu dans lequel les formes se constituent, s'articulent et se transforment pour acquérir un sens. Pour en rendre compte, le cadre général de notion de mouvement s'est ouvert à la notion de flux, de portée segmentale, ainsi que d'emprise. Les informations concernant l'amplitude et l'aspect perceptuel de la forme, compléter la description.²⁹

2.2.3.1. Flux, emprise et portée

Le cadre permet une description kinésiologique détaillant la structure générale du mouvement. Il contient les informations concernant le flux (section 1.3.2), la portée du mouvement et son emprise.

Pour rappel, le flux détermine l'ordre dans lequel les segments se mettent en mouvement. Il y a trois situations possibles :

- Le flux est disto-proximal lorsqu'un segment distal tel que la main initie un mouvement qui remonte vers le bras.
- Le flux est proximo-distal si à l'inverse un segment proximal débute un mouvement qui remonte ensuite vers la main.

²⁹ Nous ne faisons que les présenter succinctement ces notions, voir Boutet 2018 pour plus de détails.

- Il n'y a pas de flux lorsqu'un seul segment porte le mouvement.

La portée précise la distance maximale atteinte entre le premier et le dernier segment en mouvement. La portée permet donc de poser les bornes du flux, là où il commence et là où il s'arrête. Enfin, la notion d'emprise permet de préciser les segments qui sont *réellement affectés* par le mouvement à l'intérieur de la portée.

Ces trois composantes, regroupées dans le cadre structurel du mouvement, contiennent donc les données de direction interne du mouvement (flux du mouvement), du nombre de segments inclus dans le mouvement (portée du transfert) et des segments participant activement au mouvement (emprise du transfert).

2.2.3.2. Impulsion et amplitude

La description des segments concernés par le mouvement étant faite, il s'agit désormais de décrire l'impulsion, à partir du ou des pôles des DDLs en mouvement et de leurs amplitudes.

La transcription de l'amplitude suppose deux choses : la connaissance préalable de la LOCini ainsi que l'amplitude maximale du DDL concerné. En effet, un mouvement de flexion de 30° peut suffire à amener ce pôle à sa butée articulaire si le segment était déjà en flexion ou si l'amplitude maximum du DDL est faible (comme c'est le cas pour la main). Au contraire, un mouvement de 60° peut être réalisé sans atteindre la butée articulaire. C'est la raison pour laquelle, au sein de Typannot, il a été décidé de ne pas utiliser les degrés (°) comme unité de mesure de position angulaire, mais de distinguer plusieurs classes d'amplitude. L'ensemble des possibilités est regroupé en cinq sections distinctes :

- 1) le mouvement est totalement transféré sur un autre segment ;
- 2) le mouvement se poursuit jusqu'à la butée articulaire ;
- 3) le mouvement franchit la position de référence ;
- 4) le mouvement accentue la position initiale du segment ;
- 5) le mouvement est inverse à la position du segment, mais celui-ci ne passe pas la position de référence.

Un même mouvement peut être composé de plusieurs de ces amplitudes concernant plusieurs segments.

2.2.3.3. Figures perspectives et dynamique

Les figures perspectives et leurs dynamiques touchent à l'aspect perceptif du mouvement, résultante des analyses et descriptions des catégories précédentes. Ces critères visuels, qui

complètent la structure formelle, sont composés des figures perspectives, de la dynamique, de la répétition et de la symétrie.

Les figures perspectives touchent à la forme générale que prend le mouvement. Ces formes peuvent relever de :

- figures morphocinétiques telles qu'une droite, un arc, une ellipse (Lefebvre-Albaret 2010 : 137). Ces éléments sont combinables ou peuvent relever d'une forme complexe, ne correspondant à aucune de ces terminologies. ;
- figures topocinétiques qui ont des visées internes ou une dépendance au monde extérieur tel que le pointage ;
- figures non cinétiques, sans changement par rapport à la LOCini, mais qui présentent une tension musculaire (statique).

La dynamique est composée de trois critères :

- la temporalité interne. Cette temporalité est liée aux flux. Si plusieurs flux ont été repérés dans un signe, il est nécessaire de qualifier leur relation qui peut être retardée, anticipée ou saccadée ;
- la durée générale du signe peut être conforme à une durée moyenne, prolongée (plus longue par rapport à la norme) ou écourtée (plus courte par rapport à la norme) ;
- Le type de mouvement peut être antagoniste (contrôlé) ou balistique (projeté) (Johnson & Liddell 2010, Sandler 2012).

Enfin, il est nécessaire de spécifier les informations concernant la répétition dans le cas où un mouvement est répété et celles concernant la symétrie, lorsque les deux membres composent le signe. Pour la répétition, le nombre d'itérations est spécifié et l'on note si l'amplitude se réduit, si elle augmente ou si elle demeure stable. Pour les signes bimanuels, il est nécessaire de décrire le lien qu'entretiennent les mouvements des deux membres supérieurs en prenant en compte les règles de symétrie (Battison 1974).

BILAN DU CHAPITRE 2

La dimension graphique du corps, objet observable et palpable, a poussé les systèmes graphiques des LS – qu'ils soient à but communicatif ou analytique – à s'inscrire dans une tradition dominée par la perspective visuo-spatiale. Mais ce choix, bien qu'instinctif, réduit la représentation du mouvement à ce que l'œil en perçoit : une trajectoire déployée par la main dans l'espace. S'extraire de cette tradition pour utiliser un cadre intrinsèque au corps, comme cela a été observé au sein des systèmes graphiques dédiés à la danse, permet au système de transcription Typannot de décrire le mouvement selon son processus (i.e. les transformations de segments corporels), et non seulement selon le résultat de ce processus (i.e. les trajectoires). En plus d'être pertinente pour notre recherche touchant à la structuration interne de signes, la démarche portée par Typannot démontre qu'une certaine recherche d'objectivation de l'analyse du mouvement est en cours au sein des études des LS. La pertinence de la prise en main d'instruments technologiques permettant d'obtenir des données quantitatives du mouvement est alors à questionner.

CHAPITRE 3. TECHNOLOGIE EN MOUVEMENT

La dynamique d'un segment peut être définie par sa trajectoire, sa vitesse, son accélération, mais aussi par sa rotation autour de l'axe d'un segment qui lui est adjacent. Décrire ces caractéristiques participe à la retranscription fidèle d'un mouvement ; c'est ce que proposent les techniques d'imagerie numérique, appelées capture de mouvement (MoCap). Fonctionnant sur le principe de la trigonométrie, celles-ci permettent d'enregistrer avec finesse et exactitude les mouvements déployés et de transposer en données chiffrées les rotations qui les composent. Il existe différents modèles de MoCap, dont le mode de fonctionnement et la fréquence d'acquisition sont autant de critères à prendre en compte selon le type d'application souhaité. Si ces technologies sont abondamment utilisées pour la mesure biomécanique lors d'activités physiques, leur usage est moins répandu dans le cadre d'analyses linguistiques des LS. Or les données quantitatives livrées par la MoCap, qui sont d'ordre mécanique et non fonctionnel, peuvent s'avérer cruciales pour une approche des LS qui prend en compte le corps dans ses fonctionnements articulaires.

3.1. Évolution des outils de capture du mouvement

Le mouvement est un phénomène dont la manifestation n'est perceptible que temporairement. Cet aspect intrinsèquement fugace rend complexe sa lisibilité et empêche sa pleine appréhension. Pour pallier cette difficulté, il a été nécessaire de mettre en place des dispositifs techniques adaptés, de la mise au point de la chronophotographie ayant permis, au XIX^e siècle, de rendre pérenne la trajectoire du mouvement, jusqu'au développement récent de la MoCap ayant rendu les composantes du mouvement mathématiquement modélisables, et donc manipulables.

3.1.1. À la conquête du mouvement

La photographie, que l'on doit aux travaux de Niépce, Daguerre et Talbot durant la première moitié du XIX^e siècle, propose une représentation objectivante, bien que fixe, de la réalité. Son perfectionnement autorisant la multiplication de prises de vue instantanées permettra bientôt de recomposer le mouvement. L'observation lacunaire du mouvement laisse alors la place à l'analyse de données pérennes et quantifiables. Le rapport au mouvement se trouve modifié par

la technique et un nouveau type d'appropriation du phénomène se développe : le mouvement est désormais considéré comme un objet d'étude indépendant.

3.1.1.1. Objectivité de l'appareil photographique

Si le Moyen-Âge voit germer les prémices d'une représentation en trois dimensions de volumes architecturaux (Giotto, *Annonciation à Sainte-Anne*, vers 1304), c'est à la Renaissance – le *Primo Quattrocento* italien – que se développent des techniques précises de mesures des perspectives. L'invention de la perspective linéaire organisée autour d'un ou de plusieurs points de fuite vers lesquels convergent les lignes est généralement attribuée à l'architecte Brunelleschi et à sa représentation fidèle du baptistère de Florence dans un petit tableau peint vers 1415. La perspective linéaire sera théorisée en 1435 par un élève de Brunelleschi, le mathématicien humaniste Alberti. Puissant vecteur de structuration de l'image, les préceptes de la perspective linéaire permettent aux artistes de creuser l'espace de leurs œuvres et suscitent une véritable illusion de profondeur (Veneziano, *Annonciation*, vers 1445). Ses principes suivent de près celle de la vision humaine : plus un objet est proche, plus il est de taille considérable, et *vice versa*. Le désir de retrouver au plus près l'image telle qu'elle est perçue par l'œil est alors manifeste et l'utilisation de la chambre noire (*camera oscura*) par les peintres participe à sa matérialisation. Cet instrument optique s'apparente à une pièce ou à une boîte opaque munie d'un orifice permettant à quelques rayons de lumière de la traverser. Il suffit de reporter manuellement la projection imagée, plane, sur une feuille de papier ou sur une toile afin d'obtenir un rendu perspectif de l'espace. Et s'il était finalement possible d'outrepasser cette phase de reproduction et de pérenniser la projection dès qu'elle apparaît sur la paroi de la chambre ? Niépce, physicien et inventeur, entreprend en 1816 des recherches sur la fixation des images de la *camera obscura*, puis Daguerre met au point un procédé de reproduction d'une image positive et unique sur une plaque de cuivre polie et recouverte d'argent (fig. 3.1).



Figure 3.1 – Daguerre, *Boulevard du Temple*, 1838

Sur cette image prise de la fenêtre de l'atelier de Daguerre, aux abords de l'actuelle place de la République à Paris, les mouvements trop fugaces des passants demeurent invisibles : les vingt à trente minutes d'exposition nécessaires laissent un boulevard du Temple vide en pleine matinée d'été³⁰. À ses débuts, la daguerréotypie ne cherche pas à reproduire le mouvement de foule des grandes rues parce que, techniquement, elle ne le permet pas encore, mais aussi parce qu'à l'orée de son développement, elle cherche d'abord à produire une vision exacte de l'espace urbain sans la partialité propre à une intervention de main humaine, autrement dit sans le point de vue subjectif de l'artiste peintre ou graveur. Cet exercice, qui s'attache à représenter l'espace sur un plan, se poursuit avec la photographie sur papier à partir d'un négatif, le calotype (1841), mise au point par Talbot. Dès lors, les perfectionnements nombreux et rapides apportés à l'appareil photographique tout comme la maîtrise croissante des propriétés chimiques des substances employées mèneront la photographie de la quête de la reproduction de l'objet statique à celle de l'objet en mouvement ; de la capture figée de la posture à la capture du mouvement.

³⁰ Deux silhouettes sont tout de même perceptibles sur ce daguerréotype : un cireur de chaussures et son client.

3.1.1.2. Rendre perceptible l'invisible

Afin d'illustrer sa thèse sur le mécanisme de la vision, le physicien et mathématicien Plateau, conçoit le phénakistiscope (1832), un appareil comportant un disque de carton percé d'autant de fentes qu'il est orné de lithographies. Ces images reconstituent les phases distinctes d'un même mouvement comme le saut d'un animal. Une fois le disque lancé en un mouvement rotatif, l'œil perçoit une unique image animée par un mouvement continu. Le « jouet optique » inventé par Plateau élucide un phénomène déjà théorisé auparavant par Roget en 1824, celui de la *persistance rétinienne* : lorsque plusieurs représentations d'un même objet variant légèrement de position se dévoilent successivement à l'œil pendant des intervalles courts ($1/25^e$ de seconde ou moins), les images qui se posent sur la rétine se lient entre elles et recomposent le mouvement. La connaissance du phénomène de la persistance rétinienne permettant de percevoir un stimulus discontinu comme continu révèle qu'au-delà d'une certaine brièveté d'apparition et/ou d'une certaine fréquence d'apparition d'un évènement, les objets ne sont pas perçus, mais plutôt recomposés. Cela permet d'établir aussi un lien entre le statique et le dynamique.

Ces réflexions intéressent Marey qui crée le fusil chronophotographique, dont le brevet est déposé en 1890 : une caméra électrique est montée sur un véritable fusil dans lequel la chambre initialement destinée aux cartouches a été remplacée par un obturateur bloquant la lumière ; le viseur est remplacé par un rouleau de pellicule flexible enroulé autour d'un cylindre. Le fait de pouvoir prendre plusieurs photographies à la fois, en l'occurrence douze par seconde sur une même pellicule, marque un tournant important dans l'analyse du mouvement : ces photographies prises en rafales transforment la *notation* du mouvement en *capture* du mouvement et permettent de donner une rigueur toute nouvelle à la mesure. L'analyse scientifique peut alors se détacher en grande partie de la description verbale faite de l'objet observé et du poids de la subjectivité que cela entraîne. Cette méthode rudimentaire, mais astucieuse de capture du mouvement, appelée « chronophotographie géométrique », minimise les interférences entre l'expérimentateur et son objet. Les premières études quantitatives sur l'étude de la motricité humaine sont désormais possibles (Teston 2004) (fig. 3.2).

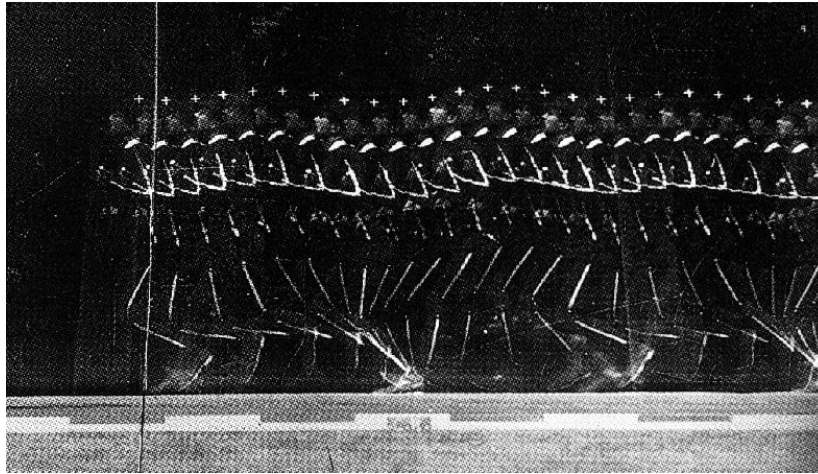


Figure 3.2 – Chronophotographie géométrique de 24 images sur plaque fixe, d'un homme en train de courir (1886). Le sujet porte des vêtements noirs ornés de bandes blanches matérialisant les segments du corps humain

Cette technique imprègne d'ailleurs la recherche des LS. C'est effectivement en se basant sur une analyse chronophotographique des signes de l'ASL que Liddell & Johnson mettent en place leur modèle descriptif « *Hold and Movement* » (1989, 2011). Seule une représentation du signe décomposé en une succession d'images (§1.1.3.1) permet de repérer les phases de suspension du mouvement communes à l'ensemble des paramètres manuels et non manuels des signes.

3.1.1.3. Individualiser le mouvement

Que se passerait-il si, de notre vision de l'environnement, seule la perception du mouvement nous demeurerait accessible ? C'est l'expérience de psychologie expérimentale qu'a menée Johansson (1973) en mettant en place un programme de recherche sur la perception visuelle des mouvements de locomotions chez l'homme (mouvements biologiques). Afin de disjoindre les informations de mouvements des autres indices visuels habituels, Johansson élabore la technique du « *pointing light display* » (PLD). Le PLD a d'abord pris la forme d'un enregistrement réalisé dans le noir complet : un sujet habillé d'une combinaison monochrome porte des ampoules de poche sur ses différentes articulations. Mais l'installation filaire nécessaire est jugée trop encombrante, la réalisation suit alors le processus inverse. Le participant, placé sous des projecteurs, est inondé de lumière et les ampoules filaires sont remplacées par des diodes réfléchissantes (fig. 3.3). L'enregistreur vidéo capte le mouvement des articulations des épaules, des coudes, des poignets, de la hanche, des genoux et des chevilles par l'intermédiaire de ces diodes. Le sujet effectue des exercices simples de marche et de course.



Figure 3.3 – Schématisation de la technique du *pointing light display* (Johansson 1973 : 202)

Ces enregistrements – dont l’aspect n’est pas sans rappeler le principe de chronophotographie géométrique à ceci près que chez Marey, les traits représentent les segments, ici les points représentent la jonction de ces segments, à savoir les articulations – sont présentés à un public test. Les résultats de leurs analyses sont alors probants : la visualisation d’indices minimes de mouvement est suffisante pour reconnaître les actions de marche et de course humaine. Cette reconnaissance est quasiment instantanée, car même avec une visualisation écourtée à 100 ms, ces séquences animées sont reconnues pour ce qu’elles sont. Si l’absence totale d’indice de forme ne pose aucun problème de reconnaissance, la nature dynamique de l’affichage est, elle, primordiale : la présentation statique de ces points ne permet plus aucune association à une forme humaine. La conclusion ne fait aucun doute : « [p]ercevoir une personne qui marche en se basant sur les mouvements de ces 10 points semble être tout aussi évident et naturel que de voir un véritable homme marcher dans un film³¹ », mais « lorsque le mouvement est arrêté, l’ensemble des éléments n’est jamais interprété comme représentant un corps humain³². » (Johansson 1973 : 203). Ce sont les mouvements pendulaires produits par les segments qui sont hiérarchiquement organisés et reconnus comme des mouvements biologiques. Cela pose la question plus globale de la nature de l’information portée par le mouvement et ouvre la voie à de nombreux approfondissements ainsi qu’à des expérimentations exploratoires dans divers domaines de recherche. Par exemple, Kozlowski & Cutting (1977) affinent le degré de reconnaissance du mouvement biologique possiblement atteignable par la technique du PLD et

³¹ “Perceiving a walking person in the motions of these 10 spots seems to be equally as self-evident and natural as seeing a real man walking in a motion picture.”

³² “[...] when the motion is stopped, the set of elements is never interpreted as representing a human body.” (Johansson 1973: 203)

découvrent qu'il est suffisant pour reconnaître sa propre démarche, identifier des individus, ou encore déterminer le genre du sujet marchant. Sumi [1984] reproduit aussi les expériences de Johansson, à la différence qu'une fois les enregistrements présentés à un public test, les vidéos sont inversées temporellement. Bien que le mouvement soit qualifié d'« étrange », la majorité des individus l'identifie comme étant issu d'un mouvement biologique humain. Il sera aussi montré par Dittrich *et al.* (1996) qu'il est possible de distinguer une démarche fatiguée (plus lente et relâchée), d'une démarche nerveuse (plus rapide et contractée). L'expérience directe de ces recherches peut se faire par l'intermédiaire d'un logiciel mis en place par Troje (2002), chercheur au sein du laboratoire *BioMotion Lab*. Ce programme (accessible [ici](#)) présente une animation sous forme d'un avatar dont il est possible de modifier des classificateurs tels que la masse corporelle et le genre, mais aussi l'état psychologique et l'humeur. La visualisation des changements de positions et de dynamiques de ces points – au gré du déplacement des curseurs à gauche de l'avatar – permet à l'utilisateur d'appréhender et d'évaluer ses propres perceptions sur les variations de la marche induites par des changements de caractéristiques corporelles ou d'humeur.

La technique du PLD a aussi été utilisée afin d'affiner notre connaissance de la perception des éléments dynamiques en LS. Poizner *et al.* (1981) mettent en place un protocole composé d'expériences psycholinguistiques et linguistiques. Un répertoire de 84 signes en ASL est d'abord enregistré à partir de deux caméras afin de pallier la visualisation plane d'un enregistrement vidéo et de gagner en profondeur. Le même répertoire de 84 signes est ensuite enregistré sous la forme d'un PLD par des signeurs affublés de marqueurs luminescents placés au niveau de la tête, de la colonne vertébrale, des épaules, des coudes, des poignets et du bout de l'index de la main dominante. Afin d'évaluer la pertinence des informations dynamiques contenues dans le mouvement des signes, ces enregistrements sont ensuite présentés à des participants. Ceux-ci parviennent à recomposer correctement les paires de signes dans 81,4 % des cas. Une deuxième expérience, semblable à la première, se concentre sur les mouvements d'inflexion (fig. 3.4) d'un même signe.



(a) [LOOK-AT]^{ponctuel} (b) [LOOK-AT]^{continu} (c) [LOOK-AT]^{itératif}

Figure 3.4 – Illustrations de la morphologie d’inflexion en ASL du signe [LOOK-AT] ([REGARDER]) (Poizner *et al.* 1981 : 435)

Prendre appui sur différents types d’inflexions d’un même signe permet de modifier la forme du mouvement du verbe de base sans en modifier la configuration. Le taux de bonnes réponses atteint alors 93%. Aussi probants que soient ces résultats, cela ne signifie pas - comme le rappellent d’ailleurs Tarter & Fisher (1982) - que le paramètre du mouvement suffit à lui seul à l’identification systématique d’un signe. Mais même si la perception des configurations, des expressions du visage et du regard est nécessaire, ces études permettent de mettre en valeur la place centrale que le mouvement et la structuration spatiale occupent dans la transmission de l’information : le paramètre du mouvement porte bien des caractéristiques langagières.

Le développement de la technique du PLD permet de démontrer l’indépendance de la perception du mouvement, réduit à une fragmentation de points successifs, comme source d’informations. Il s’agit désormais, pour aller au-delà de l’externalité que proposent ces analyses, d’élaborer des systèmes permettant une décomposition *intrinsèque* du mouvement. C’est ce que proposent les systèmes de MoCap dont nous allons présenter le fonctionnement pour l’analyse cinématique articulaire.

3.1.2. Bases théoriques de la cinématique articulaire

Pour comprendre la structure générale des systèmes de MoCap, il est nécessaire d’en saisir les mécanismes internes. Afin d’obtenir des données de mouvements du corps indépendants des forces qui les produisent (Watkins 2017), les systèmes de MoCap caractérisent les translations et les rotations des segments comme des positions successives de plusieurs points dans l’espace selon une fréquence d’enregistrement définie. Ces paramètres peuvent être décrits de différentes façons selon le référentiel auquel le marqueur est lié.

Dans cette discipline de la biomécanique qu’est la cinématique, les segments du squelette sont considérés comme des solides indéformables – leurs dimensions restent inchangées au cours du temps – et sont rigidement liés les uns aux autres : le squelette est alors un corps décomposé en une chaîne de solides, les segments, et de liaisons, les articulations.

La chaîne de solides que constitue le corps peut se déplacer dans un espace à six dimensions par des mouvements effectués sur trois axes de translations, engendrant des déplacements linéaires, et sur trois axes de rotation, occasionnant des déplacements angulaires (fig. 3.5). Malgré cela, les principales méthodes de représentation du mouvement considèrent les translations articulaires (supérieur/inférieur, latéral/médial, antérieur/postérieur) comme négligeables. À l'exception donc des déplacements qui ne sont composés que de translations pures, le mouvement relatif entre deux segments corporels peut se décrire par des rotations (roulis, tangage, lacet³³) autour d'un point commun aux deux segments, l'articulation.

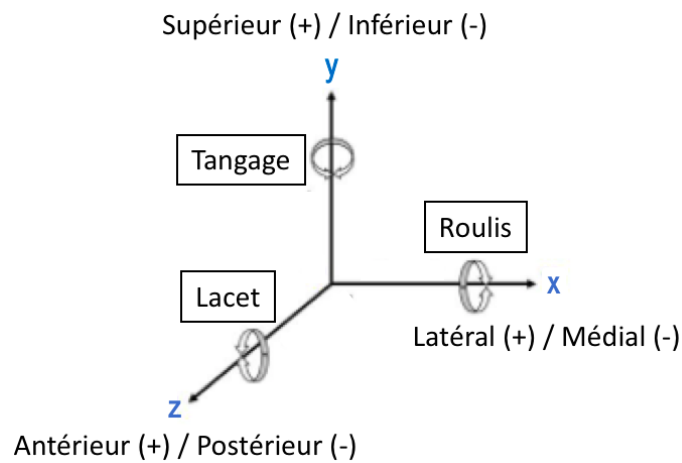


Figure 3.5 – Espace à six dimensions composé de trois axes de translation et trois axes de rotation

Chaque solide a donc des possibilités de mouvements rotatifs s'articulant autour de la liaison à laquelle il est attaché. Selon le théorème de rotation d'Euler – qui stipule que toute rotation, ou séquence de rotations, d'un corps rigide dans un espace à trois dimensions équivaut à une rotation pure autour d'un seul axe –, il est possible de formaliser géométriquement une rotation comme ceci (fig. 3.6).

³³ À ces termes sont associés des synonymes : précession (lacet), nutation (roulis) et rotation propre (tangage). Par souci d'homogénéité, seuls les termes cités dans le corps du texte seront utilisés au cours de ce manuscrit.

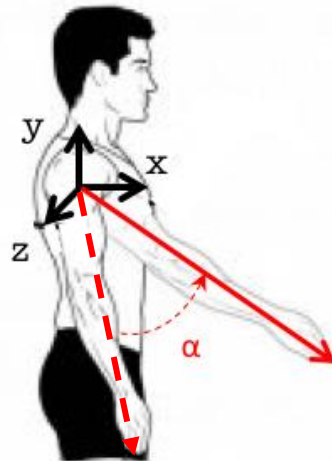


Figure 3.6 – Formalisation d’une rotation, en l’occurrence d’une flexion du bras³⁴

Afin de caractériser les différentes rotations effectuées par le corps dans l’espace, il est alors nécessaire de 1) lui associer un référentiel à trois axes (comme c’est le cas ci-dessus) et de 2) le définir par rapport à un autre référentiel qui, lui, est considéré comme fixe. On parle de paramétrage *absolu* quand ce repère fixe est lié à l’environnement et de paramétrage *relatif* lorsque le repère fixe est lié à un solide (par exemple un autre segment ou un élément extérieur au corps) (Chèze 2014).

Dans le premier cas, la description de l’orientation du segment avant-bras (en jaune sur la fig. 3.7) dépendra de tous les paramètres – translations et rotations – de la chaîne cinématique depuis le référentiel R_0 jusqu’au référentiel R_4 , en passant par les intermédiaires R_1 (repère assigné à la hanche, pouvant être considéré comme segment racine du corps), R_2 pour la colonne vertébrale (qui peut être subdivisée en plusieurs repères) et R_3 pour le bras. Il est alors question, pour la structure distale qu’est l’avant-bras, d’une dépendance à la configuration des segments sous-jacents qui est directement liée à la coordination des segments d’un même membre (coordination de proche en proche).

³⁴ La rotation s’effectue ici pour le reste de ce manuscrit dans le sens prescrit par la règle de la main droite (l’axe x étant représenté par le pouce, l’axe y par l’index et l’axe z par le majeur).

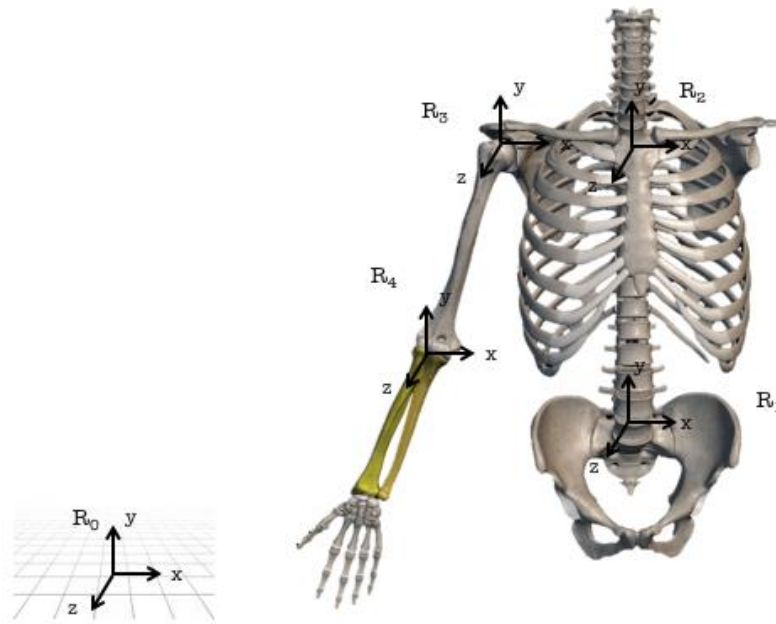


Figure 3.7 – Cadre de référence fixe relatif

Dans le cas d'un paramétrage relatif, le repère caractérisant le mouvement du segment R4 sera le référentiel R3, c'est-à-dire celui lié au segment qui lui est directement proximal. Pour obtenir l'orientation 3D de l'avant-bras, il faut calculer les paramètres caractérisant le déplacement du référentiel R4 par rapport à R3, soit de l'avant-bras par rapport au bras. Pour y parvenir, les systèmes de MoCap peuvent contenir des modèles anthropométriques, des modélisations représentant le corps humain. Dans ces modèles sont définis le nombre de segments composant le sujet – soit 14 – et les repères anatomiques qui permettent de les délimiter, pour le bras, il s'agit de l'épaule et du coude. Ces repères anatomiques ainsi que les indices de taille et de masse totales de l'individu permettent de définir 1) la longueur de chaque segment (en mesurant l'espace entre deux repères), 2) la masse des segments (pourcentage de la masse totale de l'individu), et 3) la position du centre d'inertie des segments (pourcentage de la longueur du segment à partir de l'articulation proximale et distale). Tout cela est déterminé par des tableaux anthropométriques, comme celui de Winter (1990) dans lesquels sont calculées des moyennes proportionnelles entre les segments et les membres du corps humain.

La présence d'un modèle anthropométrique permet de savoir quel segment est adjacent à tel autre et donc, dans le cadre de capteurs de mouvement optiques (section 3.2.2) ou à marqueurs embarqués (section 3.2.3) quel marqueur doit se référer à tel autre. L'enjeu pour le capteur de

mouvement est donc de parvenir à calculer 1) la position de chaque segment qui varie en fonction du temps et 2) la position de chaque segment par rapport à un autre segment³⁵.

Faisons désormais un tour d'horizon des différentes familles de MoCap disponibles sur le marché en nous basant sur leurs caractéristiques spécifiques ainsi que leurs applications.

3.2. Descriptif des systèmes de capture du mouvement

Moeslund (2001) recense quatre caractéristiques relatives aux capteurs de mouvement : l'initialisation, le suivi, l'estimation de la pose et la reconnaissance. L'initialisation recouvre la phase de mise en place générale qui constitue un modèle de suivi permettant de catégoriser les mouvements enregistrés sur une structuration cinématique. Le suivi comprend l'étape de préparation à l'enregistrement en distinguant la figure du fond et en élaborant une correspondance temporelle. Enfin, une étape de post-traitement est nécessaire, celle de la reconnaissance, soit l'identification des actions effectuées par le sujet. Tous les systèmes de MoCap ne répondent pas à ces exigences de la même manière. Nous allons passer en revue différentes technologies mises en œuvre dans trois principales familles de *MoCap* – les systèmes sans marqueur, les systèmes à capteurs optiques passifs et actifs ainsi que les systèmes à marqueurs embarqués – complétée d'une introduction aux recherches scientifiques réalisées avec chacun d'elle.

3.2.1. Capture de mouvement sans marqueur

Cette première famille de MoCap ne nécessite l'installation d'aucun marqueur sur le corps du sujet. Il s'agit de dispositifs fonctionnant en temps réel par caméras infrarouges.

3.2.1.1. Leap Motion Controller

Ce système de MoCap annonce une précision permettant de capter et de référencer les doigts – segments les plus fins et les plus distaux du membre supérieur – la paume et le dos de la main. La *Leap Motion Controller* (LMC) est un capteur développé par l'entreprise *Leap Motion Inc.* (San Francisco, CA, United States) fonctionnant par capteurs infrarouges. À la suite de

³⁵ Il est par exemple possible de calculer de différentes manières l'angle articulaire du coude : l'avant-bras est statique, ce sont le bras et/ou le tronc qui bougent ; ou bien le bras est statique et l'avant-bras bouge ; ou encore ce sont les deux segments, avant-bras et bras, qui sont en mouvement. Nous avons donc différentes configurations, pour différents DDLs.

nombreuses recherches de miniaturisation de l'appareil, la première version disponible au grand public de la LMC apparaît en 2013. L'aspect de la LMC se veut épuré, et son utilisation simple. Le boîtier mesure 8 x 3 cm (pour Longueur et Hauteur, respectivement) et est constitué de deux composantes principales : des LEDS infrarouges, au nombre de trois, et deux capteurs optiques (fig. 3.8).

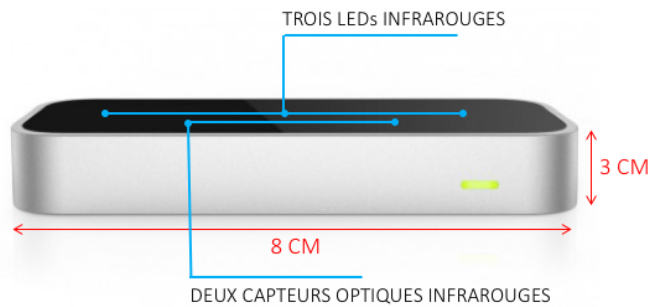


Figure 3.8 – Caractéristiques principales de la *Leap Motion Controller*

Son utilisation demande un branchement via une prise USB 3.0 à un ordinateur³⁶. Il faut ensuite placer une ou deux mains au-dessus/devant les capteurs et les données de position, de vitesse de l'extrémité des doigts, du centre de la paume et de l'orientation des mains (ou d'objets comme un stylo ou une baguette), sont alors calculées et envoyées à l'ordinateur connecté.

L'ensemble de ces données est stocké et accessible via le SDK (*System of Kit Development*) qui englobe l'ensemble des outils nécessaires pour le développement des applications de la LMC. La fréquence d'acquisition se situe entre 12 et 50Hz et sa zone de captation est d'un mètre maximum. Le coût de ce dispositif est de 89,99 €³⁷.

Une fois proposés sur le marché, des articles testant l'acuité de ses données sont publiés. C'est le cas de Weichert *et al.* (2013), dont les travaux se concentrent sur la capacité de précision de la LMC. Pour ce faire, les auteurs ont aménagé un bras robotisé dont l'extrémité représente la pointe d'un stylo. Une fois placées au-dessus du capteur, les coordonnées 3D de la position du robot sont comparées à celles enregistrées par la LMC. Pour une position statique, l'écart moyen mesuré est inférieur à 0,2 mm ; pour une situation dynamique, l'écart moyen s'élève à 2,5 mm. Ces résultats démontrent une bonne précision de détection de la position, bien qu'au-dessous de celle annoncée lors du lancement du dispositif, qui était de 0,01 mm. Guna *et al.* (2014) utilisent une technique similaire tout en appuyant sur la variabilité qu'entraîne la distance

³⁶ Certains ordinateurs ont une LMC intégrée.

³⁷ <https://www.adafruit.com/product/2106> (consulté le 08/12/2020)

spatiale de l'objet par rapport à la LMC. Les mesures sont faites sur des configurations statiques et dynamiques de suivi d'objet. La corrélation linéaire révèle une augmentation significative de l'écart lorsque l'on s'éloigne du contrôleur et lorsque l'on se déplace vers l'extrême gauche ou la droite de ce dernier. Si les résultats sont similaires à l'étude de Werchert *et al.* (2013) pour les scénarii d'objet statiques – avec un écart qui varie entre 0,1 mm et 0,5 mm – pour les résultats issus des essais dynamiques, une baisse significative de la précision pour les échantillons prélevés à plus de 250 mm au-dessus du contrôleur a été analysée. Ce saut de précision reste inexplicable pour les auteurs qui classent la LMC comme non utilisable en tant que système de suivi professionnel, sur la base des résultats actuels et de l'expérience globale. Au-delà des articles analysant la fiabilité du système, des propositions d'améliorations algorithmiques se sont développées. L'une des principales expérimentations de perfectionnement concerne la reconnaissance de geste, la liste interne à la LMC étant peu développée. Sharma (2018) travaille sur la détection des trajectoires pour l'écriture de lettres réalisées « à main levée ». L'auteur propose un algorithme qui fournit une estimation robuste et précise de la position du bout des doigts dans diverses situations (lettre réalisée partiellement, de manière oblique, ou encore suivant différents profils de vitesse) et améliore considérablement le taux de reconnaissance de ces caractères. Lu (2016) se concentre sur un ensemble de données comprenant dix gestes qui proviennent des compétences en matière de poterie.

Dans le domaine de la reconnaissance des LS, les recherches se sont concentrées sur l'analyse de l'alphabet dactylogique, privilégié par son aspect presque exclusivement statique. Si les recherches montrent de bons taux de reconnaissance des lettres de l'alphabet avec la LMC, des dysfonctionnements communs à ces études sont pointés. Parmi eux, le fait que la « *Leap Motion Image API* » – logiciel contenant les données brutes de la LMC – intégrée au dispositif ne soit pas modifiable par les utilisateurs (Potter 2013); selon Chuan *et al.* (2014) la nécessité de mesure des informations sur la profondeur des doigts et de la main, et une meilleure détection des chevauchements entre les doigts sont des améliorations nécessaires; pour Avola *et al.* (2014), le fait que le dispositif n'ait qu'un seul point de vue, implique inévitablement des occlusions et des évaluations inexactes lorsque l'utilisateur effectue des poses complexes de la main et la détection de données complémentaires dans un champ de vision étendu à la partie supérieure du torse, à la tête et au visage serait intéressante.

L'utilisation simple et le prix abordable font de la LMC un capteur accessible au grand public. Ce dispositif offre de bons résultats de reconnaissances manuelles statiques, qu'il faut mettre en regard de la taille et de la simplicité de son dispositif.

3.2.1.2. Kinect

Le système de MoCap Kinect a un spectre de reconnaissance plus large que la LMC puisqu'elle peut capter le corps entier, mains et doigts compris. La Kinect est une caméra 3D développée par la société *PrimeSense* en 2008, nommée alors *Project Natal*. En 2010, elle a été officialisée sous le nom Kinect par Microsoft et est commercialisée avec la console Xbox 360. Le capteur permet à l'utilisateur d'interagir avec les interfaces de différents jeux compatibles non plus par l'intermédiaire d'une manette, mais directement par reconnaissance de mouvements du corps et par commande vocale. Une version 2.0 de la Kinect est disponible sur le marché à partir de 2014, son coût est de 110 €. Cette nouvelle version propose une caméra Rouge Vert Bleu (RGB) et infrarouge de meilleure qualité que celle de la première version, et est commercialisée avec la Xbox 360. La Kinect 2.0 comporte une caméra RVB (1920x1080 pixels permettant d'estimer la résolution de la caméra), un micro à multiréseaux ainsi qu'un détecteur de profondeur, lui-même constitué d'une caméra (512x424 pixels) et d'un émetteur infrarouge (fig. 3.9).



Figure 3.9 – Caractéristiques de la Kinect 2.0

La fréquence d'acquisition de la Kinect 2.0 est de 30 Hz, son champ de vision pour la détection de la profondeur est de 70° horizontalement et de 60° verticalement. Basée sur la technologie du « temps de vol » (*Time of flight*), la Kinect utilise la caméra de profondeur pour lui permettre de faire le tri entre les points dont la distance est élevée, et les points plus proches : la distance à mesurer est proportionnelle au temps nécessaire à la source d'éclairage active pour se déplacer de l'émetteur à la cible. Cette phase de traitement des données qui permet de dissocier l'objet de l'arrière-plan est la première de l'algorithme constitutif de la Kinect. Comme ces données peuvent être fragmentaires, il faut ensuite procéder à un « débruitage ». S'ensuivent donc plusieurs autres étapes, comme l'alignement des ponts ou l'affinement des formes, afin

d'obtenir un modèle 3D correct de l'objet. Ces données de sortie constituent une carte de profondeur, soit une image bidimensionnelle à partir de laquelle les coordonnées tridimensionnelles sont calculées. La qualité de la carte de profondeur dépend donc directement de la qualité de l'algorithme mis en place, mais aussi de quelques interventions de l'utilisateur comme le placement de la Kinect et celui de l'objet observé (Lachat *et al.* 2015). Enfin, pour avoir une représentation en couleur, il est nécessaire de projeter le contour identifié dans l'image RVB dans les coordonnées 3D mesurées par le capteur infrarouge. Pour cela, l'algorithme peut être constitué d'une matrice de corrélation pouvant mettre en correspondance les images enregistrées en différentes résolutions (1920x1080 pour l'image RVB contre 512x424 pour l'image infrarouge). Un pixel de l'image RVB ne correspond donc à aucun pixel de l'image infrarouge, mais est plutôt contenu dans quatre pixels (Caruso *et al.* 2017).

Depuis 2012, des développements en libre accès sont rendus disponibles par Microsoft, ce qui met fin à la restriction selon laquelle la Kinect ne peut être personnalisée que sur la plateforme Xbox 360. Ces programmes permettent alors d'associer un squelette filaire à une image animée, de récupérer les positions des points clés du squelette et de les analyser. C'est le cas du logiciel *Brekel*, qui se distingue en deux composantes, *Brekel ProFace* (fig. 3.10 (a)) qui permet un suivi du visage, et *Brekel ProBody* (fig. 3.10 (b)), qui permet reconstruire un ou plusieurs squelettes en 3D.

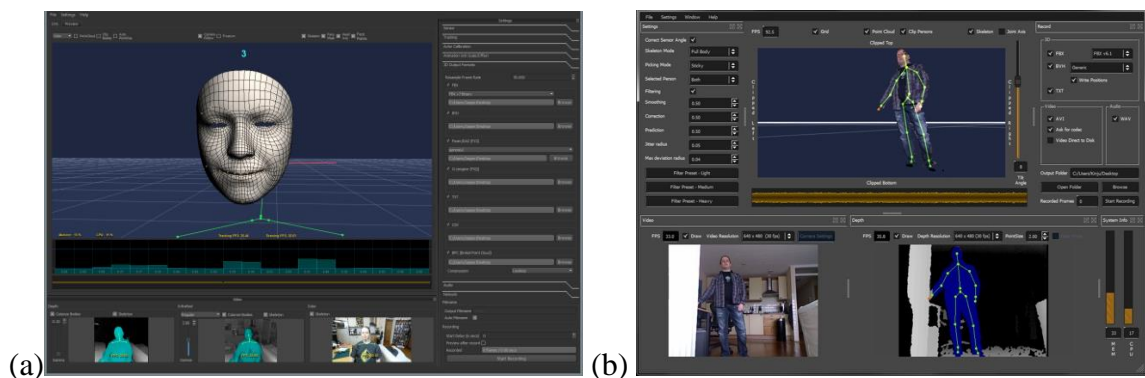


Figure 3.10 – (a) Interface du logiciel Brekel ProFace, et (b) du logiciel Brekel ProBody

La Kinect permet aux chercheurs de développer de nouveaux algorithmes pour l'estimation de la pose en 3D en utilisant des données de profondeur. Cependant, en raison de son développement initial pour les jeux vidéo, l'évaluation de la qualité de ce nouveau dispositif pour la modélisation 3D représente un axe d'investigation majeur. Lachat *et al.* (2015) ont par exemple testé une acquisition des données en extérieur, en plein soleil. Contrairement à la première version, la Kinect 2.0 est capable de fonctionner pendant une journée ensoleillée, à

condition que la lumière n'éclaire pas directement le capteur, sans quoi le rétroéclairage provoque la déconnexion du capteur de l'ordinateur. Deux phénomènes ont tout de même pu être observés : le nombre de « pixels volants » (artefacts visibles sur les contours de l'objet) augmente notamment sur les bords du champ de vision du capteur et le nombre de points captés diminue proportionnellement à l'augmentation de l'intensité lumineuse.

Mihail *et al.* (2012) testent un algorithme de suivi de configurations de la main avec l'utilisation de deux capteurs Kinect simultanés. Fusionner deux flux de profondeur provenant de capteurs placés à des angles différents permet de capturer efficacement l'ensemble des points 3D appartenant aux mains des utilisateurs, et ce, même si ces mains souffrent de diverses difformités.

La Kinect a aussi été comparée à d'autres systèmes de MoCap, optiques ou embarqués (Simsek *et al.* 2013). Une première comparaison est réalisée dans le cadre d'une recherche d'amélioration de la plateforme CopyCat (Lee *et al.* 2005). CopyCat est un jeu interactif et éducatif conçu pour les enfants sourds signeurs qui leur permet de travailler leurs capacités langagières et de mémorisation. La première version de ce jeu, dans laquelle le joueur interagit avec l'interface par le biais de l'ASL, est composée d'une caméra RVB – permettant le suivi des yeux et des mains – et d'une paire de gants sur lesquels des accéléromètres à trois axes sont fixés. Ces accéléromètres fournissent des informations d'accélération, de direction et de rotation de la main. Malgré la précision de leurs données, ces gants présentent quelques inconvénients décrits par Zaffrula *et al.* (2011). Leur utilisation augmente la complexité de l'installation du système en classe et présuppose la présence d'un spécialiste ; les accéléromètres sont fragiles et leurs batteries sont à recharger régulièrement ; aussi il faut veiller à l'état hygiénique des gants. À la suite de ce constat, Zuffrala *et al.* (2011) proposent la Kinect comme système de remplacement. Les résultats expérimentaux montrent que ce système atteint des performances comparables à la plateforme classique composée des capteurs embarqués. La Kinect est une solution « prête à l'emploi » qui contraste avec la complexité des accéléromètres. Son interface est aisée à comprendre et ne nécessite pas de formation particulière. Le facteur de confort de la Kinect est aussi à noter, avec un environnement dégagé, et la possibilité d'interagir naturellement sans avoir à porter de matériel. La Kinect est peu coûteuse et permet d'obtenir des informations proches de celles des accéléromètres. Malgré cela, le taux de reconnaissance des gestes en position assise diminue drastiquement, l'utilisateur doit donc rester debout, ce qui peut s'avérer fatiguant pour une utilisation prolongée du jeu. Chai *et al.* (2013) et Lang *et al.* (2012) proposent des études concernant la reconnaissance de la LS chinoise et allemande. Dans un cas comme dans l'autre les taux de reconnaissance sont bons, puisqu'ils atteignent

respectivement 96% et 93%. Cela dit, ces résultats se concentrent exclusivement sur des signes produits isolément. Nous n'avons donc pas de données concernant la reconnaissance des LS produite en discours.

3.2.2. Capture de mouvement optoélectronique

L'acquisition de données de la MoCap optique (angl. *Optical Movement Capture* soit OMC) nécessite l'utilisation de caméras infrarouges ainsi que de marqueurs attachés au sujet. Un minimum de deux caméras est requis, afin de permettre la triangulation des données et l'obtention des positions tridimensionnelles successives. Parmi ces OMC, le système Vicon est considéré comme le système de référence en termes d'analyse du mouvement, bien qu'il soit concurrencé par l'Optitrack, dont le coût d'utilisation est plus faible.

3.2.2.1. Marqueurs actifs et marqueurs passifs

L'OMC est composée de deux sous-ensembles, dont la distinction tient à la nature active ou passive des capteurs. Les capteurs passifs reçoivent la source infrarouge, et les capteurs actifs l'émettent. Bien que le calcul des coordonnées tridimensionnelles s'effectue de la même manière pour ces deux systèmes, l'un n'occupe pas aujourd'hui une place prépondérante dans le marché de l'analyse du mouvement, il s'agit des marqueurs actifs, qui nécessitent une alimentation électrique câblée conséquente pouvant incommoder le sujet et entraver son mouvement (fig. 3.11).

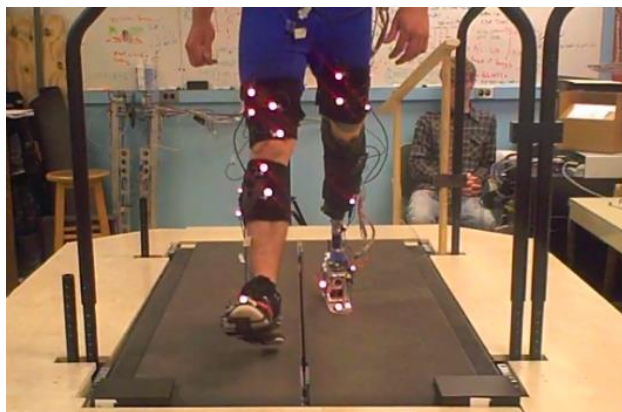


Figure 3.11 – Exemple de l'utilisation d'une capture de mouvement optique à marqueurs actifs de la marque PhaseSpace

Dans le cadre d'un enregistrement par OMC à capteurs passifs le sujet de l'étude porte des sphères catadioptriques, diodes recouvertes de matières réfléchissantes, qui ne sont pas câblées.

Une fois positionnées sur le sujet, ces sphères sont localisées par un ensemble de caméras. Ces caméras sont équipées d'émetteurs infrarouges dirigés vers ces sphères : c'est alors un jeu d'allers-retours du rayonnement infrarouge qui est enclenché et qui perdure tout au long de la captation. Plus le nombre de caméras est grand, plus le volume de captation peut être vaste - pouvant atteindre la dizaine de m³ - et plus fine sera l'estimation des positions des sphères. Les données enregistrées de chacune d'entre elles sont intégrées dans un système centralisé. La fréquence d'acquisition varie entre 100 et 2000 Hz (Vielledent 2002).

De nombreuses phases sont à suivre pour le bon déroulé d'une captation de ce type, en voici un descriptif par étapes.

1) La première étape consiste à mettre en place les caméras autour du sujet. Pour cela, quelques règles sont à suivre : aucune caméra ne doit être placée sur un axe parallèle à une autre caméra. Autrement dit, chaque champ de vision doit en croiser un autre afin que l'ensemble des sphères soient captées par au moins deux caméras. Il est au préalable nécessaire de déterminer précisément la position et l'orientation de chacune des caméras dans la salle. Il faut prendre en compte le fait que les caméras enregistrent la position des marqueurs selon leur propre position, leur propre référentiel.

2) Une fois les caméras placées, il faut les calibrer ainsi que l'espace dans lequel le mouvement sera enregistré. La première calibration est dite statique. Pour la réaliser, il faut placer un objet de référence – comme une équerre – au centre du volume de travail et procéder à une acquisition de données. La position de l'équerre représente alors un repère fixe, commun à toutes les caméras. Ensuite, il faut procéder à une calibration dynamique en balayant avec une baguette munie de marqueurs, dont l'espacement est connu au préalable, et effectuer des mouvements à travers l'intégralité du volume de captation (Vielledent 2002). Une fois ces premières étapes réalisées, il est primordial de ne plus toucher aux caméras. Si l'une d'elles bouge, les paramètres pris en compte dans le calcul de la position des sphères ne correspondent plus aux images fournies par cette caméra et le système ne peut donc plus reconstruire les trajectoires de sphères. L'étape 2) est alors à réaliser de nouveau.

3) La troisième étape consiste à mettre en place les sphères sur le sujet, c'est ce qu'on appelle le *markerset*. Une sphère doit être représentée par plusieurs pixels sur une image caméra pour que la caméra puisse localiser le centre de la sphère. Un minimum de trois marqueurs est nécessaire sur chaque segment, car si seulement deux d'entre eux sont alignés, on définit une direction, mais pas une rotation. Ils doivent être les plus éloignés possible les uns des autres, car pour une erreur de données sur la position d'un marqueur dans l'espace, l'erreur sur la direction définie par deux marqueurs sera d'autant plus faible que la distance entre ces

marqueurs sera grande. Il faut choisir les emplacements qui sont le moins possible assujettis aux mouvements de la peau par rapport au squelette, et fixer les marqueurs soit directement sur la peau soit sur une combinaison compressive, évitant les mouvements parasites des marqueurs indépendamment des mouvements du sujet. Chacune des sphères doit se voir attribuer un nom, un label, permettant de les distinguer (fig. 3.12).

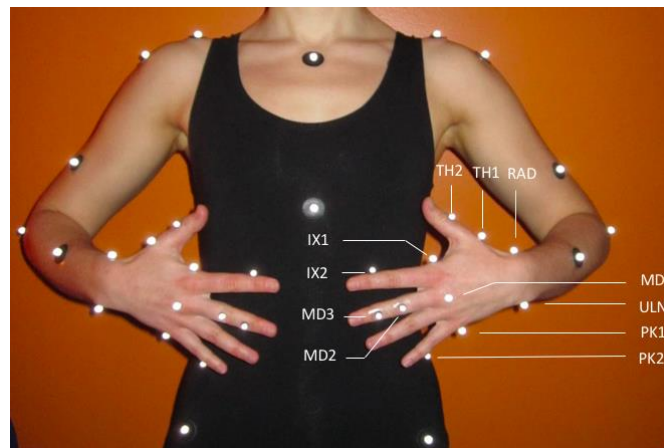


Figure 3.12 – *Markerset* et exemples de labellisation des sphères pour le projet MARQSPAT (Blondel *et al.* 2009)

4) L'enregistrement, pouvant désormais être enclenché, n'est pas la dernière étape du processus. Il consiste à demander au participant de réaliser un mouvement quelconque dans le volume d'analyse dessiné par la position des caméras. Cette étape marque alors la fin du processus de collecte des données.

5) En effet, il est suivi par le nettoyage des données, qui peut s'avérer être l'étape la plus longue. Pendant l'enregistrement, certains points ont pu être occultés. Si une sphère n'est visible par aucune des caméras, pendant quelques courts instants (perte transitoire de la sphère, pouvant être due à une occlusion par un membre qui cache la sphère du point de vue des caméras), alors aucune donnée la concernant n'apparaît durant ce laps de temps. C'est le cas de la section inférieure de la figure 3.13 qui montre les courbes de suivi de marqueurs, en vert, qui s'interrompent simultanément, pour reprendre ensuite.

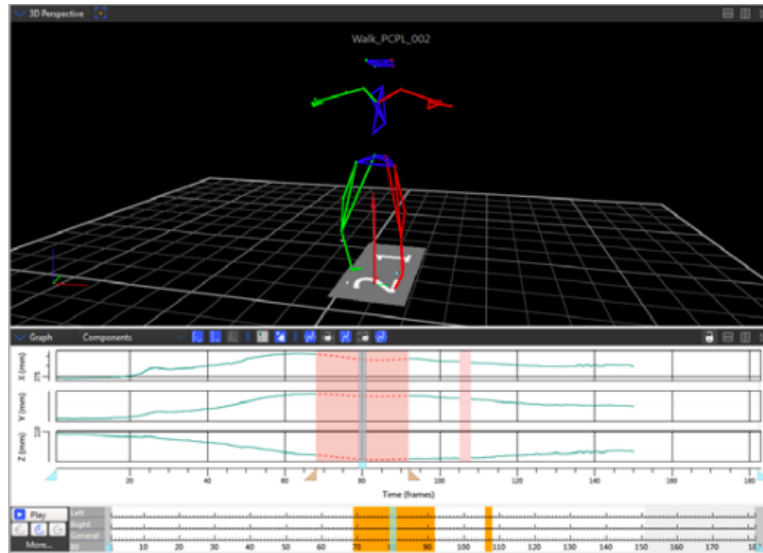


Figure 3.13 – Visualisation simultanée des courbes de suivi du mouvement accompagnées de leurs représentations 3D (Vicon Nexus 2³⁸)

Il est possible, à l'aide de l'enregistrement vidéo, de reconstruire manuellement ces pertes, mais cela est chronophage et laborieux. Afin de faciliter ce travail, un type de visualisation est proposé avec Vicon Nexus 2 permettant d'afficher simultanément les courbes et une représentation 3D du mouvement réalisé (fig. 3.13). Il existe aussi des algorithmes d'interpolation permettant de gérer les éventuelles occlusions, mais leur utilisation signifie que des données non existantes sont créées de toute pièce : de l'information est recrée, sans savoir ce qu'il en est réellement. De plus, si certaines positions de trajectoires sont corrigées, d'autres peuvent subir un phénomène de *swapping* : certains marqueurs sont réacquis automatiquement par le système de suivi, mais avec un mauvais label (par exemple si la main passe derrière la cuisse, le marqueur présent sur l'intérieur du poignet peut être échangé avec celui se situant à l'extérieur de cette même articulation). L'occultation momentanée des marqueurs représente la difficulté principale de ce système de capteurs de mouvement, car la valeur de données qui sont reconstruites peut être remise en cause.

Le coût pour l'utilisation de ce type de MoCap est élevé : il comprend la location ou l'acquisition d'une salle adaptée au dispositif et l'achat ou la location des caméras, dont le prix peut varier entre 450 € et 250 000 €. Le prix moyen d'un enregistrement de ce type environne les 10 000 €. Il existe de nombreux fabricants de ce type de dispositifs, tels que MotionAnalysis (Santa Rosa, CA, USA), ou Qualisys (Göteborg, Suède). Nous allons nous concentrer

³⁸https://documentation.vicon.com/nexus/v2.1/desktop/NexusWsN/DataQual/View_and_fill_gaps_with_the_Data_Correction_view.htm

particulièrement sur les sociétés Vicon (Oxford, UK) ainsi que Optitrack (Natural Point Inc., Corvallis, OR, USA).

3.2.2.2. Vicon et Optitrack

La société Vicon (Oxford, UK), éponyme du capteur de mouvement qu'elle produit, est aujourd'hui considérée comme le leader mondial des systèmes optoélectroniques haut de gamme de MoCap, faisant de ce système une référence en capture et analyse du mouvement (angl. *gold standard*). Merriaux *et al.* (2017) étudient les performances de positionnement du système Vicon (T40S). Le protocole comprend la mise en place d'un robot pour les évaluations des performances statiques. Les positions de marqueurs sont enregistrées dans les cadres de référence du robot et de Vicon. La comparaison révèle un faible écart avec une erreur absolue moyenne de 0,15 mm et une variabilité inférieure à 0,025 mm. Pour les expériences dynamiques, la précision absolue de positionnement, l'erreur du système est inférieure à 2 mm. Les auteurs notent que la taille du marqueur et la fréquence d'échantillonnage de Vicon doivent être soigneusement choisies en fonction de la vitesse rencontrée afin d'atteindre une performance de positionnement optimale pouvant aller jusqu'à 0,3 mm.

Le Vicon est aussi utilisé pour des études en linguistique comme avec Priesters & Mittelberg (2013) qui se sont penchés sur l'utilisation de l'espace gestuel ; ou avec Lee & Tsai (2009) qui ont travaillé sur un système de reconnaissance de la dactylologie de la LS taïwanaise, mais le coût de son utilisation, détaillé précédemment, n'en permet pas l'entière démocratisation. Des fabricants de capteurs de mouvement optoélectroniques se sont penchés sur ces questions de coûts, et ont proposé des dispositifs plus économiques, tels que Optitrack (Natural Point Inc., Corvallis, OR, USA). Fonctionnant de la même manière, son prix peut, selon les versions, être divisé par 50 par rapport à celui du Vicon (Carse *et al.* 2013). Cette nouvelle génération de MoCap à capteurs passifs à « faible coût » apparaissant sur le marché, c'est la question de la qualité des mesures qui est alors soulevée. C'est pour répondre à cette interrogation que Thewlis *et al.* (2013) ont évalué la précision des données cinématiques lors de la marche obtenue par un système Vicon MX-f20 face à un système Natural Point *Optitrack*. Les données sont recueillies simultanément à partir de ces deux systèmes, chacun composé de douze caméras qui sont placées sur un même pied, donc leurs positions sont parfaitement similaires. Le système *Optitrack* a un coût de 9590 € (15 000 \$ australiens), montant qui s'élève à 159 900 € (250 000 \$ australiens) pour le Vicon MX-f20. Le test de cinématique de la marche s'est fondé sur trois essais de marche dynamique réalisés sur un participant. Les angles de la cheville, du genou et

de la hanche ainsi que du segment pelvien ont été calculés. Les résultats de l'étude montrent qu'aucune comparaison n'a permis d'identifier une différence relative supérieure à 4° (sauf celle de la rotation du genou qui atteint 4,2°) avec une différence moyenne maximale de 2,7°, ce qui n'est pas considéré comme significatif³⁹ (McGinley *et al.* 2009 ; Cuesta-Vargas *et al.* 2020). Le système considéré comme *low-cost* est alors estimé d'une précision comparable à celle du Vicon. Malgré cela, les auteurs pointent du doigt que le nombre d'heures de travail nécessaires pour le traitement des données est bien plus conséquent pour le système Optitrack. C'est sur cette caractéristique que Vicon surpasse alors son concurrent, avec notamment un temps d'étiquetage des marqueurs beaucoup plus court. Carse *et al.* (2013) ayant comparé trois systèmes optiques d'analyse de mouvement 3D (un Vicon MX à douze caméras, un Vicon 612 à huit caméras ainsi qu'un Optitrack à huit caméras) parviennent à des conclusions similaires. Bien que les trois systèmes aient montré un degré élevé d'accord dans les magnitudes moyennes des vecteurs enregistrés, variant entre 1 et 3 mm, un logiciel de traitement des données serait un avantage non négligeable pour encourager la démocratisation de l'utilisation de l'Optitrack. De plus, outre leur différence de prix, ces deux systèmes présentent toujours des limitations liées aux occlusions et au *swapping*.

3.2.3. Capture de mouvement embarquée

Un système est dit embarqué lorsque les unités placées sur le corps du sujet ne sont pas des *marqueurs* réflecteurs ou émetteurs d'infrarouge, comme c'est le cas pour la capture optique, mais des *capteurs*. Dès lors, nul besoin de caméras, ces capteurs – qu'ils soient magnétiques, mécaniques ou inertiels – enregistrent directement les données cinématiques dans leur mémoire interne.

3.2.3.1. Capteur magnétique et exosquelette

Les capteurs dits magnétiques sont composés d'antennes émettrices magnétiques orthogonalement fixées dans l'environnement de captation. Ces antennes créent un champ électromagnétique à trois dimensions. Des récepteurs prenant la forme de fils électriques fixés sur les segments du sujet (fig. 3.14) informent de leur présence dans un espace de référence par

³⁹ Cuesta-Vargas (2010) rappellent qu'une erreur de 2° ou moins peut être considérée comme acceptable, une erreur comprise entre 2 et 5° peut aussi être considérée comme acceptable, mais peut nécessiter une prise en compte lors de l'interprétation des données, et une erreur supérieure à 5° peut être suffisamment importante pour induire une erreur l'interprétation dans le cas de mesures réalisées en recherche clinique.

perturbation du champ magnétique. Un accès aux six degrés de liberté d'un segment est possible avec un seul récepteur qui transmet les données de positions et d'orientations.



Figure 3.14 – Exemple de capture de mouvement magnétique de la marque Ascension et un modèle squelettique associé (O'Brien *et al.* 2000 : 53)

Une méthode de calibration est proposée par O'Brien *et al.* (2000) afin d'obtenir automatiquement la longueur des segments et en déterminer la hiérarchie. Pour cela, un algorithme a été mis en place qui crée automatiquement un modèle squelettique pouvant suivre les mouvements du participant de façon automatique à partir de l'emplacement des articulations. Ces systèmes magnétiques, bien que moins coûteux que les systèmes optiques, sont donc contraignants : la capture du mouvement ne peut être réalisée que dans un espace réduit, dans lequel sont installées les antennes magnétiques. De plus, tout objet métallique risque d'entraîner une distorsion électromagnétique, pouvant mener à un résultat de données inutilisables.

Des systèmes mécaniques existent également. Dans ce cas, on équipe le sujet dont on veut suivre le mouvement d'un exosquelette afin de déterminer sa posture à partir de la mesure des angles de rotation au niveau des articulations. Cet exosquelette est positionné autour du segment étudié et chacune des articulations est couplée à un capteur angulaire (fig. 3.15). Connaissant la position relative à chaque capteur, il est possible de reconstituer le mouvement du squelette.

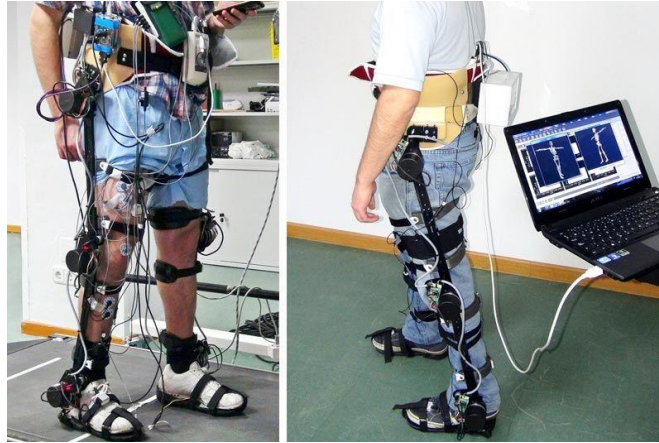


Figure 3.15 – Exemple d'exosquelette, image tirée du site fabriquant Technaid⁴⁰

Cette méthode présente certains inconvénients : la liberté de mouvement est amoindrie par la masse du dispositif sanglé sur le participant et il est nécessaire de passer par une phase d'adaptation de l'instrument à la morphologie du sujet.

3.2.3.2. Unité de mesure inertielle

La centrale inertielle aussi appelée Unité de Mesure Inertielle (angl. *Inertial Measurement Unit*, soit IMU) représente un autre type de technologie embarquée. D'abord utilisée pour estimer la position d'un véhicule en mouvement et/ou améliorer sa stabilisation durant un vol, la miniaturisation des IMUs leur permet d'être utilisées pour l'analyse du mouvement humain. Une IMU est un capteur de mouvement qui joint deux ou trois technologies distinctes : un accéléromètre, un gyroscope et dans certains cas, un magnétomètre.

L'accéléromètre est utilisé pour mesurer l'accélération linéaire ou détecter le taux d'accélération (fig. 3.16). L'appareil peut s'apparenter schématiquement au système masse-ressorts : la masse est retenue par deux ressorts à ses extrémités. Son déplacement est mesuré à l'aide d'un capteur de déplacement, donnant un signal proportionnel à la force agissant sur la masse dans le sens de l'axe d'entrée. Ce déplacement est dû soit à la force d'inertie soit à la gravité selon la deuxième loi de Newton. Cette deuxième loi stipule que la force est proportionnelle à ce qui est nécessaire pour qu'un objet change de vitesse, ce qui est formalisé mathématiquement par l'équation $F = m \cdot a$ avec F : force (N), m : masse (kg), a : accélération (m/s^2), soit $a = F / m$, l'accélération est égale à la force d'un objet divisée par la masse de ce même objet. C'est une technologie qui est aujourd'hui courante, que l'on retrouve dans les

⁴⁰ <https://www.technaid.com/products/robotic-exoskeleton-exo-exoesqueleto/>

consoles de jeux comme la Wii (Rehm *et al.* 2018), mais aussi dans les smartphones et les tablettes.

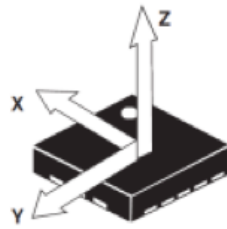


Figure 3.16 – Représentation des axes d'analyses de l'accéléromètre au sein d'une IMU

Le gyromètre est un capteur de rotation qui est utilisé pour mesurer la vitesse angulaire et détecter les changements de rotation que sont le roulis, le tangage et le lacet (fig. 3.17). C'est un appareil qui exploite le principe de la conservation du moment angulaire, appelé effet gyroscopique : lorsqu'un objet qui tourne sur un axe est lancé, il tend à résister aux changements de son orientation. L'appareil prend la forme d'un disque dont les axes de rotation se modifient selon les mouvements effectués. L'unité de mesure du système international est le radian par seconde ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$, car la vitesse angulaire *oméga* est une variation de position angulaire *thêta* exprimée en radians en fonction du temps *t* exprimé en secondes).

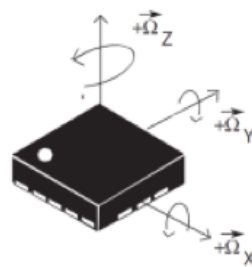


Figure 3.17 – Représentation des axes d'analyse du gyromètre au sein d'une IMU

Lorsqu'il est présent au sein de l'IMU, le magnétomètre est utilisé pour détecter et mesurer la force du champ magnétique (fig. 3.18). Son principe de fonctionnement repose sur la détection des effets de la force de Lorentz qui est une force électromagnétique. Il permet de calibrer correctement le capteur et d'éviter d'éventuelles déviations pouvant être causées par des structures métalliques et donc d'obtenir une mesure qui minimise les dérives de l'orientation du sujet en mouvement. L'unité de mesure est le microtesla (μT) ou le Gauss (G).

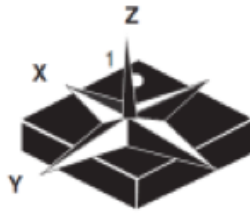


Figure 3.18 – Représentation schématique du magnétomètre au sein d'une IMU

La plupart du temps, l'accéléromètre, le gyromètre et le magnétomètre mesurent leurs données selon trois axes, comme c'est le cas sur les figures précédentes, permettant de composer une IMU à neuf axes (ou à six axes, s'il n'y a pas de magnétomètre).

Plusieurs entreprises produisent maintenant des centrales inertielles et utilisent divers acronymes pour les désigner : « unité de mesure inertielle » (IMU) est la nomination la plus courante de ce dispositif, mais nous pouvons trouver les appellations « capteurs de mouvement inertielle » (IMS), microsystemes électromécaniques (MEMS), « capteur d'unité de mesure magnétique » (MIMU) ou encore « capteur de vitesse angulaire et de gravité magnétique » (MARG) (Ribeiro & Santos 2017)⁴¹. Les compagnies productrices de ces IMUs — telles que Xsens, InterSense, Technaid, IMeasureU, Noraxon ou encore Notiom — accompagnent leurs centrales de filtres et d'algorithmes propriétaires (Godwin *et al.* 2009), qui ont un impact sur l'estimation de leurs valeurs d'orientation.

Le coût d'un équipement est assez variable, il peut être compris entre 300 et 6000 € (Dixon 2006). Le marché de l'IMU étant particulièrement concurrentiel, de constantes améliorations de la performance, de la miniaturisation des dispositifs et de la baisse des prix sont observables. C'est le cas de la société Noitom⁴² (Miami, FL, USA) qui propose une combinaison 3D nommée *Perception Neuron V2*. Cette combinaison est composée de 32 IMUs et le prix à l'achat est 1799 \$⁴³ (1640 €). La différence de coût avec un système optique étant importante, des comparaisons de performances ont été réalisées (voir la §5.1.1.2 pour les comparaisons spécifiques au *Perception Neuron*).

Kang & Gross (2016) ont examiné la validité simultanée des IMUs pour l'estimation des angles posturaux de flexion de la tête, du thorax et de l'élévation de la ceinture scapulaire (omoplates et clavicules) pendant la marche. Ce sont trois IMUs 9 axes TSS-WL (*YEI Technology*, Portsmouth, OH, USA) qui sont étudiées, chacune placée sur le front, le sternum et l'épaule du

⁴¹ Nous garderons l'acronyme IMU au cours de ce manuscrit.

⁴² <https://www.noitom.com/about>

⁴³ Prix affiché en septembre 2018 sur <https://neuronmocap.com/content/product/32-neuron-edition-v2>

sujet. Le système de MoCap optoélectronique – le système de référence – est composé d'un ensemble de huit caméras (*Motion Analysis*, Santa Rosa, CA, USA). Quatre marqueurs rétro réfléchissants sont fixés aux IMUs (fig. 3.19). Les analyses statistiques sont axées sur la concordance, la fiabilité et la précision entre les angles posturaux estimés avec les IMUs et mesurés par le système de MoCap optique.

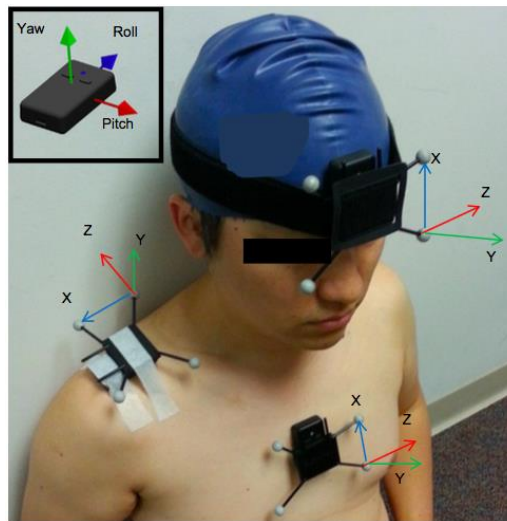


Figure 3.19 – Photographie du placement des IMUs et des capteurs optiques (Kang & Gross 2016 : 242)

Les résultats de cette étude suggèrent que les angles posturaux moyens estimés avec les IMUs sont valides avec une marge d'erreur entre les systèmes considérés comme faibles, les plus grandes erreurs se produisant au niveau de la tête et les plus petites au niveau de la ceinture scapulaire.

Lachaine *et al.* (2017) se sont penchés sur la comparaison d'un système Xsens (*Xsens technologies*, Enschede, Pays-Bas) avec un système Optitrak à huit caméras (*Northern Digital Inc.*, Ontario, Canada). Le système Xsens est composé de dix-sept IMUs disposées sur l'ensemble du corps. Les auteurs veulent vérifier par cette recherche deux hypothèses préalablement établies :

1) Les erreurs technologiques et celles du modèle biomécanique ont été dissociées. Les erreurs provenant des IMUs en tant que technologie embarquée sont moindres par rapport à celles dues au modèle anthropométrique qui y est incorporé (i.e. la structure mathématique qui rend compte des articulations du corps). Il est donc nécessaire de porter une attention particulière au modèle anthropométrique propriétaire qui joue un rôle prépondérant dans la qualité de la capture du mouvement.

2) La longueur et la complexité de la tâche jouent un rôle dans l'erreur technologique (celle imputée directement aux IMUs) Les auteurs rappellent que les études comparatives se concentrent majoritairement sur des enregistrements de moins d'une minute et des tâches simples ne permettant pas de se pencher sur la stabilité des données des IMUs. Il est donc intéressant de mettre ici en exergue de possibles erreurs dues à la dérive progressive du signal, majoritairement imputable au gyroscope. Les auteurs précisent tout de même que cela peut être principalement dû à la complexité de la tâche plutôt qu'à sa durée (un protocole incluant des tâches longues, mais peu complexes serait nécessaire) ; et malgré cette augmentation, la plupart des angles d'articulation sont restés sous un niveau acceptable (5° RMSE⁴⁴), ce qui permet de conclure sur le potentiel technologique satisfaisant de ces IMUs pour suivre les mouvements du corps humain.

3.2.4. Synthèse

Il existe donc des méthodes variées d'enregistrement du mouvement qui reposent sur des technologies embarquées, ambulantes, libres et plus ou moins contraignantes (tab. 3.1).

Les systèmes sans marqueur (Leap Motion et Kinect) s'adressent à un marché grand public, des progrès restant à faire quant à la précision des données recueillies.

Les systèmes de capteurs de mouvements optiques avec marqueurs actifs n'ont pas connu l'essor de leur homologue aux marqueurs passifs, car trop contraignants pour l'utilisateur. Ces derniers, représentés par les marques Vicon ou Optitrack, constituent aujourd'hui le type de MoCap la plus utilisée. Malgré un risque d'occlusion des marqueurs, et donc une perte potentielle de données, ils sont unanimement considérés comme une référence. Se basant sur la technique des rayons infrarouges, ces MoCap se distinguent par une portée de captation modulable et proportionnelle au nombre de caméras déployées. Cette qualité a cependant son revers : plus le nombre de caméras est élevé, plus l'étape de calibration est complexe et l'aménagement de l'espace coûteux.

Le système mécanique, technique apparue au début de la MoCap, est précis, mais encombrant et rencontre des problèmes de restitution dans l'espace. Il est donc assez peu utilisé aujourd'hui.

Les capteurs magnétiques ont l'avantage d'être libérés des câbles remplacés par un système d'aimants. La courte portée du champ magnétique limite cependant les déplacements du sujet. Enfin, les IMUs sont peu chères, portables, et ne présentent aucun risque d'occlusions. Cela dit, il faut être vigilant à la dépendance du dispositif au champ magnétique terrestre et à la qualité

⁴⁴ Voir note de bas de page précédente.

du modèle anthropométrique interne. Par ailleurs, toutes les IMUs ne disposent pas d'un logiciel de traitement des données, qui peut s'avérer long à réaliser par d'autres moyens.

Tableau 3.1 – Récapitulatif des avantages et inconvénients associés aux différentes familles de MoCap

Types de MoCap	Avantages	Inconvénients
Sans marqueur	Portabilité aisée Confort Faible coût Intuitivité	Manque de précision Manque de données
Capteurs optiques actifs	Grande précision	Coûteux Inconfortable Mauvaise portabilité
Capteurs optiques passifs	Grande précision	Coûteux Occlusions potentielles Mauvaise portabilité
Centrales inertielle (IMUs)	Grande précision Peu coûteux Portabilité aisée	Potentielle absence de logiciel de traitement Précision dépendante du modèle anthropométrique interne

Les IMUs constituent donc la famille de MoCap la plus adaptée à l'élaboration de notre corpus et à l'exploitation des données recueillies. Le §5.1.1.1 précise et développe quelle IMU nous avons sélectionnée ainsi que les raisons de ce choix. Mais revenons d'abord sur la nature des liens qui réunissent les avancées technologiques et le développement des études linguistiques.

3.3. Apports de la technologie

L'irruption des techniques a eu un impact fort en linguistique. Elles modifient constamment, au fil de leur perfectionnement, les principes et habitudes de recherche de la discipline, touchant jusqu'à la forme et au traitement des corpus. L'accès récent aux données tridimensionnelles du mouvement fait partie d'une de ces transformations paradigmatiques, offrant un regard nouvellement quantitatif sur des phénomènes linguistiques déjà observés.

3.3.1. Évolutions paradigmatiques

Bien que les sciences du langage soient encore dominées par le modèle de l'écrit, l'expansion des ressources sémiotiques multimodales, tels que la vidéo ou plus récemment les systèmes de MoCap, jouent un rôle prépondérant dans la modification des approches théoriques et méthodologiques de la discipline. Voyons de quelles natures sont ces évolutions.

3.3.1.1. Vidéo et outils computationnels

La démocratisation de la linguistique de corpus (Habert *et al.* 1997) est corrélée au développement, dans les années 1980, d'ordinateurs dont la puissance permet la dématérialisation et le stockage de données volumineuses. La linguistique de corpus permet de travailler sur une langue authentique et non idéalisée : il est alors possible de se concentrer sur la production de la langue (performance) en tant que telle, plutôt que sur les mécanismes permettant la construction de ces énoncés (compétence). Ces nouveaux corpus sont textuels, mais aussi audio et visuels. Les enregistrements vidéo donnent aussi une tout autre dimension aux situations de langage. La vidéo permet de créer et de développer de nouveaux champs d'études, d'appréhender les LV dans l'intégralité de leur contexte multimodal, de développer l'étude de la gestualité en tant que modalité d'expression en soi, et joue un rôle primordial pour l'étude des LS. Les détails multimodaux permettent de mettre au jour des liens entre des faits purement linguistiques, tels que la syntaxe, et la coordination des mouvements corporels des locuteurs (Mondala 2010).

Mais comment interroger une si grande masse de données, dont les supports sont multiples, et appliquer une analyse linguistique systématique ? Pour effectuer le travail préparatoire nécessaire, il peut alors être plus efficace de mettre de côté l'habituel duo stylo/feuille, voire parfois les logiciels de traitement de texte tel que Microsoft Word, afin d'exploiter les dernières conceptions numériques.

Pour pouvoir documenter et coder un corpus, des outils d'annotation spécialisés (tels que ELAN, CLAN, ANVIL, Transcriber, PRAAT) sont mis en place et sont applicables à différentes étapes de l'exploitation d'un corpus. Ces logiciels permettent de réaliser des annotations qui sont synchronisées temporellement, mettant l'accent sur la temporalité et la simultanéité des ressources langagières utilisées. Si la nature des annotations dépend directement de l'objet de l'étude, elles suscitent toutes un résultat qui leur est commun : elles décomposent le langage en données *requêtables*, critère indispensable à la recherche linguistique (Slobin *et al.* 2001). Calculer, par exemple, la fréquence ou la significativité d'un phénomène est désormais possible, ce qui apporte une dimension quantitative à la langue et à son utilisation. Des phénomènes qui n'étaient pas perceptibles sont maintenant analysables, permettant d'aller au-delà de l'intuition que l'on se fait de la langue. Une fois ces phénomènes détectés, ils peuvent ensuite être étudiés statistiquement, visualisés ou encore interrogés automatiquement grâce à des logiciels de lexicométrie et de textométrie (Poudat & Landragin 2017) et des tableurs. Cela entraîne de fait une distinction entre les données primaires, c'est-à-

dire les données telles qu'elles sont collectées, et les données secondaires, soit les annotations ou tout autre travail effectué sur ces données brutes.

Nous sommes donc là face à une double transformation épistémologique : la révolution technologique a participé à un renouvellement théorique de la linguistique, à l'éclosion d'une linguistique de corpus⁴⁵ ; et la vidéo a permis de mettre en exergue la multiplicité des niveaux sur lesquels se déploient les aspects multimodaux du langage. Malgré cela, l'étude, finalement encore récente, de cette expression multimodale reste encore lacunaire, cantonnée à la représentation du geste déformé par la surface de l'écran (Boutet 2018). Ce fait devrait placer comme prioritaire l'utilisation de systèmes capables de rendre au geste la tridimensionnalité qui le constitue.

3.3.1.2. Accès aux données tridimensionnelles

Les technologies de Mocap offrent une résolution spatiale et temporelle tout autre que celle apportée par les caméras. Elles captent avec facilité et fiabilité le mouvement dans l'espace en trois dimensions. Se tourner vers ces nouvelles technologies en linguistique permettrait donc de résoudre le biais de déformation engendré par l'utilisation de la vidéo et de ses images projetées en deux dimensions. L'irruption de nouveaux instruments implique cependant, comme on a pu le voir avec les ordinateurs et les enregistrements audiovisuels, de nouvelles considérations sur la nature des informations qui nous parviennent.

Les capteurs de mouvement enregistrent parfois jusqu'à 240 valeurs par seconde (240 Hz) sous la forme de positions relatives selon les trois axes X, Y et Z de chaque segment du corps. Les informations qui nous parviennent s'apparentent à une longue suite de nombres (fig. 3.20). Ces données ne sont pas directement lisibles. Un temps de traitement préalable est nécessaire pour leur exploitation.

⁴⁵ La linguistique de corpus présente des limites qu'il est nécessaire de prendre en compte. Un corpus est construit, il est donc limité et réduit le langage à un échantillon de lui-même.

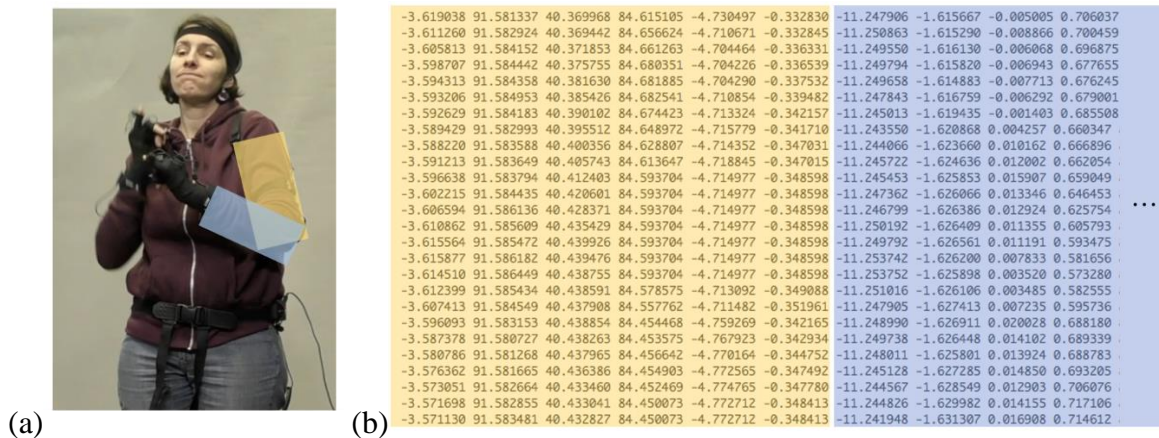


Figure 3.20 – En jaune les données du bras gauche, en bleu celles de l’avant-bras gauche provenant d’un extrait (a) d’un enregistrement vidéo et (b) d’un enregistrement de MoCap à centrales inertielles

L’exploitation de ces données nécessite une expertise technique particulière et un post-traitement rigoureux. Pour comprendre les données cinématiques, le linguiste doit impérativement se former au traitement du signal, et/ou mettre en place des groupes de recherche interdisciplinaire.

Il faut aussi souligner que malgré l’arrivée de la MoCap, l’utilité des données vidéo reste – encore aujourd’hui – importante. Certes, la vidéo n’est plus la source unique contenant les éléments à explorer, mais il est impossible de réaliser un alignement sémantique entre contenu verbal et contenu gestuel sans y faire référence. Les dynamiques interactionnelles sont capturables au niveau formel, mais leur interprétation sémantique et pragmatique reste impossible si le flux dialogique n’est plus à disposition. La vidéo donne la possibilité de garder le lien avec le sens des gestes et pour cela elle demeure nécessaire, bien que complémentaire (Boutet & Blondel 2016).

3.3.2. Revue des corpus de Langue des Signes Française

Malgré des évolutions de paradigmes et la démocratisation de ressources sémiotiques multimodales, une grande dissymétrie persiste entre LS et LV (Braffort 2016). Si de nouveaux corpus ont été et continuent à être créés depuis, que ce soit au moyen de la vidéo ou de la MoCap, le contraste est toujours saisissant. Mais surtout, de nombreux problèmes surviennent dans les étapes qui suivent ces mises en place, que ce soit pour le traitement des données ou pour leur partage au sein de la communauté scientifique.

3.3.2.1. Corpus vidéo

Les bases de données vidéo de LSF sont conçues selon diverses perspectives d'utilisation :

- (1) étudier un mécanisme ou une théorie linguistique spécifique ;
- (2) comparer la LSF à d'autres LS ou à des LV ;
- (3) proposer une approche multimodale axée sur l'acquisition des langues ;
- (4) stocker, documenter et archiver des élicitations signées⁴⁶ ;
- (5) se pencher sur le traitement automatique de la LSF.

Présentons les principaux corpus existants selon ces différentes catégories.

Pour le cas (1), nous avons le corpus de LSF nommé LS-COLIN (2002⁴⁷). C'est le premier corpus de grande échelle, élaboré en partenariat entre plusieurs universités et à la croisée de plusieurs disciplines (linguistique, cognition et informatique). Le cadre théorique général de ce corpus est d'étudier le principe de l'iconicité défini par Cuxac (2000). Le corpus comprend 90 productions monologiques de 13 adultes sourds signeurs. Ce corpus est documenté, segmenté et transcrit pour 39 de ces productions (Sallandre 2003). Le corpus de Millet (2001-2003) contient les narrations de 8 enseignants de LSF sourds. Le but est ici d'étudier les classificateurs dans les récits du jeu, les espaces de narration et des proformes (Millet 2006, Millet & Morgenstern 2019).

DEGELS⁴⁸ (2011) est un corpus qui traite de la thématique (2) puisqu'il est composé de quatre heures de dialogues LSF et cinq heures de dialogues en français oral. Le thème de ces dyades comparables est la description d'itinéraires et de lieux à Marseille et à Aix-en-Provence. Le matériel d'enregistrement est composé de trois caméras ainsi que de deux microphones.

Le projet Dicta-Sign⁴⁹ (2009-2012) répond aux objectifs (2) et (5). Il comprend de la LSF, mais aussi la LS allemande (DGS), la LS grecque (GSL) et la LS britannique (BSL). Ce sont 14 locuteurs qui ont suivi des tâches dialogiques. La totalité du corpus atteint environ huit heures par langue. Le corpus est entièrement élicité et transcrit et est annoté sur cinq heures de vidéo. Il est ici question de mettre en œuvre un système de reconnaissance et de synthèse en vue de l'édition de sites internet en LS (Belissen *et al.* 2020).

En (3) nous avons le corpus Illana qui regroupe des gestes de pointage réalisés par un jeune enfant exposée à un environnement bilingue LSF-français dès sa naissance (Blondel 2003, 2009). Le projet CoLaJE (2009-2012) étudie l'émergence de la communication langagière chez

⁴⁶ Ce sont les buts initiaux ayant motivé la constitution d'un corpus qui sont présentés ici.

⁴⁷ http://cocoon.huma-num.fr/exist/crdo/meta/crdo-FSL-CUC020_SOUND

⁴⁸ <https://www.ortolang.fr/market/corpora/degels1/v1>

⁴⁹ <https://www.ortolang.fr/market/corpora/dicta-sign-lsf-v2/v1>

le jeune enfant en interaction avec une approche multimodale. Le corpus atteint deux cents heures d'enregistrement⁵⁰ (Limousin 2011, Morgenstern & Parisse 2019). Le projet signMET⁵¹ rend compte des compétences linguistiques des enfants afin de cibler leurs besoins et les aider au mieux lors de leur entrée à l'école. Le corpus est composé de productions tirées de types d'élicitation différents : entretien semi-guidé, tâche de production, tâche de compréhension d'une narration, tâche de narration, ainsi que des tâches de répétition de phrases.

D'une ampleur considérable, le projet CREAGEST⁵² (2008-2011) a pour but premier de répondre à l'objectif (4). Ce sont 290 heures d'élicitations de 144 locuteurs adultes et 70 heures de 65 enfants sourds signeurs (Garcia *et al.* 2013), qui sont regroupées. Bien que l'un des objectifs soit centré sur la documentation des corpus, seuls de courts extraits sont mis à disposition sur le site ORTOLANG. Enfin, le corpus longitudinal « Signes en famille⁵³ » comprend 32 heures d'échanges spontanés interfamiliaux en LSF. Ce corpus financé par la DGLFLF (Délégation générale à la langue française et aux langues de France) est constitué de recueils de données de la sortie de l'école au coucher dans dix familles utilisant la LSF à la maison avec des situations variées (i.e. familles sourdes signeuses, familles entendantes avec enfants sourds). Ce corpus a pour motivation de démontrer que la LSF est une langue en usage en France, qu'elle est une langue naturelle et quotidienne pour les jeunes sourds⁵⁴.

3.3.2.2. Corpus couplés avec de la capture de mouvement

Les données issues d'une session MoCap peuvent être utilisées afin de :

- (1) étudier un mécanisme de langue spécifique ;
- (2) analyser des principes issus des sciences du mouvement ;
- (3) comparer la LSF avec d'autres LS ou LV ;
- (4) parfaire une modélisation informatique ;
- (5) enrichir l'interaction homme-machine.

Pour le cas (1), il existe le projet HuGEx (2005) pour lequel deux corpus sont mis en place (Gibet *et al.* 2006) : « TRAIN », qui vise à construire des phrases dont des parties remplaçables sont prédéfinies et « METEO » qui s'intéresse aux variations de prosodie. Leurs durées respectives sont de dix et quarante minutes. Ils sont tous deux enregistrés avec un Vicon

⁵⁰ La proportion de productions en LSF ne nous est pas connue.

⁵¹ <http://prosigne.ortolang.fr/SignMET/index.php>

⁵² <http://www.sfl.cnrs.fr/creagest>

⁵³ http://prosigne.ortolang.fr/signes_en_famille/index.php

⁵⁴ Ce corpus est poursuivi et enrichi dans le cadre du projet ANR Dinlang sur les diners familiaux coordonné par Aliyah Morgenstern, Marion Blondel, Christophe Parisse et Diane Bedoin.

douze caméras à 120 Hz et deux cybergloves à 60 Hz. Dans le cadre de l'objectif (2), il existe le corpus MOCAP1 (2014). Ce corpus couple un système de MoCap Optitrack S250e à dix caméras pour un enregistrement en 250 Hz et une caméra vidéo. Il dure en tout 2 heures et 20 minutes. Utilisé dans le cadre de la thèse de Benchiheub (2017), il a permis l'étude des lois du mouvement au sein des locutions en LSF. Le corpus MARQSPAT (Bondel *et al.* 2009) répond au cas (3) puisque c'est un corpus plurilingue avec un ensemble de trois LS - LSF, LS québécoise et ASL - et des LV correspondantes. L'enregistrement est double avec un dispositif d'oculométrie et de caméra classique. L'étude associée à la mise en place de ce corpus repose sur une exploration de la variation du marquage spatial dans des LS et dans la gestuelle associée aux LV.

En (4) nous avons le projet CIGALE (2012-2015) qui comporte un corpus de recueils poétiques en LSF et en mime. Ce sont six séquences poétiques y sont déclinées avec des variations prosodiques, avec des modifications de la vitesse ou de l'amplitude du mouvement. Le système de MoCap utilisé est un Vicon composé de vingt-quatre caméras, enregistrant en 120 Hz (Catteau *et al.* 2016). L'analyse de l'interaction gestuelle via un agent virtuel y est étudiée.

Pour l'emploi (5) nous pouvons citer le corpus d'une heure nommé SignCom (Gibet *et al.* 2011), enregistré avec un Vicon MX composé de douze caméras pour 100 Hz, et une caméra classique. Ici, c'est l'amélioration de la qualité de l'interaction en temps réel entre les humains et les personnages virtuels conversant entre LSF qui est visée. Un corpus de dix minutes « Sign3D » (Gibet *et al.* 2015) - enregistré avec un Vicon T160 à seize caméras pour 100 Hz et complété de données tirées d'un oculomètre MLab 50-W - vient en complément de ce dernier corpus. Enfin, le corpus LSF-Animal est enregistré par Qualisys avec seize caméras infrarouges en 200 Hz et d'une caméra vidéo pour une durée totale de 58 minutes, et est utilisé dans le cadre d'un travail sur la synthèse du mouvement pour l'animation d'avatar 3D (Naert 2020).

Bien que le nombre de corpus concernant la LSF soit croissant, certaines problématiques sont à prendre en compte quant à leur composition et leur diffusion.

3.3.2.3. Problématiques liées au traitement des corpus

Une fois un corpus enregistré, il est nécessaire de mettre en place un système de transcription qui soit viable pour l'étude concernée. Cette phase est, dans la majorité des cas, longue et laborieuse : la relation proportionnelle entre la durée du corpus et le temps nécessaire pour le transcrire est très faible. Il est rare que la durée effective de la transcription d'un corpus soit donnée, mais Chételat (2010) l'évoque brièvement :

« L'ensemble de l'annotation a demandé un temps considérable, à savoir par exemple que pour la première phase, chaque piste a été annotée séparément ce qui représente, juste pour les sourcils et les yeux, le visionnage et l'annotation de plus de 120 000 images à raison d'au moins trois secondes passées sur chaque image. Pour la dernière phase, il a fallu environ 15h pour positionner les points sur une seule minute d'une seule vidéo ($1' \geq 15h$) ». (Chételat 2010 : 106)

Ainsi que Blondel & Boutet (2011) :

« Quatre annotateurs ont participé à l'annotation de ce défi. Ils ont utilisé l'outil ELAN et ont consacré 90 heures au total à l'annotation manuelle, réparties de la façon suivante : 15 heures pour l'annotation du regard, 25 heures pour l'annotation manuelle du verbal-vocal, 15 heures pour l'annotation des directions alignement et mouvement, 35 heures pour toutes les autres pistes, et intégration de la segmentation automatique via Easy Align ». (Blondel & Boutet 2011 : 5)

Réduire le temps de transcription permettrait d'étudier de plus nombreux corpus, pouvant être plus volumineux.

Aussi, la vidéo pose la question de l'anonymisation qui est difficile, car elle ne peut être que parcellaire, ce qui peut décourager de potentiels participants aux enregistrements de corpus. Les contraintes sont aussi techniques. Les vidéos classiques ont une fréquence d'acquisition de 20 à 30 Hz : les images des mains obtenues sont souvent légèrement floues, ce qui complique par exemple l'identification précise des configurations ou du mouvement impliqué. Pour une recherche dédiée, par exemple, aux mimiques du visage et au regard, un simple zoom suffit à pixéliser fortement les images.

Pour ce qui est des corpus réalisés avec de la MoCap, les problématiques sont en partie les mêmes. Les bases de données pour les études LS sont encore rares et seule une petite partie d'entre elles est mise à disposition. Elles dépassent rarement une heure de données et contiennent les énoncés signés de peu de signeurs différents. Aussi, bien que traitant de LS, la majorité des corpus 3D sont mis en place par des informaticiens, mathématiciens, des biomécaniciens et rarement par des linguistes. Cela permet de mettre en exergue le fait que les outils utilisés sont liés à la discipline. En biomécanique, par exemple, l'étude du mouvement est le but premier : ce n'est pas le sens donné au mouvement qui apporte les informations nécessaires à l'étude, mais bien le mouvement lui-même. La MoCap est alors plus populaire. Par contraste, l'étude de la dynamique interactionnelle au niveau dialogique, sémantique, pragmatique demande un complément d'analyse par rapport aux données formelles obtenues par la MoCap. Cela dit, la possibilité de coupler l'analyse qualitative de la vidéo avec des données quantitatives permet, nous allons le voir, d'affiner le lien peu exploré du mouvement corporel et les informations sémiotiques et grammaticales qu'il produit.

3.3.3. Analyses basées sur le mouvement : bornage des réalisations signées et gestuelles

En linguistique, des catégories verbales permettent de distinguer le temps, le mode et l'aspect d'un prédicat. Ce dernier, l'aspect, est un trait grammatical qui est orienté vers le déroulement interne du prédicat (Guillaume 1984, Gosselin 2021). Différents types d'aspects existent, dont celui relevant de la télicité⁵⁵. Des études montrent que, pour les LS, ce sont des indices touchant à la cinématique du mouvement qui permettent de détecter la télicité d'un prédicat. Pour ce qui est d'un autre type d'aspect, la perfectivité⁵⁶, ce sont des informations d'ordre kinésiologique qui en permettent la caractérisation.

3.3.3.1. Cinématique et (a)télicité

Au sein des LS, la structure morphologique des signes porterait les marques de la télicité. Pour le démontrer, Wilbur (2003) reprend une analyse proposée par Klima & Bellugi (1979) pour qui certains signes semblent avoir un arrêt plus net, comme marqué par différents mécanismes tels que le changement de configuration, un changement d'orientation, un arrêt brusque dans l'espace ou par contact avec le corps. Fort de cette catégorisation par la présence ou l'absence de ce marquage, les auteures posent l'hypothèse de « la visibilité des événements » (*Event Visibility Hypothesis*, soit EVH). Selon l'EVH, le marquage apparent de la fin est un reflet systématique de la notion selon laquelle les événements téliques ont des états finaux et que ces événements sont marqués physiquement dans la production des signes verbaux. Wilbur & Malaia (2008, 2012) cherchent alors à déterminer spécifiquement quelles sont les variables cinématiques qui rendent compte de ces différences de mouvements observées. Pour cela, 24 signes téliques et 16 signes atéliques ont été randomisés et produits auprès de six participants. Les signeurs portent une combinaison de MoCap Gypsy 3 011 et les données sur les positions XYZ de tous les marqueurs ont été collectées à raison de 60 Hz pour cinq participants et de 50 Hz pour un participant par six caméras spécialisées montées en cercle au plafond. La vidéo et les données de position en 3D ont été importées dans le logiciel d'annotation ELAN. Les points temporels du début et de la fin de chaque signe ont été extraits de l'annotation ELAN, et traités dans MATLAB (The Mathworks, Natick, MS, USA) pour extraire les profils de vitesse et d'accélération de chaque prédicat à partir des fichiers

⁵⁵ Un procès dit télique conduit à une borne intrinsèque (manger une pomme) tandis qu'un procès atélique ne peut avoir qu'une borne extrinsèque (habiter une maison).

⁵⁶ L'aspect perfectif indique un procès qui ne peut être réalisé qu'une fois parvenu à son terme (sortir), alors qu'un l'aspect imperfectif indique un procès réalisé dès qu'il est entamé (chanter).

cinématiques enregistrés. Les mesures cinématiques suivantes ont été affectées par le type de prédicat :

- a) La durée du signe est plus courte pour les signes téliques, qu'ils soient en position finale ou médiane dans la phrase.
- b) La vitesse de pointe est plus élevée pour les signes téliques, qu'ils soient en position finale ou médiane dans la phrase.
- c) La décélération des signes téliques est plus élevée.
- d) Le pourcentage du signe écoulé avant l'atteinte de la vitesse de pointe est similaire pour les signes téliques et atéliques en positions médianes dans la phrase.
- e) La pente de décélération est significativement plus raide pour les signes téliques quelle que soit la position du prédicat dans la phrase.

Cette analyse statistique atteste donc bien d'une modification contrôlée de la cinématique des mouvements de LS, permettant de transmettre un sens linguistique précis, en l'occurrence le fait que le prédicat décrive un événement comme étant intrinsèquement borné (télique) ou sans borne (atélique). L'EVH a été étendu avec des affirmations sur une universalité des LS avec une comparaison entre ASL et la LS croate, deux LS non apparentées (Malaiia & Wilbur 2010). Les paramètres cinématiques de cette LS sont semblables dans les cadres de productions de prédicats téliques et atéliques. Strickland *et al.* (2015) poussent cette démonstration encore plus loin en élaborant des tests constitués de signes issus de la LS italienne, la LS des Pays-Bas et la LS turque ainsi qu'une liste de signes artificiels présentés à des non-signeurs. Dans chacun de ces cas-là, la différenciation entre les signes inventés ayant la morphologie apparentée à la télicité et ceux ayant une morphologie apparentée à l'atélicité est faite. Ces résultats suggèrent que les signeurs et les non-signeurs partagent des notions universellement accessibles de télicité.

Au-delà d'une conclusion axée sur les liens qu'entretiennent le système cognitif et la structure de langage ainsi que de l'existence d'unités de sens universellement accessibles (notions remises en cause par Davidson *et al.* 2019), ce qui est particulièrement marquant ici concerne le fait que ces études démontrent l'existence de *profils cinématiques récurrents* et partagés entre les signes d'une certaine catégorie.

Aiguillés par ces études, Boutet *et al.* (2016, 2018) propose une étude basée sur le profil cinématique, mais aussi kinésiologique des prédicats perfectifs et imperfectifs.

3.3.3.2. Kinésiologie et imperfectivité

Selon l'étude de Talmy (1985), les gestes perfectifs qui sont rendus par un mouvement qui se termine par un arrêt soudain sont considérés comme étant bornés. Les gestes imperfectifs sont quant à eux rendus par un mouvement continu. Ils sont alors considérés comme non bornés. Boutet *et al.* (2016) approfondissent ces résultats en se penchant sur le mouvement de gestes co-verbaux. Dans le cadre de cette étude, des enregistrements d'interactions naturelles et de narration de récits sont réalisés, puis transcrits sur le logiciel ELAN. Un premier travail de transcription s'est intéressé, entre autres, à la segmentation des locutions verbales produites au passé⁵⁷, ainsi que les gestes coproduits dans ce contexte. Pour chacun de ces gestes, des informations cinématiques touchant à une variation soudaine de la vitesse sont annotées, permettant de déceler un éventuel bornage des mouvements.

Par exemple, le geste (a) de la fig. 3.21 est annoté comme étant non borné, car le mouvement est simple (flexion de la main) et homogène (pas de changement de vitesse). Le geste (b) de la fig. 3.21 est, lui, considéré comme étant borné puisqu'il présente un mouvement complexe (abaissement de la main, extension de l'auriculaire et de l'annulaire et flexion de l'annulaire) ainsi que différentes phases d'accélération du mouvement, comme c'est le cas entre les images 4 et 5.



Figure 3.21 – Exemples tirés du corpus mis en place dans le cadre du projet POLIMOD⁵⁸, montrant un geste annoté comme étant (a) non borné et un second considéré comme (b) borné (Boutet *et al.* 2016 : 141)

⁵⁷ Parmi les productions au passé, celles produites au passé composé ou à l'imparfait, deux temps pour lesquels il existe un contraste aspectuel reconnu dans la littérature, ont été particulièrement observées.

⁵⁸ Ce projet porte sur l'aspectualité et la gestualité en russe, français et allemand (Cienki & Irishkhanova 2018).

Les résultats démontrent que les gestes non bornés accompagnent des productions vocales utilisant l'imparfait dans 66,88% des cas, contre 28,43% pour le passé composé ; et les gestes bornés dans 71,57% sont coproduits avec des productions vocales au passé composé, contre 33,12% pour l'imparfait (fig. 3.22).

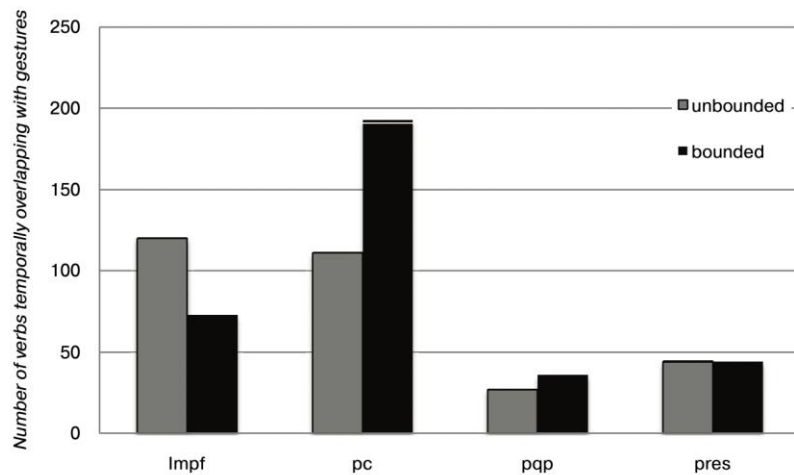


Figure 3.22 – Nombre gestes coproduits avec des locutions à l'imparfait, au passé composé, au plus que parfait et au présent (Boutet *et al.* 2016 : 140)

Ces résultats corroborent l'hypothèse portée par Boutet *et al.* (2016) ainsi que les résultats de Talmy (1985) : le passé composé, qui correspond à l'aspect perfectif et délimité, est fortement corrélé aux gestes bornés ; et l'imparfait, qui correspond à l'aspect imperfectif et non délimité, est fortement corrélé aux gestes non bornés.

Pour aller plus loin, les auteurs cherchent à saisir les raisons physiologiques dues au (non)bornage de ces gestes. Le processus de transcription est alors complété avec des données ayant trait non plus à la forme visuelle du mouvement, mais à sa qualité. Selon les auteurs, « [l]a qualité du mouvement est la partie la plus « intime » d'un geste »⁵⁹ (*ibid.* : 136). Il s'agit de la description de la forme du geste *en tant que déroulé*, et non de celle de sa forme en tant que *résultat*. Les gestes sont alors décrits selon le flux de propagation du mouvement à travers les segments du membre supérieur. Voici les observations qui en découlent.

Dans le cas d'un flux de propagation proximo-distal (qui descend vers les doigts), le mouvement naît principalement dans le bras ou l'avant-bras (*ibid.* : 143). Le mouvement de ces derniers se propage vers la main alors que ceux-ci sont toujours en déplacement, ce qui crée une homogénéité de la réalisation gestuelle qui est associée au perfectif.

⁵⁹ "Movement quality is the most "intimate" part of a gesture." (Boutet *et al.* 2016: 136)

Dans le cas d'un flux de propagation disto-proximal (qui remonte vers l'épaule), le mouvement nait majoritairement dans la main (*ibid.* : 143). La secousse de vitesse et l'accélération doivent potentiellement être plus importantes pour ce segment, afin qu'il parvienne à faire remonter le mouvement sur ses voisins qui sont plus lourds et longs qu'elle-même. Cet effort, ajouté au fait que la main arrive rapidement à ses butées articulaires donnant une impression de séquençage du mouvement, participe à la non-homogénéité du mouvement qui est associée à l'imperfectif. Ces observations sont vérifiées puisque les locutions au passé composé sont accompagnées dans 74% de flux disto-proximal ; les locutions à l'imparfait sont, elles, accompagnées dans 81,3% des occurrences des gestes dont le flux est proximo-distal (fig. 3.23).

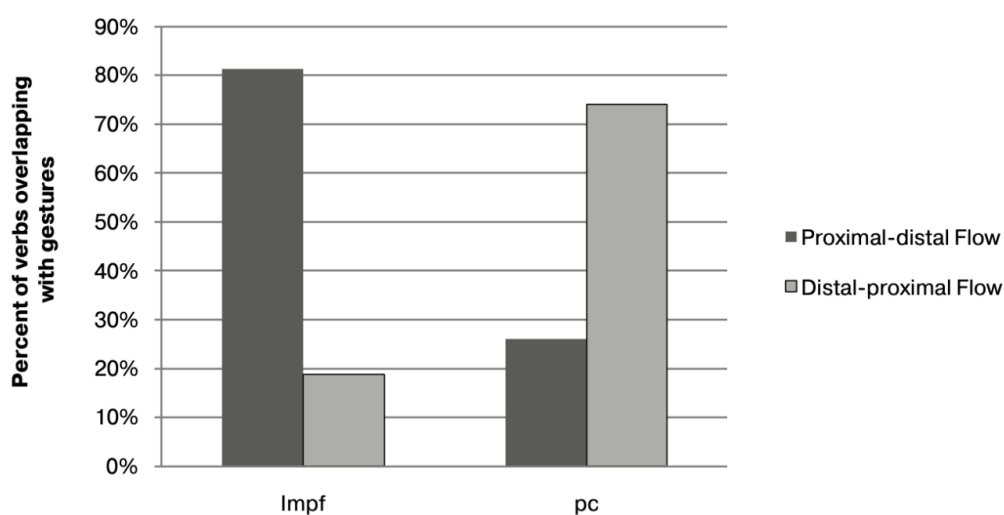


Figure 3.23 – Nombre de gestes coproduits avec des locutions à l'imparfait et au passé composé, selon les flux proximo-distaux et disto-proximaux (Boutet *et al.* 2016 : 143)

Ces résultats sont encore plus marqués que ceux réalisés sur des appréciations cinématiques (fig. 3.22) et non kinésiologiques. La notion de perfectivité d'un prédicat, qui est d'ordre cognitif, peut alors être liée à des réalités purement physiologiques, comme l'est le flux de propagation du mouvement. Ces résultats semblent assez probants pour en motiver l'approfondissement via une instrumentation issue de la MoCap (§6.1.3.2), ainsi que dans le cadre de productions issues d'autres langues, comme les LS, comme cela a été le cas pour l'étude de Wilbur & Malaia (2008, 2012).

BILAN DU CHAPITRE 3

À la recherche de la recombinaison de la dynamique telle que visualisée par l'homme, a succédé l'exploration de l'imperceptible. Les découvertes et les adaptations technologiques qui ont vu le jour à partir du XIX^e puis du XX^e siècle ont transformé les paradigmes de la recherche dans la représentation du mouvement et posé les conditions de la recherche dans notre domaine, celui des études gestuelles. Aujourd'hui, la MoCap permet de traiter efficacement des questions de structuration profonde des LS en franchissant un pas supplémentaire vers une analyse structurelle de la multimodalité langagière. Elle offre la possibilité de ne plus se concentrer sur une représentation des gestes et des signes, mais sur ce qui les constitue (Boutet 2018). Mais la difficulté d'accès à leurs données et le savoir nécessaire à leur emploi freinent la généralisation de leur utilisation. Si aujourd'hui la difficile lisibilité de leurs données ne permet pas de les autonomiser face à la vidéo ni de les considérer pleinement comme des « données primaires », il est possible de spéculer sur de prochaines améliorations et évolutions allant vers une indépendance et une clarté accrue de leurs informations cinématiques.

Concernant notre recherche, les développements technologiques contemporains à cette recherche rendent nécessaires une exploitation de corpus vidéo couplé à de la MoCap. Mais avant de présenter avec précision le type de système utilisé, il nous faut d'abord établir avec précision la nature de nos hypothèses.

CHAPITRE 4. THÉORIES DYNAMIQUES DU CONTRÔLE MOTEUR

Comme nous allons le voir au cours de ce chapitre, ce travail de recherche est tourné vers l'écologie qui unit la LS à son environnement, le corps. Afin de l'interroger efficacement, il faut saisir les différentes structures qui participent à la mise en mouvement contrôlée et régulée du corps. Il est pour cela question de *production* motrice, soit des dynamiques corporelles dont les contraintes permettent une mise en action coordonnée des segments ; mais aussi *d'optimisation motrice*, soit de l'apparition de comportement adaptés, qui permettent de maintenir la qualité d'un mouvement. Interroger ce fonctionnement permet de jeter un nouveau regard sur l'organisation du paramètre du mouvement, potentiellement empreinte d'une économie gestuelle forte héritée de ces dynamiques organisationnelles.

4.1. Production du mouvement corporel

Que ce soit pour réaliser des mouvements simples tels que maintenir une position, se gratter, ou réaliser des mouvements plus complexes comme courir ou nager, il est nécessaire que les segments corporels sollicités par ces mouvements soient *coordonnés*. Quels mécanismes neurologiques ou mécaniques gèrent et permettent cette coordination ? Dans la littérature scientifique, les théories traitant de cette question peuvent être principalement regroupées en deux courants : le courant cognitiviste (Keele 1968, Schmidt 1975) et le courant dynamique (Kelso *et al.* 1981, Turvey 1990). Pour le courant cognitiviste, les possibilités de régulation et de coordination du corps fonctionnent selon une organisation *hiérarchique* avec un système nerveux central (SNC) qui dicte sous forme de commandes motrices les mouvements à réaliser aux segments. À l'opposé, le courant dynamique prône une organisation *hétérarchique* : ce sont les segments eux-mêmes qui s'organisent en fonction des contraintes intra et extracorporelles.

4.1.1. Approche cognitiviste

L'approche cognitiviste pense le contrôle des productions motrices comme une structure verticale descendante, allant du SNC aux segments. Pour que le cérébral endosse le rôle de descripteur agissant sur les muscles qui vont mettre en mouvement les segments, le SNC doit alors stocker l'ensemble des connaissances et des règles nécessaires au bon déroulé du mouvement. Ce regard prescriptif du contrôle moteur est comparable au fonctionnement d'un programme informatique ; on appelle alors « programme moteur » (Keele 1968) les instructions

transmises aux muscles par le SNC. Cette notion sera adaptée par Adams (1971) pour qui le phénomène de production motrice, à la différence des algorithmes, est capable de rétroactions et d'autocorrections. Puis, conscient de la forte charge de travail incombant au SNC – qui doit être capable de prédire, catégoriser et, le cas échéant, de modifier les instructions du mouvement durant son encours – Schmidt (1975) développera la notion de « programme moteur généralisé ».

4.1.1.1. Dualisme corps/esprit

Pour Descartes (1641) l'humain est composé de deux types de substances : l'esprit et le corps. Bien que ces deux substances puissent interagir entre elles, elles sont pensées dans leurs différences – la première est immatérielle et indivisible alors que la seconde est matérielle et divisible – et sont concevables séparément l'une de l'autre. Ce dualisme imprègne jusqu'au XX^e siècle les sciences cognitives. Le cerveau est alors le seul vecteur de la cognition et l'esprit est pensé comme un outil computationnel réceptionnant des données afin de les traiter et les organiser. Le corps est alors dédié au transfert de ces informations.

Cet ensemble de postulats mène à la « linguistique générative » portée par Chomsky (1975). Cette théorie présente la langue comme étant basée sur une structure cognitive universellement partagée, la faculté de langage. Cette faculté est innée grâce aux propriétés formelles de la grammaire. Les processus mentaux sont alors des processus de traitement de l'information. Cette pensée est complétée par Fodor (1975) qui présente une conception de l'esprit qui s'inspire du fonctionnement de l'ordinateur. Dans ce type de machine, un programme informatique permet de désigner une suite d'instructions organisées destinées à être exécutées de manière séquentielle. La pensée serait alors au cerveau ce que le programme informatique est à l'ordinateur.

Cette relation *top-down* ou descendante entre le cognitif et les effecteurs se diffuse aussi dans les théories liées à la production motrice.

Un programme moteur est défini par Keele (1968), comme « un ensemble de commandes musculaires qui sont structurées avant qu'une séquence de mouvements ne commence, permettant à la séquence entière d'être exécutée sans être influencée par la rétroaction périphérique⁶⁰ » (traduction personnelle, Keele 1968 : 387).

⁶⁰ “[...] a set of muscle commands that are structured before a movement sequence begins, and that allows the entire sequence to be carried out uninfluenced by peripheral feedback” (Keele 1968 : 387).

Un programme - qu'il soit moteur ou informatique - doit donc produire un résultat en un nombre fini d'étapes et chaque étape doit être la plus précise possible afin qu'il ne soit pas nécessaire d'y revenir une fois le programme enclenché. Mais cette mise en parallèle pose question.

Kelso *et al.* (1981) soulignent que « le fait que les ordinateurs simulent certains types de performances humaines ne prouve pas que les humains utilisent réellement de tels programmes⁶¹ » (Kelso *et al.* 1981 : 228). Si le cerveau fonctionnait bien comme un ordinateur dans un système dit à « boucle ouverte » (i.e. qui ne prend pas en compte la réponse du système), alors, à l'instar d'un programme informatique, le programme moteur fixerait à l'avance tous les paramètres d'un mouvement sans qu'il soit possible de les modifier en cours d'exécution ; le mouvement serait alors initié et réalisé en l'absence de tout retour sensoriel. Or, pour Adams (1971), il est nécessaire d'analyser le résultat du programme moteur afin de s'assurer que la sortie (le résultat) correspond bien à l'intention initiale, afin également d'envisager la manière qui permettrait de corriger d'éventuelles erreurs.

4.1.1.2. Système en boucle fermée

Un système de contrôle en « boucle fermée » (i.e. intégrant un procédé de rétroaction) permettrait d'apporter à la relation entre le SNC et les muscles la possibilité d'un processus de contrôle et de corrections. C'est la théorie développée par Adams (1971) qui, pour la développer, a étudié une classe particulière de mouvements : les mouvements progressifs de positionnements linéaires, autrement dit des mouvements simples et lents. Ces mouvements ont été réalisés à deux reprises par des sujets selon des conditions cognitives spécifiques. D'abord réalisés avec leurs capacités cognitives habituelles, les participants ont eu ensuite à les reproduire sans rétroactions sensorielles, leur vision étant occultée. Il s'agissait alors de vérifier leur capacité à reproduire le plus fidèlement possible le premier mouvement. Pour Adams (1971), une reproduction presque à l'identique est possible grâce à la *mémoire*. Toute production de mouvement fait appel à l'association de deux types de traces que laissent les mouvements effectués dans la mémoire : la trace mnésique et la trace perceptive.

La trace mnésique est un programme moteur restreint ne transmettant qu'un petit nombre d'informations sur le mouvement, sa direction par exemple. Cette trace permet aux sujets de démarrer leur mouvement réalisé sans information visuelle dans une direction reprenant celle du mouvement réalisé quelques instants auparavant, les yeux ouverts. L'information de la

⁶¹ "Just because computers can *simulate* certain types of human performance is hardly evidence that humans actually do *employ* such programs." (Kelso *et al.* 1981 : 228)

direction ne suffisant pas pour que les deux mouvements soient les plus ressemblants possibles, elle doit être complétée par d'autres types de données, comme l'amplitude. La mémoire fait alors appel à la trace perceptive. Elle agit comme un enregistrement du mouvement effectué au cours de nombreuses répétitions. Pendant et après une tentative de reproduction des mouvements, la rétroaction et la connaissance des résultats permettent au sujet de comparer cet essai avec la trace perceptive qui agit comme une référence de fidélité, de sorte que les ajustements nécessaires pour combler une erreur ou une imprécision peuvent être faits lors de tentatives ultérieures. Moins le sujet a répété le mouvement, moins la trace perceptive et ses informations sont aisées à exploiter. À l'opposé, une reproduction intensive du mouvement renforce et affine graduellement, puis stabilise la trace perceptive à laquelle on peut plus facilement avoir recours. Ces deux traces de mémoire forment une boucle continue entre le mouvement réalisé et le mouvement désiré, permettant une rétroaction constante.

La théorie d'Adams (1971) répond de façon satisfaisante au problème posé par une théorie de la production de mouvement sans retour sur le résultat, mais a tout de même été critiquée dans la mesure où l'ensemble des observations sur lesquelles elle repose concernent une unique catégorie de mouvements (simples et lents), ce qui restreint sensiblement sa portée. Et au-delà de ce constat, un second dysfonctionnement théorique subsiste : si chaque mouvement musculaire est codifié par un programme moteur inscrit dans le SNC, il existerait alors un code pour chaque mouvement réalisable par un individu ; le corps pouvant réaliser une infinité de mouvements, la capacité de stockage de l'information par le SNC serait donc infinie.

4.1.1.3. Théorie du schéma

Pour Schmidt (1975), il est impossible de stocker en mémoire l'infinité des programmes moteurs correspondant à l'infinité des mouvements qu'un sujet apprend et réalise au cours de sa vie. Afin de corriger cette contradiction commune aux théories en boucle ouverte et en boucle fermée, Schmidt (1975) propose le concept de programme moteur *généralisé*.

Dans le processus d'apprentissage du langage, un enfant n'a pas besoin d'avoir vu toutes les races de chien pour référer à l'animal grâce au mot « chien » ou à l'onomatopée « ouaf ouaf ». L'enfant sait que tous les individus appartenant à la même catégorie « chien » ont des traits communs avec le prototype qu'il s'est formé à travers son expérience de ce type d'animal.

Tout comme il n'est pas nécessaire d'avoir vu *toutes* les races de chiens existantes pour savoir distinguer un chien d'un autre animal, il n'est pas nécessaire d'avoir pratiqué *tous* les gestes possibles pour savoir les réaliser. Cela est possible dans la mesure où, entre les chiens pris dans

leur ensemble comme entre certaines catégories gestuelles, il existe des *invariants*. Par exemple, dans le cas du lancer (fig. 4.1 et fig. 4.2) – un lancer de balle ou de javelot – l’objet pourra être positionné en arrière du corps avec le bras légèrement fléchi de façon à augmenter l’amplitude du mouvement et donc la distance parcourue par l’objet. Grâce à ces caractéristiques communes, ces mouvements pourraient être regroupés en un seul et même programme moteur. Ce programme moteur généralisé englobe la structure des mouvements qui peut être instanciée, et à laquelle il est possible de faire appel. Des variantes y sont introduites comme la force, la vitesse, l’amplitude ou la direction du mouvement, afin que le lancer soit parfaitement adapté à ce que la situation en cours exige.

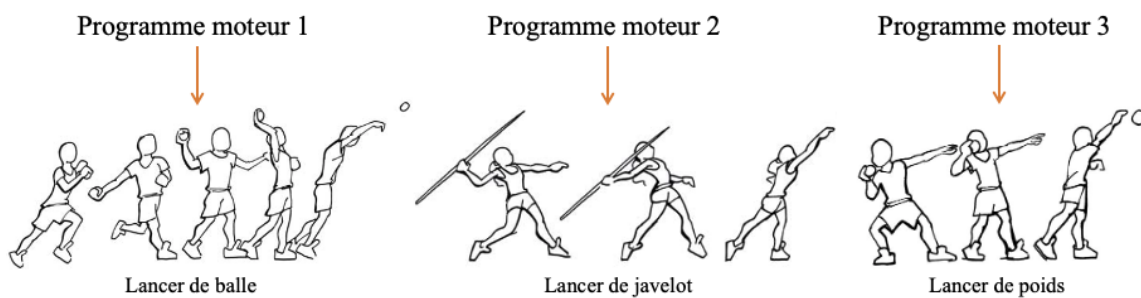


Figure 4.1 – Un programme moteur représente l’exécution d’un unique geste

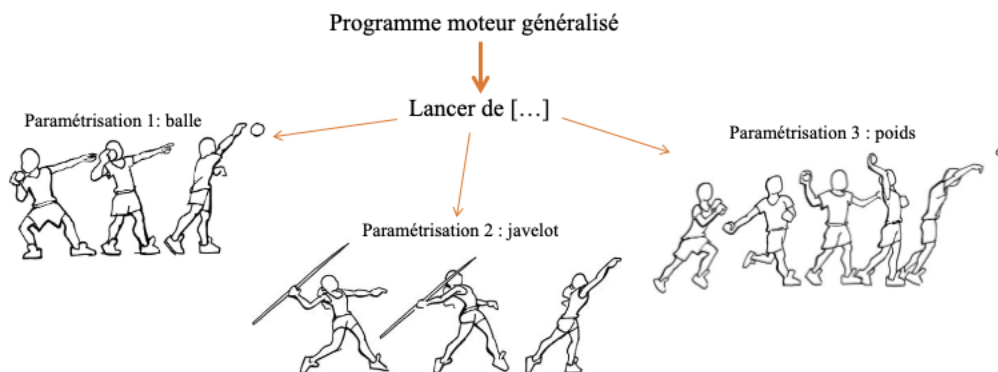


Figure 4.2 - Un programme moteur généralisé recouvre l’exécution d’un *groupe* de gestes, auquel sont ensuite associées les variables (paramétrisation) singulières à chacun

Selon Schmidt (1975) toujours, pour faire appel à un programme moteur généralisé, il est nécessaire de mettre en jeu deux types de schémas : le schéma de rappel et le schéma de reconnaissance. Le premier a pour rôle de sélectionner les paramètres requis pour la réalisation d’un mouvement donné et de rappeler en mémoire le programme moteur généralisé adapté. En fonction du programme moteur généralisé activé, un schéma de reconnaissance se met en

place : les conséquences sensorielles qui sont attendues sont comparées à celles qui se réalisent dans les faits. Le parallèle entre ce qui se réalise et ce qui est attendu permet de déceler les erreurs et, si nécessaire, de réguler le mouvement.

La distinction apportée par Schmidt (1975) se situe donc au niveau de la généralisation du programme moteur permettant de réduire la nécessité de stockage des données par le SNC : il existe autant de programmes moteurs qu'il existe de *classes* de gestes.

Malgré ces quelques modifications, la relation univoque entre le SNC et les segments corporels constitue le fondement des deux théories (Adams 1971, Schmidt 1975) ; dans les deux cas, la mémoire joue un rôle central. Mais, déjà à cette même époque, d'autres courants de pensée étaient également forts, comme celui mené par Bernstein (1967). L'observation de cet auteur est simple. Le corps comporte 206 os, plus de 300 articulations et 600 muscles : il est impossible de contrôler chacune de ces entités sans surcharger le SNC (système nerveux central), et la généralisation des programmes moteurs n'y change rien. Ce sont dès lors, les notions de « prescription » et d'« ordre » qui sont remises en cause. Cette réflexion émane d'un autre courant théorique : l'approche dynamique.

4.1.2. Approche dynamique

L'approche dynamique ne propose pas de modifier les théories préexistantes, mais de renouveler profondément l'étude de la production des mouvements corporels. Comme c'est le cas de l'approche cognitive de deuxième génération, cette approche s'appuie sur les liens qu'entretient l'individu avec son environnement. L'environnement fournit constamment des informations à l'individu qui peut modifier ou renforcer son comportement en conséquence ; pour se mouvoir, il n'est alors plus question de mémoire, mais de perception et d'action directe. Dans ce cadre, l'étude de la formation de modèles de comportements et de l'émergence de structures dans des systèmes complexes permet de mettre au jour les capacités d'auto-organisation du vivant : les segments se coordonnent entre eux, et ce, sans que le SNC ait eu besoin d'en donner l'ordre⁶².

⁶² Les approches dynamiques n'opposent pas fermement le SNC et les coordinations motrices : elles considèrent que la cognition est incluse dans les comportements émergents, faisant office de « cognition en action » (Temprado 200, 2004).

4.1.2.1. Individu et environnement

Un mouvement d'émancipation a lieu par rapport à la linguistique cognitive de première génération, qui pense le cerveau au centre de toute activité de cognition : le corps devient acteur de la cognition. D'abord pensée en termes de processus de calcul et de représentation mentale, la cognition est désormais décrite en termes de dynamique agent-environnement (Varela 1991). L'esprit n'est alors plus considéré de façon isolée, mais comme étant inscrit dans un corps, et situé dans un environnement. La grammaire fonctionnelle peut prendre alors le pas sur la grammaire générative et considérer la langue à travers l'expérience du sujet. Les approches fonctionnelles tendent à prêter attention à la façon dont la langue est employée dans un contexte de communication, fondé sur l'usage (angl. *usage-based*). Le langage est étudié comme un processus dynamique de construction des capacités de communication et il est incarné. De la même manière, on se demande quelles relations existent entre les entrées sensorielles – ce que l'individu reçoit comme informations de son environnement – et les productions motrices de l'individu.

Pour Lee (1974), la vision joue un rôle prédominant dans l'action : elle sert à prélever des informations de l'environnement pour contrôler les mouvements. C'est le cas notamment avec le contrôle de l'équilibre. Lee (1974) (vidéo [4.1](#) timecode : 2 min 19) a placé successivement des bébés âgés de 13 à 16 mois dans une pièce, dont on peut déplacer légèrement deux des cloisons. Une fois les cloisons actionnées, ces enfants qui marchent depuis peu oscillent sur leurs pieds, titubent et parfois chutent : la vision des cloisons en mouvements donne l'impression aux jeunes participants qu'ils sont eux-mêmes en train de bouger, alors qu'il n'en est rien. Cette observation démontre que l'information visuelle est utilisée pour agir. Dans Gibson & Walk (1960), des bébés se trouvent dans un espace où une zone particulière est plus profonde. Ce creux est recouvert par une vitre protégeant de tout type de chute, qui n'est pas visible par les bébés. Cela prouve que la perception visuelle prend le pas sur les autres systèmes mis en jeu pour le contrôle de l'équilibre, et ce même chez les plus jeunes : ils ne s'aventurent pas sur la zone où ils perçoivent un potentiel danger.

À travers son approche écologique de la perception visuelle, Gibson (1979) approfondit les liens inconscients présents entre l'environnement et l'observateur. Deux grands principes régissent ces liens :

- la perception sert principalement à guider l'action (couplage ou boucles perception-action) ;

- la perception ne demande pas de calcul ou de stockage de l'information (perception directe) puisqu'elle est présente dans l'environnement, et ce, par le biais des *affordances*⁶³.

L'environnement artefactuel et naturel présente des informations en termes de *possibilités d'actions*. La présence d'un siège peut induire la possibilité à celui qui le voit de l'utiliser. Le siège permet, pour ainsi dire, de s'y asseoir. Mais ces affordances ne sont pas invariables, elles dépendent de celui qui les perçoit. Si le siège *afforde* bien à un adulte de s'y asseoir, il peut être une cachette pour l'enfant qui se place derrière le dossier ou un couchage pour l'animal qui s'installe sur l'assise. À ce propos, Warren (1986) a demandé à des individus de différentes tailles s'ils s'estimaient capables de monter une marche qui leur est présentée. Les résultats démontrent que petits ou grands – les sujets jugent que les escaliers ne sont pas praticables à une hauteur critique, qui s'avère être proportionnelle à la longueur de leurs jambes. La frontière entre une *affordance* (marche invitant à être utilisée) et une autre (marche n'invitant pas à être utilisée, car non praticable) émerge alors de la dynamique du système observateur-environnement. Pour les individus qui ont dû juger la praticabilité d'une marche tout comme pour l'enfant qui a estimé qu'il pouvait disparaître derrière le dossier du siège, c'est la relation entre la perception de leurs dimensions corporelles et l'environnement qui construit l'action. Proffitt *et al.* (1995) ont demandé à des individus de juger de l'inclinaison d'une colline soit dans l'environnement réel soit dans un environnement de réalité virtuelle (fig. 4.3). Certains ont eu à donner leur estimation avec, sur le dos, un lourd sac à dos (fig. 4.3 image de gauche) et d'autres, sans rien à porter (fig. 4.3 image de droite). Bien que la colline soit la même, la pente a semblé plus raide pour le groupe encombré d'un sac à dos.

⁶³ Le terme « affordance » dérive du verbe anglais "*to afford*" qui signifie « pouvoir se permettre », ou « avoir les moyens ». Comme il n'y a pas de traduction directe du terme « affordance », nous référencerons ce dernier comme des « opportunités ou possibilités d'actions ».



Figure 4.3 - Expériences de visualisation d'une colline et d'estimation de son inclinaison (Proffitt *et al.* 1995 dans Rosenbaum 2010 : 37)

La pente de la colline est perçue en fonction à la fois de l'effort nécessaire pour la monter et de la capacité de l'individu à l'escalader. L'environnement est perçu et traité selon les possibilités d'action : il y a un couplage continu entre système perceptif et système moteur (i.e. les boucles de perception-action).

Les observations de Gibson (1979) démontrent donc que les actions d'un individu ne sont pas liées à des représentations stockées dans le SNC, mais émergent du fait de la situation rencontrée. Cela signifie que la mémoire ne jouerait pas un rôle décisif dans l'action.

Mais alors, si le primat n'est plus mis uniquement sur la mémoire, mais plutôt sur l'émergence du comportement en fonction des caractéristiques de l'individu et celles de l'environnement, comment produire un mouvement cohérent avec autant d'effecteurs ? Comment prendre en compte la complexité de ce système perceptivo-moteur ? Nous verrons que la tendance à amoindrir le rôle du SNC ira en s'amplifiant avec l'étude des systèmes complexes : ces théories se penchent sur la formation de patrons émergents d'auto-organisation.

4.1.2.2. Systèmes complexes : auto-organisation et émergence

Une foule humaine est composée de nombreux sujets regroupés dans un espace clos ou ouvert, qui se déplacent. Une foule en mouvement – nous en avons tous fait l'expérience – est une structure organisée (Older 1968) : deux flux d'individus se forment spontanément, l'un dans le sens contraire de l'autre (fig. 4.4).



Figure 4.4 – Photographie d’une foule qui laisse apparaître deux flux opposés de déplacement : à gauche, la foule avance vers le photographe ; à droite, elle avance vers les arbres.

Cet ordonnancement peut ressembler à un accord tacite préalable et collectif ayant pour but d’améliorer le confort de déplacement de chacun. Il n’en est cependant rien (Moussaid 2010). Si nous opérons un *zoom* sur les individus présents sur la fig. 4.4, nous nous rendons compte que chacun n’observe pas scrupuleusement cette règle ; en réalité, chaque individu est confronté à ses voisins qu’il tente constamment de dépasser ou d’éviter. Les comportements relèvent d’une intention purement personnelle qu’aucune règle explicite ne prescrit, mais une division en deux flux distincts se forme bel et bien. Une telle structure relève en fait de *propriétés émergentes*. Cela signifie qu’un comportement collectif apparaît spontanément à l’échelle du groupe sans être explicitement souhaité ou organisé par les individus. Chaque individu se comporte suivant ses propres motivations, mais le comportement de chacun est fortement influencé par celui de ses voisins ; et « [c]’est à partir de ces interactions locales entre des individus proches que naît la dynamique globale du système » (Moussaid 2010 : 2). C’est à partir d’interactions à l’échelle microscopique que s’établit une organisation à l’échelle macroscopique. Cette *auto-organisation* ne peut apparaître qu’à partir d’un certain niveau de complexité (dans ce cas-ci, il faut que le nombre d’individus au sein de la foule soit suffisamment important). La complexité, qui constituait plutôt une gêne à évacuer pour l’approche cognitive, constitue dès lors un atout dans la perspective dynamique.

Il en va de même, par exemple, avec les nuées d’oiseaux. La « murmuration » est un phénomène naturel connu : des milliers d’oiseaux semblent ne former qu’une seule entité vivante. Il suffit qu’un seul individu soupçonne ou détecte l’attaque d’un prédateur et change de direction pour

que son voisin l'imite et que le mouvement se transmette de proche en proche. Comme pour la foule, plus les interactions entre voisins sont nombreuses, plus les individus synchronisent efficacement leur vitesse : la nuée est alors mieux coordonnée et semble se déplacer comme un seul être. Reynolds (1987) a créé un logiciel de vie artificielle qui simule le comportement de nuée des oiseaux⁶⁴. Ces acteurs artificiels à la forme triangulaire sont appelés *BOIDS* (contraction du mot anglais « *birds* » et du suffixe grec « *oids* » qui signifie « qui a l'aspect de »). Pour que leurs interactions semblent naturelles, trois règles suffisent (fig. 4.5) :

- 1) Répulsion de courte distance (il ne faut pas que les individus entrent en collision, entre eux ou avec des obstacles).
- 2) Cohésion (chaque individu essaye de se rapprocher de ses voisins).
- 3) Alignement (chaque individu regarde dans la même direction)

Ces règles simples permettent de générer un comportement complexe.

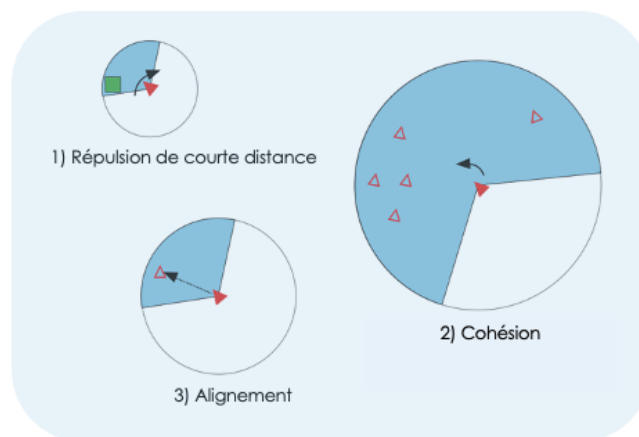


Figure 4.5 – Régulations du comportement de nuées des oiseaux par le biais de trois règles simples⁶⁵ (pour visualiser le résultat de l'algorithme développé par Reynolds : vidéo [4.2](#))

Lorsque l'observation est basée sur le comportement de l'individu, aucun *patron* ou cohérence ne peut être analysé. Mais à partir du moment où l'intérêt se déplace vers la *coordination* entre les différents éléments d'un vaste ensemble d'individus, il est possible de le décrire de manière simple, quelle que soit sa complexité, comme nous venons de le voir.

Le système musculo-squelettique humain est composé de nombreux DDLs ; serait-il possible d'y déceler des structures émergentes auto-organisationnelles ?

⁶⁴ Il s'agit ici non pas du phénomène de murmuration qui apparaît lors d'une nécessité de protection, mais plutôt du déplacement en banc classique.

⁶⁵ Illustration tirée de <https://mas.kke.co.jp/en/model/voide-model/>

4.1.2.3. Contraintes régulatrices du comportement moteur

La production motrice, qui est particulièrement complexe et riche, est soumise à de nombreuses contraintes. Pour Newell (1986), les contraintes forment l'ensemble des facteurs qui peuvent limiter – et non empêcher - les possibilités d'action. L'auteur distingue trois catégories de contraintes : les contraintes inhérentes à la tâche, celles liées à l'individu et celles dues à l'environnement dans lequel le mouvement est réalisé (fig. 4.6).

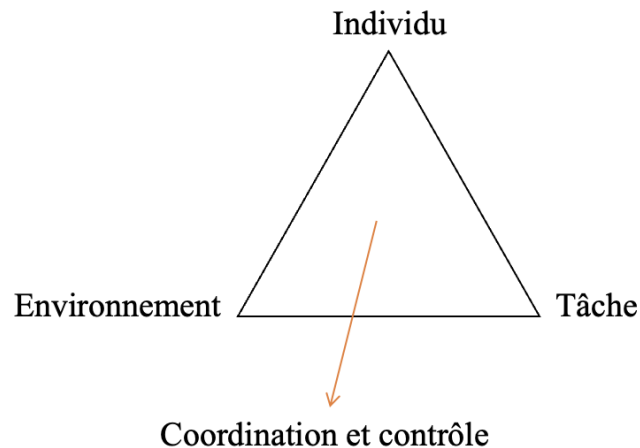


Figure 4.6 – Diagramme schématisant les catégories de contraintes qui guident l'émergence du patron de coordination (inspiré de Newell 1986 : 348).

1) Les contraintes liées à la tâche sont définies par rapport au but de l'activité. Il est possible de classer ces contraintes selon trois catégories d'activités :

- Les activités contraintes par leurs objectifs : des règles dictent la conduite globale à adopter, laissant l'individu libre de ses mouvements.
- Les activités contraintes par une ou des consignes : la liberté de mouvement est soumise à une règle, comme dans une course de natation qui spécifie le type de nage (*brasse, etc.*).
- Les activités contraintes par un instrument : les mouvements sont entièrement définis par un dispositif. Le vélo par exemple impose des rotations des membres inférieurs, en prenant appui sur des pédales.

2) Les contraintes liées à l'individu imposent des spécificités physique, physiologique ou encore psychologique à la réalisation d'une tâche. Certaines d'entre elles sont associées aux caractéristiques du corps comme la masse ou la taille ; d'autres sont dépendantes du temps ou sont fonctionnelles. Il s'agit par exemple d'un état de fatigue particulier au moment de la réalisation du mouvement.

3) Les contraintes liées à l'environnement sont associées à un facteur extérieur, tel que la luminosité, le climat ou le bruit. Les forces gravitationnelles – comme celles dans l'espace ou

dans l'eau - peuvent être aussi considérées comme des contraintes qui peuvent, en cas de changement brutal, influencer la configuration et l'amplitude des mouvements. La tâche à réaliser pouvant elle-même être un facteur extérieur, il peut y avoir des liens entre ces deux derniers types de contraintes.

C'est grâce à l'interaction de ces trois catégories de contraintes que l'émergence d'une coordination devient possible. Ces contraintes agissent alors comme des limiteurs, tout mouvement n'est pas possible, mais aussi comme facilitateur : le nombre limité de solutions, voire l'exclusivité d'une solution rend son choix plus aisé. Selon l'approche cognitive, si une des contraintes est retirée, cela ne change pas la fonctionnalité du système, mais seulement la fonctionnalité bien précise du composant, comme c'est le cas pour un objet mécanique, une télévision ou une voiture. Pour les partisans de l'approche dynamique, si une partie des composants du corps - un muscle, une articulation - ou un élément de l'environnement est retiré, alors cela peut - ou non - désorganiser complètement le comportement final.

Si nos articulateurs s'organisent afin d'interférer dans le milieu artificiel environnant, nous pouvons supposer que c'est aussi le cas lorsqu'il s'agit de mouvements communicationnels. Cette organisation peut être questionnée par le biais de l'approche kinésilogique des LS de Boutet (2001, 2018) qui met justement l'accent sur les relations qu'entretiennent les segments entre eux. Cette approche linguistique fait alors écho à l'unicité corporelle de la théorie dynamique du contrôle moteur, et elles formeront toutes deux les fondements de notre travail de recherche. Si nous avons démontré que le corps présente les caractéristiques d'un système complexe et possède une capacité d'auto-organisation, il est désormais nécessaire de qualifier et de caractériser cette dernière.

4.2. Optimisation du mouvement corporel

La contiguïté de plusieurs segments au sein d'un même membre augmente exponentiellement le nombre de mouvements possibles, et donc le nombre de configurations tridimensionnelles envisageables. Nous pouvons l'observer par le biais de la mise en mouvement d'un triple pendule (fig. 4.7).

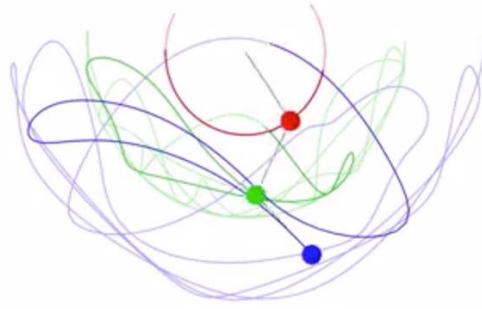


Figure 4.7 – Mouvements d'un pendule à trois axes (vidéo [4.3](#))

Le premier pendule représenté par le disque rouge pourrait être vu comme l'articulation du coude. Le disque vert correspondrait alors au poignet et le disque bleu aux doigts. Si on ne regarde que le disque rouge, le mouvement est simple puisqu'il est contraint à ne suivre qu'une seule et unique trajectoire circulaire. Mais cette liberté de mouvement limitée multiplie les possibilités de mouvement du deuxième pendule. Il en va de même pour le disque vert qui accumule les DDLs de ses deux voisins proximaux. Mettre en mouvement le membre supérieur revient à contrôler des segments qui ont des contraintes articulaires particulières, mais qui fonctionnent avec ce même schéma d'accroissement exponentiel de mouvement. Si cette caractéristique reflète la richesse de notre système articulo-squelettique elle présuppose des processus d'optimisation du mouvement analysables à travers les données cinématiques du mouvement corporel ainsi que par les groupements synergiques des segments effecteurs.

4.2.1. Récurrence et stabilité motrices

La variabilité est une propriété intrinsèque au système responsable du mouvement corporel : il n'est pas possible de reproduire *exactement* le même mouvement deux fois (Bernstein 1967). Cette caractéristique a alors été initialement associée à une perte de performance. Pourtant, dans le cadre des approches dynamiques, elle prend une autre dimension et est considérée comme une richesse des comportements moteurs, capables de s'adapter pour agir dans une situation complexe (Davids & Serfert 2014). De plus, il a été démontré que des patrons récurrents de profils de mouvement existent et que leur reproductibilité peut être modélisée mathématiquement. L'exemple de la foule humaine (§ 4.1.2.2) permet de comprendre cette supposée dichotomie : lorsque les individus sont observés séparément, ils présentent des comportements idiosyncrasiques ; tandis que si la foule est considérée comme un unique ensemble, alors des comportements communs et récurrents se manifestent. Les disparités locales n'empêchent donc pas l'homogénéité collective.

4.2.1.1. Mouvements morphocinétiques

Le temps mis par une personne pour dessiner une forme repose sur un principe de proportionnalité, dit ici d'isochronie. Ce principe stipule que l'augmentation de la taille des ellipses n'entraîne pas d'augmentation de la durée de réalisation des trajectoires (fig. 4.8) : le temps mis pour dessiner une forme est globalement constant, quelle que soit la taille de la forme (Viviani & Schneider 1991).

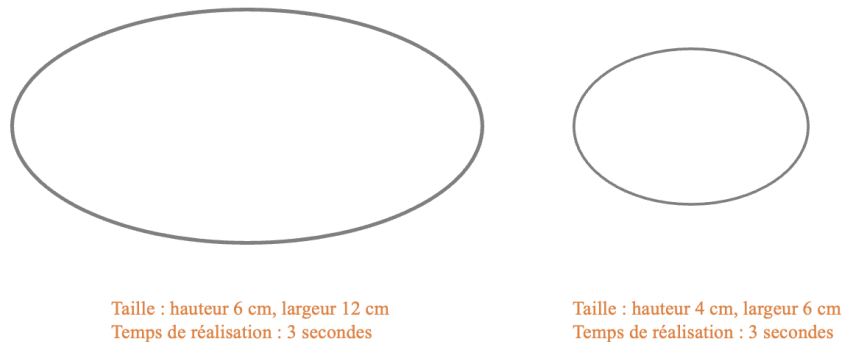


Figure 4.8 – Sans contrainte de précision ou de vitesse, le principe d'isochronie stipule que le temps de réalisation de ces deux ellipses est le même, malgré leur différence de tailles

En absence de contrainte temporelle explicite, la vitesse moyenne d'un geste co-varie donc de façon spontanée avec la longueur de sa trajectoire présentant une proportionnalité (isochronie) entre la taille de la figure et la *vitesse* d'exécution, mais une absence de proportionnalité (anisochronie) entre la taille de la figure et la *durée* d'exécution.

Ce principe met en évidence une invariance globale de la durée de production d'une forme graphique. Cependant, il ne dit rien sur la façon dont varie la vitesse de production *au cours* du tracé d'une forme. Berthoz (1997) énonce :

« Lorsque vous dessinez une ellipse sur une feuille de papier d'un mouvement naturel, vous pouvez avoir l'impression que la vitesse avec laquelle vous dessinez est totalement indépendante de la forme. Eh bien, ce n'est pas le cas : il existe une relation extraordinairement précise entre la courbure de la forme que vous dessinez et la vitesse tangentielle le long de la courbe ». (Berthoz, 1997 : 158-159)

En effet, une étude sur les tracés curvilignes a montré que la vitesse du dessin augmente lorsque le trait est le moins courbé, et au contraire, le tracé diminue de vitesse dans les parties les plus courbes (fig. 4.9).

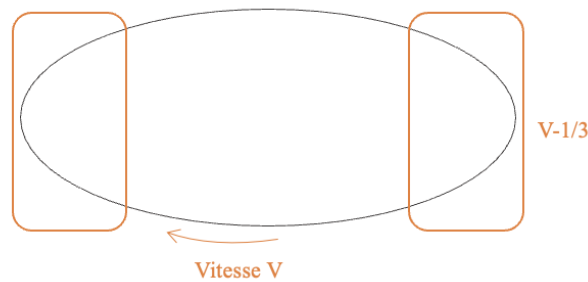


Figure 4.9 – La vitesse de réalisation d’une ellipse diminue d’un tiers dans les parties les plus courbées

Cette loi se nomme « loi de puissance deux tiers » ou « co-variation vitesse courbure » (Lacquaniti *et al.* 1983). Elle peut être observée pour le tracé de lettres ou pour celui d’un dessin, mais aussi pour les mouvements tracés dans l’espace (Viviani & Schneider 1991). Cette loi de puissance $2/3$ n’invalide pas le principe d’isochronie, mais le complète.

4.2.1.2. Mouvements topocinétiques

Les mouvements topocinétiques – mouvements dirigés vers un but spatialement défini comme c’est le cas lors d’un test de pointage – ont aussi été étudiés selon leurs caractéristiques cinématiques. Contrairement aux productions morphocinétiques, les mouvements topocinétiques ne respectent pas le principe d’isochronie, mais sont plutôt contraints par les propriétés de la cible à atteindre.

Fitts (1954) a cherché à quantifier et modéliser les relations rapidité/précision de ce type de mouvement et les conséquences sur la vitesse d’exécution de ce même mouvement. Des sujets ont reçu la consigne de pointer le plus de fois possible deux cibles distinctes dans un temps donné. Ces cibles, de différentes largeurs, étaient placées à une distance variable les unes des autres : le temps pris pour pointer ces cibles n’était pas imposé, mais la précision spatiale était indispensable ; il fallait faire en sorte que le pointage atteigne bel et bien la cible.

Le résultat de ce temps démontre que le temps augmente en fonction de la distance croissante entre les cibles et/ou de la largeur décroissante de ces mêmes cibles. La relation entre ces deux variables est linéaire puisque la valeur du temps de mouvement évolue strictement en fonction de la valeur de l’index de difficulté de la tâche (distance et taille de la cible). Cette relation linéaire permet de prédire le temps de déplacement nécessaire pour atteindre une cible : atteindre une cible proche, mais petite requiert un ralentissement du mouvement afin d’être le plus précis possible ; atteindre une cible éloignée, mais de plus grande taille engendre un mouvement plus rapide, car moins précis (fig. 4.10). Le mouvement de pointage de ces deux types de cibles est finalement similaire.

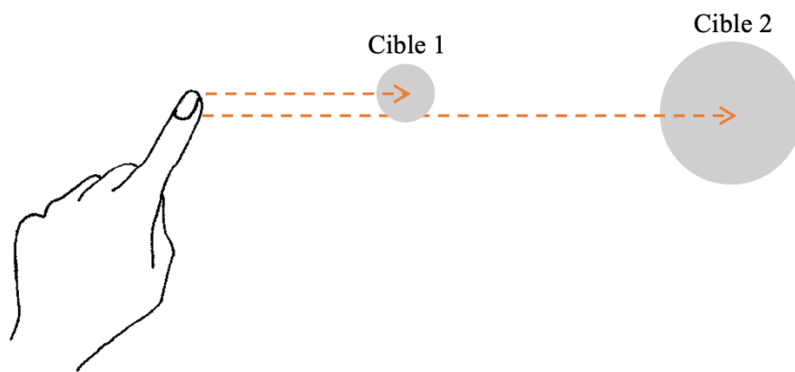


Figure 4.10 – Le temps pour atteindre ces deux cibles est sensiblement le même : la cible 1 est petite, mais rapprochée, alors que la cible 2 est éloignée, mais plus large.

Langolf *et al.* (1976) ont ensuite montré que la linéarité entre l'indice de difficulté de la tâche (précision, éloignement) et le temps moteur demeurait le même, quel que soit le segment corporel utilisé par le sujet, que ce soit le doigt, le poignet, mais aussi le bras ou le pied. L'ensemble de ces principes et lois démontre parfaitement l'aspect non hasardeux du mouvement humain qui est soumis à des régularités cinématiques auxquelles, d'ailleurs, les signes de la LSF ne dérogent pas (Benchiheub 2017).

Cependant, la présentation de ces lois n'offre qu'une description de surface des phénomènes d'économie et ne fournit pas d'explication sur son origine. Il semble désormais nécessaire de se pencher sur les relations synergiques entre les segments d'un même membre, et sur leurs conséquences au niveau de la dynamique du système articulo-squelettique.

4.2.2. Acte moteur : un travail d'équipe

Les lois du mouvement démontrent qu'il existe une mise en place de structures coordinatrices des articulateurs. Elles sont le reflet observable de l'adaptabilité dont fait preuve tout organisme vivant contraint par les forces physiques environnantes. Ces dernières incitent le corps à travailler par couplage synergique se reposant sur des relations préférentielles des coordinations de leurs DDLs.

4.2.2.1. Forces physiques

Une certaine régularité peut être observée dans le milieu naturel. Boutet (2018) cite l'auteur Thompson (1942), et plus particulièrement un passage dans lequel ce dernier explique le processus de création du motif des nids d'abeilles, composé d'hexagones parfaitement agencés.

Trois formes géométriques simples permettent, une fois empilées, de ne laisser aucun espace vide entre elles : il s'agit du triangle équilatéral, du carré et de l'hexagone (fig. 4.11). Leur comparaison démontre que pour atteindre une même superficie, le triangle nécessite une vingtaine de répliques, le carré neuf et l'hexagone sept.

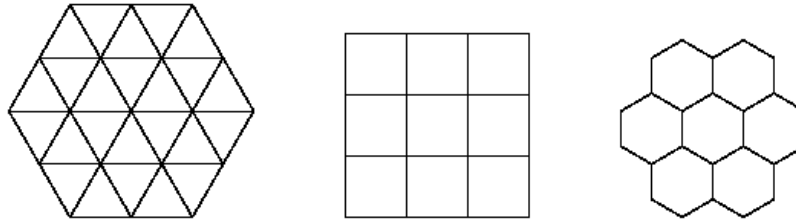


Figure 4.11 - le triangle équilatéral, le carré et l'hexagone

Pour les abeilles, utiliser le moins de cire possible pour construire leur ruche revient à chercher la forme qui donnera la plus grande surface pour un périmètre donné : l'hexagone est la figure qui s'impose pour remplir cet objectif. S'agit-il d'un choix « délibéré » afin de réaliser une économie d'espace et de matière, la sélection naturelle ayant permis aux abeilles de devenir « conscientes » de l'intérêt stratégique que l'hexagone représente ? L'observation des abeilles dans leur milieu naturel démontre tout autre chose : celles-ci déposent *aléatoirement* des gouttes de cire, qui sont de forme – parce que ce sont des gouttes – circulaire. Une fois déposées, elles sèchent et, sous la pression des gouttes qui s'accumulent, se rétractent et prennent la forme d'hexagones. La forme hexagonale s'impose donc à l'abeille pour des raisons purement physiques. La recherche d'économie est pourtant bien là : la goutte circulaire a opéré une transformation minimale jusqu'à ce qu'elle puisse s'emboîter parfaitement avec ses semblables (fig. 4.12).



Figure 4.12 – La forme circulaire ne peut pas s'agglutiner sans laisser d'espaces vides, contrairement à la forme hexagonale

Ce même patron hexagonal apparaît sur diverses surfaces naturelles comme les bulles qui s'agrègent à la surface de l'eau ou les écailles d'un ananas : les lois de la physique modèlent les formes du non-vivant... et celles du vivant.

En effet, la forme de l'anatomie humaine est directement imposée par l'action des forces physiques. L'impact de la gravité a joué un rôle déterminant dans notre constitution (Thompson 2009) :

« Si la force de gravité venait à doubler, notre bipédie serait totalement inadaptée, et la plupart des animaux terrestres prendraient la forme de sauriens courts sur pattes ou encore de serpents. [...] En revanche, si l'intensité de la force de gravité diminuait de moitié, nous serions plus légers, plus sveltes et plus actifs, nous aurions un besoin d'énergie, de chaleur et de sang moins important, et notre cœur et nos poumons pourraient être plus petits. La gravité ne contrôle pas seulement les actions, mais elle module également la forme de toutes les créatures, jusqu'à la moindre d'entre elles. » (Thompson 2009 : 57)

Plus encore, la gravité a contraint le *mouvement* humain. McMahon (1984) a observé que durant la marche, le balancement de la jambe qui ne repose pas au sol ne requiert aucune activation musculaire simultanée. Les propriétés physiques de la jambe par rapport au champ gravitationnel suffisent, aucun contrôle du mouvement n'est nécessaire une fois que la jambe est lancée vers l'avant⁶⁶.

Par ailleurs, la superposition des photographies inspirée de la technique de Muybridge (§3.1.1.2) démontre que pendant la course, la tête est stabilisée malgré les mouvements amples des membres supérieurs et inférieurs (fig. 4.13).

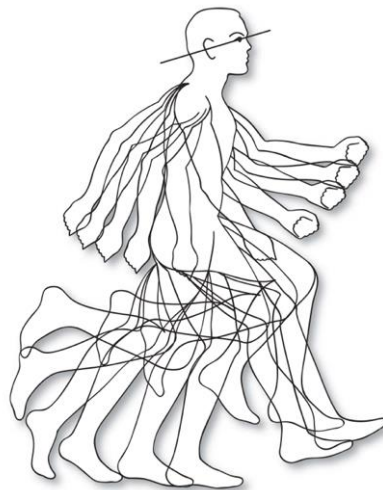


Figure 4.13 – Superposition de chronophotographies permettant de révéler la stabilisation de la tête durant une course (Berthoz 1997 : 111)

⁶⁶ Ce principe a permis de développer des robots qui marchent en ne se servant que de leur propre poids. Sans moteur ou électricité, une légère impulsion mécanique suffit. Pour un exemple de « *dynamique passive walker* ».

Cette stabilité est primordiale pour évaluer efficacement l'angle de la tête, et par ce fait celui du système vestibulaire, par rapport au sol (Berthoz & Pozzo 1988). Ne pas subir les rotations permet à la tête de mieux coopérer avec la gravité et garder un équilibre global, notamment pour le système visuel, dont le rôle est prépondérant dans le maintien de l'équilibre et dans la perception des informations sensorielles. Cette stratégie montre que le corps fonctionne en *synergie*.

4.2.2.2. Synergies préférentielles

L'organisation synergique est un mécanisme d'économie au sein des productions motrices proposé et développé par Bernstein (1967). La synergie est un phénomène qui implique plusieurs éléments, ici il s'agit de différents segments. Pour illustrer ce type d'organisation, Rosenbaum (2010) donne deux types d'exercices moteurs simples à réaliser. Le premier présuppose une position de départ avec le membre supérieur étendu et la main en supination (paume vers le haut) (fig. 4.14 A image de gauche) ; il s'agit ensuite de fléchir dans un même mouvement le poignet et le coude (fig. 4.14 A image de droite) et de répéter ce mouvement plusieurs fois de suite. Pour le second exercice, la position de départ diffère légèrement. Le membre supérieur est toujours étendu avec la main en supination, mais cette dernière est déjà fléchie (fig. 4.14 B image de gauche) ; il faut alors fléchir le coude, mais étendre la main (fig. 4.14 B image de droite) dans un seul et même élan, et répéter le mouvement plusieurs fois de suite.

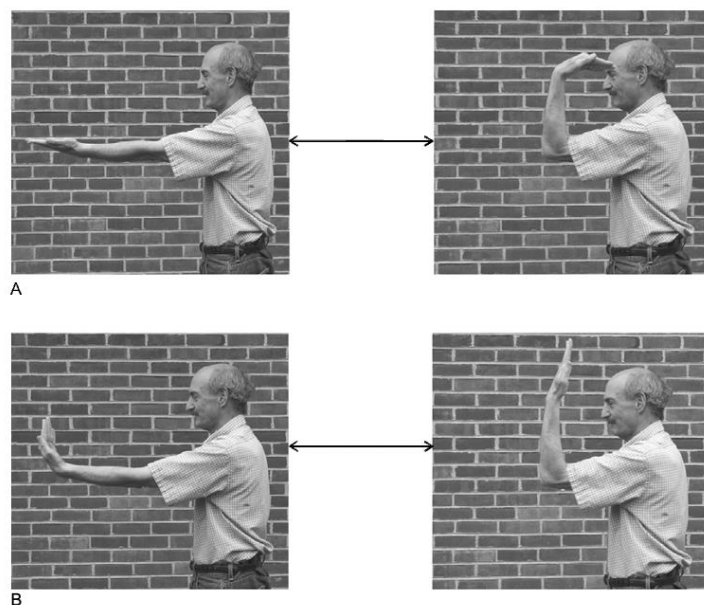


Figure 4.14 – Deux exercices permettant d’illustrer un type de synergie préférentielle (Rosenbaum 2010 : 16)

Si la différence entre ces deux exercices est minime, la deuxième tâche est néanmoins plus difficile à réaliser (Kots & Syrovognin 1966). Certaines combinaisons de mouvements seraient donc plus « fortes » ou en tout cas « préférées » par le système musculo-squelettique. Ce type de synergie ne bloque pas les DDLs (il est tout à fait possible de réaliser le mouvement de la figure 4.14 B), mais elle favorise des regroupements qui sont autant de « modes d’exécution par défaut⁶⁷ » (Rosenbaum 2010 : 18).

Lorsqu’un pendule à un axe est lâché (pendule rouge de la fig. 4.7), son mouvement est prévisible : il cherche à revenir à sa position d’équilibre vertical stable. Cette attraction vers un état de stabilité peut aussi être observée dans un mouvement. Kelso *et al.* (1981) ont demandé à des sujets de faire osciller leurs deux index à la même fréquence. L’analyse de ces mouvements démontre que deux patrons stables se détachent de manière particulière : celui qui maintient une relation en *phase* et celui qui maintient une relation en *antiphase* entre les deux doigts. Le terme « en phase » signifie que ce sont les mêmes muscles qui se contractent simultanément. Sur la fig. 4.15 image de gauche, les doigts réalisent tous deux une abduction (mouvement qui les éloigne des autres doigts). Le terme « en antiphase » indique que les mouvements requièrent la contraction simultanée de muscles antagonistes. Sur la fig. 4.15 image de droite, l’index de la main gauche réalise une adduction (mouvement qui le rapproche des autres doigts), et l’index de la main droite effectue une abduction.

⁶⁷ « as fallback ways of performing » (Rosenbaum 2010: 18)

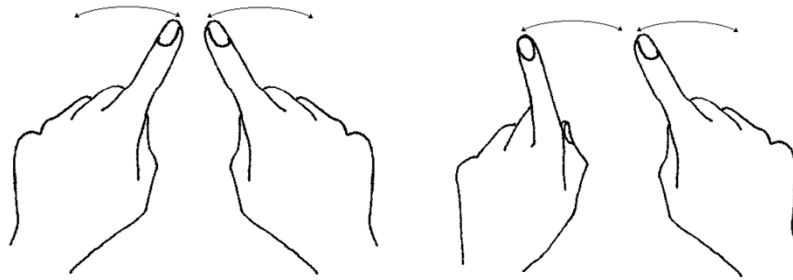


Figure 4.15 – Le schéma de gauche représente la coordination en phase, le schéma de droite représente la coordination en antiphase (d’après Kelso *et al.* 1981)

Sous l’influence des contraintes qui agissent sur le système, ce dernier tend donc à adopter un certain type de comportement pouvant être qualifié de spontané ou préférentiel. C’est à ces coordinations préférentielles que Kelso *et al.* (1981) donnent le nom d’« attracteur ». Ici, la coordination en phase et la coordination en antiphase sont deux attracteurs. C’est-à-dire qu’un sujet adopte spontanément, sous la contrainte de modifications de la fréquence d’oscillation des index, l’une ou l’autre de ces deux coordinations.

Ces éléments ne doivent pas laisser penser que selon l’approche dynamique, la cognition n’a plus de rôle à jouer dans la production et la coordination des mouvements. Sa présence active n’est pas remise en cause, mais son rôle est déplacé. Cette dynamique intrinsèque auto-organisationnelle pourrait tout à fait être contrainte par des informations comportementales contradictoires : si l’exercice de coordination bimanuelle le demande et si le sujet en a l’intention, il est tout à fait possible de réaliser une coordination différente, par exemple un décalage de phase entre les deux index (le premier index termine un mouvement d’adduction pendant que le second le débute). Ces coordinations possibles, mais plus instables, sont nommées les « repellants ». Dans ce cas, la variabilité du décalage sera plus grande et le sujet devra investir un effort plus intense pour le maintenir, sauf si celui-ci s’entraîne à modifier la force des attracteurs initiaux.

Nous avons vu dans cette section des règles de synergie et d’optimisation motrice présentes dans le cadre de mouvements non écologiques et surtout, non langagiers. Intéressons-nous désormais à l’acte moteur produit au sein de communications en LS.

4.2.3. Optimisation du mouvement en langue des signes française

Si dans les chapitres précédents nous avons principalement considéré le mouvement comme un paramètre constitutif des LS ; il a été question ici du mouvement comme production motrice auto-organisée faisant partie d'un système complexe. Ces deux perspectives sont issues de disciplines distinctes, touchant respectivement à la linguistique et la kinésiologie. Les travaux de Stokoe (1991) puis de Boutet (2001, 2010, 2018) ouvrent la voie à l'association de ces disciplines, nous permettant de réinterroger l'exhaustivité terminologique de l'économie linguistique.

4.2.3.1. Économie linguistique

Il est possible d'aborder la notion d'économie linguistique sous plusieurs angles.

Une première acception de l'économie linguistique doit être prise en compte : tout système qui est en mesure d'atteindre l'infini par le fini peut être considéré comme économique. C'est le cas des LV qui, par un nombre limité de phonèmes, obtient un nombre pratiquement illimité de mots (Chomsky & Halle 1965). Cette notion, appelée double articulation, est suffisamment robuste pour constituer un critère d'adhésion à l'obtention du statut de langue (Martinet 1974). C'est ce qui pousse Stokoe (1960) à soutenir qu'un niveau phonologique est également repérable dans les LS.

La deuxième acception de la notion d'économie tient compte de la capacité d'une langue à donner un nombre important d'informations en un nombre restreint de productions langagières. Bellugi & Fisher (1972) ont réalisé une étude sur trois sujets parlants couramment l'ASL et l'anglais. Chacun a eu à visionner puis à raconter une même histoire en LV et en LS. Les résultats ont montré que le taux de production de mots est deux fois plus élevé que celui des signes : 4,7 mots sont prononcés par seconde contre 2,36 signes produits par seconde (*ibid.* : 180). Les auteurs expliquent cette différence par le changement de modalité. Prononcer un mot nécessite des déplacements des articulateurs (les lèvres et la langue) qui sont bien moins chronophages que ne le sont les déplacements des articulateurs principaux nécessaires à la composition d'un signe (les bras, les avant-bras et les mains). Si la seule comparaison de la rapidité de production entre mot/signe était établie, il serait alors possible de dire que les LS sont des langues peu économiques. Mais le débit et son rapport implicite au temps n'est pas le seul paramètre dont il faut tenir compte : il y a aussi celui de la quantité d'informations fournies par un mot ou un syntagme et par un signe. Bellugi & Fischer remarquent à ce propos que même si deux fois plus de mots sont prononcés à la seconde, les deux langues ont une production

d'information comparable : il a fallu à peu près le même temps aux locuteurs/signeurs pour relater la totalité de l'histoire (*ibid.* : 184). Bien que les débits de paroles présentent une certaine hétérogénéité, la communication d'un message donné en LS et en LV s'exécute à la même vitesse. C'est là « une forte tendance à la condensation » (*ibid.* : 186) des LS qui permet à ces langues de s'inscrire dans cette première acception d'économie linguistique.

Le troisième type d'économie est celui qui traite de la composition même d'une langue. Des études diachroniques de LS ou de LV démontrent que ces langues se modifient avec le temps, laissant des traces de suppression ou de modifications des phonèmes considérés comme redondants. Pour Adegboku (2011 : 27), l'espagnol médiéval s'est peu à peu transformé jusqu'à prendre la forme de l'espagnol contemporain en suivant une inclination à atténuer jusqu'à leur disparition, des consonnes fricatives (telles que (v) et (z)) et affriquées (telles que (dz) et (ts)). Pour les LS, Frishberg (1975) a étudié ce type de changements diachroniques au niveau du paramètre. L'auteure a notamment observé une tendance à l'augmentation de la symétrie ainsi qu'un déplacement de l'emplacement des signes au sein de l'ASL.

La propension à la symétrie peut être observée au sein de signes bimanuels constitués de deux configurations différentes ou des signes unimanuels. Certains ont évolué vers un signe bimanuel dont les deux configurations sont identiques (fig. 4.16 (a)) ou ont évolué vers un signe bimanuel avec une configuration identique et un mouvement symétrique (fig. 4.16 (b)).

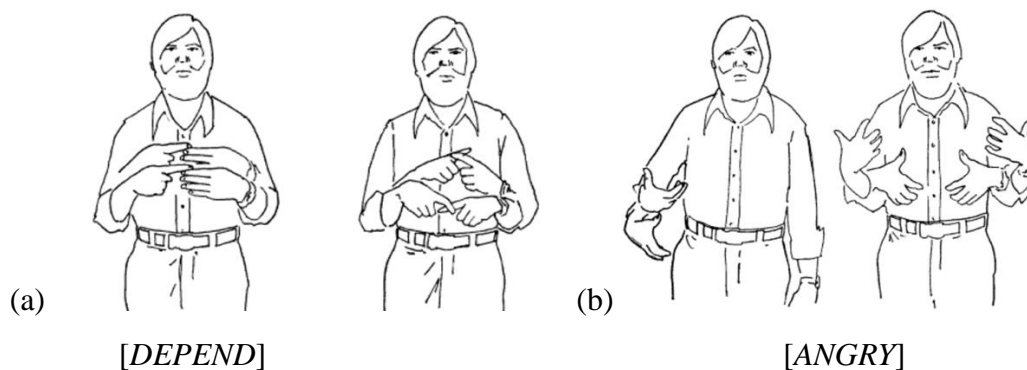


Figure 4.16 – L'évolution du signe issu de l'ASL [DEPEND] concerne la configuration. Celle du signe [ANGRY] concerne l'ajout du deuxième membre supérieur et un déplacement du signe (Frishberg 1975 : 701-702)

Les signes se réalisant sur le visage ont eu tendance à se déplacer en périphérie et à changer de support (fig. 4.17 (a)) et les signes réalisés sur la poitrine se sont plutôt rapprochés d'un point plus central comme l'axe médian du torse (fig. 4.17 (b)).

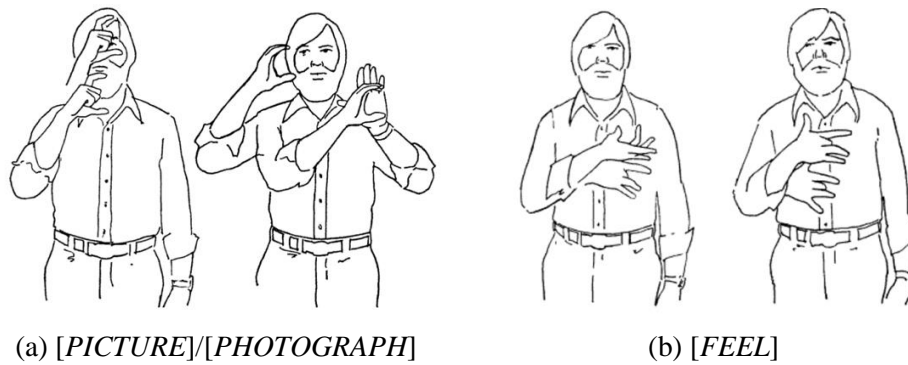


Figure 4.17 – Évolutions de l'emplacement des signes (a) *PICTURE* / *PHOTOGRAPH* et du signe (b) *FEEL* (Frishberg 1975 : 704-705)

Selon Frishberg, ces changements démontrent que l'ASL tend à rendre plus arbitraires les signes qui seraient au départ empreints d'une forte motivation entre le référent et le signifiant. L'auteure y perçoit aussi une tendance à faciliter la production des signes (i.e. mouvements identiques entre les deux membres, emplacements s'éloignant de la périphérie de l'espace de signation) afin d'en faciliter la perception visuelle (Frishberg 1975 : 707).

Chacune des acceptions d'économie linguistique des LS recensées ici trouve un écho dans la structure ou le fonctionnement des LV. Pourtant, si la phonologie des LV et celle des LS rencontrent toutes deux la physiologie, il s'agit pour les LV d'un appareil vocalique d'un équipement ne servant que la parole alors que pour les LS il sert aussi à l'activité quotidienne (Boutet 2005). Puisque le médium est commun entre production motrice et production langagière en LS, il semble légitime de se demander si les habitudes synergiques corporelles jouent un rôle dans la production des signes.

Est-ce que pour communiquer en LS, le mouvement des membres supérieurs n'a d'autres choix que de se complexifier ? Ou bien est-ce que l'optimisation motrice, relevant de processus synergiques automatiques et intrinsèques à l'organisme, est toujours présente ?

Afin de répondre à ces interrogations, il est nécessaire d'exploiter des paramètres qui engagent les membres supérieurs, soit les paramètres de la LOCini et du MOUV. Établissons quelles sont les propriétés et caractéristiques de ces deux paramètres kinésiologiques.

4.2.3.2. Localisation initiale (LOCini) et mouvement (MOUV)

La LOCini décrit la position prise par l'ensemble des segments du membre supérieur avant le déploiement du MOUV (Bianchini *et al.* 2018). Cette position marque une rupture entre un mouvement de transition et un MOUV. C'est le cas de la fig. 4.18, dont l'image (a), qui représente une position de repos, est suivie par (b) un mouvement transitoire aboutissant à (c),

une première LOCini. C'est ensuite le MOUV (d) qui s'enclenche et qui se termine en (e), pour laisser ensuite place à un nouveau mouvement transitoire (f).

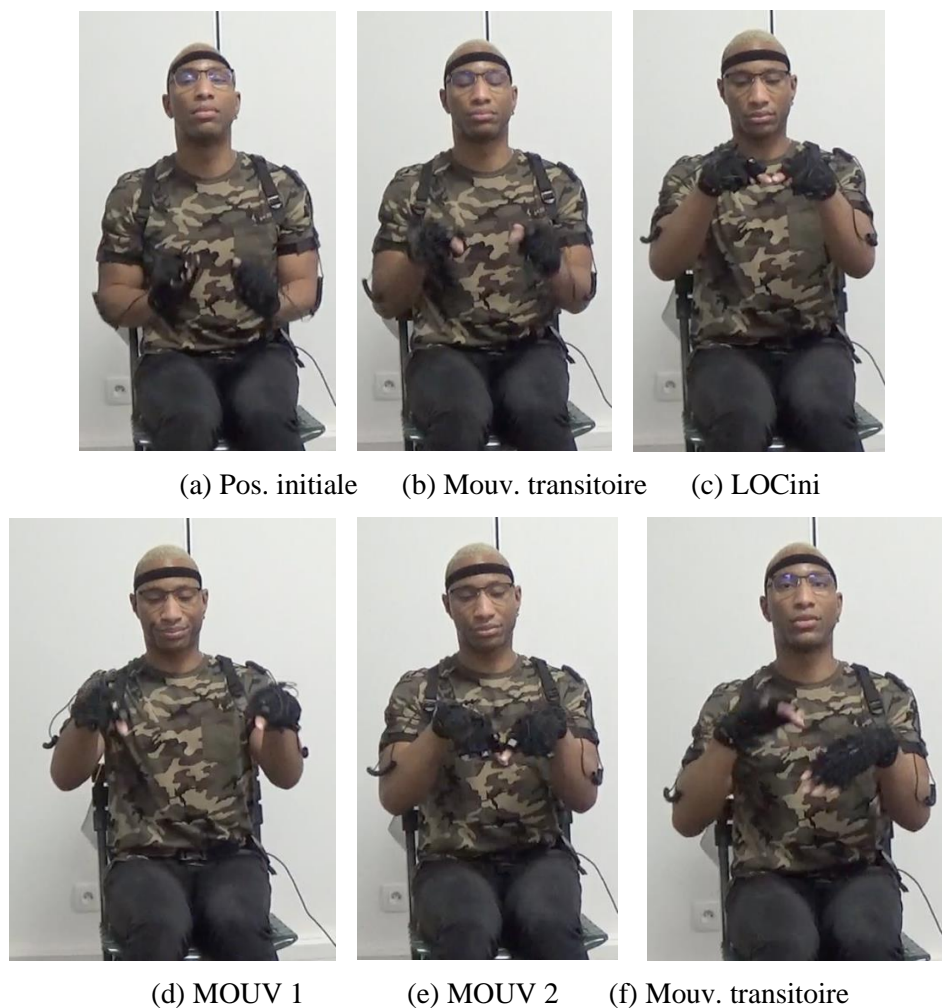


Figure 4.18 – Photographes présentant la succession entre mouvement transitionnel, LOCini et MOUV (signeur 7-2 signe 136 & 137, vidéo [4.4](#))

Il arrive que le MOUV succède directement une nouvelle LOCini. C'est le cas de la fig. 4.19, qui présente une succession de deux couples LOCini/MOUV sans qu'un mouvement transitoire ne les sépare.



(a) LOCini 1

(b) MOV

(c) LOCini 2

(e) MOV

Figure 4.19 – Réalisations des signes [FEMME] (images (a) et (b)) et [LÀ] (images (c) et (d)) (signeur 7-2 signe 42 & 43, vidéo [4.5](#))

Concernant le MOUV : celui-ci n'est pas seulement égal à un déplacement observable dans l'espace, mais peut aussi relever d'une absence de variation des DDLs. Cette absence de variation peut être totale, comme pour le signe [TENIR LE GUIDON] qui dure plus de 1152 ms sans qu'il n'y ait de déplacement observable d'un des segments (fig. 4.20).



Figure 4.20 – Réalisation du signe [TENIR LE GUIDON] (signeur 1 signe 014, vidéo [4.6](#))

Ou elle peut être partielle, comme pour le signe [MUSCLÉ] (fig. 4.21) : le MOUV relève ici d'une absence de variation concernant l'ensemble des DDLs, hormis pour celui de la rotation de l'avant-bras.



Figure 4.21 – Réalisation du signe [MUSCLÉ] (signeur 3 signe 004, vidéo [4.7](#))

Notre travail vient interroger les relations qu’entretiennent ces deux paramètres en se basant sur le postulat qu’une simplification de la forme des signes est attribuable à leur complémentarité. Cette proposition théorique a été divisée en quatre hypothèses. Les voici.

4.2.3.3. Pour une simplification motrice de la forme des signes

Notre première hypothèse postule pour une présence de LOCini hétérogènes (fig. 4.23 hypothèse (a)). Cette contingence de profils démontrerait une participation active des segments afin d’anticiper le déploiement dynamique du signe. Afin de savoir si cette préparation sert bien à un déploiement du MOUV simple et stabilisé, il faut se pencher sur la composition de ce dernier. Pour cela, il faut trouver un critère pertinent nous permettant de considérer que la forme d’un signe est simple ou complexe. Nous décidons de poser le curseur sur le nombre de segments actifs. Plus ce nombre est important, plus la forme est complexe. Voici donc notre deuxième hypothèse ; le MOUV reposerait principalement sur la mise en mouvement d’une *unique* segment (fig. 4.23 hypothèse (b)) comme c’est le cas de la réalisation du signe [MUSCLÉ] (fig. 4.21) pour laquelle seul l’avant-bras est actif⁶⁸.

Selon le type de résultats obtenus, nous pourrions classer les signes en deux catégories :

- les MOUV qui se déploient effectivement sur un unique DDL, et donc un seul segment, classés comme étant une *simple* mise en action de la LOCini préalablement établie ;
- les MOUV qui se déploient sur plusieurs DDLs de différents segments, classés comme une *complexe* mise en action de la LOCini préalablement établie.

⁶⁸ Bien sûr, la main est emportée par le mouvement de l’avant-bras et donc elle se déplace dans l’espace, mais elle n’effectue aucun mouvement propre.

Cette bipartition sous-entend qu'à partir du moment où un MOUV est pluri-segmental, celui-ci est nécessairement complexe. Mais, est-ce vraiment le cas ?

Le membre supérieur est une infrastructure polyarticulée et cette contiguïté des segments n'est pas sans conséquence : le mouvement d'un segment peut avoir des répercussions sur un autre segment voire il peut en influencer le mouvement. Afin d'interroger cette supposée complexité des mouvements pluri-segmentaux, prenons alors en considération deux spécificités qui ont trait à ces MOUV, que nous avons eu l'occasion de détailler dans des sections précédentes : le flux de propagation du mouvement (i.e. l'ordre d'activation des DDLs de différents segments) et les synergies articulaires (i.e. rapports préférentiels entre les DDLs actifs).

Commençons par le flux de propagation du mouvement. Nous avons vu section 1.3.2 que le flux se déroule préférentiellement du bras vers la main. Une étude portant sur l'ordre d'activation des muscles lors d'activités sportives (Van Ingen Schenau 1989) démontre que l'organisation proximo-distale est effectivement celle utilisée afin de maximiser la vitesse du mouvement. Puisque les muscles les plus épais ont aussi les tendons les plus longs (i.e. bras ou cuisse), cela permet de créer un effet de levier et de transférer le mouvement de manière optimale.

En LS, la finalité est différente : ce n'est pas une maximisation de vitesse qui est recherchée, mais plutôt une optimisation de précision de l'information et de justesse de la production de sens. Cette distinction nous permet de postuler qu'en LS le MOUV ne prend pas racine dans les segments proximaux, mais dans les segments distaux, tels que la main. C'est le cas de la fig. 4.22 dont le MOUV touche d'abord la main, puis l'avant-bras : entre les images ① et ②, la main réalise une flexion et une supination ; puis, entre les images ② et ③, la main réalise une extension et entraîne l'avant-bras dans sa course, qui réalise alors aussi une extension.



Figure 4.22 – Réalisation du signe [BIEN SÛR] (signeur 9 signe 136, vidéo [4.8](#))

Si l'amplitude du mouvement de la main est marquée et visible, celui de l'avant-bras est assez faible, et le bras demeure immobile. Cela rappelle que les segments distaux ont une masse musculaire bien plus faible que les segments proximaux (Dumas 2007). La force de pesanteur due à l'attraction terrestre étant proportionnelle à la masse de l'objet, celle du bras est plus forte que celle de la main : que celle-ci parvienne à déplacer le bras demande un effort moteur particulier, sans lequel le MOUV s'affaiblit et se stabilise naturellement tout en remontant le long du membre supérieur. Nous postulons donc, dans le cas de signes pluri-segmentaux, que le flux disto-proximal est majoritaire, ce qui canaliserait le MOUV à l'activation de seulement deux segments, et non les trois (fig. 4.23 hypothèse (c)).

Enfin, pour notre dernière hypothèse, il est question de la présence de synergies préférentielles au sein des MOUV pluri-segmentaux.

Nous l'avons vu, certains pôles⁶⁹ de DDLs sont plus simples à mettre en action en même temps que d'autres (§4.2.2.2). L'exemple que nous avons repris de Rosenbaum (2010 : 16) pour illustrer ce fait est celui-ci : une *flexion* de l'avant-bras accompagnée d'une *flexion* de la main demande moins d'effort qu'une *flexion* de l'avant-bras accompagnée d'une *extension* de la main (fig. 4.23). Si l'auteur ne présente pas d'indications sur les autres synergies existantes au sein du membre supérieur, ceci n'est pas sans rappeler les règles de transfert de mouvement données par Boutet (2018). Pour Boutet, un transfert apparaît : « **lorsque le moment cinétique d'un mouvement est aligné ou dans un angle inférieur à 60° avec le mouvement possible d'un ou plusieurs autres degrés de liberté et que sa force est suffisante pour entraîner le mouvement de ces degrés de liberté**⁷⁰ » (Boutet 2018 : 57). Afin de comprendre de quoi il s'agit,

⁶⁹ Pour rappel, chaque nom de DDL est du nom des deux pôles que le segment peut rejoindre sur cet axe (pour le DDL flexion-extension, les pôles sont la flexion et l'extension).

⁷⁰ Le gras est présent dans le texte initial.

nous pouvons en faire l'expérience : Le bras est en position de repos, aligné au torse, l'avant-bras est à 90° par rapport au bras et la main est en supination, paume vers le ciel. L'avant-bras est en tension afin de rester en flexion par rapport au bras, mais la main est détendue, ballante. Si une flexion de l'avant-bras est réalisée, la main va suivre cette impulsion et réaliser à son tour une flexion (vidéo [4.9](#)). L'impulsion donnée à l'avant-bras s'est prolongée sur la main, sans qu'elle n'ait eu besoin de produire un effort particulier : il y a eu un transfert de mouvement d'un segment à un autre.

En fait, nous venons de reproduire le même test que celui proposé par Rosenbaum (2010). La seule différence est que pour Rosenbaum la main a un mouvement propre, et que pour Boutet (2018) celle-ci est ballante. Mais, il s'agit bien de démonstrations similaires qui se basent sur le même fait moteur : certains mouvements reposent sur la structure corporelle et l'abouchement des DDLs, leur permettant de se déployer sur différents segments tout en minimisant l'effort fourni. La réalisation d'un mouvement pluri-segmental n'est alors pas nécessairement égale à un mouvement complexe, puisqu'il fait partie des synergies préférentielles du système.

Boutet spécifie que ce rapport entre les DDLs n'est pas absolu, mais relatif au niveau de pronosupination initial de la main. En effet, si le même mouvement de flexion est réalisé sur l'avant-bras, mais que la main n'est plus en supination, mais en pronation (i.e. paume orientée vers le sol), l'impulsion de l'avant-bras se transfère sur le pôle opposé de la main : la flexion du bras se prolonge par une extension de la main (vidéo [4.10](#)). Ces différentes combinaisons possibles étant en grande partie identifiées par Boutet⁷¹ (2018 : 57), nous avons désormais toutes les informations nécessaires pour pouvoir interroger la présence de mouvements simultanés ou consécutifs qui relèvent de ces synergies préférentielles au sein de productions signées (fig. 4.23 hypothèse (d)).

⁷¹ Voici un aperçu de la description faite par Boutet : « De l'avant-bras vers la main, le transfert de la flexion de l'avant-bras sur la main dépend de la position de la main. En position intermédiaire (ni pronation, ni supination, « la main sur la tranche »), le transfert opère par une abduction de la main ; en position de pronation complète (paume vers le bas), le transfert a une incidence en termes d'extension. On aura compris qu'en position de pronation de 45°, le transfert se fait à la fois sur l'abduction et sur l'extension de la main. Les autres positions orientent la main de sorte que le transfert touche d'autres pôles. La pronosupination fonctionne ici comme un inverseur de pôles : en position de pronation complète (paume vers le bas), le transfert d'un mouvement de flexion de l'avant-bras affecte l'extension de la main, en position de supination complète (paume vers le haut), c'est bien la flexion de la main qui est affectée. Il est inutile de détailler vers quel degré de liberté manuel est transféré une extension de l'avant-bras, cela dépend ici encore de la position de la main. Retenons qu'à position identique un mouvement d'extension de l'avant-bras aura un impact opposé en termes de pôles à celui qu'aurait le transfert d'un mouvement de flexion de l'avant-bras sur la main. » (Boutet 2018 : 58)

L'ensemble de ces hypothèses sont schématisées en fig. 4.23. Celle représentée en vert concerne exclusivement les données qui proviennent de la transcription des LOCini, celles notées en bleu concernent les informations issues du MOUV ; et celle qui est bicolore nécessite le traitement conjoint des deux types de données.

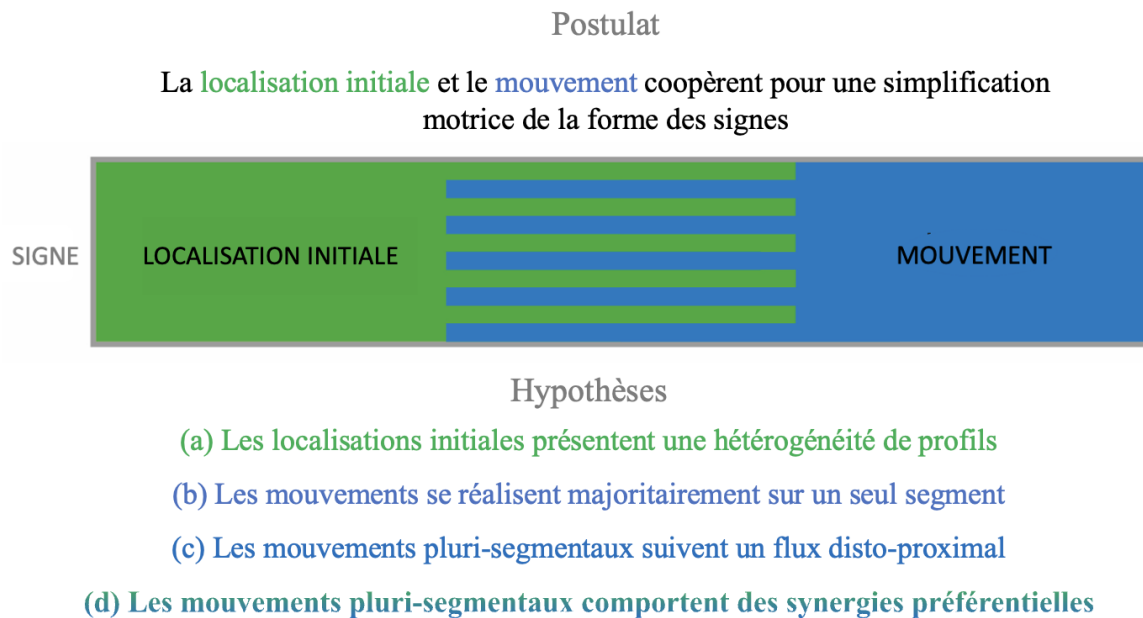


Figure 4.23 – Schématisation du postulat général et rappel des hypothèses de recherche. L'hypothèse (a) concerne la LOCini (vert) ; les hypothèses (b) et (c) concernent le MOUV (bleu) ; l'hypothèse (d) concerne à la fois la LOCini et le MOUV (vert et bleu)

BILAN DU CHAPITRE 4

Deux approches se sont distinguées dans le domaine du contrôle moteur : les théories cognitivistes, pour lesquelles les programmes moteurs sont stockés par le système nerveux du sujet et prescrits aux segments ; et les théories dynamiques qui considèrent plutôt les mouvements comme le produit émergent des interactions entre les éléments du système et l'environnement dans lequel celui-ci évolue. Pour ces dernières, des phénomènes collectifs sont observables dans les systèmes complexes (foules humaines, colonies animales, articulations corporelles), pour lesquels des formes stables apparaissent et disparaissent spontanément sous l'effet des contraintes qui s'exercent sur le système en continu : les acteurs se synchronisent par eux-mêmes et l'ordre « émerge » spontanément, déterminant des patrons préférentiels propres au système. En nous insérant dans cette approche dynamique, nous souhaitons chercher la présence de cette économie motrice au sein des productions en LS, et par ce fait, interroger la complexité imputée au paramètre du mouvement. Pour cela nous posons le postulat que deux des paramètres kinésiologiques, la LOCini (i.e. emplacement et orientation des segments composant le membre supérieur) et le MOUV (i.e. mouvement des segments composant le membre supérieur), s'auto-organisent afin de réaliser une simple forme des signes. Afin de vérifier cette théorie, nous avons posé un ensemble d'hypothèses qui traitent ces paramètres de manière indépendante ou conjointe. Voyons désormais à partir de quel type de corpus et quelles techniques de traitement ces questionnements peuvent être traités.

CHAPITRE 5. MISE EN PLACE ET EXPLOITATION D'UN CORPUS DE LANGUE DES SIGNES FRANÇAISE

Baser son travail sur un corpus préexistant présente un avantage certain. Le processus chronophage de préparation et de production du corpus n'a pas à être réalisé et, parfois, les annotations et les transcriptions sont déjà effectuées. Ce n'est pourtant pas cette option que nous avons retenue pour plusieurs raisons. En premier lieu, les techniques de captation vidéo évoluant rapidement, il se peut que les corpus présentent une qualité de données visuelles non optimisées. Pour un travail basé sur l'observation du mouvement corporel, il s'agit d'un enjeu important, tout comme l'est la fixité du cadrage ou encore la perspective utilisée. Par ailleurs, les corpus sont fréquemment enregistrés à partir de stimuli orientés spécifiquement vers des questions de recherche particulières, ce qui peut engendrer un biais de représentativité de certains types ou familles de signes. Enfin, les corpus de LSF qui allient captation vidéo et capture de mouvement (MoCap) sont peu nombreux et de courte durée (§3.3.2.2). Enregistrer un nouveau corpus nous permet d'apprécier et de contrôler l'ensemble de ces variables, tout en participant au développement des corpus de LSF. Nous exposons dans ce chapitre les aspects et les choix méthodologiques que nous avons faits tout au long de ce recueil de productions signées, ainsi que ceux ayant trait aux traitements des données collectées.

5.1. Structure et organisation

La première étape de mise en place de notre corpus a été de déterminer l'outil de MoCap conforme à nos critères de sélection. Il était impératif que ce choix soit fait en amont de toute rencontre avec les futurs participants volontaires, afin que ceux-ci puissent être pleinement informés des conditions techniques de leur contribution. Ce n'est qu'une fois cette décision prise que le protocole d'enregistrement a pu être amorcé.

5.1.1. Matériel utilisé

Pour la captation vidéo, nous avons utilisé des caméras Full HD (1080p) munies de trépieds permettant des prises de vue fixes et stables. Pour le système de MoCap, la comparaison des familles de capteurs (section 3.2.4) nous a orienté vers l'utilisation d'un système incorporant des centrales inertielles et un modèle anthropométrique, le *Perception Neuron V2*,

commercialisé par la société Noitom (Miami, FL, USA⁷²). Sa portabilité, son coût, mais aussi le fait qu'il ait été préalablement testé et approuvé dans le cadre de diverses recherches dans le domaine de la biomécanique, en ont motivé l'usage.

5.1.1.1. Description du système de capture mouvement

Le *Perception Neuron* est composé de 32 unités de mesure inertielle (*Inertial Measurement Unit*, soit IMU) (fig. 5.1) intégrées à un modèle anthropométrique (i.e. modèle humain qui s'adapte à la taille et à la masse du participant). À l'inverse des sphères catadioptriques des OMC (*Optical Movement Capture*), ce sont les centrales inertielles qui enregistrent directement les informations cinématiques : chacune d'elle mesure 12,5 mm × 13,1 mm × 4,3 mm et contient un gyroscope triaxial (± 2000 degrés par seconde), un accéléromètre triaxial et un magnétomètre triaxial (± 16 g), calculant respectivement la vitesse angulaire, les accélérations linéaires et l'orientation par rapport au nord magnétique par sensibilité magnétique terrestre.

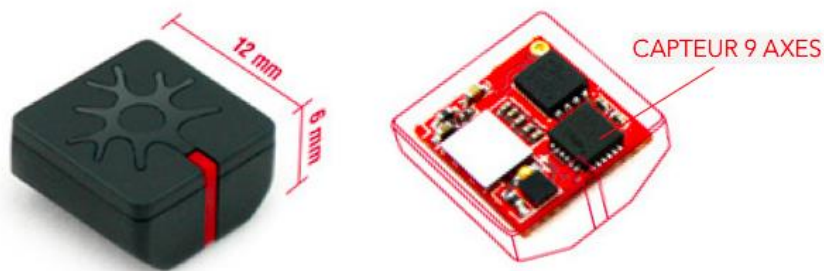


Figure 5.1- Caractéristiques d'une des IMUs du *Perception Neuron* (adapté d'Axis Neuron Userguide 2015 : 5)

Ces composantes présupposent une attention particulière à l'espace environnant. Le *Perception Neuron* (et plus largement les IMUs) ne peut être utilisé dans un milieu à fortes interférences magnétiques sans que cela introduise des erreurs dans les résultats de capture du mouvement. Une fois positionnées sur le corps d'un locuteur, les IMUs doivent être tenues à un mètre de tout objet magnétique, incluant l'ordinateur auquel le système de MoCap est relié (*Axis Neuron Userguide 2015*⁷³).

Les capteurs sont fixés aux membres par des sangles auto-agrippantes (Velcro). À la différence des IMUs qui sont identiques et dont les places sont interchangeable, les sangles ont, par leurs différences de tailles et de formes, des emplacements distinctifs spécifiés par un schéma

⁷² <https://www.noitom.com/about>

⁷³ <https://shopcdn.noitom.com.cn/software/AxisUserGuideFinal0923.pdf>

imprimé au dos de chacune d'elle. Un boîtier de centralisation positionné au niveau de la taille de l'utilisateur, collecte l'ensemble des données enregistrées par les IMUs et les transmet à un ordinateur disposant d'un logiciel de traitement via une connectivité USB ou *Bluetooth* (fig. 5.2).



Figure 5.2 – Composantes de la combinaison du *Perception Neuron* (adapté d'Axis Neuron Userguide 2015 : 44)

Une fois les sangles attachées et les capteurs imbriqués, il faut être attentif à la localisation des IMUs sur le corps de l'utilisateur. Fixés au plus près de l'os, les capteurs doivent être positionnés sur la section d'un segment d'un membre la moins soumise aux mouvements directs afin de minimiser le risque de déplacement ou de glissement involontaire des sangles. Les capteurs des segments jambes sont donc placés sur les tibias, vers l'avant par rapport à l'individu, alors que ceux du haut de la cuisse le sont sur le côté latéral du segment.

Pour commencer un enregistrement, il faut connecter le boîtier de centralisation à un ordinateur sur lequel sera lancé le logiciel *Axis Neuron*. Ce logiciel d'application, nécessaire pour toute utilisation du système de capture du mouvement, se présente comme ceci (fig. 5.3) :

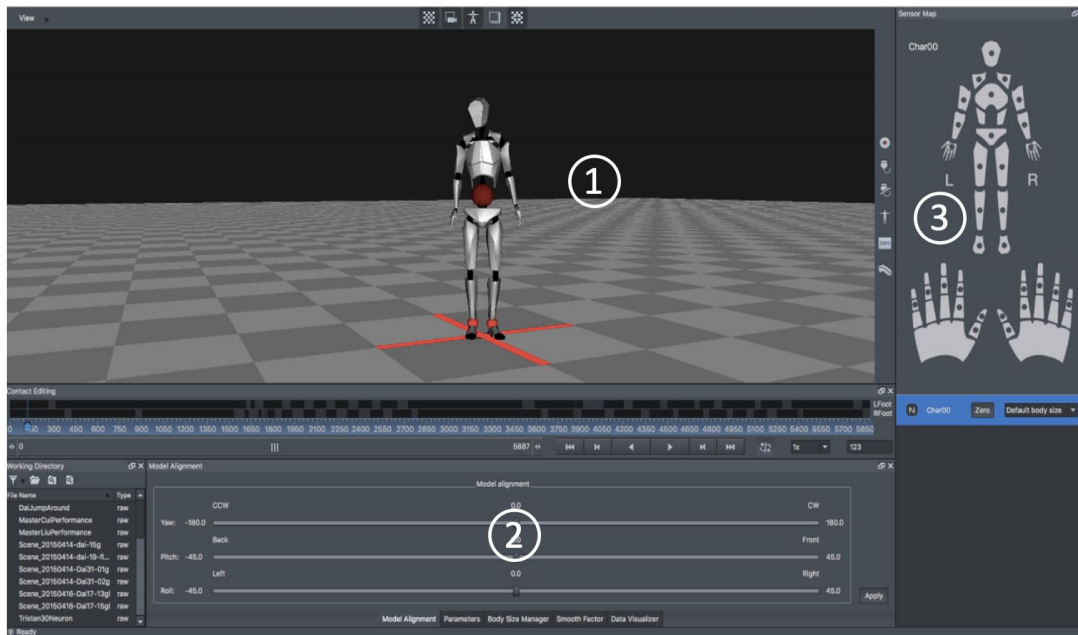


Figure 5.3 - Interface du logiciel *Axis Neuron* et principales fonctionnalités

Dans la zone ① défile en temps réel ou en relecture la représentation 3D du ou des participants. *Axis Neuron* peut prendre en charge jusqu'à cinq combinaisons *Perception Neuron* connectées simultanément. La sphère au niveau du bassin représente le centre de masse du corps de l'individu et la croix rouge sur le sol représente l'origine du système de coordonnées (obtenue une fois la connexion avec le boîtier de centralisation établie).

Les relevés des différents paramètres fonctionnels ainsi que la liste des enregistrements réalisés préalablement se trouvent dans la zone ②.

La cartographie des capteurs et la qualité de la transmission des données sont visibles en zone ③ (fig. 5.4).

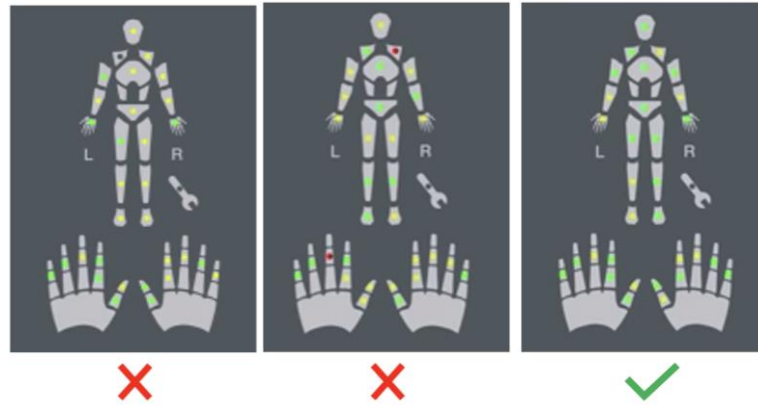


Figure 5.4 – À gauche : aucun signal de l’IMU de l’épaule gauche (absence de couleur). Au milieu : mauvais signal de l’IMU de l’épaule droite et du majeur de la main gauche (en rouge). À droite : signaux de bonne qualité (vert) et de qualité suffisante (jaune) sur l’ensemble des IMUs.

Si l’emplacement dédié à une IMU ne présente pas de couleur (fig. 5.4 à gauche), cela signifie que la connexion entre le capteur et le logiciel n’est pas effective ; sans signal, aucune récupération de données n’est possible. Si l’emplacement dédié à une IMU est de couleur rouge, cela signifie que le signal est de mauvaise qualité (fig. 5.4 au centre). Si l’emplacement dédié à une IMU alterne entre le vert et le jaune, cela signifie que la transmission convient pour un enregistrement (fig. 5.4 à droite).

Avant une importante captation ou après une longue période de maniement et d’emploi, les capteurs peuvent se magnétiser ou accumuler des erreurs de calcul, il est donc nécessaire de les calibrer. Il faut pour cela orienter l’IMU de manière répétitive le long des trois axes XYZ en le faisant tourner dans toutes les dimensions soit en tenant le câble tel un lasso, soit en tenant l’IMU directement du bout des doigts en le faisant pivoter rapidement dans toutes les directions. Une fois cette étape terminée, il faut poser l’IMU sur une surface plane : si la représentation de l’IMU est de biais ou dérive, il faut recommencer ; si sa représentation est droite et fixe, l’ajustage est réussi.

Il est alors possible d’installer chaque capteur sur les sangles de la combinaison et de l’installer elle-même sur un utilisateur, en suivant les indications précisées en début de section.

L’agencement des IMUs varie selon les points d’intérêts générés par un projet de recherche. Il est, par exemple, possible de placer des capteurs sur l’ensemble du corps et des doigts de la main gauche tout en excluant ceux de la main droite (utilisation de vingt et une IMUs), de ne s’intéresser qu’à un seul bras (trois IMUs) ou à la partie inférieure du corps (sept IMUs).

Il est nécessaire de sélectionner le mode adéquat (i.e. modèle anthropométrique) au nombre d’IMUs utilisés dans le logiciel (i.e. « *Full body mode* », « *Single arm mode* », « *Lower body mode* »). Il faut aussi sélectionner la taille correspondant à celle de l’utilisateur. Une série de

tailles préconfigurées sont proposées, de 155 à 185 cm pour les femmes et de 160 à 195 cm pour les hommes. À chaque taille correspondent des mesures spécifiques de l'ensemble des segments du corps.

5.1.1.2. Critères de sélection

Les propriétés nous ayant poussés à choisir cette technique de MoCap sont de plusieurs ordres. Tout d'abord – nous abordons ici l'aspect pratique de ce système – le fait qu'aucun autre dispositif ne soit nécessaire hormis un ordinateur pour obtenir les données cinématiques du mouvement, a rendu possible la captation du corpus au sein du studio d'enregistrement universitaire.

Les systèmes de MoCap à marqueurs catadioptriques tels que le *Vicon* (Vicon Motion Systems Ltd., Oxford, Royaume-Uni) exigent aussi la location d'une salle adaptée et l'achat ou la location de plusieurs caméras équipées d'émetteurs infrarouges :

“The system requires a bespoke laboratory environment comprising of high-resolution infrared cameras, as well as a highly trained operator. In addition, optoelectronic systems are confined to the volume of space where the equipment is installed [7,8]. In some instances, optoelectronic systems can be temporarily installed in alternative locations, however this process can also be time consuming to implement and may not be feasible for workplace environments.” (Sers *et al.* 2020 : 1)

« Le système nécessite un environnement de laboratoire sur mesure comprenant des caméras infrarouges haute résolution, ainsi qu'un opérateur hautement qualifié. De plus, les systèmes optoélectroniques sont limités au lieu où l'équipement est installé [7,8]. Dans certains cas, les systèmes optoélectroniques peuvent être temporairement installés dans d'autres lieux, mais ce processus peut également prendre du temps à mettre en œuvre et peut ne pas être réalisable dans des espaces de travail. » (Traduction personnelle, Sers *et al.* 2020 : 1)

A contrario, l'ensemble des composants du *Perception Neuron*, c'est-à-dire les trente-deux IMUs, la combinaison à sangles, les câbles et les accessoires, tiennent dans une mallette aisément transportable (13H × 28L × 23l). Nous pouvons aussi ajouter que les IMUs permettent de recueillir des données qui ne sont ni lacunaires, ni fragmentées. Cette caractéristique est importante, car les occlusions momentanées des marqueurs passifs (i.e. sphères réfléchissantes) face aux caméras infrarouges peuvent engendrer une succession de pertes de données qu'il faut reconstruire (Aristidou *et al.* 2008). Cette reconstruction peut s'obtenir par interpolation entre deux enregistrements de marqueurs correctement identifiés ou à l'aide de la captation vidéo servant de support visuel. Mais, en plus d'être une étape laborieuse et chronophage, l'interpolation peut créer du faux corpus dépendant du temps d'occultation des

marqueurs passifs, ce qui peut être préjudiciable à une analyse de terrain. Aucune phase de nettoyage n'est nécessaire avec un système à marqueurs actifs.

Enfin, le prix à l'achat de ce système inertiel, 1799 \$⁷⁴ (1640 €, reste abordable sachant que l'utilisation d'un MoCap optique telle que le *Vicon MX* peut coûter jusqu'à 250 000 GBP (286119 €) (Carse *et al.* 2013).

Un tel écart dans la sophistication apparente des moyens et leur coût pourrait engendrer des interrogations quant à la qualité de précision des données recueillies par la combinaison. À l'origine dédié au monde de la réalité virtuelle (Sers *et al.* 2020), le *Perception Neuron* est-il vraiment efficace pour une analyse scientifique des mouvements humains ?

L'étude de Sers *et al.* (2020) a répondu à cette question. Elle compare des données issues du *Vicon*, système de référence, à celles de la combinaison *Perception Neuron*, encore récente sur le marché de la MoCap.

L'enjeu était d'obtenir des données cinématiques provenant des deux systèmes de MOCAP distincts qui soient comparables. Pour ce faire, huit volontaires ont porté d'une part la combinaison composée de sept IMUs (*Perception Neuron*) et d'autre part un ensemble de vingt-trois marqueurs réfléchissants (fig. 5.5) pour lesquels douze caméras spécifiques HD équipées d'émetteurs infrarouges ont été installées et calibrées (*Vicon*). Grâce à ce dispositif, la captation des mouvements réalisés par les participants est effectuée de manière simultanée avec les deux systèmes.

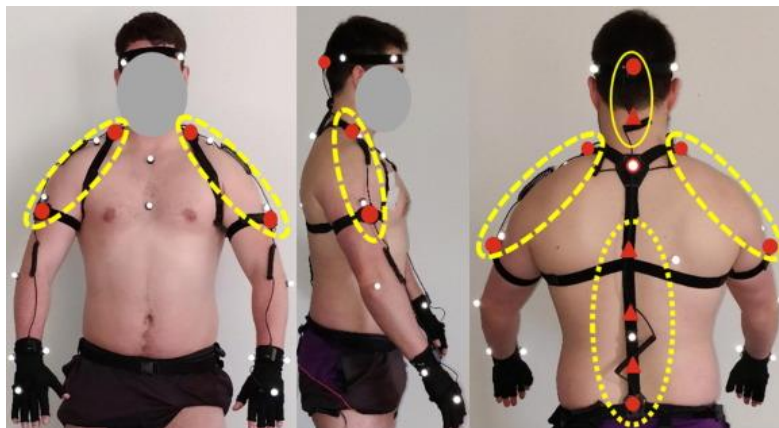


Figure 5.5 – Visualisation des emplacements des IMUs utilisées dans cette étude (cercles rouges) et des marqueurs réfléchissants (cercles blancs) (Sers *et al.* 2020 : 3)

Une fois l'ensemble de ces équipements installé, huit mouvements (fig. 5.6) ont été effectués par huit participants, chacun de ces mouvements étant répété deux fois afin de mesurer l'impact

⁷⁴ Prix affiché en septembre 2018 sur <https://neuronmocap.com/content/product/32-neuron-edition-v2>

de la vitesse d'exécution du mouvement sur la qualité des mesures effectuées par le *Perception Neuron* : une première fois lentement, puis une seconde plus rapidement.

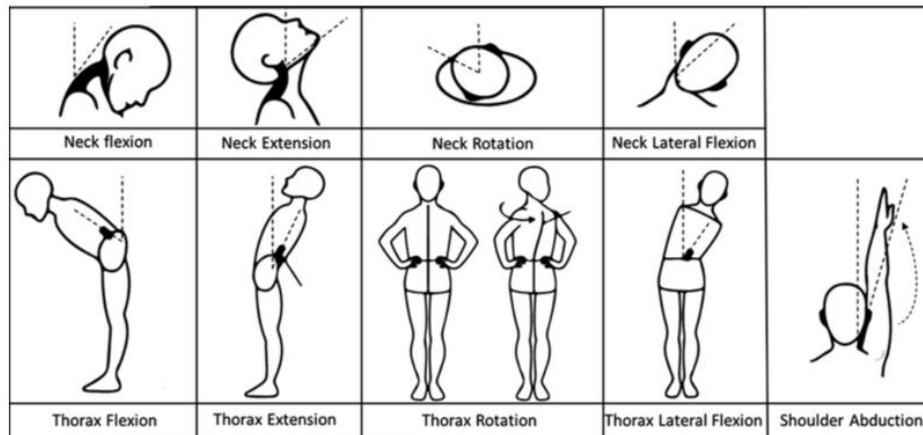


Figure 5.6 – Visualisation des mouvements réalisés (Sers *et al.* 2020 : 4)

Deux types de résultats statistiques sont alors tirés de ces 128 mouvements (8 participants \times 8 mouvements \times 2 vitesses d'exécution). La première analyse compare les données angulaires obtenues par les deux systèmes sur une série temporelle débutant à la position anatomique de référence (i.e. position neutre, avant le début du mouvement) et se terminant par la valeur angulaire maximale enregistrée durant chaque mouvement. Seule une partie du signal enregistré par les deux outils de mesure est donc soumise à cette première analyse statistique. Ces valeurs angulaires, exprimées en degrés, sont comparées distinctement pour chaque système de MoCap. Sers *et al.* (2020) rappellent que, selon McGinley *et al.* (2009) et Cuesta-Vargas *et al.* (2010) dans le cadre spécifique d'une comparaison de données cinématiques en recherche médicale et chirurgicale, une marge d'erreur de mesure inférieure ou égale à 2° est considérée comme tout à fait acceptable ; une marge d'erreur comprise entre 2° et 5° peut être considérée comme satisfaisante bien qu'il faille la prendre en compte lors de l'interprétation des données. Les marges d'erreur de plus de 5° sont susceptibles de fausser l'interprétation clinique des données. Partant de ces considérations, le *Perception Neuron* présente un biais systématique satisfaisant pour tous les angles testés par rapport aux valeurs obtenues avec le système *Vicon* (en moyenne le *Perception Neuron* sous-estime les valeurs angulaires de $4,5^\circ$, sauf lors de l'extension du cou, où les valeurs atteignent $6,1^\circ$). Par ailleurs, l'amplitude des limites de concordance atteint en moyenne $\pm 4,5^\circ$ (cela signifie que 95% des données angulaires obtenues avec le *Perception Neuron* se situent à $\pm 4,5^\circ$ du biais estimé entre les deux outils de mesure) à l'exception de l'extension du cou, pour laquelle ces limites atteignent $\pm 9^\circ$. Ces résultats ne semblent pas

dépendants de la vitesse d'exécution du mouvement (Sers *et al.* 2020) et permettent de dire que le *Perception Neuron* est fiable (avec un léger biais).

Le second groupe de mesures statistiques se focalise sur la comparaison de la *forme* des séries temporelles recueillies par les deux outils de MoCap. Nous arrivons alors à un total de 14 séries angulaires (et non 16, car les données des épaules ont été fusionnées, leurs mouvements étant similaires) exécutées par chacun des huit participants. Plus précisément, deux analyses statistiques sont extraites des relevés comparatifs de la forme des signaux : la RMSD (*Root Mean Square Difference*) : la différence quadratique moyenne ; et le CMC (*Coefficient of Multiple Correlation*) : le coefficient de corrélation multiple (ou coefficient de détermination). En ce qui concerne la RMSD, plus la différence quadratique moyenne est faible, plus l'accord entre les formes des signaux angulaires comparés est bon. Les résultats obtenus ici indiquent des valeurs systématiquement inférieures à 4° (voire inférieures à 2,5° si la flexion-extension du cou et l'abduction de l'épaule sont exclues), nous avons donc une excellente adéquation entre les données du *Vicon* et celles du *Perception Neuron* qui, là encore, ne semblent pas affectées par l'augmentation de la vitesse d'exécution du mouvement. Il est important de noter que les IMUs et les marqueurs réfléchissants ne sont pas superposés, mais fixés sur des reliefs anatomiques distincts et suffisamment éloignés les uns des autres pour éviter tout risque d'interférences (fig. 5.5). Ce choix, qui privilégie l'analyse du mouvement par rapport à la comparaison stricte entre les deux outils de mesure, a pour conséquence une augmentation de valeurs RSMD.

Quant au coefficient de corrélation multiple (CMC), les valeurs varient entre -1 et 1 et représentent la proportion de la variance totale des données angulaires mesurées avec le *Vicon*. Une valeur de 1 correspond à une corrélation positive parfaite, une valeur de 0 correspond à une absence de corrélation, et une valeur de -1 correspond à une corrélation négative parfaite (quand une variable augmente, l'autre diminue). Les valeurs moyennes du CMC pour les formes des signaux angulaires sont de 0.99, ce qui renforce l'excellent accord global entre les deux systèmes de MoCap.

Au regard de l'ensemble des résultats recueillis, Sers *et al.* (2020) concluent que « ce niveau de précision de mesure est adéquat à l'application objective destinée à la quantification de la posture du chirurgien⁷⁵ » (traduction personnelle, *ibid.* : 8), tout en soulignant que ces résultats sont obtenus sur des séquences de moins de 10 secondes ne permettant pas d'évaluer les performances du *Perception Neuron* lors d'un usage prolongé. C'est sur ce dernier point que se

⁷⁵ "This level of measurement precision is adequate for the intended application of objectively quantifying surgeon posture." (Sers *et al.* 2020 : 8)

sont concentrés Robert-Lachaine *et al.* (2019) à l'aide d'une étude comparative entre le *Perception Neuron* et le système *Optotrak* (Optotrak, Northern Digital, Waterloo, Canada). La cinématique du corps entier a été enregistrée chez cinq participants qui ont eu à manipuler des boîtes durant une durée variable pouvant aller jusqu'à une trentaine de minutes.

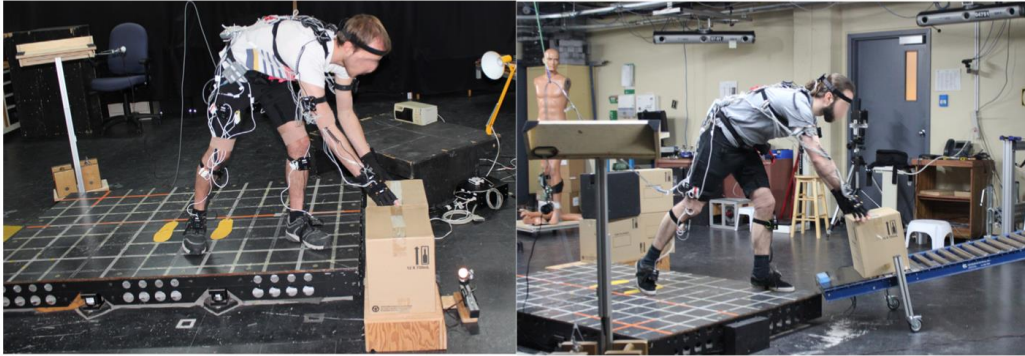


Figure 5.7 – Illustration du déroulé de la tâche de manipulation de boîtes. Les participants portent une combinaison *Perception Neuron* sur corps entier ainsi que des diodes dédiées au système *Optotrak* (Robert-Lachaine *et al.* 2019 : 2)

Ici encore l'efficacité du *Perception Neuron* est confirmée avec une RMSD acceptable, inférieure à 5°. La précision du système est similaire ou à peine inférieure à celle de l'*Optotrak*, et représente de ce fait une alternative viable.

L'objectif premier de ces études est donc d'exploiter des données recueillies par la combinaison *Perception Neuron*, ce qui permet de tester la fiabilité des centrales inertielles, mais aussi de contrôler et de vérifier le protocole d'ajustage de la posture (§5.1.2.2), ainsi que les emplacements précis des IMUs prescrits par le constructeur. La recherche de Sers *et al.* (2020) se basant exclusivement sur le haut du corps – section privilégiée par notre étude – et celle de Robert-Lachaine *et al.* (2019) évaluant les performances globales du système selon des durées variables non affectées par la vitesse du mouvement⁷⁶, nous permettent de considérer comme fondé et motivé un recueil de données cinématiques des membres supérieurs issus du *Perception Neuron* dans le cadre de productions en LSF.

⁷⁶ La récente étude de Choo *et al.* (2022) confirme la correspondance de la majorité des données articulaires entre le *Perception Neuron* et le *Vicon* qui ont été établis au sein de ces précédentes études.

5.1.2. Protocole d'enregistrement

Voyons maintenant quel est le contenu du corpus CLM-MOCAP, acronyme signifiant « Corpus pour l'étude de la Localisation initiale et du Mouvement - MOTion CAPture », ainsi que les étapes du processus de recueil des données.

5.1.2.1. Contenu et métadonnées du corpus

Précisons tout d'abord pourquoi notre étude repose sur des données issues d'une unique LS, la LSF. Cette dernière a été la première LS à être institutionnalisée (Cuxac 1983) ; elle est aujourd'hui une langue source pour une part importante des LS recensées dans le monde (Wittmann 1991). À ce titre, sa compréhension et son analyse éclairent *a priori* le plus grand nombre de phénomènes linguistiques liés à la spécificité des LS. À cela s'ajoutent d'importantes raisons de commodité : il s'agit d'une langue que nous pratiquons et qui nous permet de communiquer de manière courante avec des locuteurs-participants recrutés dans les lieux fréquentés par la communauté Sourde parisienne et rouennaise. Nous y avons plus d'une fois présenté le contexte et les conditions générales de notre projet à la recherche de volontaires en nombre suffisant pour présenter une hétérogénéité de profil permettant de couvrir tous les aspects de notre projet. Dix locuteurs ont accepté de se prêter à l'exercice, sept femmes et trois hommes âgés de 23 à 45 ans. Quatre d'entre eux portent un implant cochléaire et sont bilingues LSF-français : ils utilisent la LSF au quotidien et ont développé une bonne maîtrise du français écrit comme oral. Les six autres ne sont pas implantés et n'utilisent que la LSF dans leurs interactions journalières (tab. 5.1).

Tableau 5.1 – Métadonnées du corpus

Signeur	Sexe	Âge	Langue(s) majoritairement pratiquée(s)
Signeur 1	F	23	LSF/français
Signeur 2	M	23	LSF/français
Signeur 3	F	45	LSF
Signeur 4	F	24	LSF
Signeur 5	F	27	LSF
Signeur 6	M	28	LSF
Signeur 7	M	27	LSF/français
Signeur 8	F	35	LSF
Signeur 9	F	28	LSF
Signeur 10	F	28	LSF/français

Ce sont quatre sessions de captation qui ont été programmées.

Les deux premières sessions ont été organisées à l'Université de Rouen Normandie et se sont concentrées sur les productions des signeurs 1 à 6. Les enregistrements étant monopartites, les signeurs sont tour à tour placés debout face à la caméra. La combinaison 3D est placée l'ensemble du corps (i.e. trente-deux IMUs) permettant un enregistrement à 60Hz (fig. 5.8 (a)). Les deux sessions suivantes, des signeurs 7 à 10, ont eu lieu au laboratoire Structure Formelle du Langage (SFL-CNR) à Paris. Les enregistrements sont cette fois-ci bipartites : les signeurs sont deux, assis de trois quarts l'un par rapport à l'autre (fig. 5.8 (b)). La fréquence d'acquisition des données a été portée à 120 Hz pour ces enregistrements, la combinaison étant circonscrite à la partie haute du corps des signeurs (i.e. seize IMUs).

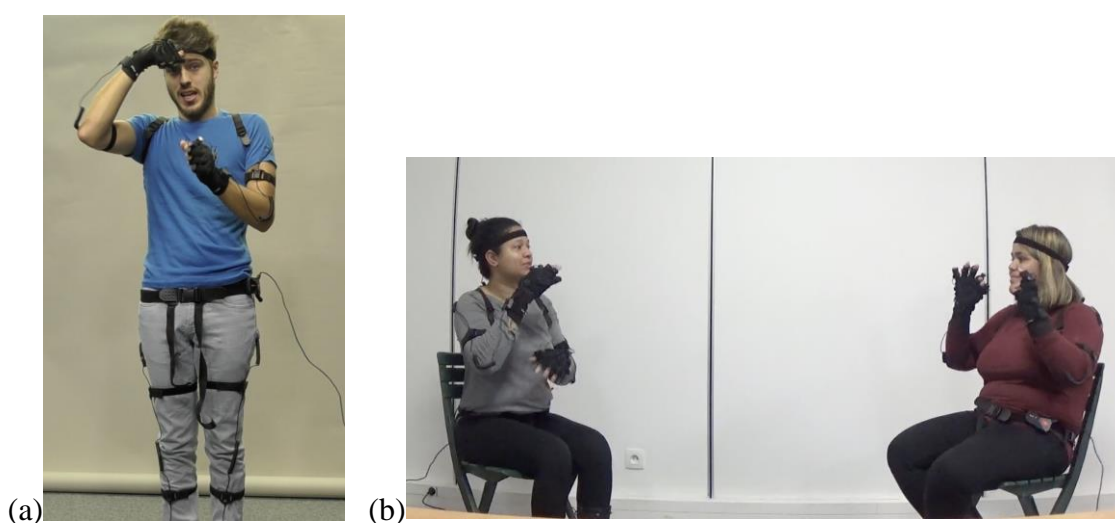


Figure 5.8 – Extrait de l'enregistrement (a) monopartite avec la combinaison placée sur l'ensemble du corps et de celui-ci (b) bipartite avec les combinaisons placées sur le haut du corps

Les stimuli présentés aux participants sont constitués d'un ensemble d'images projetées associées à des consignes courtes présentées en LSF⁷⁷.

La première tâche consiste en une narration fictive. Deux images sont soumises au choix du participant : l'une portant sur une compétition de cyclistes et l'autre sur une course poursuite. La deuxième tâche consiste à exposer les différentes étapes d'une recette de cuisine (une pizza ou un gâteau au chocolat), de la liste des produits nécessaires jusqu'à la confection du mets. La troisième tâche consiste à détailler l'itinéraire d'un trajet à partir d'exemples proposés au signeur, comme celui de l'itinéraire de son domicile à son lieu de travail.

⁷⁷ Nous avons consciemment évité les stimuli textuels parfois peu accessibles aux sourds signeurs.

La quatrième tâche consiste en une narration non fictive à partir d'une expérience passée personnelle. Des exemples sont une nouvelle fois proposés aux participants (un mariage ou une naissance).

Enfin, la cinquième tâche consiste en une discussion semi-dirigée portant sur l'accessibilité aux événements culturels, aux transports ou encore au marché du travail pour les Sourds. Il s'agit de la seule tâche dialogique. L'input prend la forme d'une incitation à la conversation, laissant ensuite libre cours au discours.

La diversité des genres discursifs constitue le point crucial de ces exercices. Comme soulevé §3.3.2.1, une hétérogénéité trop faible de genres discursifs peut engendrer une apparition disproportionnée d'un type de structure. Dès lors, il est apparu nécessaire de mêler des tâches narratives et descriptives pouvant engendrer une multiplicité de signes iconiques, et des tâches procédurales et dialogiques qui sont plus à même d'être composées de signes lexicaux.

Précisons cependant que tous les participants n'ont pas réalisé l'ensemble des tâches proposées, à l'exception du locuteur 7 qui a participé à deux sessions d'enregistrement successives⁷⁸ (tab. 5.2). Cela est à imputer au temps que chaque participant a eu à accorder à l'enregistrement, mais aussi aux différentes restrictions sanitaires qui étaient en vigueur, pouvant empêcher la réalisation de la tâche dialogique.

⁷⁸ Durant sa première participation, des doutes quant à la qualité des enregistrements ont été émis. Il a donc été décidé de le convier une seconde fois.

Tableau 5.2 – Métadonnées concernant la nature des tâches réalisées par les signeurs, leurs durées ainsi que le nombre de signes produits durant chacune d'elles

Production	Tâche 1 - monopartite - narration fictive	Tâche 2 - monopartite - procédurale	Tâche 3 - monopartite - description	Tâche 4 - monopartite - narration non fictive	Tâche 5 - bipartite - dialogue semi- dirigé	Durée par production	Nombre de signes par production
1	45 sec 152 ms	55 sec 531 ms	35 sec 796 ms	42 sec 736 ms	x	2 min 59 sec 215 ms	165
	40	41	37	47	x		
2	36 sec 380 ms	37 sec 483 ms	52 sec 495 ms	49 sec 675 ms	x	2 min 56 sec 033 ms	318
	55	62	99	102	x		
3	1 min 36 sec 749 ms	59 sec 355 ms	44 sec 847 ms	2 min 07 sec 865 ms	x	5 min 28 sec 818 ms	512
	142	86	71	213	x		
4	42 sec 443 ms	27 sec 221 ms	53 sec 246 ms	1 min 22 sec 005 ms	x	3 min 24 sec 915 ms	230
	39	29	48	114	x		
5	1 min 19 sec 888 ms	59 sec 671 ms	51 sec 894 ms	45 sec 099 ms	x	3 min 46 sec 552 ms	270
	75	63	64	68	x		
6	39 sec 197 ms	52 sec 618 ms	48 sec 864 ms	1 min 21 sec 024 ms	x	3 min 41 sec 703 ms	309
	42	61	68	138	x		
7-1	x	1 min 44 sec 458 ms	x	x	6 min 31 sec 396 ms	8 min 15 sec 854 ms	308
	x	60	x	x	248		
7-2	2 min 02 sec 559 ms	54 sec 386 ms	53 sec 625 ms	40 sec 733 ms	x	4 min 31 sec 303 ms	287
	121	58	50	58	x		
8	x	1 min 48 sec 496 ms	x	x	1 min 06 sec 022 ms	2 min 54 sec 518 ms	182
	x	99	x	x	83		
9	x	1 min 02 sec 797 ms	x	x	1 min 55 sec 314 ms	2 min 58 sec 075 ms	159
	x	77	x	x	82		
10	3 min 21 sec 761 ms	38 sec 301 ms	43 sec 336 ms	40 sec 502 ms	x	5 min 23 sec 900 ms	237
	139	32	33	33	x		
Total durée						46 min 20 sec 886 ms	
Total signes							2977

5.1.2.2. Déroulé de l'enregistrement

Reprenons les étapes des sessions d'enregistrement telles qu'elles ont eu lieu : quatre modérateurs ont mis en place le dispositif technique de la salle d'enregistrement avant l'arrivée des participants. Tout objet ayant été détecté comme parasite et non indispensable est disposé dans une salle annexe. Les enregistreurs sont mis en place à distance suffisante de la zone de captation : la caméra Full HD est placée face au fond uni du studio. Un premier ordinateur permet de diffuser sur un grand écran le support visuel qui indiquera au signeur les étapes à suivre ; un second ordinateur permet de faire le lien entre la combinaison, à laquelle il est relié, et le logiciel *Axis Neuron* (5.9). Le protocole détaillé de la séance est exposé au premier signeur et la combinaison 3D est installée.

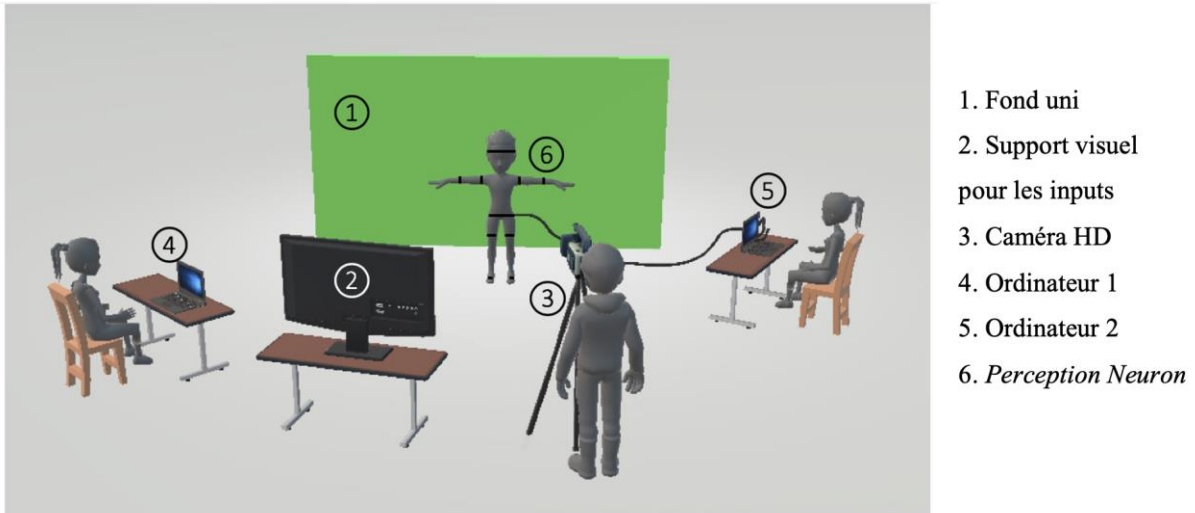


Figure 5.9 – Reconstitution de l'enregistrement de corpus monopartite

Un formulaire de consentement éclairé préalablement rédigé explicitant la visée du projet, les conditions de diffusion des résultats et exposant une fiche technique des enregistreurs leur a été présenté (annexe B.1) et traduit en LSF pour une complète compréhension. Il est daté et signé par chaque participant.

Vient ensuite la phase de vérification de la qualité de transmission des données entre les capteurs et le logiciel d'application : l'intégralité des IMUs doit alterner entre un signal vert et jaune dans la section de la cartographie des capteurs d'*Axis Neuron* (fig. 5.4). Les données variables concernant le genre et la taille du locuteur sont introduites dans le logiciel, ce qui permet de lancer la phase d'étalonnage de la posture (angl. *pose calibration*) (fig. 5.10). Cet étalonnage permet au logiciel d'enregistrer l'orientation et la position de chaque capteur par rapport au corps ; il doit être réitéré à chaque changement de participant à partir de quatre postures que ce dernier doit maintenir durant trois à cinq secondes. La première posture, la « *Steady pose* », est la plus importante, car elle permet de supprimer d'éventuelles erreurs de polarisation affectant les capteurs et leurs récepteurs. Pour s'assurer du succès de cette étape, le sujet adopte une pose permettant une immobilité totale : assis, les paumes posées sur un support stable. Pour la deuxième posture, l'« *A-pose* », le sujet se tient debout, bras le long du corps, les paumes vers l'intérieur et les pieds légèrement écartés. Pour la troisième posture, la « *T-pose* », il faut tendre les bras à 90° du corps, la paume vers le bas et le pouce sous les doigts. Enfin, la quatrième posture dite « *S-pose* » nécessite d'avoir les genoux fléchis parallèles aux pieds et les bras tendus face au-dessus du torse.

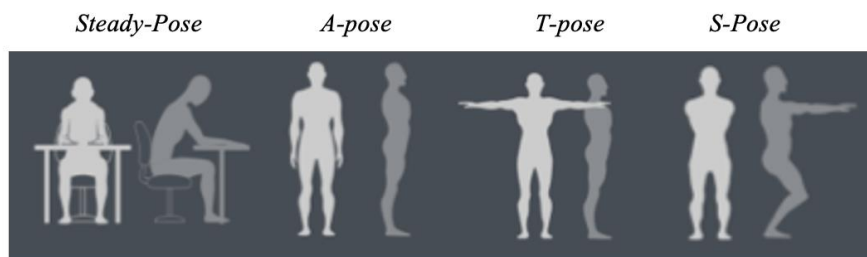


Figure 5.10 – Postures à effectuer successivement pour l'étalonnage des IMUs

Un geste distinctif établi au préalable est effectué par un modérateur afin de marquer le début ou la fin d'une posture signalée par un avertissement sonore.

Cette phase est primordiale pour une obtention des données conformes à la réalité : toute invraisemblance anatomique dans la représentation 3D du corps du participant doit être éliminée. Si aucune aberration n'est repérée, l'enregistrement peut débuter.

La caméra vidéo est d'abord enclenchée, puis vient le tour du *Perception Neuron*. Cet ordre est important à suivre puisqu'il est nécessaire d'entendre le signal sonore émis par ce dernier pour pouvoir opérer une juste synchronisation des enregistreurs (§5.3.1.2). Ces deux déclenchements sont respectivement suivis d'appellations vocales constituées du nom du projet, soit l'acronyme « CLM-MOCAP », un numéro associé au locuteur (allant de 1 à 10), la date ainsi que l'initiale du genre et la taille en centimètres du participant.

Le signeur réalise alors une nouvelle *T-pose* suivie d'un clap de début d'enregistrement, permettant de multiplier les points de synchronisation visuels et auditifs.

Une fois les productions accomplies, le participant termine par une ultime *T-Pose* suivie d'un clap de fin d'enregistrement. Toujours pour des questions de synchronisation, le *Perception Neuron* est mis à l'arrêt avant la caméra vidéo. Un récapitulatif du déclenchement des enregistreurs est proposé figure 5.11.

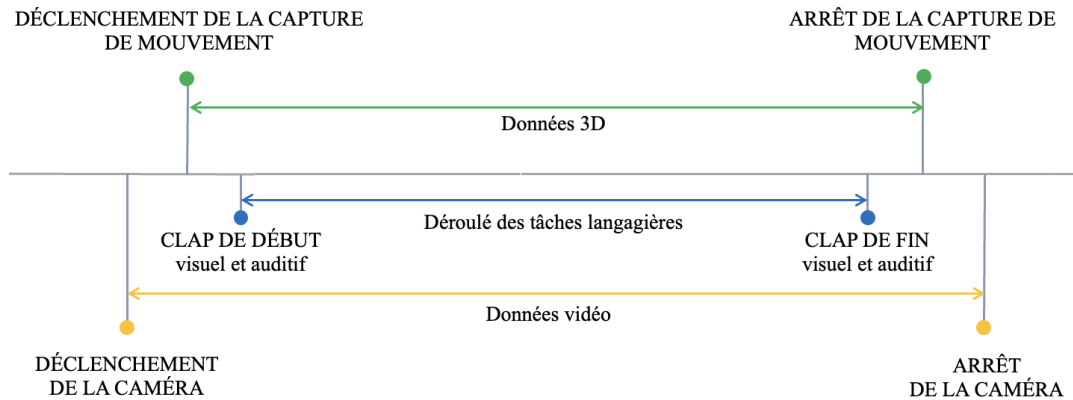


Figure 5.11 – Ordre des déclenchements des différents enregistreurs

Cette succession d'étapes se répète jusqu'à ce que les dix signeurs soient enregistrés. Les données primaires de notre corpus étant désormais entièrement collectées.

5.2. Corpus vidéo CLM-MOCAP

L'exploitation de notre corpus vidéo a requis la connaissance et la pratique du logiciel ELAN pour le travail d'annotation et de transcription des signes produits, et de la plateforme *Jupyter Notebook* pour la création et l'utilisation de scripts consacrés au traitement de ces données secondaires. Explorons leur utilisation spécifique respective.

5.2.1. Exploitation sur ELAN

Parce que Typannot est le seul système graphique des LS basé sur une approche articulaire (§2.2.2.1), il est celui qui a été utilisé pour l'exploitation de nos données. Nous allons présenter sous quelle forme il a été implanté au sein du logiciel ELAN, ainsi que les règles mises en place concernant la transcription de deux paramètres kinésiologiques, la LOCini (i.e. localisation initiale) et le MOUV (i.e. mouvement).

5.2.1.1. Contenu du *template*

Utiliser le logiciel ELAN présuppose la mise en place d'un *template* (schéma d'annotation). Il revient au chercheur de le mettre en place en fonction de ses thématiques de recherches.

Par-delà le codage et les conventions de transcription, le *template* sert à la fois au transfert des mêmes types de transcription/annotation sur d'autres enregistrements, à la stabilité des entités

annotées tout au long de la recherche, au partage du travail⁷⁹, à la documentation du codage, ou encore à l'établissement d'accords inter-annotateurs. La mise en place du *template* est donc une étape importante qui permet d'anticiper les besoins et les orientations du travail de recherche en cours.

Il est souvent nécessaire de tester différents schémas d'annotation avant de parvenir à une version finale stabilisée et fonctionnelle. Cela a été le cas pour le *template* relatif à notre travail de recherche. Nous ne présenterons ici que la version définitive composée de seize pistes d'annotation introduites dans ELAN en autant de lignes distinctes (fig. 5.12).

	GAGNER	PREMIER	QUI
Sign [374]			
. Sign number [18]	LOC 2 SIGN 032		LOC 2 SIGN 033
0-1-1 LOCini Arm Flexion/Extension [169]	[111]		[111]
0-1-2 LOCini Arm Abduction/Adduction [169]	[111]		[111]
0-2-0 LOCini Forearm Rotation [169]	[111]		[111]
0-2-1 LOCini Forearm Flexion/Extension [169]	[111]		[111]
0-3-0 LOCini Hand Pronation/Supination [169]	[111]		[111]
0-3-1 LOCini Hand Flexion/Extension [169]	[111]		[111]
0-3-2 LOCini Hand Abduction/Adduction [169]	[111]		[111]
1-1-1 MOV Arm flexion/extension [195]	Extension | No variation		Flexion | No variat
1-1-2 MOV Arm abduction/adduction [195]	No variation		No variation
1-2-0 MOV Forearm rotation [195]	No variation | Internal rotation		No variation
1-2-1 MOV Forearm flexion/extension [195]	No variation		No variation
1-3-0 MOV Hand pronation/supination [195]	No variation		Supination | No variat
1-3-1 MOV Hand flexion/extension [195]	No variation | Flexion		Flexion | No variat
1-3-2 MOV Hand abduction/adduction [178]	No variation		No variation

Figure 5.12 – Extrait du travail de transcription réalisé sur ELAN

Présentons-les en détail.

La piste « . Sign » permet de segmenter les productions signe par signe. La phase de transition entre deux signes est comprise dans cette segmentation, les étiquettes composant cette piste sont donc attenantes les unes aux autres (première ligne fig. 5.12). Ce travail d'étiquetage a été complété par de la traduction sous forme de gloses⁸⁰.

La piste suivante, « . Sign Number », correspond à un second type de segmentation ne retenant cette fois que la partie signifiante des signes. Pour le contenu de ces étiquettes, nous avons utilisé une des fonctions proposées par ELAN permettant de les numéroter automatiquement. Cela nous permet d'obtenir des labels spécifiques à chaque signe (ex. : LOC 2 SIGN 033).

Les quatorze pistes suivantes correspondent aux informations relatives à la LOCini et au MOUV. Pour chaque paramètre, les pistes font référence aux sept DDLs du membre supérieur

⁷⁹ À ce titre, il a été décidé d'utiliser la langue anglaise pour la mise en place de notre *template*.

⁸⁰ Afin de s'assurer de la qualité du glosage, elle a été vérifiée et complétée par le service de traduction professionnel « Nola interprétation ».

dominant. Afin de garder l'ordre établi qui figure sur la fig 5.12, les titres de ces pistes débutent par un code numérique à trois chiffres (ex. : 1-2-1).

Le premier chiffre fait référence au paramètre (0 pour la LOCini ou 1 pour le MOUV) ; le deuxième chiffre permet d'indiquer le segment dont il est question (1 pour le bras, 2 pour l'avant-bras, 3 pour la main) ; et le troisième chiffre définit le DDL (0 pour la rotation et la prono-supination, 1 pour la flexion-extension, 2 pour ou l'abduction-adduction).

À titre d'exemple, cette information codée s'organisant toujours selon l'ordre « paramètre – segment – DDL », le code « 1-2-2 » signifie « mouvement – avant-bras – abduction-adduction ». Cela nous permet, en sélectionnant l'option « trier par nom de piste » proposée par ELAN, d'obtenir une succession de pistes qui se fait selon l'agencement souhaité, suivant automatiquement l'ordre croissant des chiffres⁸¹. Cette technique est aussi utile lors de l'export des transcriptions puisqu'elle garantit que les fichiers obtenus seront parfaitement identiques les uns aux autres, ce qui est indispensable pour une automatisation réussie de leur traitement. Les quatorze pistes relatives aux paramètres contiennent un vocabulaire contrôlé, c'est-à-dire un nombre limité d'entrées possibles qui s'affichent au sein d'un menu déroulant (fig. 5.13). L'établissement de ce type de liste permet d'empêcher d'éventuelles coquilles, mais aussi d'accélérer le temps de transcription.

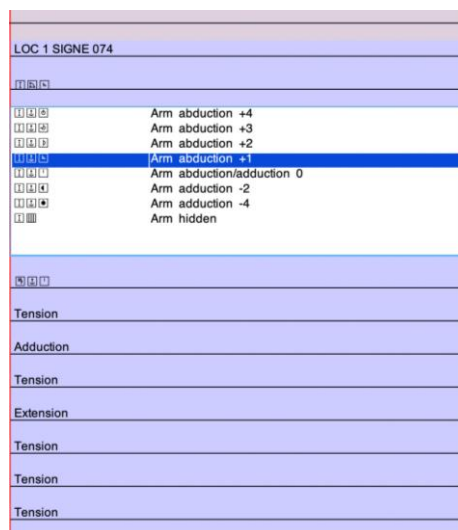


Figure 5.13 – Visualisation des transcriptions et d'un menu déroulant contenant une liste de vocabulaires contrôlés (à gauche la valeur de l'entrée en glyphes Typannot et à droite leurs descriptions)

⁸¹ Les pistes «. Sign » et «. Sign number » ont des titres qui débutent par un point afin d'être automatiquement placées en haut de la liste.

Concernant la LOCini⁸², le vocabulaire contrôlé divise chaque DDL en crans. Afin de choisir le nombre de crans attribués à chaque DDL, nous avons suivi la logique de Typannot selon laquelle le nombre de crans varie selon l'amplitude du DDL dont il est question : un DDL dont amplitude est faible arrivera plus vite à sa butée articulaire et aura donc moins de crans intermédiaires. Le pôle d'un DDL (i.e. une de ses bornes) peut avoir un maximum de quatre crans, et un minimum d'un cran. Le cran neutre est établi selon la posture de référence choisie par Typannot (§2.2.2.1). Nous avons dressé un tableau qui passe en revue l'ensemble du vocabulaire contrôlé concernant la LOCini. Ce tableau présente, à gauche, le vocabulaire contrôlé en tant que tel en glyphes Typannot ; au milieu, sa description traduite en français ; et à droite un avatar permettant de visualiser chacun des crans dont il est question dans les colonnes adjacentes (tab. 5.3).

Tableau 5.3 – Vocabulaire contrôlé concernant la LOCini (colonne de gauche et centrale) et son illustration (colonne de droite)

Vocabulaire contrôlé (glyphes Typannot)	Description	Illustration
⌈ ⌋ ◐	bras extension -4	
⌈ ⌋ ◑	bras extension -2	
⌈ ⌋ ◒	bras flexion/extension 0	
⌈ ⌋ ◓	bras flexion +1	
⌈ ⌋ ◔	bras flexion +2	
⌈ ⌋ ◕	bras flexion +3	
⌈ ⌋ ◖	bras flexion +4	
⌈ ⌋ ◗	bras adduction -4	
⌈ ⌋ ◘	bras adduction -2	
⌈ ⌋ ◙	bras abduction/adduction 0	
⌈ ⌋ ◚	bras abduction +1	
⌈ ⌋ ◛	bras abduction +2	
⌈ ⌋ ◜	bras abduction +3	
⌈ ⌋ ◝	bras abduction +4	
⌈ ⌋ ◞	bras caché	

⁸² Bien que la LOCini soit une posture qui précède le MOUV, dans le cadre d'une transcription ELAN, une longueur - la même que le MOUV - lui a été attribuée arbitrairement. Il s'agit d'une contrainte liée au logiciel : il n'est possible de noter des informations que dans des étiquettes ayant une certaine temporalité.

	avant-bras extension -4	
	avant-bras extension -2	
	avant-bras flexion/extension 0	
	avant-bras flexion +2	
	avant-bras flexion +4	
	avant-bras rotation extérieure -4	
	avant-bras rotation extérieure -2	
	avant-bras rotation ext./int. 0	
	avant-bras rotation intérieure +2	
	avant-bras rotation intérieure +4	
	avant-bras caché	
	main supination -4	
	main supination -2	
	main pronation/supination 0	
	main pronation +2	
	main pronation +4	
	main extension -4	
	main extension -2	
	main flexion/extension 0	
	main flexion +2	
	main flexion +4	
	main adduction -4	
	main adduction -2	
	main abduction/adduction 0	
	main abduction +2	
	main abduction +4	
	main cachée	


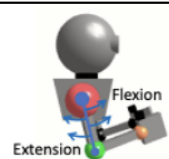
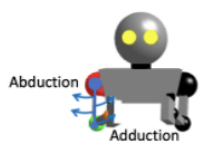
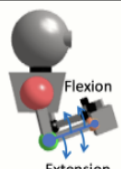
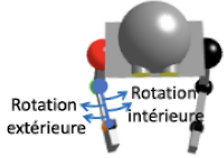

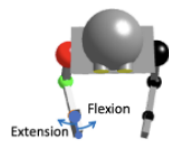
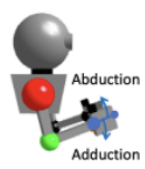
S'il n'est pas possible d'accéder à ce type d'information - dans le cas par exemple où un segment n'est plus dans le cadre (fig. 5.14) - il est possible de ne pas spécifier de cran, mais de sélectionner le vocabulaire contrôlé comprenant le glyphe «  », signifiant « caché ».



Figure 5.14 – Exemple pour lequel la LOCini de la main ne peut pas être spécifiée car cette dernière est sortie du cadre (signeur 3 signe 025)

La transcription du MOUV se focalise sur les pôles des DDL qui sont actifs, ainsi que sur leur temporalité. Le vocabulaire contrôlé utilisé pour cela ne contient pas de glyphes spécifiques à Typannot, car ces derniers n'étaient pas encore créés lors de la phase de transcription du corpus. Comme pour la LOCini, nous avons constitué un tableau passant en revue l'ensemble du vocabulaire contrôlé utilisé pour le MOUV, ainsi qu'une visualisation par avatar (tab. 5.5).

Tableau 5.4 – Vocabulaire contrôlé concernant le MOUV (colonne de gauche et centrale) et son illustration

Vocabulaire contrôlé	Illustration
bras extension	
bras flexion	
bras sans variation	
bras adduction	
bras abduction	
bras sans variation	
bras caché	
avant-bras extension	
avant-bras flexion	
avant-bras sans variation	
avant-bras rotation extérieure	
avant-bras rotation intérieure	
avant-bras sans variation	
avant-bras caché	
main pronation	
main supination	
main sans variation	
main extension	
main flexion	
main sans variation	
main adduction	
main abduction	
main sans variation	
main cachée	

Si le segment ne présente pas de modification articulaire par rapport à la LOCini, il faut sélectionner « sans variation ». Dans le cas où le segment n'est pas visible, il faut opter pour « caché ».

La transcription de ce paramètre dynamique peut sembler *a priori* plus simple que celle de la LOCini : le vocabulaire contrôlé qui lui est joint présente moins d'options.

En fait, la spécificité de la transcription du MOUV ne se situe pas dans le choix d'un vocabulaire adéquat, mais dans celui de la juste temporalité assignée aux pôles actifs. Il faut être en mesure de préciser si les pôles ont été activés en même temps, ou s'ils présentent un décalage temporel même minime. Plus le nombre de DDLs actif est important, plus la tâche est complexe, demandant un visionnage méticuleux et répété du MOUV.

Afin d'expérimenter les spécificités de ces deux types de transcriptions, nous proposons une mise en pratique.

5.2.1.2. Mise en pratique

Prenons pour cela le signe [FRANCE]⁸³ (fig. 5.15).

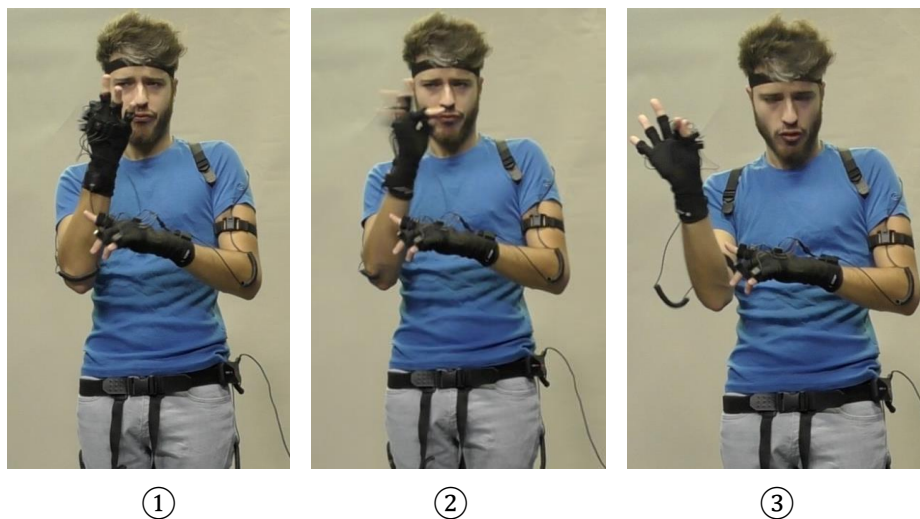


Figure 5.15 – Réalisation du signe [FRANCE] (signeur 2 signe 264, vidéo [5.1](#))

L'image ① de la fig. 5.15 est celle qui apparaît sur ELAN lorsque l'on place le curseur au début de l'étiquette de la piste « . Sign Number ». L'image correspond donc à la LOCini du signe à exécuter. L'objectif est d'analyser la posture du membre supérieur, en l'occurrence le droit, DDL par DDL, en comparaison avec la posture de référence (fig. 5.16).

⁸³ Dans le cadre réel de transcription, la piste contenant la glose des signes est masquée afin de ne minimiser le biais de projection : ne pas avoir accès à la traduction favorise une observation basée sur la forme *visible* et non sur une forme projetée *prédéterminée*.

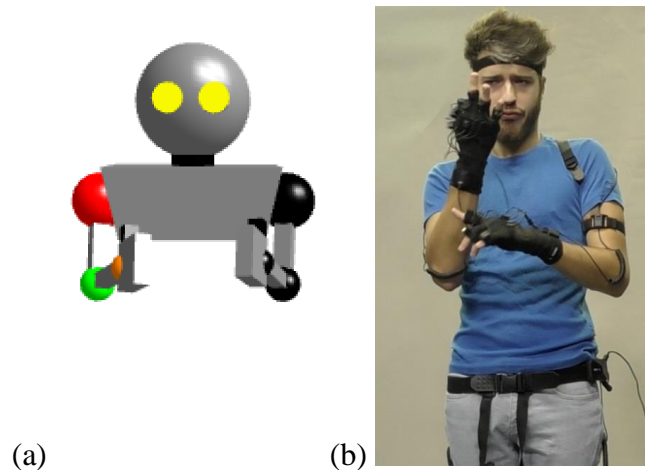


Figure 5.16 – Présentation de (a) la posture de référence et de (b) la LOCini du signe [FRANCE]

Le bras est en légère flexion comme c'est le cas pour la posture de référence. Il faut donc sélectionner le vocabulaire contrôlé « arm flexion-extension 0 », soit en Typannot : $\boxed{\text{I}}\boxed{\text{I}}\boxed{\text{I}}$. Le bras est collé au torse, l'abduction-adduction est donc elle aussi neutre : $\boxed{\text{I}}\boxed{\text{J}}\boxed{\text{I}}$.

La rotation intérieure-extérieure, centre l'avant-bras légèrement vers le corps du signeur ; c'est donc neutre une nouvelle fois : $\boxed{\text{I}}\boxed{\text{O}}\boxed{\text{I}}$. Cependant, l'avant-bras est bien plus replié sur le bras que ne l'est celui de la posture de référence, tout en n'étant pas à sa butée articulaire, il est donc en flexion moyenne : $\boxed{\text{I}}\boxed{\text{I}}\boxed{\text{D}}$.

La paume de la main est orientée vers le visage du signeur ; elle est en supination complète : $\boxed{\text{M}}\boxed{\text{O}}\boxed{\text{D}}$. Enfin, la main est en extension moyenne, les doigts la tirant en arrière : $\boxed{\text{M}}\boxed{\text{I}}\boxed{\text{K}}$; mais elle ne présente pas d'abduction ou d'adduction particulière : $\boxed{\text{M}}\boxed{\text{J}}\boxed{\text{I}}$.

Une fois l'ensemble de la LOCini établie, il est possible de passer au MOUV.

On peut observer que le signeur réalise dans un premier temps une pronation de la main : la paume de la main n'est plus orientée vers le signeur, mais vers sa gauche (fig. 5.15 ②). Ensuite, une rotation extérieure de l'avant-bras est exécutée, puisque le segment n'est plus devant son torse, mais déporté sur sa droite. En parallèle, le mouvement de pronation se poursuit puisque la paume de la main est désormais pleinement visible (fig. 5.15 ③). Les autres DDLs sont restés identiques à leurs LOCini, ne présentant aucun changement articulaire.

Sur le logiciel ELAN, nous pouvons commencer par indiquer tous les DDLs qui ne présentent pas de mouvement propre avec le vocabulaire contrôlé « no activation ». Puis, en ce qui concerne les pistes « 1-2-0 MOV forearm rotation » et « 1-3-0 MOV hand pronation/supination », il faut sélectionner le pôle actif au sein des DDLs, soit « external rotation » et « supination ». Il faut ensuite leur assigner une temporalité adéquate en réduisant

la longueur des étiquettes selon leurs activations respectives. L'espace vide laissé par ce décalage doit être rempli par le vocabulaire contrôlé « no variation ».

Voici le résultat de cette double transcription telle qu'affichée sur ELAN (fig. 5.17) :

Sign number <small>[318]</small>	LOC 2 SIGN 264	
0-1-1 LOCini Arm Flexion/Extension <small>[169]</small>	[f] [s] [r]	
0-1-2 LOCini Arm Abduction/Adduction <small>[169]</small>	[f] [d] [r]	
0-2-0 LOCini Forearm Rotation <small>[169]</small>	[f] [m] [r]	
0-2-1 LOCini Forearm Flexion/Extension <small>[169]</small>	[f] [s] [r]	
0-3-0 LOCini Hand Pronation/Supination <small>[169]</small>	[m] [m] [r]	
0-3-1 LOCini Hand Flexion/Extension <small>[169]</small>	[m] [s] [r]	
0-3-2 LOCini Hand Abduction/Adduction <small>[169]</small>	[m] [d] [r]	
1-1-1 MOV Arm flexion/extension <small>[196]</small>	No variation	
1-1-2 MOV Arm abduction/adduction <small>[187]</small>	No variation	
1-2-0 MOV Forearm rotation <small>[238]</small>	No variation	External rotation
1-2-1 MOV Forearm flexion/extension <small>[235]</small>	No variation	
1-3-0 MOV Hand pronation/supination <small>[205]</small>	Pronation	No variation
1-3-1 MOV Hand flexion/extension <small>[196]</small>	No variation	
1-3-2 MOV Hand abduction/adduction <small>[178]</small>	No variation	

Figure 5.17 – Transcription sur le logiciel ELAN de la localisation initiale et du mouvement du signe [FRANCE]

Ce processus a été réitéré pour les 1574 signes transcrits, soit un peu plus de la moitié des signes composant notre corpus de thèse.

5.2.1.3. Durée du travail de transcription

Le choix de ne pas traiter l'ensemble des 2977 signes constituant notre corpus a été fait après avoir mesuré la relation proportionnelle entre la durée du corpus et le nombre d'heures nécessaires à sa transcription.

Ce ratio a été calculé en nous chronométrant deux fois 15 minutes. La première fois, nous nous sommes concentrés sur les LOCini des signes et la seconde sur les MOUV. Ce sont respectivement huit et onze signes qui ont pu être traités dans ce laps de temps. Cela signifie qu'une minute et cinquante-deux secondes sont nécessaires pour la transcription d'une seule LOCini ; et une minute et vingt-et-une seconde sont nécessaires pour la transcription d'un unique MOUV. Ces résultats sont à multiplier par le nombre de signes total, soit 2977 (tab. 5.5).

Tableau 5.5 – Temps nécessaire à la transcription d’un signe, temps estimé pour la transcription de l’ensemble du corpus

Paramètre	Temps effectif de transcription pour 1 signe	Temps estimé de transcription pour 2977 signes
LOCini	00 h 1 min 52 sec	93 h 4 min 0 sec
MOUV	00 h 1 min 21 sec	67 h 31 min 12 sec

L’estimation du temps nécessaire au traitement de l’ensemble du corpus est donc d’approximativement 160 heures. Ce résultat nous a semblé trop important par rapport au temps alloué à notre travail de thèse. Il a donc été décidé de traiter un peu plus de la moitié de chaque tâche produite par les signeurs (tab.5.6), en commençant au début ou à la moitié de celles-ci de manière aléatoire. Ce procédé nous permet de profiter de l’hétérogénéité des participants et des genres discursifs que notre corpus offre, tout en diminuant le temps de travail à 84 heures⁸⁴.

Tableau 5.6 – Nombre de signes transcrits par production

Production	Nombre de signes transcrits
1	86
2	168
3	260
4	121
5	138
6	170
7-1	160
7-2	152
8	103
9	89
10	126
Total	1573

5.2.2. Traitement par script Python

Une fois l’ensemble des transcriptions terminées, elles sont exportées à partir du logiciel ELAN. Chaque fichier obtenu est alors considéré comme une base de données de référence. Leur traitement est automatisé grâce à la mise en place de scripts Python⁸⁵ réalisés en collaboration avec Marco Pensalfini (Université polytechnique de Catalogne).

⁸⁴ Il s’agit ici seulement du temps de transcription, les autres étapes d’exploitation du corpus (glosage, double segmentation, phases de test des différents *template* (§6.1.1.2), temps de révision et de corrections une fois la transcription terminée) ne sont pas prises en compte.

⁸⁵ Les scripts ont été réunis en un unique document, consultable [ici](#). Pour une présentation optimisée, il est nécessaire de télécharger le document et de l’ouvrir à partir de la plateforme *open source Jupyter Notebook* (qui a été utilisée afin de créer, tester et exécuter ces scripts).

5.2.2.1. Format des bases de données de référence

Voici comment sont composés les onze fichiers (un par production) contenant les données de référence (tab. 5.7).

Tableau 5.7 – Extrait d'un fichier de base de données de référence, obtenu de l'export des transcriptions réalisées sur ELAN

Temps de départ	Temps de fin	Durée	. Sign	. Sign number	0-1-1	0-1-2	0-2-0	0-2-1	0-3-0	0-3-1	0-3-2	1-1-1	1-1-2	1-2-0	1-2-1	1-3-0	1-3-1	1-3-2
00:01:07.777	00:01:08.152	00:00:00.375	DISPUTE															
00:01:08.152	00:01:08.307	00:00:00.155	DISPUTE	LOC 2 SIGN 038	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	Internal rotation	No variation	Pronation	No variation	No variation
00:01:08.307	00:01:08.457	00:00:00.150	DISPUTE	LOC 2 SIGN 038	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	External rotation	No variation	Supination	No variation	No variation
00:01:08.457	00:01:08.578	00:00:00.121	DISPUTE	LOC 2 SIGN 038	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	Internal rotation	No variation	Pronation	No variation	No variation
00:01:08.578	00:01:08.635	00:00:00.057	DISPUTE	LOC 2 SIGN 038	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	Supination	No variation	No variation
00:01:08.635	00:01:08.730	00:00:00.095	VOIR															
00:01:08.730	00:01:08.755	00:00:00.025	VOIR	LOC 2 SIGN 039	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation
00:01:08.755	00:01:08.822	00:00:00.067	VOIR	LOC 2 SIGN 039	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation	Flexion	No variation
00:01:08.822	00:01:08.960	00:00:00.138	POULE															
00:01:08.960	00:01:09.128	00:00:00.168	POULE	LOC 2 SIGN 040	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
00:01:09.128	00:01:09.264	00:00:00.136	POULE	LOC 2 SIGN 040	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
00:01:09.264	00:01:09.425	00:00:00.161	POULE	LOC 2 SIGN 040	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation	No variation	No variation
00:01:09.425	00:01:09.778	00:00:00.353	POULE	LOC 2 SIGN 040	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	Internal rotation	Flexion	No variation	No variation	No variation
00:01:09.778	00:01:10.021	00:00:00.243	MANGER															
00:01:10.021	00:01:10.138	00:00:00.117	MANGER	LOC 2 SIGN 041	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation	Flexion	No variation
00:01:10.138	00:01:10.376	00:00:00.238	PICORER															
00:01:10.376	00:01:10.494	00:00:00.118	PICORER	LOC 2 SIGN 042	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation	Flexion	No variation
00:01:10.494	00:01:10.610	00:00:00.116	PICORER	LOC 2 SIGN 042	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation	Extension	No variation
00:01:10.610	00:01:10.710	00:00:00.100	PICORER	LOC 2 SIGN 042	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation
00:01:10.710	00:01:10.821	00:00:00.111	NON															
00:01:10.821	00:01:10.933	00:00:00.112	NON	LOC 2 SIGN 043	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	Flexion	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
00:01:10.933	00:01:11.712	00:00:00.779																
00:01:11.712	00:01:11.811	00:00:00.099	AVEC															
00:01:11.811	00:01:11.990	00:00:00.179	AVEC	LOC 2 SIGN 044	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	Internal rotation	No variation	No variation	No variation	No variation
00:01:11.990	00:01:12.318	00:00:00.328	VELO															
00:01:12.318	00:01:12.380	00:00:00.062	VELO	LOC 2 SIGN 045	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation
00:01:12.380	00:01:12.412	00:00:00.032	VELO	LOC 2 SIGN 045	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	Supination	Flexion	No variation
00:01:12.412	00:01:12.443	00:00:00.031	VELO	LOC 2 SIGN 045	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	Supination	Supination	No variation
00:01:12.443	00:01:12.648	00:00:00.205	VELO	LOC 2 SIGN 045	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	External rotation	No variation	Supination	No variation	No variation
00:01:12.648	00:01:12.928	00:00:00.280	TOMBER															
00:01:12.928	00:01:13.092	00:00:00.164	TOMBER	LOC 2 SIGN 046	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	Adduction	No variation	Extension	Supination	No variation	No variation
00:01:13.092	00:01:13.280	00:00:00.188	TOMBER	LOC 2 SIGN 046	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation	No variation	No variation
00:01:13.280	00:01:13.748	00:00:00.468	TOUT															
00:01:13.748	00:01:14.061	00:00:00.313	TOUT	LOC 2 SIGN 047	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	External rotation	No variation	No variation	No variation	No variation
00:01:14.061	00:01:14.305	00:00:00.244	TOUT	LOC 2 SIGN 047	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	Extension	No variation	No variation	No variation	Supination	No variation	No variation
00:01:14.305	00:01:14.999	00:00:00.694																
00:01:14.999	00:01:15.332	00:00:00.333	VOILÀ															
00:01:15.332	00:01:15.424	00:00:00.092	VOILÀ	LOC 2 SIGN 048	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation
00:01:15.424	00:01:15.595	00:00:00.171	VOILÀ	LOC 2 SIGN 048	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	Pronation	Extension	No variation
00:01:15.595	00:01:15.866	00:00:00.271	CONNAÎTRE															
00:01:15.866	00:01:15.958	00:00:00.092	CONNAÎTRE	LOC 2 SIGN 049	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
00:01:15.958	00:01:16.057	00:00:00.099	CONNAÎTRE	LOC 2 SIGN 049	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	Extension	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
00:01:16.057	00:01:16.386	00:00:00.329	RÉSULTAT															
00:01:16.386	00:01:16.572	00:00:00.186	RÉSULTAT	LOC 2 SIGN 050	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	Extension	No variation	Internal rotation	No variation	No variation	Flexion	No variation
00:01:16.572	00:01:16.768	00:00:00.196	CONNAÎTRE															
00:01:16.768	00:01:16.858	00:00:00.090	CONNAÎTRE	LOC 2 SIGN 051	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation
00:01:16.858	00:01:16.927	00:00:00.069	QUI															
00:01:16.927	00:01:17.011	00:00:00.084	QUI	LOC 2 SIGN 052	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	Extension	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
00:01:17.011	00:01:17.163	00:00:00.152	GAGNER															
00:01:17.163	00:01:17.314	00:00:00.151	GAGNER	LOC 2 SIGN 053	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	Internal rotation	No variation	No variation	No variation	No variation
00:01:17.314	00:01:17.439	00:00:00.125	GAGNER	LOC 2 SIGN 053	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	□□□□	No variation	No variation	External rotation	Flexion	No variation	No variation	No variation

Les premières colonnes se concentrent sur les indications temporelles de chaque signe : départ, fin et durée. Nous retrouvons ensuite le même ordre que nous avons dans les fichiers ELAN, soit la glose du signe, son identifiant unique, les informations qui se rapportent à la LOCini et celles qui se rapportent au MOUV.

Voici quelques informations concernant cet affichage de données.

Certaines lignes contiennent une glose, mais ne donnent aucune information dans les autres colonnes. Il s'agit alors de la phase de préparation des signes qui se situent après la fin d'un MOUV et avant l'apparition d'une nouvelle LOCini.

Par ailleurs, certains signes sont composés d'une seule ligne d'informations concernant la LOCini et le MOUV (ex. : [MANGER] ou [NON]), alors que d'autres en comportent plusieurs (ex. : [DISPUTE] ou [POULE]). Le nombre de signes est soumis au nombre de phases d'un MOUV. Pour un signe comme [FRANCE] (fig. 5.15), il y a trois phases distinctes :

- la pronation de la main seule ;

- la pronation de la main ET la rotation extérieure ;
- la rotation extérieure seule.

Ce signe apparait donc sur trois lignes dans la base de données.

Ce mode de représentation a une incidence sur l'information concernant la glose, le label du signe et la LOCini, qui se trouve répétée à chaque nouvelle phase.

Passons maintenant aux traitements des données en fonction de nos hypothèses de recherche.

5.2.2.2. Traitement de la LOCini

La première hypothèse mise en place concerne la LOCini (fig. 5.18 (a)). Nous supposons que les LOCini composant notre corpus présentent un profil différent.

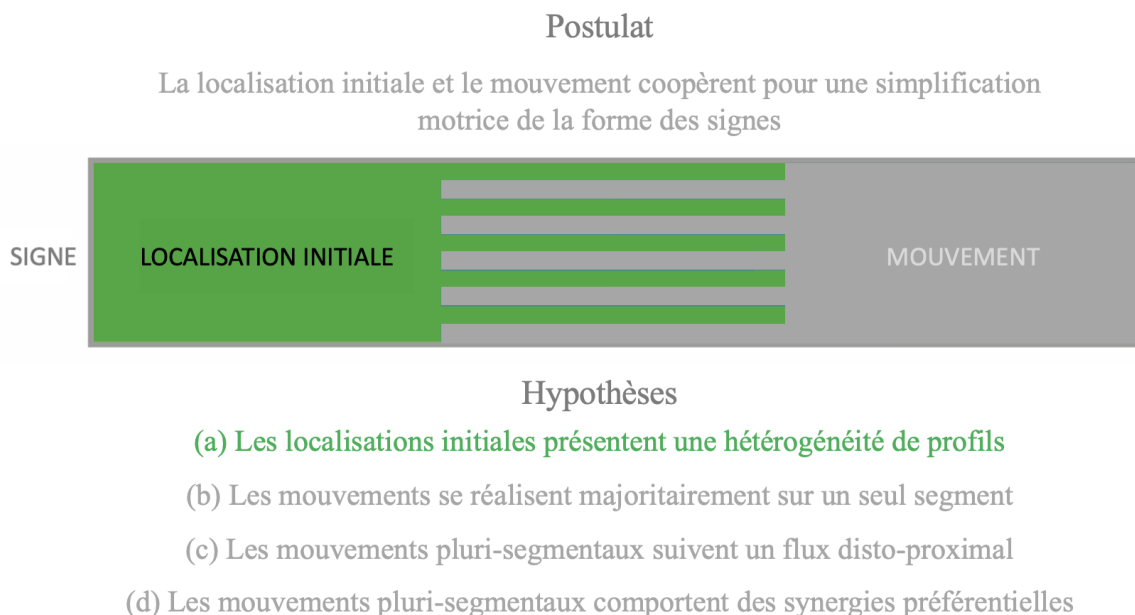


Figure 5.18 – Rappel de l'hypothèse (a) qui concerne la LOCini spécifiquement

Deux étapes préliminaires concernant le tableau de référence sont nécessaires avant de commencer le traitement des données à proprement parler.

Étape 1 : Correspondance avec les glyphes Typannot

La LOCini est transcrite avec des glyphes spécifiques à Typannot. Pour que le script fonctionne correctement et traite de manière adéquate ces caractères inconnus, il faut mettre en place un

répertoire de correspondances. Pour cela, la liste des LOCini possibles (il en existe 41), et leurs correspondances Unicode⁸⁶ respectives sont transmises.

Étape 2 : Récupération des données pertinentes (LOCini)

Le script étant désormais en mesure de reconnaître chacun des caractères de Typannot, la sélection des informations pertinentes à la validation (ou à l'invalidation) de notre première hypothèse peut commencer. Un premier filtre est opéré au niveau des colonnes : seules les colonnes « . Sign Number » et celles dont le titre débute par le chiffre 0 (i.e. LOCini) sont considérées.

Un deuxième filtre est opéré au niveau des lignes : afin de ne pas avoir de doublons de LOCini, seule la première ligne associée à un « . Sign number » distinct est prise en compte (tab. 5.8).

Tableau 5.8 – Visuel des données traitées par le script Python pour l'hypothèse (a)

. Sign number	0-1-1	0-1-2	0-2-0	0-2-1	0-3-0	0-3-1	0-3-2
LOC 2 SIGN 038	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 039	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 040	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 041	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 042	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 043	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 044	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 045	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 046	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 047	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 048	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 049	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 050	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 051	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 052	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ
LOC 2 SIGN 053	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ	ⓂⓂⓂ

Les étapes préparatoires maintenant terminées, le traitement des données peut débuter.

Tâche 1 : Fréquences des LOCini

Il s'agit, pour cette première tâche, d'identifier la fréquence d'apparition de chaque LOCini. L'*output* est généré dans une nouvelle base de données (tab. 5.9). Seule la première manifestation de LOCini est notée dans la colonne « LOCini string », c'est ensuite la colonne « Frequency » qui permet d'indiquer le nombre de fois où cette dernière apparaît.

⁸⁶ Unicode est une norme universelle associant à chaque graphème un nombre unique

Tableau 5.9 – Extrait de l’*output* de la tâche 1

LOCini string	Frequency
I I ɓ I ɗ ɓ I ɔ I I I ɔ ɔ I I ɓ I ɗ I	1
I I I I ɗ ɓ I ɔ I I I ɔ ɔ I I I ɔ I ɔ I	1
I I ɓ I ɗ I I ɔ I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I ɓ I ɗ I I ɔ I I I ɓ I ɔ I I I ɓ I ɗ I	2
I I ɓ I ɗ I I ɔ I I I I ɔ ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	2
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	2
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	2
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	3
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1
I I I I ɗ I I ɔ I I I I ɓ I ɔ I I I I ɗ I	1

Tâche 2 : Fréquence des crans au sein des LOCini

Cette deuxième tâche permet cette fois-ci de calculer la fréquence d’apparition des crans de chaque LOCini. Les *outputs* sont automatiquement générés dans un nouveau tableau (tab. 5.10).

Tableau 5.10 – Extrait de l’*output* de la tâche 2

LOCini	Frequency
I I ɔ	0
I I I	0
I I I	94
I I ɓ	70
I I ɗ	4
I I ɔ	0
I I ɔ	0
I ɗ ɔ	0
I ɗ I	1
I ɗ I	136
I ɗ ɓ	30
I ɗ ɗ	1

Tâche 3 : Traitement des LOCini

La troisième tâche concerne, non plus les crans de chaque DDL, mais les LOCini entières.

À l’intérieur de chacune d’elles, le nombre de crans non neutres est relevé.

Les *outputs* sont aussi automatiquement générés dans un nouveau tableau (tab. 5.11) :

Tableau 5.11 – Extrait de l’output de la tâche 3

. Sign number	0-1-1	0-1-2	0-2-0	0-2-1	0-3-0	0-3-1	0-3-2	# of DDL with no □
LOC 2 SIGN 038	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	2
LOC 2 SIGN 039	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	3
LOC 2 SIGN 040	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	2
LOC 2 SIGN 041	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	4
LOC 2 SIGN 042	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	2
LOC 2 SIGN 043	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	2
LOC 2 SIGN 044	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	2
LOC 2 SIGN 045	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	4
LOC 2 SIGN 046	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	3
LOC 2 SIGN 047	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	4
LOC 2 SIGN 048	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	4
LOC 2 SIGN 049	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	3
LOC 2 SIGN 050	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	2
LOC 2 SIGN 051	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	5
LOC 2 SIGN 052	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	4
LOC 2 SIGN 053	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	□□□	2

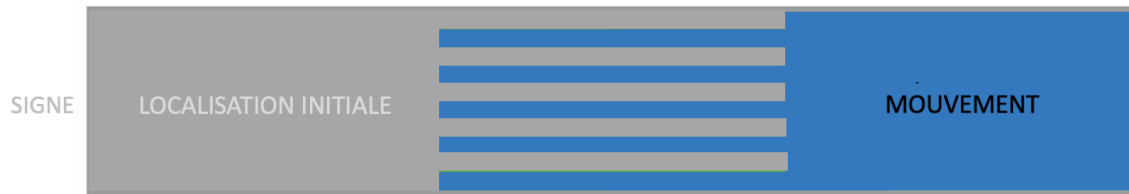
Grâce à ce double point de vue, à la fois centré sur les LOCini (tâches 1 et 3) et sur les DDLs spécifiquement (tâche 2), nous avons un bilan complet des informations utiles à notre première hypothèse.

5.2.2.3. Traitement du MOUV

Nous pouvons désormais passer au traitement des hypothèses concernant le MOUV, soit la (b) qui postule pour une majorité de MOUV qui ne requiert l’activation que d’un seul DDL, et la (c) qui postule pour un flux disto-proximal majoritaire au sein des MOUV pluri-segmentaux (fig. 5.19).

Postulat

La localisation initiale et le mouvement coopèrent pour une simplification motrice de la forme des signes



Hypothèses

- (a) Les localisations initiales présentent une hétérogénéité de profils
- (b) Les mouvements se réalisent majoritairement sur un seul segment
- (c) Les mouvements pluri-segmentaux suivent un flux disto-proximal
- (d) Les mouvements pluri-segmentaux comportent des synergies préférentielles

Figure 5.19 – Rappel des hypothèses (b) et (c) qui concernent le MOUV spécifiquement

À la différence de la LOCini, le MOUV est transcrit en caractères latins, il n’y a donc pas besoin de réitérer l’étape de mise en correspondance avec les glyphes Typannot.

Étape 3 : Récupération des données pertinentes (MOUV)

Cette fois-ci, les données à conserver sont celles contenues dans la colonne « . Sign Number » et dans les colonnes dont le titre débute par le chiffre 1 (i.e. MOUV). Toutes les autres ne sont pas prises en compte (tab. 5.12).

Tableau 5.12 – Visuel des données traitées par le script Python pour les hypothèses (b) et (c)

. Sign number	1-1-1	1-1-2	1-2-0	1-2-1	1-3-0	1-3-1	1-3-2
LOC 2 SIGN 038	No variation	No variation	Internal rotation	No variation	Pronation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 038	No variation	No variation	External rotation	No variation	Supination	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 038	No variation	No variation	Internal rotation	No variation	Pronation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 038	No variation	No variation	No variation	No variation	Supination	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 039	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 039	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 040	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 040	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 040	Flexion	No variation	No variation	Extension	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 040	No variation	No variation	Internal rotation	Flexion	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 041	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 042	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 042	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation	Extension	No variation
LOC 2 SIGN 042	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 043	Flexion	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 044	No variation	No variation	Internal rotation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 045	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 045	No variation	No variation	No variation	No variation	Supination	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 045	No variation	No variation	No variation	No variation	Supination	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 045	No variation	No variation	External rotation	No variation	Supination	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 046	No variation	Adduction	No variation	Extension	Supination	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 046	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 047	No variation	No variation	External rotation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 047	Extension	No variation	No variation	No variation	Supination	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 048	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation
LOC 2 SIGN 048	No variation	No variation	No variation	No variation	Pronation	Extension	No variation
LOC 2 SIGN 049	Flexion	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 049	Extension	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 050	Extension	No variation	Internal rotation	No variation	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 051	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation
LOC 2 SIGN 052	Extension	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 053	No variation	No variation	Internal rotation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 053	No variation	No variation	External rotation	Flexion	No variation	No variation	No variation

C'est à partir de ces données optimisées que le script va réaliser les tâches suivantes :

Tâche 4 : Catégoriser le MOUV en fonction du nombre de DDLs et segments actifs

En amont de la mise en place du script, un ensemble de catégories a été créé. Celui-ci classe les MOUV selon le nombre et l'appartenance des DDLs actifs qui le composent :

- Cat1 – Pas de DDL

Aucun DDL n'est actif.

- Cat2 - un DDL un segment

Un DDL est actif.

- Cat3 - plusieurs DDL un SEG

Il y a au moins deux DDLs actifs et ils sont tous concentrés sur le même segment.

- Cat4 - un DDL plusieurs SEG

Il y a au moins deux DDLs actifs et ils sont répartis sur plusieurs segments, avec pas plus d'un DDL actif pour un même segment.

- Cat5 - plusieurs DDL plusieurs SEG

Il y a au moins trois DDLs actifs et ils sont répartis sur plusieurs segments, un segment au moins ayant plus d'un DDL actif.

Nous avons donc trois catégories qui englobent les MOUV a-segmentaux ou uni-segmentaux (i.e. Cat1, Cat2 et Cat3) et deux catégories qui concernent les MOUV pluri-segmentaux (Cat4 et Cat5).

En passant en revue chaque ligne et colonne contenue dans un même MOUV, le script peut trouver combien de DDLs et de segments sont actifs et formaliser cette catégorisation. Les *outputs* sont automatiquement générés dans un nouveau tableau (tab. 5.13).

Tableau 5.13 – Extrait de l'*output* de la tâche 4

. Sign number	Number of DDL
LOC 2 SIGN 038	Cat2/Cat4
LOC 2 SIGN 039	Cat2/Cat4
LOC 2 SIGN 040	Cat1/Cat2/Cat3/Cat4
LOC 2 SIGN 041	Cat4
LOC 2 SIGN 042	Cat2/Cat4
LOC 2 SIGN 043	Cat2
LOC 2 SIGN 044	Cat2
LOC 2 SIGN 045	Cat2/Cat3/Cat4
LOC 2 SIGN 046	Cat2/Cat4
LOC 2 SIGN 047	Cat2/Cat4
LOC 2 SIGN 048	Cat2/Cat3
LOC 2 SIGN 049	Cat2
LOC 2 SIGN 050	Cat4
LOC 2 SIGN 051	Cat2
LOC 2 SIGN 052	Cat2
LOC 2 SIGN 053	Cat2/Cat3

Nous pouvons remarquer que plusieurs catégories ont été assignées à certains signes. Cela est dû au fait que l'analyse se concentre sur les *phases* (voir page 217) du MOUV et non sur un MOUV global.

Par exemple, pour le signe [FRANCE], nous avons trois phases. Ces trois phases s'inscrivent dans deux catégories différentes :

- la première (DDL actif : pronation) relève de la Cat2 ;
- la deuxième (DDLs actifs : pronation ET rotation extérieure) relève de la Cat4 ;
- la troisième (DDL actif : rotation extérieure) relève de nouveau de la Cat2

Les informations nécessaires à l'hypothèse (b) sont maintenant rassemblées ; nous pouvons passer au traitement relatif à l'hypothèse (c) qui concerne le flux de propagation du mouvement

à travers le membre supérieur. L'automatisation de ce traitement présuppose la mise en place de tâches intermédiaires (tâches 4 et 5) que voici.

Tâche 5 : Répartition des MOUV en fonction de leur nombre de phases

Le premier traitement classe les MOUV selon leur nombre de phases. Trois nouvelles catégories sont alors formées :

- Simple

Concerne les signes composés d'une seule phase.

- Répété

Concerne les signes composés d'au moins deux phases, mais ces phases se concentrent sur un seul et même segment.

- Multiple

Concerne les signes composés d'au moins deux phases impliquant au moins deux segments qui ont au minimum un DDL actif.

Cette étape est importante : elle permet de distinguer les signes qui sont composés de plusieurs phases, mais qui pour autant ne se déploient pas sur plusieurs segments.

Une fois cette distribution faite, une colonne est générée dans le même document constitué au cours de la tâche précédente (tab. 5.14).

Tableau 5.14 – Extrait de l'*output* de la tâche 5

. Sign number	Number of DDL	Number of phase
LOC 2 SIGN 038	Cat2/Cat4	Multiple
LOC 2 SIGN 039	Cat2/Cat4	Multiple
LOC 2 SIGN 040	Cat1/Cat2/Cat3/Cat4	Multiple
LOC 2 SIGN 041	Cat4	Simple
LOC 2 SIGN 042	Cat2/Cat4	Multiple
LOC 2 SIGN 043	Cat2	Simple
LOC 2 SIGN 044	Cat2	Simple
LOC 2 SIGN 045	Cat2/Cat3/Cat4	Multiple
LOC 2 SIGN 046	Cat2/Cat4	Multiple
LOC 2 SIGN 047	Cat2/Cat4	Multiple
LOC 2 SIGN 048	Cat2/Cat3	Repeated
LOC 2 SIGN 049	Cat2	Repeated
LOC 2 SIGN 050	Cat4	Simple
LOC 2 SIGN 051	Cat2	Simple
LOC 2 SIGN 052	Cat2	Simple
LOC 2 SIGN 053	Cat2/Cat3	Repeated

Tâche 6 : Récupération de l'ordre d'activation des segments

La seconde étape intermédiaire cherche à obtenir l'ordre d'activation des segments au cours d'un MOUV. Pour cela, le script se charge de générer une unique chaîne d'informations contenant le nom des segments présentant un DDL, selon leur ordre chronologique d'activation. Une nouvelle colonne est alors ajoutée au document créé au cours de la tâche 3 (tab. 5.15).

Tableau 5.15 – Extrait de l'*output* de la tâche 6

. Sign number	Number of DDL	Number of phase	Order of segment activation
LOC 2 SIGN 038	Cat2/Cat4	Multiple	Forearm&Hand
LOC 2 SIGN 039	Cat2/Cat4	Multiple	Hand -> Forearm
LOC 2 SIGN 040	Cat1/Cat2/Cat3/Cat4	Multiple	Forearm -> Arm
LOC 2 SIGN 041	Cat4	Simple	Forearm&Hand
LOC 2 SIGN 042	Cat2/Cat4	Multiple	Forearm&Hand
LOC 2 SIGN 043	Cat2	Simple	Arm
LOC 2 SIGN 044	Cat2	Simple	Forearm
LOC 2 SIGN 045	Cat2/Cat3/Cat4	Multiple	Hand -> Forearm
LOC 2 SIGN 046	Cat2/Cat4	Multiple	Arm&Forearm&Hand
LOC 2 SIGN 047	Cat2/Cat4	Multiple	Forearm -> Arm&Hand
LOC 2 SIGN 048	Cat2/Cat3	Repeated	Hand
LOC 2 SIGN 049	Cat2	Repeated	Arm
LOC 2 SIGN 050	Cat4	Simple	Arm&Forearm&Hand
LOC 2 SIGN 051	Cat2	Simple	Hand
LOC 2 SIGN 052	Cat2	Simple	Arm
LOC 2 SIGN 053	Cat2/Cat3	Repeated	Forearm

Le symbole « & » placé entre deux segments signifie que leurs DDLs se sont activés en même temps au cours du MOUV ; le symbole « -> » signifie qu'il y a un décalage temporel entre le premier segment actif (à gauche du symbole) et le deuxième ou dernier segment actif (à droite du symbole). Si le MOUV fait partie de la « Cat1 – No DDL », la case contenue dans la colonne « order of segment activation » reste vide.

Tâche 7 : Catégorisation du flux de propagation du mouvement

Grâce aux *outputs* des tâches 3, 4 et 5, il est désormais possible de détecter le type de flux pour chacun des signes. Six catégories de flux ont été mises en place :

- CatA – Non concerné

Si un signe est « Simple » (i.e. une phase) ou « Répété » (i.e. plusieurs phases durant lesquelles les DDLs actifs se concentrent sur un seul segment) et ses phases actives sont en Cat2 (i.e. un DDL actif sur un segment) ou Cat3 (i.e. plusieurs DDLs actifs sur un segment).

- CatB – Pas de flux (simple)

Si un signe est « Simple », ses phases actives sont Cat4 (i.e. un DDL actif sur plusieurs segments) ou Cat5 (i.e. plusieurs DDLs actifs sur plusieurs segments) et ne présentent pas de décalage d'activation.

- CatC – Pas de flux (répété)

Si un signe est « Complexe », ses phases actives sont Cat4 ou Cat5 et ne présentent pas de décalage d'activation.

- CatD – Flux temporel disto-proximal

Si un signe est « Complexe », ses phases actives sont Cat4 ou Cat5 et suivent un ordre d'activation des segments distal à proximal.

- CatE – Flux temporel proximo-distal

Si un signe est « Complexe », ses phases actives sont Cat4 ou Cat5, et suivent un ordre d'activation des segments proximaux vers distal.

- CatF – Flux indéterminé

Si un signe est "Complexe", ses phases actives sont Cat4 ou Cat5, et suivent un ordre d'activation des segments qui n'est ni distal à proximal ni proximal à distal.

Une colonne est générée dans le même document constitué au cours de la tâche 3 (tab. 5.16).

Tableau 5.16 – Extrait de l'output de la tâche 7

. Sign number	Phase categories	Sign complexity	Order of segment activation	Flow category
LOC 2 SIGN 038	Cat2/Cat4	Complex	Forearm&Hand	CatC - No flux (Repeated)
LOC 2 SIGN 039	Cat2/Cat4	Complex	Hand -> Forearm	CatD - Flux Temp Dist-Prox
LOC 2 SIGN 040	Cat1/Cat2/Cat3/Cat4	Complex	Forearm -> Arm	CatD - Flux Temp Dist-Prox
LOC 2 SIGN 041	Cat4	Complex	Forearm&Hand	CatB - No flux (Simple)
LOC 2 SIGN 042	Cat2/Cat4	Complex	Forearm&Hand	CatC - No flux (Repeated)
LOC 2 SIGN 043	Cat2	Simple	Arm	CatA - Not applicable
LOC 2 SIGN 044	Cat2	Simple	Forearm	CatA - Not applicable
LOC 2 SIGN 045	Cat2/Cat3/Cat4	Complex	Hand -> Forearm	CatD - Flux Temp Dist-Prox
LOC 2 SIGN 046	Cat2/Cat4	Complex	Arm&Forearm&Hand	CatC - No flux (Repeated)
LOC 2 SIGN 047	Cat2/Cat4	Complex	Forearm -> Arm&Hand	CatF - Flux Indet
LOC 2 SIGN 048	Cat2/Cat3	Repeated	Hand	CatA - Not applicable
LOC 2 SIGN 049	Cat2	Repeated	Arm	CatA - Not applicable
LOC 2 SIGN 050	Cat4	Complex	Arm&Forearm&Hand	CatB - No flux (Simple)
LOC 2 SIGN 051	Cat2	Simple	Hand	CatA - Not applicable
LOC 2 SIGN 052	Cat2	Simple	Arm	CatA - Not applicable
LOC 2 SIGN 053	Cat2/Cat3	Repeated	Forearm	CatA - Not applicable

L'ensemble des données dont nous avons besoin à propos de la LOCini et du MOUV analysés indépendamment l'un de l'autre sont désormais obtenues.

5.2.2.4. Traitement conjoint de la LOCini et du MOUV

Nous pouvons désormais passer au traitement de l'hypothèse (d) qui concerne à la fois la LOCini et le MOUV. Il s'agit cette fois de détecter la présence potentielle de synergies préférentielles au sein des signes pluri-segmentaux (fig. 5.20).

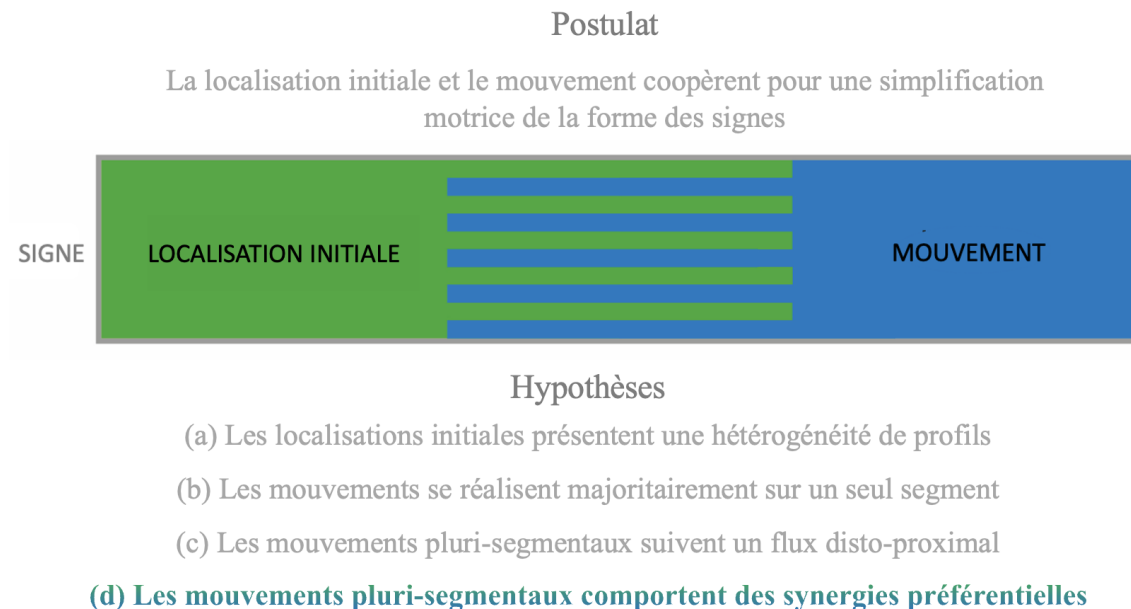


Figure 5.20 – Rappel de l'hypothèse (d) qui concernent les paramètres de la LOCini et du MOUV

Étape 4 : Récupération des données pertinentes (LOCini et MOUV)

Les données conservées sont celles contenues dans « . Sign Number », celles dont le titre est « 0-3-0 » (i.e. LOCini de la prono-supination de la main) et toutes celles dont le titre débute par le chiffre 1 (i.e. MOUV). Les autres colonnes ne sont pas prises en compte (tab. 5.17).

Tableau 5.17 – Visuel des données traitées par le script Python pour l’hypothèse (d)

. Sign number	0-3-0	1-1-1	1-1-2	1-2-0	1-2-1	1-3-0	1-3-1	1-3-2
LOC 2 SIGN 038	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	No variation	Supination	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 039	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 039	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 040	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 040	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 040	☒☒☒	Flexion	No variation	No variation	Extension	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 040	☒☒☒	No variation	No variation	Internal rotation	Flexion	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 041	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 042	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 042	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation	Extension	No variation
LOC 2 SIGN 042	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 043	☒☒☒	Flexion	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 044	☒☒☒	No variation	No variation	Internal rotation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 045	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 045	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	No variation	Supination	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 045	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	No variation	Supination	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 045	☒☒☒	No variation	No variation	External rotation	No variation	Supination	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 046	☒☒☒	No variation	Adduction	No variation	Extension	Supination	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 046	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 047	☒☒☒	No variation	No variation	External rotation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 047	☒☒☒	Extension	No variation	No variation	No variation	Supination	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 048	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation
LOC 2 SIGN 048	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	No variation	Pronation	Extension	No variation
LOC 2 SIGN 049	☒☒☒	Flexion	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 049	☒☒☒	Extension	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 050	☒☒☒	Extension	No variation	Internal rotation	No variation	No variation	Flexion	No variation
LOC 2 SIGN 051	☒☒☒	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	Extension	No variation
LOC 2 SIGN 052	☒☒☒	Extension	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 053	☒☒☒	No variation	No variation	Internal rotation	No variation	No variation	No variation	No variation
LOC 2 SIGN 053	☒☒☒	No variation	No variation	External rotation	Flexion	No variation	No variation	No variation

Tâche 8 : Catégoriser les liens entre une paire de pôles

Comme annoncé §4.2.3.3, afin de discerner les synergies préférentielles nous nous sommes basés sur la liste des transferts de mouvement possibles au sein du membre supérieur dressée par Boutet (2018 : 58). Cette liste a été complétée puis mise en forme à l’aide de trois tableaux à double entrée (tab. 5.18, 5.19 et 5.20) : en abscisse se trouvent l’ensemble des pôles et la combinaison des pôles d’un premier segment ; en ordonnée se trouvent l’ensemble des pôles et la combinaison des pôles d’un second segment.

Tableau 5.18 – Possibilités de relations synergiques entre les pôles du bras et de l’avant-bras

Arm	Forearm				Flexion AND External rotation	Flexion AND Internal rotation	Extension AND External rotation	Extension AND Internal rotation
	Flexion	Extension	External rotation	Internal rotation				
Flexion	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy	No synergy
Extension	No synergy	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy
Abduction	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy
Adduction	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy
Flexion AND Abduction	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy
Flexion AND Adduction	Partial synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy
Extension AND Abduction	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Synergy	Partial synergy
Extension AND Adduction	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	Synergy

Tableau 5.20 – Possibilités de relations synergiques entre les pôles du bras et de la main

Hand	Arm	LOCini of hand Pronation/Supination	Flexion	Extension	Abduction	Adduction	Flexion AND Abduction	Flexion AND Adduction	Extension AND Abduction	Extension AND Adduction
Flexion	☐	☐	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy	No synergy
Extension	☐	☐	No synergy	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy
Abduction	☐	☐	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy
Adduction	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy
Flexion AND Abduction	☐	☐	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy
Flexion AND Adduction	☐	☐	Partial synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy
Extension AND Abduction	☐	☐	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Synergy	Partial synergy
Extension AND Adduction	☐	☐	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Synergy
Flexion	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	No synergy
Extension	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy
Abduction	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy
Adduction	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy
Flexion AND Abduction	☐	☐	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy	No synergy
Flexion AND Adduction	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy
Extension AND Abduction	☐	☐	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy
Extension AND Adduction	☐	☐	No synergy	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy
Flexion	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy
Extension	☐	☐	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy
Abduction	☐	☐	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy	No synergy
Adduction	☐	☐	No synergy	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy
Flexion AND Abduction	☐	☐	Partial synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy
Flexion AND Adduction	☐	☐	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	Synergy
Extension AND Abduction	☐	☐	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy
Extension AND Adduction	☐	☐	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Synergy	Partial synergy
Flexion	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy
Extension	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy
Abduction	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	No synergy
Adduction	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy
Flexion AND Abduction	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy
Flexion AND Adduction	☐	☐	No synergy	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy
Extension AND Abduction	☐	☐	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy
Extension AND Adduction	☐	☐	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy
Flexion	☐	☐	No synergy	Synergy	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy
Extension	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy
Abduction	☐	☐	No synergy	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy
Adduction	☐	☐	No synergy	No synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy
Flexion AND Abduction	☐	☐	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	Synergy
Flexion AND Adduction	☐	☐	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Synergy	Partial synergy
Extension AND Abduction	☐	☐	Partial synergy	No synergy	No synergy	Partial synergy	Partial synergy	Synergy	No synergy	Partial synergy
Extension AND Adduction	☐	☐	Partial synergy	No synergy	Partial synergy	No synergy	Synergy	Partial synergy	Partial synergy	No synergy

Pour les mouvements composés de deux pôles, la catégorisation est binaire :

- si le pôle d'un segment peut transférer son mouvement sur le pôle d'un autre segment, alors le lien entre ces pôles est synergique (case verte) ;
- si le pôle d'un segment ne peut pas transférer son mouvement sur le pôle d'un autre segment, alors le lien entre ces pôles est non synergique (case orange).

Pour les mouvements composés de trois pôles, la catégorisation est aussi binaire :

- le lien de synergie ne peut se faire qu'entre deux pôles de deux segments distincts, à partir du moment où une paire synergique est créée, le pôle restant ne peut en faire partie. La relation entre les trois pôles est alors partiellement synergique (case bleue) ;
- si aucun transfert de mouvement n'est possible entre ces trois pôles, la relation entre les trois pôles est non synergique (cases orange).

Pour les mouvements composés de quatre pôles, la catégorisation est ternaire :

- si les pôles d'un segment peuvent respectivement transférer leurs mouvements sur les pôles d'un autre segment, alors les liens entre ces pôles sont synergiques (case verte) ;

- si un pôle d'un segment peut transférer ses mouvements sur un pôle d'un autre segment, mais que ce n'est pas le cas des pôles restants, alors les liens entre ces pôles sont partiellement synergiques (case bleue) ;
- si les pôles d'un segment ne peuvent pas transférer leurs mouvements sur les pôles d'un autre segment, alors les liens entre ces pôles sont non synergiques (case orange).

Lorsque la main est impliquée dans le mouvement, la synergie dépend de la LOCini de la prono-supination (par exemple, la flexion de l'avant-bras n'aura pas les mêmes répercussions sur la main si celle-ci est en supination ou en pronation, vidéo [4.9](#) et [4.10](#)). La prono-supination ayant neuf crans différents, le nombre de combinaisons possibles passe de 64 (tab. 5.18) à 320 possibilités (tab. 5.19 et 5.20).

Le script a donc pour rôle de rechercher les pôles actifs dans la paire de segments d'intérêt. Si une phase présente des pôles actifs uniquement dans un des segments d'intérêt, le script permet de comparer ces DDLs aux DDLs actifs de l'autre segment qui se trouve (éventuellement) dans la phase suivante.

Les *outputs* sont automatiquement générés dans un nouveau tableau (tab. 5.21). En prenant les tableaux qui viennent d'être présentés comme référence, six colonnes sont alors créées afin d'identifier les éventuelles relations synergiques entre les paires de pôles repérées :

- Bras/avant-bras : synergie

Toutes les paires de pôles du bras et de l'avant-bras qui sont activées en suivant un modèle de mouvement synergique.

- Bras/avant-bras : pas de synergie

Toutes les paires de pôles du bras et de l'avant-bras qui sont activées selon un schéma de mouvement non synergique.

- Bras/avant-bras : synergie partielle

Toutes les paires de pôles du bras et de l'avant-bras qui sont activées selon un schéma de mouvement partiellement synergique.

Il en va en de même pour les couples bras/avant-bras et bras/main.

Ces colonnes peuvent être remplies avec la description de la paire de pôles dont il est question ou avec l'expression « non traité » (i.e. not processed). Cette expression est utilisée lorsque la prono-supination de la main est impliquée dans le MOUV. Rappelons que si un MOUV est

synergique, il est nécessaire de connaître le niveau de pronation-supination de la LOCini. Or, si celui-ci a changé au cours du MOUV, alors il n'est plus possible de l'identifier⁸⁷.

Tableau 5.21 – Extrait de l'output de la tâche 8

. Sign number	Arm & Forearm Synergy	Arm & Forearm Partly synergy	Arm & Forearm No synergy	Hand & Forearm synergy	Hand & Forearm Partly synergy	Hand & Forearm No synergy	Hand & Arm Synergy	Hand & Arm Partly synergy	Hand & Arm No synergy
LOC 2 SIGN 038									
LOC 2 SIGN 039						Flexion -> Flexion			
LOC 2 SIGN 039						Flexion -> Flexion			
LOC 2 SIGN 040									
LOC 2 SIGN 040			Extension -> Flexion						
LOC 2 SIGN 040			Flexion -> Extension						
LOC 2 SIGN 040									
LOC 2 SIGN 041				Flexion -> Flexion					1
LOC 2 SIGN 042				Extension -> Flexion					1
LOC 2 SIGN 042				Flexion -> Extension					1
LOC 2 SIGN 042									
LOC 2 SIGN 043									
LOC 2 SIGN 044									
LOC 2 SIGN 045									
LOC 2 SIGN 045									
LOC 2 SIGN 045				not processed	not processed	not processed			
LOC 2 SIGN 045				not processed	not processed	not processed			
LOC 2 SIGN 046			Adduction -> Extension	not processed	not processed	not processed	not processed	not processed	not processed
LOC 2 SIGN 046									
LOC 2 SIGN 047			External rotation -> Extension	not processed	not processed	not processed			
LOC 2 SIGN 047							not processed	not processed	not processed
LOC 2 SIGN 048									
LOC 2 SIGN 048									
LOC 2 SIGN 049									
LOC 2 SIGN 049									
LOC 2 SIGN 050			Extension -> Internal rotation	Internal rotation -> Flexion					Extension -> Flexion
LOC 2 SIGN 051									
LOC 2 SIGN 052									

Ceci clôture les traitements effectués sur notre corpus vidéo. Les résultats obtenus nous permettent désormais d'établir un verdict quant à nos hypothèses de recherche et à notre postulat général. Mais avant de les présenter, nous allons exposer le processus d'exploitation établi concernant la MoCap.

5.3. Exploitation du corpus de capture de mouvement CLM-MOCAP

L'exploitation de notre corpus de MoCap a requis une connaissance poussée du contenu des fichiers sous format « Biovision BVH » qui résultent de l'export du logiciel Axis Neuron, ainsi que d'une prise en main du logiciel MATLAB (R2016b, *The MathWorks, Inc. Natick, MA, USA*) afin de traiter ces données cinématiques.

⁸⁷ Si le MOUV contient plusieurs phases, seules celles qui *précèdent* la pronation ou la supination peuvent être placées dans l'une des trois catégories (mouvement synergique, non synergique ou partiellement synergique).

5.3.1. Export et synchronisation des données

Tout comme nous avons exporté les transcriptions réalisées sur ELAN, il faut maintenant exporter les données 3D du logiciel *Axis Neuron*. Voyons de quoi est constitué le type de fichier obtenu, ainsi que les techniques employées pour synchroniser la MoCap et la vidéo.

5.3.1.1. Fichier de sortie : BVH Biovision

Les fichiers BVH peuvent être lus à partir d'un éditeur de textes tels que *TextEdit* ou *TextWrangler*. Ils se composent systématiquement de deux parties : la première détaille la hiérarchie et la pose initiale du squelette ; la seconde contient les données de positions et de rotations de chaque articulation. Cette première section, dont le titre "*HIERARCHY*" (fig. 5.21) est en en-tête, débute par le terme "*ROOT*" suivi du nom du segment "*Hips*". Cela signifie que les hanches sont considérées comme le segment racine de l'ensemble du squelette, ou encore le segment « parent ». Ce format de fichier propose une définition hiérarchisée (Meredith & Maddock 2001) du squelette : chaque segment de la hiérarchie contient des données pertinentes pour ce segment, permettant également de définir ses segments « enfants ».

```
HIERARCHY
ROOT Hips Segment parent
{
  OFFSET 0.000 90.120 0.000 Valeurs du segment parent par rapport au sol selon les axes x, y et z
  CHANNELS 6 Xposition Yposition Zposition Yrotation Xrotation Zrotation Positions sur chaque axe et rotations du segment parent
  JOINT RightUpLeg Segment enfant
  {
    OFFSET -11.250 -1.640 0.000 Décalage par rapport au segment parent selon les axes x, y, z
    CHANNELS 6 Xposition Yposition Zposition Yrotation Xrotation Zrotation Positions sur chaque axe et rotations du segment enfant
    JOINT RightLeg
    {
      OFFSET 0.000 -41.510 0.000
      CHANNELS 6 Xposition Yposition Zposition Yrotation Xrotation Zrotation
      JOINT RightFoot
      {
        OFFSET 0.000 -39.430 0.000
        CHANNELS 6 Xposition Yposition Zposition Yrotation Xrotation Zrotation
        End Site Segment terminal
        {
          OFFSET 0.000 -7.540 17.150
        }
      }
    }
  }
} Fin de la récursivité du membre
JOINT LeftUpLeg
```

Figure 5.21 - Extrait de la première section du fichier BVH ainsi que les informations concernant son contenu (en orange)

Nous avons ensuite l'« *OFFSET* » de ce segment qui est donné en centimètres. L'*offset* correspond au décalage tridimensionnel de chaque segment par rapport à un repère droit (fig. 5.22) positionné arbitrairement par le logiciel *Axis Neuron* au sol.

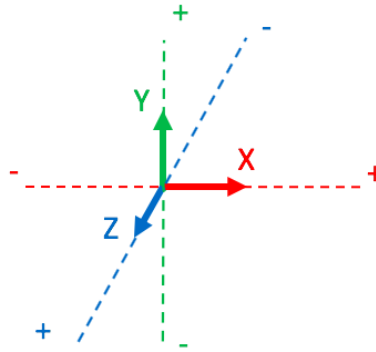


Figure 5.22 - Illustration des axes XYZ selon un repère droit (le sens des axes détermine le signe des valeurs des offsets de chaque segment par rapport à ce repère)

Plus précisément, le repère initial sur lequel se construit l'ensemble de la hiérarchie des fichiers BVH se situe exactement entre les jambes du squelette, au niveau du sol (fig. 5.23).

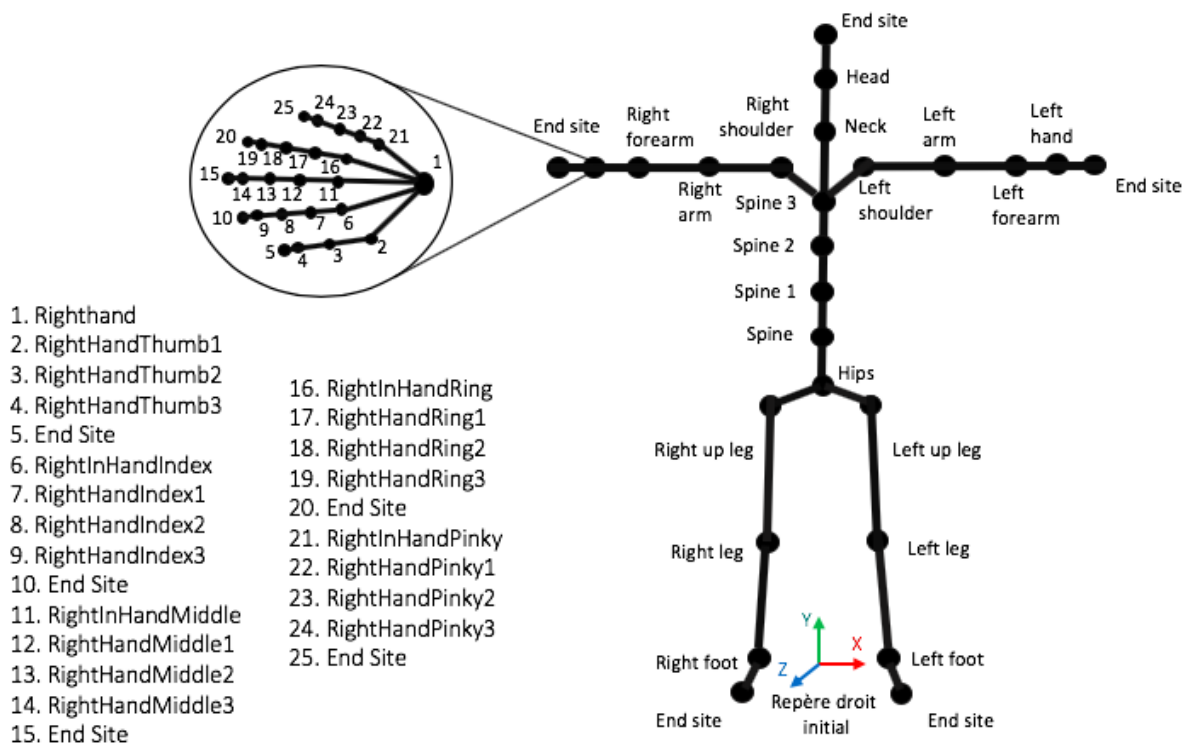


Figure 5.23 - Visualisation de la hiérarchie d'un fichier BVH (le zoom proposé sur la main droite fait état d'un découpage précis de tous les segments identiques sur le côté gauche du corps)

Dans notre exemple (fig. 5.21), les hanches ont pour *offset* 0.000 cm sur l'axe X, 90.120 cm sur l'axe Y et 0.000 cm sur l'axe Z ; elles se situent donc parfaitement à 90.120 cm au-dessus du repère initial.

Le segment suivant est un segment dit « enfant », son *offset* dépend de celui de son « parent ». La « RightUpLeg », soit le haut de la jambe droite, a pour offset -11.250 -1.640 et 0.000 ; dans le référentiel du participant, elle se situe donc à 11.250 cm sur la droite de la hanche, à 1.640 cm vers le bas de la hanche, et sur le même plan frontal que la hanche. C'est ce même mécanisme qui est suivi pour tous les segments suivants, chaque *offset* sera calculé par rapport à l'*offset* du segment parent précédent.

La ligne suivante, « CHANNELS 6 », définit les DDLs pour chaque segment et détermine l'ordre qu'il faudra suivre lors de la concaténation des angles d'Euler avec les matrices de rotation (i.e. XYZ pour les positions et YXZ pour les rotations).

Les termes « *End Site* » mettent fin à la description du membre et indiquent que le segment en cours est un effecteur terminal, il n'a donc pas d'enfant. L'*offset* du *end site* fournit la longueur du segment précédent.

Enfin, l'accolade droite "}" marque la fin du membre.

La suite du fichier (seconde section) complète les données de mouvement pour chaque os dans l'ordre dans lequel elles ont été vues dans la définition de la hiérarchie (fig. 5.24) :

MOTION

```

Frames: 22699 Nombre d'enregistrements
Frame Time: 0.017 Temps séparant deux enregistrements successifs
-3.619038 91.581337 40.369968 84.615105 -4.730497 -0.332830 -11.247906 -1.615667 -0.005005 0.706037
-3.611260 91.582924 40.369442 84.656624 -4.710671 -0.332845 -11.250863 -1.615290 -0.008866 0.700459
-3.605813 91.584152 40.371853 84.661263 -4.704464 -0.336331 -11.249550 -1.616130 -0.006068 0.696875
-3.598707 91.584442 40.375755 84.680351 -4.704226 -0.336539 -11.249794 -1.615820 -0.006943 0.677655
-3.594313 91.584358 40.381630 84.681885 -4.704290 -0.337532 -11.249658 -1.614883 -0.007713 0.676245
-3.593206 91.584953 40.385426 84.682541 -4.710854 -0.339482 -11.247843 -1.616759 -0.006292 0.679001
-3.592629 91.584183 40.390102 84.674423 -4.713324 -0.342157 -11.245013 -1.619435 -0.001403 0.685508
-3.589429 91.582993 40.395512 84.648972 -4.715779 -0.341710 -11.243550 -1.620868 0.004257 0.660347
-3.588220 91.583588 40.400356 84.628807 -4.714352 -0.347031 -11.244066 -1.623660 0.010162 0.666896
-3.591213 91.583649 40.405743 84.613647 -4.718845 -0.347015 -11.245722 -1.624636 0.012002 0.662054
-3.596638 91.583794 40.412403 84.593704 -4.714977 -0.348598 -11.245453 -1.625853 0.015907 0.659049
-3.602215 91.584435 40.420601 84.593704 -4.714977 -0.348598 -11.247362 -1.626066 0.013346 0.646453
-3.606594 91.586136 40.428371 84.593704 -4.714977 -0.348598 -11.246799 -1.626386 0.012924 0.625754
-3.610862 91.585609 40.435429 84.593704 -4.714977 -0.348598 -11.250192 -1.626409 0.011355 0.605793
-3.615564 91.585472 40.439926 84.593704 -4.714977 -0.348598 -11.249792 -1.626561 0.011191 0.593475
-3.615877 91.586182 40.439476 84.593704 -4.714977 -0.348598 -11.253742 -1.626200 0.007833 0.581656
-3.614510 91.586449 40.438755 84.593704 -4.714977 -0.348598 -11.253752 -1.625898 0.003520 0.573280
-3.612399 91.585434 40.438591 84.578575 -4.713092 -0.349088 -11.251016 -1.626106 0.003485 0.582555
-3.607413 91.584549 40.437908 84.557762 -4.711482 -0.351961 -11.247905 -1.627413 0.007235 0.595736
-3.596093 91.583153 40.438854 84.454468 -4.759269 -0.342165 -11.248990 -1.626911 0.020028 0.688180
-3.587378 91.580727 40.438263 84.453575 -4.767923 -0.342934 -11.249738 -1.626448 0.014102 0.689339
-3.580786 91.581268 40.437965 84.456642 -4.770164 -0.344752 -11.248011 -1.625801 0.013924 0.688783
-3.576362 91.581665 40.436386 84.454903 -4.772565 -0.347492 -11.245128 -1.627285 0.014850 0.693205
-3.573051 91.582664 40.433460 84.452469 -4.774765 -0.347780 -11.244567 -1.628549 0.012903 0.706076
-3.571698 91.582855 40.433041 84.450073 -4.772712 -0.348413 -11.244826 -1.629982 0.014155 0.717106
-3.571130 91.583481 40.432827 84.450073 -4.772712 -0.348413 -11.241948 -1.631307 0.016908 0.714612
-----
Hips Tx, Ty, Tz Hips Ry, Rx, Rz RightUpLeg Tx, Ty, Tz ...

```

Figure 5.24 - Extrait de la seconde section du fichier BVH ainsi que les informations concernant son contenu (en orange)

La section « MOTION » donne d’abord le nombre total de données enregistrées par les IMUs. Nous avons ensuite le « *Frametime* » indiquant la durée d’un unique enregistrement. Dans l’exemple ci-dessus, cette durée est de 0.017 seconde, soit 17 millisecondes. Nous aurions donc une fréquence d’acquisition de 58.8 images par seconde ($f = 1 / T$ avec f la fréquence d’acquisition et T le temps séparant deux acquisitions successives, soit, appliqué à nos données, $f = 1 / 0.017 = 58.8$). Or, comme précisé par Boutet *et al.* (2018), le *frametime* affiché est une approximation du *frametime* réel :

“Regarding the motion capture, the device we use (Perception Neuron) records movement at 60,6060 FPS (pace = 16,5 ms). However we note a simple export to BVH sets in the exported file a pace at 17 ms which appears to be an approximation of 16,5 ms. This results in obtaining a longer motion capture file (in time) than the raw mocap file since the same number of frames is played at a slower pace. In this case, we have to correct the file export manually in order to generate for instance a video in the Blender 3D software. In this way, the total length is correct and can be synchronized properly with the audio and video files from the camera.” (Boutet *et al.* 2018 : 6-7)

« En ce qui concerne la capture de mouvement, l'appareil que nous utilisons (Perception Neuron) enregistre le mouvement en 60.6060 images/seconde (cadence = 16,5 ms). Cependant, nous remarquons que lors d’une simple exportation vers un ensemble BVH, le fichier exporté a une cadence annoncée à 17 ms qui semble être

une approximation de 16,5 ms. Cela permet l'obtention d'un fichier de capture de mouvement plus long (dans le temps) que le fichier mocap brut, car le même nombre d'images est lu à un rythme plus lent. Dans ce cas, nous devons corriger manuellement l'exportation du fichier afin de générer par exemple une vidéo dans le logiciel Blender 3D. De cette façon, la longueur totale est correcte et peut être convenablement synchronisée avec les fichiers audio et vidéo de la caméra. » (Traduction personnelle, Boutet *et al.* 2018 : 6-7)

La fréquence d'acquisition exprimée en nombre d'images/seconde est donc de 60.606060 et non 58.8. Une telle approximation, aussi faible soit-elle, entraîne une désynchronisation croissante entre les données MoCap et la vidéo. À titre d'exemple, un enregistrement de 10 secondes présentera un écart de 5 millisecondes entre les deux fréquences d'acquisition, et une heure d'enregistrement se soldera par un écart conséquent de 1,8 seconde. Dans le cadre de nos recherches, l'enregistrement d'un locuteur durant 8 minutes accuserait un décalage de 240 millisecondes. Bien que pouvant paraître minime, ce décalage peut provoquer de graves erreurs d'affectation entre les données cinématiques et la réalisation des signes, car de nombreux signes se réalisent en moins de 240 millisecondes.

Notons également que cette fréquence d'acquisition n'est pas constante à tous les enregistrements effectués avec un *Perception Neuron*, mais relative au nombre d'IMUs utilisées : plus le nombre d'IMUs est faible, plus la fréquence d'acquisition est élevée. Dans le cas d'un enregistrement du haut du corps sans les doigts, soient seize IMUs, la *frametime* passe alors à 0,008 seconde.

Enfin, le fichier « MOTION » rassemble les données de positions et de rotations : il s'agit des données brutes du mouvement effectué. Ces données s'apparentent à une longue liste de chiffres recouvrant l'ensemble d'un enregistrement sans interruption. Afin de pouvoir récupérer les zones d'intérêt (i.e. LOCini et MOUV des signes) relatives à notre étude, il faut parvenir à mettre en correspondance les deux types de données, MoCap et vidéo.

5.3.1.2. Synchronisation des enregistreurs

Pour pouvoir synchroniser enregistrements de vidéo et MoCap, il faut déterminer l'exacte durée qui sépare le déclenchement des deux enregistreurs. Pour cela, nous nous servons du signal sonore qu'émet le logiciel *Axis Neuron* lors du déclenchement du *Perception Neuron*.

Une extraction de la bande-son de la vidéo grâce au logiciel Audacity nous permet d'obtenir un fichier audio (.wav) que l'on peut intégrer à ELAN. Une onde de la fréquence du signal sonore est alors visualisable (fig. 5.25).

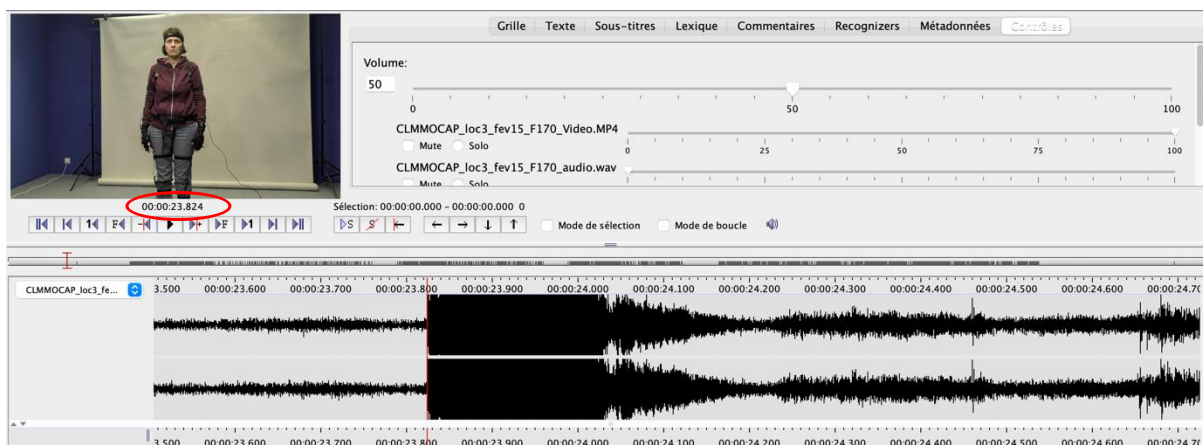


Figure 5.25 – Visualisation de la forme d’onde du signal sonore du déclenchement du *Perception Neuron* (sieur 3)

En plaçant le curseur à l’exact début de ce signal sonore, on peut obtenir un *timecode* qui se trouve être la donnée de décalage que nous cherchions : dans l’exemple ci-dessus, le *Perception Neuron* a été déclenché alors que la caméra tournait depuis 23 secondes et 824 millisecondes (fig. 5.25 cercle rouge). Il faut conserver cette information et la noter dans un nouveau document ; elle fera office de première donnée concernant le déroulé de l’enregistrement de la MoCap (tab. 5.22 case jaune). Pour les lignes suivantes, il faut incrémenter le décalage du *frametime* préalablement établi, soit 0,0165 s ou 0,00825 s.

Il suffit ensuite d’ajouter les données de la section « motion » du fichier BVH et de les insérer dans ce même fichier.

Tableau 5.22 – Extrait du fichier de synchronisation (exprimé en millisecondes)

Timecode	Motion								
23824	2.922132	93.198021	76.874229	88.560257	-5.063833	-0.163620	-11.250693	-1.639900	0.012972
23840,5017	2.917349	93.198647	76.872971	88.560257	-5.063833	-0.163620	-11.250043	-1.640406	0.013841
23857,0033	2.913571	93.199860	76.872292	88.560257	-5.063833	-0.163620	-11.248586	-1.640340	0.008007
23873,505	2.911836	93.199348	76.875290	88.560257	-5.063833	-0.163620	-11.248396	-1.640243	0.003005
23890,0066	2.912840	93.199608	76.878220	88.520805	-5.078797	-0.165267	-11.248157	-1.641411	0.008262
23906,5083	2.911887	93.198769	76.880959	88.519455	-5.078708	-0.164014	-11.248411	-1.638969	0.009061
23923,0099	2.914733	93.197510	76.882553	88.505005	-5.083997	-0.168719	-11.248891	-1.637681	0.012791
23939,5116	2.915172	93.197350	76.879562	88.496513	-5.079248	-0.172706	-11.251574	-1.638619	0.013030
23956,0132	2.914807	93.196693	76.878212	88.501808	-5.084436	-0.174955	-11.251325	-1.639624	0.011877
23972,5149	2.916979	93.197548	76.878098	88.484261	-5.079378	-0.175178	-11.250398	-1.639827	0.009754
23989,0165	2.918844	93.198128	76.879585	88.470901	-5.082102	-0.178764	-11.250469	-1.638536	0.010847
24005,5182	2.920923	93.199089	76.884109	88.470863	-5.079605	-0.178894	-11.248073	-1.638659	0.011242
24022,0198	2.924287	93.199883	76.888527	88.464996	-5.082352	-0.182497	-11.248094	-1.637913	0.012138
24038,5215	2.924172	93.200325	76.892769	88.463608	-5.079755	-0.181377	-11.246447	-1.635541	0.013787
24055,0231	2.925221	93.200279	76.893875	88.448921	-5.084882	-0.183581	-11.245582	-1.636676	0.018295
24071,5248	2.927512	93.200401	76.896706	88.451424	-5.084886	-0.183586	-11.246743	-1.637586	0.017307
24088,0264	2.933415	93.199982	76.899551	88.451378	-5.082389	-0.183717	-11.247977	-1.638182	0.014083
24104,5281	2.941389	93.198578	76.904205	88.463676	-5.084753	-0.181115	-11.249216	-1.635931	0.012484
24121,0297	2.945952	93.198814	76.905884	88.468628	-5.082275	-0.181257	-11.250436	-1.635785	0.008643
24137,5314	2.949856	93.197884	76.909149	88.470863	-5.079605	-0.178894	-11.252248	-1.633423	0.007599
24154,033	2.950819	93.196983	76.912781	88.470863	-5.079605	-0.178894	-11.251790	-1.631270	0.005073
24170,5347	2.954354	93.196396	76.912392	88.461929	-5.074490	-0.177888	-11.251140	-1.631911	0.003355

A priori, les données sont synchronisées : il est dorénavant possible de retrouver les données cinématiques d’un signe segmenté sur ELAN.

Mais, comme nous l'avons vu précédemment, un signe s'étend en moyenne sur quelques centaines de millisecondes : le moindre écart dans les données peut causer des erreurs d'analyse importantes. Nous avons donc testé la précision de cette synchronisation. Pour ce faire, nous avons comparé la dernière occurrence qui apparaît dans la colonne « timecode » à la référence temporelle du signal sonore annonçant cette fois la fin de l'enregistrement MoCap. Si la synchronisation est réussie, les deux informations devraient être identiques.

Pourtant, ce n'est pas tout à fait le cas.

Dans notre exemple, le signal de fin d'enregistrement de la MoCap à 07 min 53 sec 949 ms, soit à 473949 ms. Or, le *timecode* de la dernière ligne affiche 473840 ms. On arrive donc à 109 ms d'écart.

Ce type de comparaison a été effectué sur tous les enregistrements, et des écarts – qui oscillent entre 109 et 250 ms - ont été trouvés pour chacun (tab. 5.23).

Tableau 5.23 – Décalages détectables après la phase de synchronisation entre la MoCap et la vidéo

Production	Décalage en ms
1	131
2	167
3	324
4	206
5	240
6	238
7-1	345
7-2	117
8	244
9	120
10	207

Aucune raison à ces variations dans ces écarts n'a clairement été identifiée. Cela peut être dû au choix du début du signal sonore comme seuil du décalage entre les enregistrements. Il est probable que les données ne commencent à être enregistrées qu'une fois le signal sonore terminé. Mais les répercussions sonores brouillant le moment exact de l'arrêt de ce dernier, il nous a donc été impossible de tester cette hypothèse.

Cela dit, maintenant que nous avons pris connaissance du temps de décalage et de leurs écarts respectifs, nous sommes en mesure d'obtenir une synchronisation et donc, des données précises.

5.3.2. Pré-traitement des données 3D

Pour le pré-traitement de nos données, nous avons choisi d'utiliser le logiciel de calcul numérique MATLAB. Afin de transformer les données brutes contenues dans les colonnes du

fichier BVH en données interprétables par le logiciel MATLAB, nous utilisons le script `skeleton_complet.m`⁸⁸ accompagné de la fonction `loadbvh_modified.m`⁸⁹. Ce script charge les données de mouvement dans la structure du squelette et ordonne l'ensemble de ces informations sous la forme d'un tableau (tab. 5.24). Celui-ci comprend : le nom des segments (colonne *name*), le lien avec le plus proche parent (colonne *parent*), l'offset correspondant à celui-ci décrit dans la première section du BVH (colonne *offset*), le nombre de canaux entre position et rotation (colonne *channel*), les données de déplacement (colonne *Dxyz*), de rotation (colonne *ryxz*) de translation (colonne *trans*), et le nombre d'enregistrements (colonne *Nframes*) pour le recueil de données considéré.

Tableau 5.24 – Visuel de la catégorisation des données tirées du fichier BVH opérée par le script `skeleton_complet.m` et la fonction `loadbvh_modified.m`

Fields	name	nestdepth	parent	offset	Nchannels	order	Dxyz	ryxz	trans	Nframes
1	'Hips'	1	0	[0;85.1750;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
2	'RightUp...	2	1	[-10.5000;-1.5350;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
3	'RightLeg'	3	2	[0;-39.4000;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
4	'RightFoot'	4	3	[0;-37.3200;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
5	' '	5	4	[0;-6.9200;15.7500]		0 []	3x16784 ...	[]	[]	16784
6	'LeftUpLeg'	2	1	[10.5000;-1.5350;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
7	'LeftLeg'	3	6	[0;-39.4000;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
8	'LeftFoot'	4	7	[0;-37.3200;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
9	' '	5	8	[0;-6.9200;15.7500]		0 []	3x16784 ...	[]	[]	16784
10	'Spine'	2	1	[0;13.8150;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
11	'Spine1'	3	10	[0;9.3840;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
12	'Spine2'	4	11	[0;9.7720;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
13	'Spine3'	5	12	[0;9.3840;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
14	'Neck'	6	13	[0;10.0300;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
15	'Head'	7	14	[0;8.2900;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
16	' '	8	15	[0;16.0700;0]		0 []	3x16784 ...	[]	[]	16784
17	'RightSho...	6	13	[-3.1000;6.6870;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
18	'RightArm'	7	17	[-12.4000;0;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
19	'RightFor...	8	18	[-21;0;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
20	'RightHand'	9	19	[-23;0;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
21	'RightHa...	10	20	[-2.3470;0.1790;2.9420]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
22	'RightHa...	11	21	[-3.4720;0;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
23	'RightHa...	12	22	[-2.4120;0;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
24	' '	13	23	[-2.0680;0;0]		0 []	3x16784 ...	[]	[]	16784
25	'RightInH...	10	20	[-3.0390;0.4790;1.8650]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
26	'RightHa...	11	25	[-4.9190;-0.0860;0.9420]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
27	'RightHa...	12	26	[-3.4130;0;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784
28	'RightHa...	13	27	[-1.9350;0;0]		6 [2,1,3]	3x16784 ...	3x16784 ...	4x4x167...	16784

Ces données formatées sont sauvegardées dans un fichier nommé `results_num.mat`.

Le pré-traitement est terminé. Il s'agit désormais de mettre en place un script, mais surtout une méthodologie complète, permettant de transformer les données 3D en données équivalentes à celles obtenues par notre travail de transcription. Les options de traitement choisies et les résultats associés seront présentés §6.2.1.1.

⁸⁸ L'accès à ce script se fait [ici](#).

⁸⁹ Cette fonction de lecture des fichiers BVH a été créée par Will Robertson (*University of Adelaide*). Nous l'avons téléchargée depuis GitHub, plateforme d'hébergement de code (<https://github.com/wspr/bvh-matlab>), puis modifiée selon nos besoins spécifiques. L'accès à cette fonction se fait [ici](#).

BILAN DU CHAPITRE 5

Ce chapitre nous a permis d'opérer un retour méthodologique sur notre travail de recherche. Nous avons présenté notre protocole de recueil de productions signées en LSF en captation vidéo et de MoCap, mais aussi les étapes de son double traitement. Celui concernant le versant vidéo du corpus s'est élaboré en deux étapes majeures :

- une transcription sur le logiciel ELAN qui se concentre sur les paramètres de la LOCini (annotée selon les DDLs du membre supérieur et de leurs amplitudes articulatoires divisées en crans linguistiquement pertinents) et du MOUV (annoté en fonction des DDLs en mouvement et leur temporalité) qui a été réalisé sur 1573 signes ;
- une mise en place de scripts Python permettant le traitement automatique de ces transcriptions orienté vers chacune de nos hypothèses de recherche. Nos conclusions se baseront sur ces résultats.

Pour le versant MoCap, le travail s'est aussi effectué en deux étapes :

- un export des données et une mise en correspondance avec le versant vidéo du corpus ;
- un prétraitement permettant à MATLAB de formater et d'interpréter les données cinématiques.

Le prochain chapitre est dédié à la présentation des résultats liés à ces différents traitements, ainsi qu'à leurs répercussions dans notre appréhension des liens qui unissent la LOCini et le MOUV.

CHAPITRE 6. DU CORPS AU SIGNE

Dans ce dernier chapitre, nous présentons les deux familles de résultats que notre double traitement a permis d'obtenir.

Concernant le premier volet, qui a trait à notre transcription de corpus vidéo, nous gardons le même ordre de présentation que celui utilisé précédemment : nous exposons les résultats concernant la composition de la LOCini, puis ceux qui ont trait à la structure et à l'organisation du MOUV, avant de terminer par l'analyse conjointe de ces deux paramètres. Nous revenons ensuite sur le traitement mené au sein du corpus de MoCap en exposant le processus méthodologique mis en place afin de formater les données cinématiques et les adapter à notre convention de transcription. Nous exposons les limites, mais aussi les possibilités qu'offre ce processus d'exploitation de données, concernant notamment la détection du flux de propagation du mouvement (Boutet 2008).

Nous concluons ce chapitre par une ouverture réflexive concernant le développement phonologique des LS et ses directions évolutives.

6.1. Relations entre LOCini et MOUV : le dénouement

Les paragraphes qui suivent proposent de revenir sur les choix méthodologiques et épistémologiques qui ont été faits ou qui ont évolué au fil de notre appréhension des sujets abordés. Ce n'est qu'une fois cette mise en perspective faite, que nous présentons les résultats issus du script Python. Nous serons alors en mesure d'invalider ou de corroborer chacune de nos hypothèses et de vérifier notre postulat général concernant une simplification de la forme des signes grâce à une coopération de la LOCini et du MOUV.

6.1.1. Retours sur le travail effectué

Il nous semble important de revenir sur les dispositions et les décisions majeures prises tout au long de ce travail. En être informé permet de porter un regard pleinement éclairé sur les types de données traitées, et plus largement sur les conclusions qui seront les nôtres.

6.1.1.1. Objets de l'analyse

Un premier thème de réflexion a concerné le ou les membres supérieurs qu'il est pertinent de traiter.

Lorsque la production d'un signe requiert l'utilisation d'un seul membre (fig. 6.1), il est évident que seuls la LOCini et le MOUV du membre en action – le membre dominant – sont à réaliser.

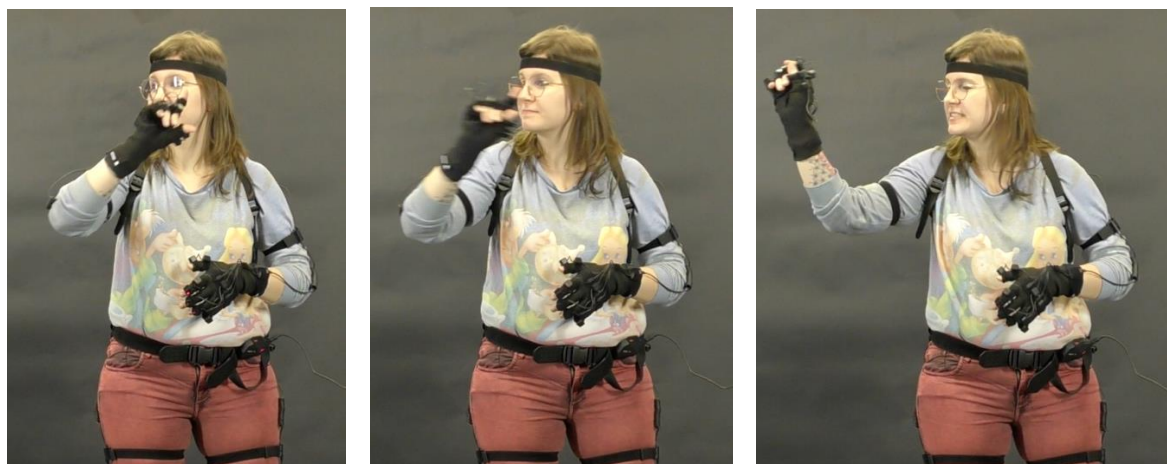


Figure 6.1 – Réalisation du signe [PARTIR] (signeur 4 signe 209, vidéo [6.1](#))

Toutefois, lorsqu'un signe présente une combinaison des deux membres supérieurs pour être pleinement formés, est-il nécessaire de transcrire la LOCini et le MOUV de chacun d'eux ?

Battison (1978) a démontré que les signes bimanuels impliquent un nombre restreint de possibilités quant aux mouvements de la main non dominante. Cette dernière peut :

- être passive (fig. 6.2) ;



Figure 6.2 – Réalisation du signe [MONDE] (signeur 1 signe 122, vidéo [6.2](#))

- présenter un mouvement identique et simultané à celui de la main dominante (fig. 6.3) ;



Figure 6.3 – Réalisation du signe [VACANCES] (signeur 5 signe 200, vidéo [6.3](#))

- présenter un mouvement identique et alterné à celui de la main dominante (fig. 6.4).

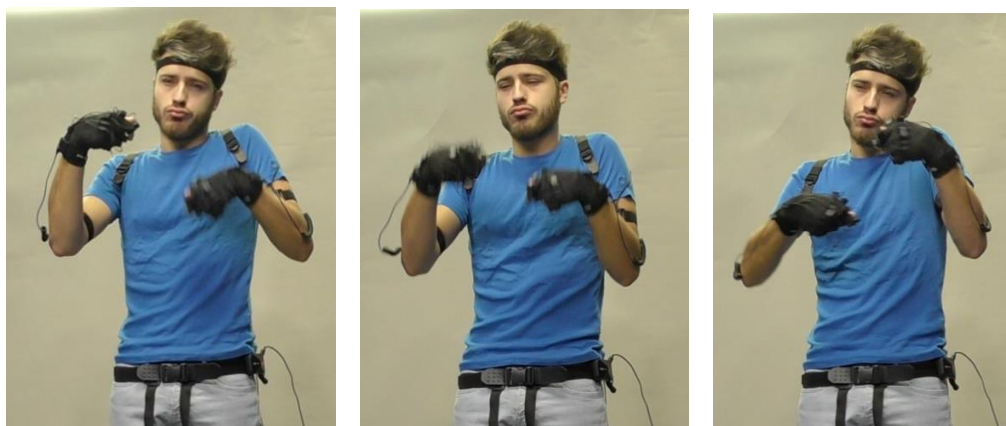


Figure 6.4 – Réalisation du signe [PÉDALER] (signeur 2 signe 005, vidéo [6.4](#))

Ces règles, qui portaient à l'origine sur les mains, semblent s'appliquer à l'ensemble des membres supérieurs. Le nombre de possibilités concernant le MOUV du membre non dominant est donc restreint, voire prévisible. Il nous a alors semblé approprié de nous concentrer exclusivement sur le membre dominant de chaque signeur.

Parmi les segments du membre supérieur dominant, nous avons choisi de tenir compte de la main, de l'avant-bras et du bras. L'exclusion de l'épaule et des doigts mérite explication.

L'épaule est une articulation permettant le faire mouvoir le bras, mais qui peut aussi avoir des mouvements qui lui sont propres grâce à la scapula qui effectue des mouvements de translation le long de la cage thoracique. Ce glissement peut se faire vers le haut, la scapula porte alors le moignon créant un haussement d'épaules ; vers le bas, ce qui crée un abaissement du membre supérieur ; vers l'avant, amenant un mouvement appelé antéprojection (ou protraction) ; ou vers l'arrière, pour réaliser une rétroprojection.

Ces types de mouvement peuvent être utilisés en gestuelle co-verbale. Par exemple, le « *shrug* » signifiant « je ne sais pas », est réalisé en faisant glisser la scapula vers le haut. Cela dit, ces glissements ne respectent pas la définition stricte d'un DDL : il ne s'agit pas de rotation autour d'un axe, mais de translation, et leurs amplitudes ne se mesurent pas en degrés, mais en centimètres. Ces différences empêchent toute mise en relation avec les variations des DDLs du bras, de l'avant-bras et de la main, ce qui réduit considérablement la pertinence de son traitement. De plus, contrairement aux autres segments du membre supérieur, la posture de repos de l'épaule est équivalente à celle prise avant de débiter un MOUV. Il n'y a donc pas besoin de mettre en place une LOCini particulière avant de réaliser un « *shrug* ». Le sens de « je ne sais pas » est engagé dès le début de la translation de la scapula vers le haut. Aucune LOCini préalable au MOUV n'est nécessaire, ce qui ne convient définitivement pas à notre travail d'exploration du lien entre la LOCini et le MOUV.

Pour ce qui est des doigts, le choix de leur exclusion s'est basé sur le fait qu'en LS, ils sont continuellement employés à la mise en place des configurations. Ils présenteraient donc une organisation spécifique réduisant considérablement leur participation au transfert et au flux du mouvement qui parcourt les autres segments.

Bien sûr, les prendre en compte aurait un impact sur la notion de simplicité du mouvement que nous traitons. Il faut cependant souligner le fait qu'une configuration mise en place pendant la phase de transition reste majoritairement inchangée tout au long d'un MOUV (Braffort 1996) (fig. 6.5) :

« La répartition des signes du corpus parmi ces types de comportement a été étudiée (Figure 2.16). Près de 80% de signes possèdent une configuration de type statique (les doigts ne bougent pas). Par ailleurs, 12% des signes possèdent une configuration dynamique de type fermeture (un ou plusieurs doigts se plient durant le signe) et 6% possèdent une configuration dynamique de type ouverture (un ou plusieurs doigts se déplient durant le signe).

Moins de 3% des signes font partie d'une des cinq classes restantes (34 signes). Ces cinq classes correspondent à des mouvements des doigts plus complexes d'un point de vue articulatoires. » (Braffort 1996 : 62)

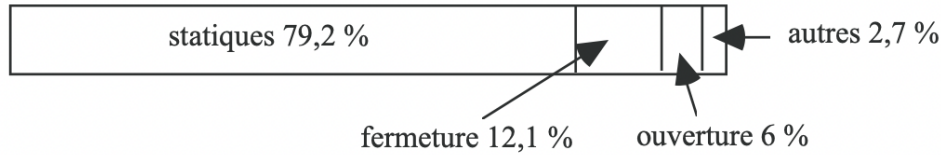


Figure 6.5 – Pourcentages des mouvements associés aux configurations, étude de Braffort sur la base du dictionnaire IVT (Moody 1986) (Braffort 1996 : 62)

Afin de nous assurer que notre corpus comporte de mêmes proportions, nous avons noté pour chacun des signes transcrits si les configurations attestent d'une quelconque modification au cours du MOUV, ou non. Nous avons trouvé que 1339 signes présentent des configurations statiques, soit 85,12 % de notre corpus. Bien que l'étude de Braffort (1996) ait été faite sur un ensemble de signes isolés sous forme de citation, les configurations de notre corpus relèvent de proportions similaires, avec une large majorité de configurations présentant une tension musculaire n'ajoutant aucune variation de DDL.

6.1.1.2. Méthodologie de recherche

La mise en place du *template* présuppose une méthodologie de recherche et de requête du corpus qui corresponde aux interrogations formulées et aux hypothèses à traiter.

Notre première inclination a donc été d'interroger le déploiement interne d'un MOUV, c'est-à-dire d'identifier son origine, puis d'établir sa diffusion au sein du membre supérieur. Pour cela, nous avons un *template* permettant de transcrire la LOCini et le MOUV, et de définir quel segment semble impulser le mouvement (i.e. les trois dernières lignes du *template* « Arm impeller », « Forearm impeller » et « Hand impeller ») (fig. 6.6).

	00:01:09.600	00:01:09.800	00:01:10.000	00:01:10.200	00:01:10.400	00:01:10.600	00:01:10.800	00:01:11.000	00:01:11.200	00:01:11.400	00:01:11.600	00:01:11.800
	CHAPEAU			FOULARD				MUSCLÉ				
Sign 1292												
Sign number 1292			LOC 5 SIGN			LOC 5 SIGN 014						LOC 5 SIGN 015
LOCini Arm flexion/extension 1332			1 1 1			1 1 1						1 1 1
LOCini Arm abduction/adduction 1332			1 1 1			1 1 1						1 1 1
LOCini Forearm flexion/extension 1332			1 1 1			1 1 1						1 1 1
LOCini Forearm rotation 1332			1 1 1			1 1 1						1 1 1
LOCini Hand pronation/supination 1332			1 1 1			1 1 1						1 1 1
LOCini Hand flexion/extension 1332			1 1 1			1 1 1						1 1 1
LOCini Hand abduction/adduction 1332			1 1 1			1 1 1						1 1 1
MOV Arm flexion/extension 631			Extension			No movement						No movement
MOV Arm abduction/adduction 691			No moveme			No movement		Adduction				Adduction
MOV Forearm flexion/extension 1711			Flexion			No movement						No movement
MOV Forearm rotation 1801			No moveme			Internal rotation	No movement	External rotation				External rotation
MOV Hand pronation/supination 1801			No moveme			Supination	No movement					Supination
MOV Hand flexion/extension 1661			No moveme			Flexion	No movement					No movement
MOV Hand abduction/adduction 1671			No moveme			Abduction	No movement					No movement
Arm impeller 1531			A-imp-0			A-imp-0						A-imp-0
Forearm impeller 1541			For-imp-0			For-imp-0						For-imp-0
Hand impeller 1551			H-imp-1			H-imp-1						H-imp-1

Figure 6.6 – Première version du template, avec indication du segment qui impulse le mouvement (présence du « 1 » dans le vocabulaire contrôlé)

L'impulseur peut s'avérer être le segment qui effectue une variation de DDL en premier par rapport aux autres, mais aussi un segment qui ne présente *aucune* variation de DDL. En effet, pour Boutet (2018), un segment peut transférer totalement son mouvement sur un autre segment, mais tout en étant à l'origine du mouvement déployé. Deux critères permettent de déterminer si un segment dont les DDLs ne varient pas se trouve être celui qui induit le mouvement effectué par l'autre ou les autres segments. Il faut que ce segment dont les DDLs ne varient pas :

- ait un pôle qui lui permette d'aller dans la même direction que celui qui est réellement en mouvement ;
- participe à la signification du signe en cours.

Prenons un exemple. Pour la fig. 6.7, la main ne présente aucun mouvement propre, mais elle répond aux deux critères d'un mouvement totalement transféré :

- le signe aurait gardé son sens si le MOUV de celui-ci était réalisé au niveau de la flexion-extension du poignet ;
- la main participe bien au sens du signe.



Figure 6.7 – Réalisation du signe [KILO] (signeur 5 signe 084, vidéo [6.5](#))

La main remplit les conditions du transfert de mouvement ; il s’agit donc du segment « origine » du mouvement, c’est-à-dire de l’impulseur. Nous pouvons alors noter « Hand-Imp-1 » sur ELAN.

Mais cette démarche ne convient finalement pas.

La notion d’impulseur peut être génératrice de flux de propagation inexistant : dans la fig. 6.7, si la main est notée comme étant l’impulseur du MOUV et que celui-ci se matérialise sur le bras, il se forme alors une corrélation entre la main et le bras créant un flux disto-proximal. Le MOUV n’affecte pourtant bien qu’un seul segment, le bras, et selon la définition du flux, si « le mouvement n’affecte qu’un seul segment [...] ; aucun flux apparent ne s’en dégage alors » (Boutet 2018 : 9). Cela est révélateur d’un fait plus général : l’impulseur ne relève pas d’une réalité physique factuelle. Les règles à suivre pour l’identifier font intervenir un travail d’*interprétation* basé sur la supposition d’une participation d’un segment immobile au sens d’un signe. Cette démarche dépasse celle de l’observation et va au-delà d’une l’analyse de bas niveau. Or - il s’agit d’une considération qui a marqué notre réflexion épistémologique - nous tenons à nous concentrer exclusivement sur les informations transmises par le corps.

Afin de ne pas déroger à notre exigence d’une transcription exhaustive des productions corporelles observables, afin également de ne pas dénaturer la notion de flux du mouvement, nous avons alors supprimé les trois dernières pistes d’annotation de notre *template*. Même si la seule présence de la LOCini et du MOUV ne permet plus de reconnaître un éventuel transfert total de mouvement, elle nous permet de garder la notion de flux du mouvement (dans la mesure où son identification se base sur le décalage temporel des variations de DDLs), mais aussi d’orienter rigoureusement nos résultats et analyses autour du corps et de ses manifestations.

6.1.2. Résultats tirés du traitement sous Python

Venons-en désormais à nos résultats. Comme pour le chapitre précédent, nous divisons leur présentation en trois sections. La première se concentre sur les résultats de l'hypothèse (a) concernant la LOCini ; la deuxième présente ceux des hypothèses (b) et (c) relatifs au MOUV ; la troisième s'intéresse à la fois à la LOCini et au MOUV et expose les résultats de l'hypothèse (d).

6.1.2.1. Hétérogénéité des placements initiaux (LOCini)

Afin de révéler la potentielle hétérogénéité formelle des LOCini constituant notre corpus, nous sommes basés sur trois types d'information :

- 1) la proportion de LOCini distinctes ;
- 2) la fréquence d'utilisation des crans par DDL ;
- 3) le taux d'utilisation de crans non neutres par LOCini.

Détaillons les résultats obtenus.

Le premier traitement nous permet d'établir une liste comprenant l'ensemble des LOCini distinctes - c'est-à-dire les LOCini qui présentent les unes par rapport aux autres un écart d'au moins un cran d'un DDL - contenues dans chaque production (i.e. chaque ensemble de tâches réalisé par un signeur (§5.1.2.1)).

Nous avons schématisé les résultats dans le graphique ci-dessous (fig. 6.8, annexe C.1 pour le tableau des données chiffrées correspondantes).

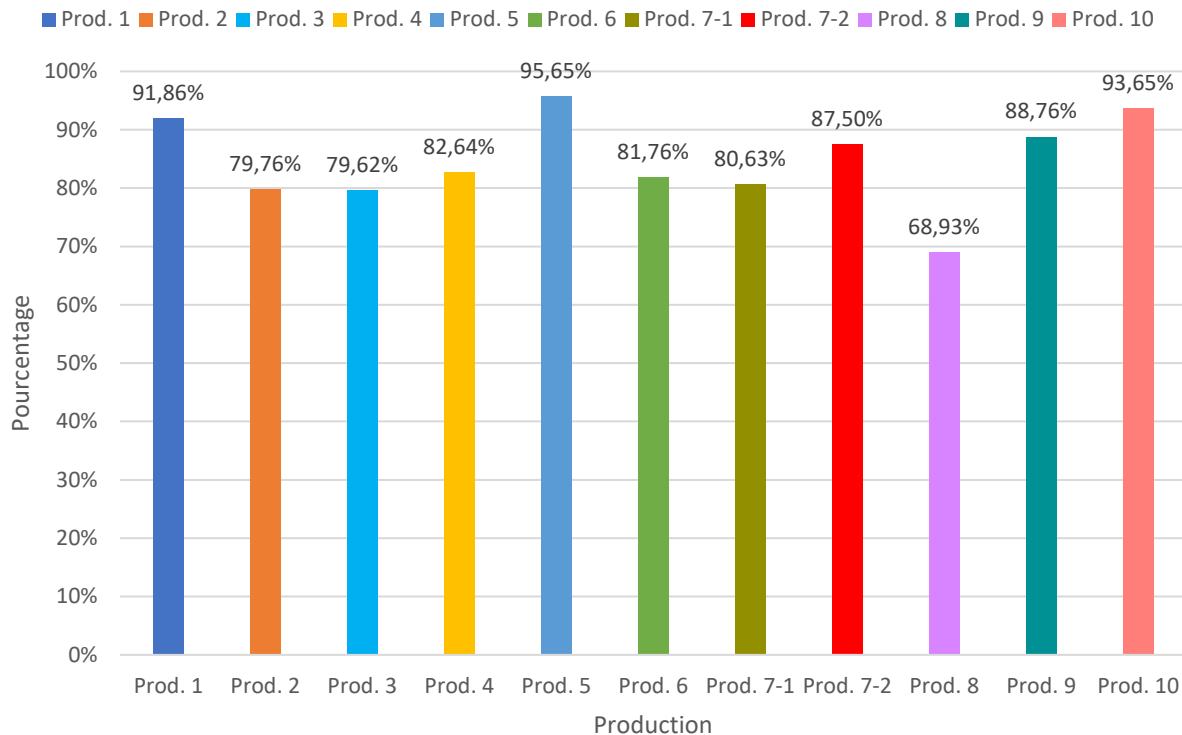


Figure 6.8 – Pourcentage du nombre de LOCini uniques selon chaque production

La production 8 affiche le taux de LOCini le plus faible avec 68,93% de LOCini dissemblables, contrairement aux productions 1, 5 et 10 dont les productions sont presque exclusivement composées de LOCini singulières. La moyenne transversale à l'ensemble des productions atteint les 84,62%. Nous sommes donc face à des LOCini qui présentent des formes profondément hétérogènes ne laissant que peu de place à la reduplication.

Afin d'atteindre ce niveau de variation, nous pouvons supposer que tous les crans relatifs aux DDLs sont utilisés. Pour vérifier cela, examinons la constitution interne de ces LOCini. Commençons par les DDLs du bras et la fréquence d'utilisation des crans les composant (fig. 6.9, annexe C.2).

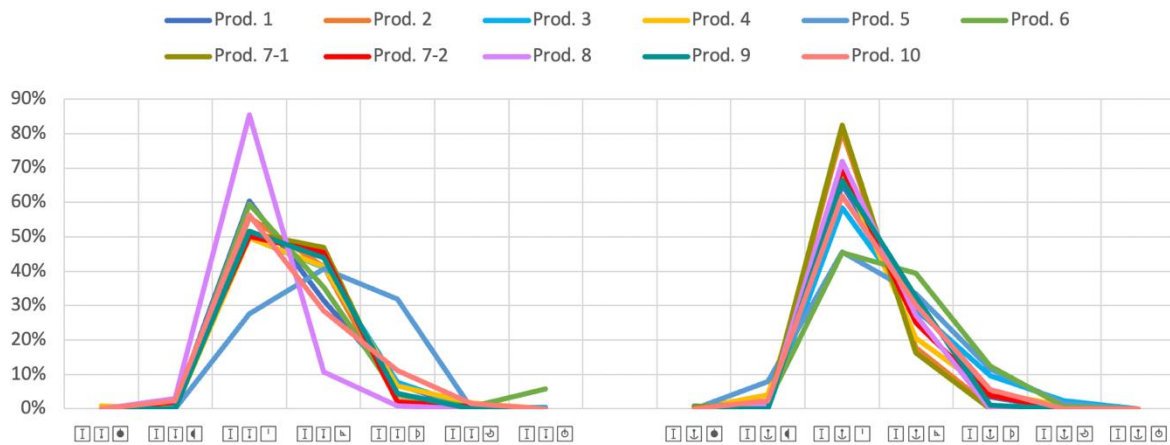


Figure 6.9 – Fréquences des crans relatifs à la flexion-extension (à gauche) et à l'abduction-adduction (à droite) du bras

D'emblée, nous pouvons remarquer que les courbes se chevauchent, se masquant parfois mutuellement : les profils de fréquence d'utilisation des crans entre les productions sont donc semblables.

Pour la flexion-extension (fig. 6.9 à gauche), deux crans sont principalement utilisés : la flexion-extension 0 ($\square\square\square$) qui intéresse en moyenne 54,27% des cas, et la flexion +1 ($\square\square\square$) qui en intéresse 36,96%. La flexion +2 ($\square\square\square$) ne rassemble que 7,28% de cas ; quant aux crans de l'extension -2 ($\square\square\square$) et les butées articulaires ($\square\square\square$ et $\square\square\square$), ils concernent moins de 1% des LOCini de ce segment. Deux productions s'écartent légèrement de cette tendance : la production 5, dont la flexion +2 ($\square\square\square$) atteint un taux d'utilisation de 32%, et la production 8 dans laquelle la flexion-extension 0 du bras ($\square\square\square$) est prédominante caractérisant 85% des usages.

Le second DDL (fig. 6.9 à droite), l'abduction-adduction, montre aussi une utilisation du cran neutre ($\square\square\square$) majoritaire, représentant en moyenne 65,15% des cas. L'abduction +1 ($\square\square\square$) est aussi présente, bien que ce soit dans une moindre mesure, avec un taux atteignant 27,51%. Une fois de plus, deux productions témoignent d'une légère singularité. Les productions 5 et 6 présentent toutes deux une abduction-adduction 0 moins forte, ne dépassant pas 45%, et ce, au profit du cran de l'abduction +1. Cela dit, comme pour le DDL précédent, l'ensemble des crans ± 2 et ± 4 ont un taux de récurrence faible : l'abduction +2 ($\square\square\square$) et l'adduction -2 ($\square\square\square$) sont respectivement utilisés à hauteur de 4,84% et 1,80% ; et les butées articulaires ($\square\square\square$ et $\square\square\square$) représentent toujours moins de 1% des LOCini de ce segment.

Concernant des DDLs du bras, la majorité des emplois se concentrent donc sur les crans représentant une position neutre ou légèrement marquée. Voyons si les mêmes observations peuvent être faites concernant les DDLs de l'avant-bras (fig. 6.10, annexe C.3)

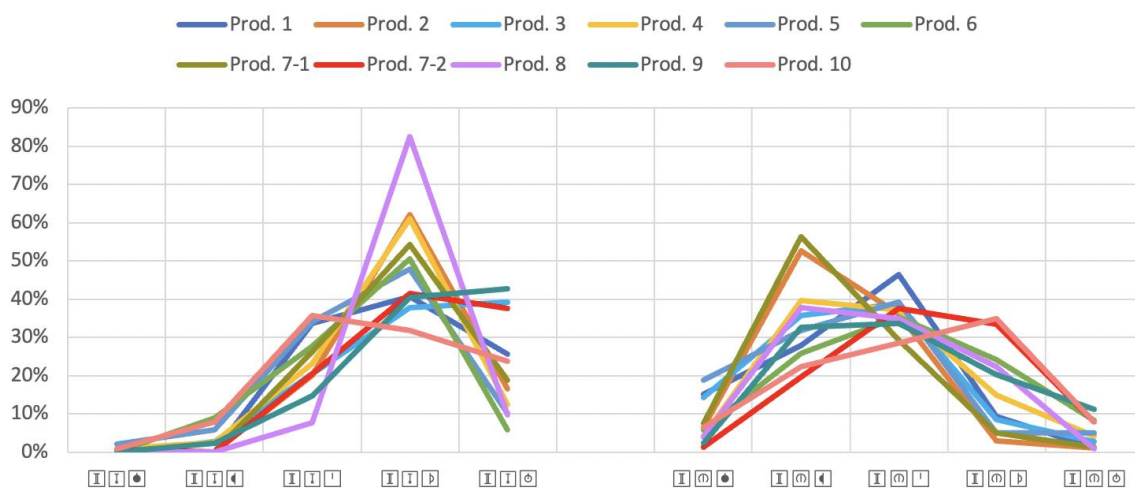


Figure 6.10 – Fréquences des crans relatifs à la flexion-extension (à gauche), la rotation intérieure-extérieure de l'avant-bras (à droite)

Pour le DDL de la flexion-extension (fig. 6.10 à gauche), seul le cran de la butée articulaire de l'extension (☐☐☐●) est sous-exploité. La courbe monte ensuite crescendo, atteignant son pic avec la flexion +2 (☐☐☐☐). Cette dernière représente 50,06% des cas, doublant la proportion de présence de la position neutre (☐☐☐☐). Pour ce qui est de la flexion +4 (☐☐☐☐), son taux d'utilisation est de 22% en moyenne. Il s'agit du pourcentage relatif à une butée articulaire le plus élevé qui ait été recensé jusqu'ici.

Concernant le DDL de la rotation intérieure-extérieure (fig. 6.10 à droite), le cran 0 (☐☐☐☐) la rotation intérieure +2 (☐☐☐☐) et la rotation extérieure -2 (☐☐☐☐) représentent trois pics d'utilisation, atteignant respectivement 56, 47, et 38%. Nous avons donc là une répartition plus équilibrée des crans médians, mais les extrémités restent toujours les moins utilisées avec une moyenne de 8% pour la rotation extérieure -4 (☐☐☐☐), et de 5% pour la rotation intérieure +4 (☐☐☐☐).

Nous sommes donc face à des profils d'exploitation des crans moins absolus que pour le bras. Cela dit, les butées articulaires sont toujours peu utilisées, avec une exception concernant la flexion +4 de l'avant-bras (☐☐☐☐).

Il reste à observer les informations relatives aux DDLs de la main (fig 6.11, annexe C.4).

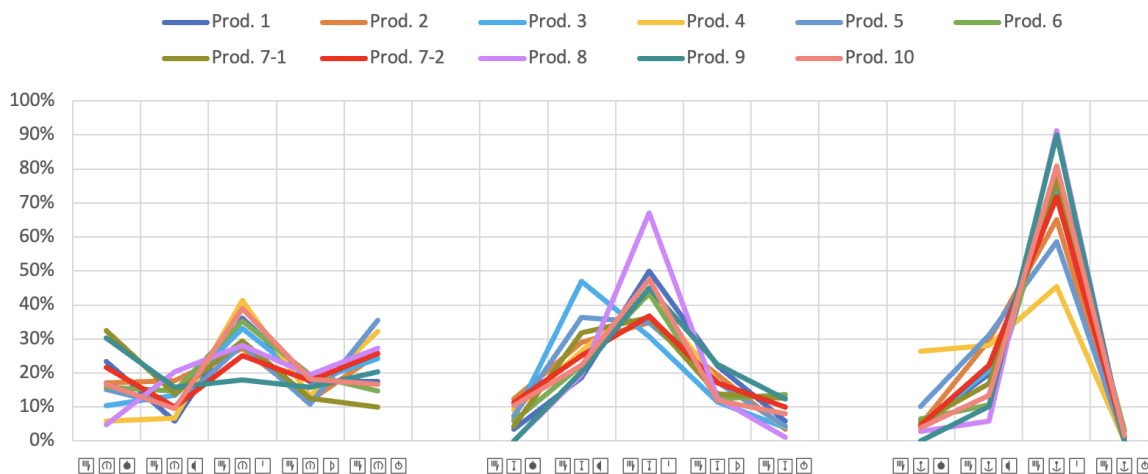


Figure 6.11 – Fréquences des crans relatifs au DDLs de la main, prono-supination (à gauche), la flexion-extension (milieu) et l’abduction-adduction (à droite)

Nous retrouvons des profils similaires entre les productions, avec un ensemble de courbes qui se superposent.

Commençons par le DDL de la prono-supination (fig. 6.11 à gauche). Celui-ci se distingue significativement de ceux vus jusqu’à présent dans la mesure où les butées articulaires sont en moyenne sur-représentées par rapport aux crans médians. Plus précisément, la pronation +4 (☐☐☐☐) est majoritaire dans huit cas sur onze en en laissant trois pour la pronation +2 (☐☐☐☐) ; et la supination -4 (☐☐☐☐) est majoritaire dans sept cas sur onze en en laissant quatre pour la supination -2 (☐☐☐☐).

La prono-supination est le DDL dont l’amplitude totale est la plus exploitée.

Pour la flexion-extension (fig. 6.11 au milieu), on relève de nouveau une position 0 (☐☐☐☐) majoritaire (42,69%), réalité accrue pour la production 8 qui montre un pic de 67% pour ce cran, et diminuée pour la production 3 dans laquelle domine l’extension -2 de la main (atteignant 47%). Nous retrouvons ensuite les crans médians, avec l’extension -2 (☐☐☐☐) et la flexion +2 (☐☐☐☐) qui touchent 27,12% et 16,19% des LOCini, puis les butées articulaires (☐☐☐☐ et ☐☐☐☐) qui sont cantonnées à des moyennes de représentativités respectives de 6,41% et 7,17%.

Enfin, le DDL de l’abduction-adduction (fig. 6.11 à droite) présente une fréquence de la position 0 (☐☐☐☐) particulièrement marquée puisqu’elle est utilisée en moyenne à 73,43%. Les taux baissent ensuite avec une adduction -2 (☐☐☐☐) à 18,97%, et une adduction -4 (☐☐☐☐) à 6,74%. L’abduction +4 (☐☐☐☐) est quant à elle pratiquement absente du paysage des LOCini avec un taux de présence à 0,64%.

Ces résultats nous permettent d'établir une tendance qui est largement dominante : la fréquence d'exploitation d'un cran diminue proportionnellement à son éloignement de la position neutre. Effectivement, la moyenne transversale à tous les DDLs concernant le cran neutre est à 46,66%, puis celle-ci descend à 18,25% pour les crans +1 et +2, puis passe en dessous des 10% pour les crans +3 et +4 (6,12%). La flexion-extension de l'avant-bras fait exception à cette inclination en affichant une flexion +1 plus présente que la position 0. Cela peut être dû à la nécessité d'approcher ou de faire entrer en contact la main avec le visage ou le corps du signeur. Suivant d'autres proportions, le DDL de la prono-supination fait aussi office d'exception. Ses butées articulaires sont notablement présentes, ce qui peut être assimilé au fait qu'il s'agisse du DDL ayant l'impact le plus direct sur les changements d'orientation de la paume, souvent nécessaire à la formation des signes.

A priori, le fait que les crans médians et de surcroît les butées articulaires ne soient que peu représentés ne s'accorde pas avec nos premiers résultats : comment parvenons-nous à une hétérogénéité forte de profils de LOCini en exploitant principalement les crans 0 de chacun des DDLs ?

Pour comprendre ce qui se joue, portons attention à un troisième type de résultats, présentés ci-dessous, qui concerne les proportions du nombre de DDLs non neutres au sein des LOCini (fig. 6.12).

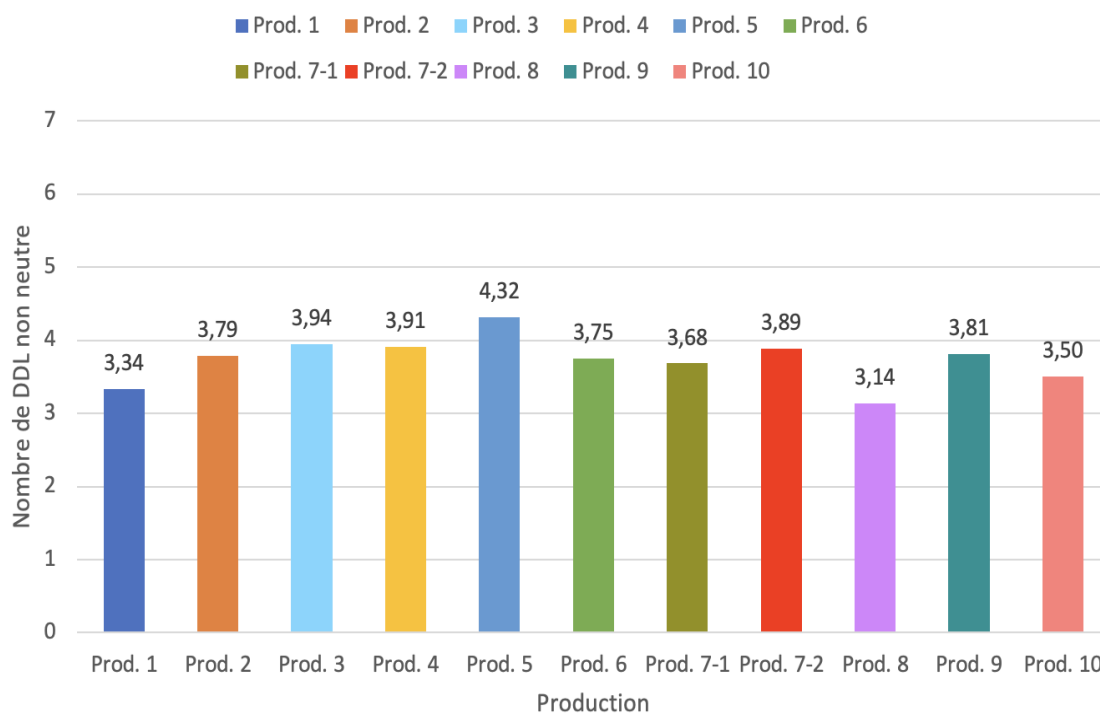


Figure 6.12 – Moyenne par production du nombre de DDLs non neutres au sein des LOCini

Nous remarquons que le nombre de crans qui se différencie de leurs positions 0 au sein des LOCini représente la moitié des DDLs du membre supérieur. Cela signifie que les crans neutres, majoritairement présents à l'échelle des DDLs, sont en fait distribués équitablement au sein des LOCini.

Afin de s'assurer qu'il ne s'agisse pas de moyennes biaisées (i.e. comprenant essentiellement un ensemble de LOCini composées de sept DDLs neutres et de LOCini composées de sept DDLs non neutres), voici les proportions de l'ensemble des compositions des LOCini (fig. 6.13).

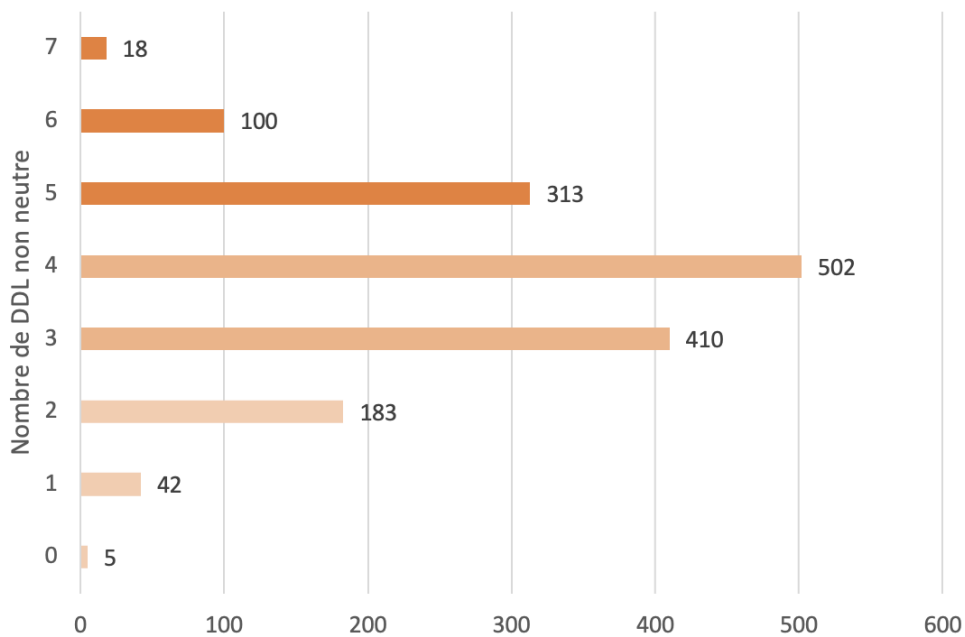


Figure 6.13 – Nombre d'apparition de DDL non neutre, toute production confondue

Les LOCini composées exclusivement de crans neutres ou non-neutres sont bel et bien peu représentées. Celles comportant trois ou quatre DDLs non-neutres sont nettement majoritaires, figurant dans 912 des 1573 LOCini recensées. Malgré des fréquences d'utilisation des DDLs centrées sur les positions neutres, c'est cet équilibre dont font preuve les compositions complètes des LOCini qui conduit à l'hétérogénéité observée en première instance.

Nous analyserons l'ensemble de ces résultats à l'aune de notre postulat général une fois que nous nous serons intéressés au MOUV.

6.1.2.2. Quantité et temporalité des degrés de liberté actifs (MOUV)

Observons les résultats issus des traitements relatifs à notre deuxième hypothèse. Celle-ci postule que le déploiement du MOUV est majoritairement uni-segmental.

Pour notre démonstration, nous avons réparti chaque phase des MOUV dans une des catégories suivantes :

- Cat1 - pas de DDL actif
- Cat2 - un seul DDL actif
- Cat3 - plusieurs DDLs actifs sur un unique segment
- Cat4 - un DDL actif sur plusieurs segments
- Cat5 - plusieurs DDLs actifs sur plusieurs segments

La fig. 6.14 (annexe C.5 pour la répartition par productions) illustre la répartition des MOUV dans ces différentes catégories.

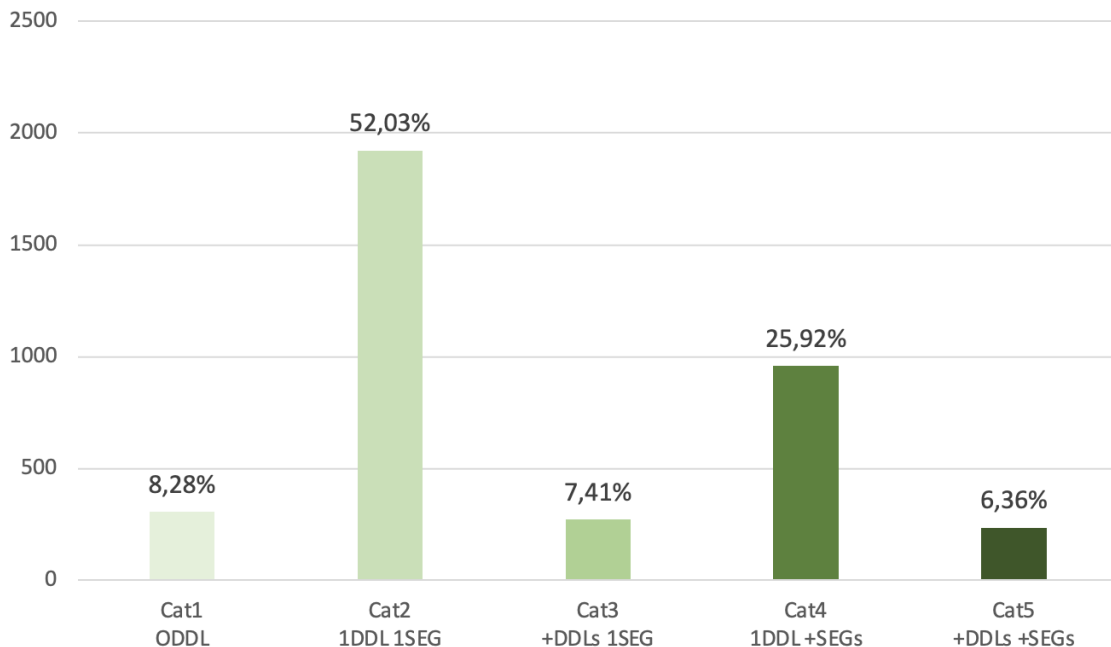


Figure 6.14 – Répartition des phases des MOUV selon le nombre de DDL.s et de segment.s actif.s

Le dégradé chromatique permet de mettre l'accent sur le crescendo de complexité motrice de ces différentes catégories du plus simple (vert clair) au plus complexe (vert foncé).

Dans les trois nuances de vert clair (de la Cat1 à la Cat3), la tension musculaire est maximale puisqu'elle concerne au minimum deux des trois segments composant le membre supérieur.

Les deux nuances de vert foncé (Cat4 et Cat5) témoignent du processus inverse. Ces catégories rassemblent les phases de MOUV pour lesquelles un minimum de deux segments présentent des variations de DDLs. Ces phases comportent un nombre de modifications par rapport à la LOCini qui est plus important.

Une majorité (67,72%) des phases de MOUV correspondent à un MOUV a-segmental ou uni-segmental. Ce résultat est encourageant dans la mesure où il ne contredit pas notre hypothèse, mais il ne permet pas encore de la valider pleinement ; il s'agit ici de données qui concernent les *phases* de MOUV et non le MOUV dans sa globalité. Bien que cette segmentation en phases ait été nécessaire pour le traitement des tâches algorithmiques, nous devons maintenant obtenir une catégorisation unique par signe.

Pour cela, nous avons récupéré l'*output* de la tâche 4 (tab. 5.13), auquel nous avons ajouté les informations comprenant la catégorie du MOUV en question.

Pour les signes ne comprenant qu'une catégorie de MOUV, aucun changement n'a été opéré (i.e. tab. 6.1 signe 041) ; pour ceux composés de plusieurs catégories, nous avons sélectionné la plus élevée (i.e. tab. 6.1 signe 038) : un MOUV qui a débuté par la variation d'un unique DDL, qui s'est ensuite étendu à un DDL appartenant à un autre segment, s'est effectivement déroulé selon les caractéristiques de la Cat4 (et non de la Cat2).

Tableau 6.1 – Ajout de la colonne « Nbr of DDL/sign » permettant d'obtenir une seule catégorie par signe

. Sign number	Nbr of DDL/phase	Nbr of DDL/sign
LOC 2 SIGN 038	Cat2/Cat4	Cat4
LOC 2 SIGN 039	Cat2/Cat4	Cat4
LOC 2 SIGN 040	Cat1/Cat2/Cat3/Cat4	Cat4
LOC 2 SIGN 041	Cat4	Cat4
LOC 2 SIGN 042	Cat2/Cat4	Cat4
LOC 2 SIGN 043	Cat2	Cat2
LOC 2 SIGN 044	Cat2	Cat2
LOC 2 SIGN 045	Cat2/Cat3/Cat4	Cat4
LOC 2 SIGN 046	Cat2/Cat4	Cat4
LOC 2 SIGN 047	Cat2/Cat4	Cat4
LOC 2 SIGN 048	Cat2/Cat3	Cat3
LOC 2 SIGN 049	Cat2	Cat2
LOC 2 SIGN 050	Cat4	Cat4
LOC 2 SIGN 051	Cat2	Cat2
LOC 2 SIGN 052	Cat2	Cat2
LOC 2 SIGN 053	Cat2/Cat3	Cat3

Ces nouvelles données recueillies, nous sommes désormais en mesure d'obtenir des résultats appropriés (fig. 6.15 et annexe C.6).

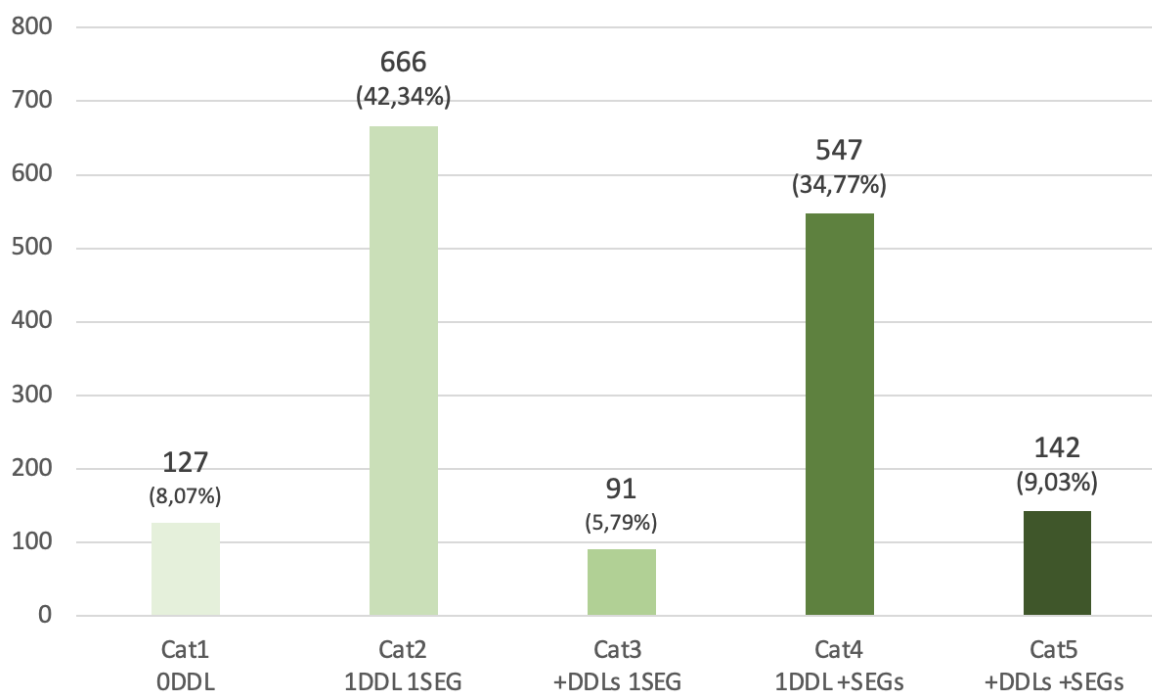


Figure 6.15 – Répartition des 1573 signes selon le nombre de DDL.s et de segment.s actif.s au cours de chaque MOUV

Bien que ce soit dans de moindres proportions, ce nouveau graphique révèle que les Cat1, Cat2 et Cat3 sont toujours majoritaires. Notre hypothèse est validée : les MOUV qui présentent un déploiement simple du MOUV – c'est-à-dire n'impliquant aucune variation de DDLs ou uniquement des variations de DDLs situées sur un même segment - sont prédominants : ils touchent 884 signes, soit 56,20% de notre corpus.

Malgré ces résultats probants, un point reste à soulever dans la mesure où le graphique de la fig. 6.15 témoigne d'une singularité. Nous nous attendions - à partir de la Cat2 - à des taux qui diminuent à mesure que la complexité du MOUV augmente. Ce n'est pas le cas. La faible proportion allouée à la Cat3 (i.e. plusieurs DDLs actifs sur le même segment) démontre que - dans le cas où plusieurs DDLs sont nécessaires au déploiement d'un signe - le membre supérieur a une tendance à transférer son MOUV de segment en segment plutôt que de le compresser sur un seul. Cette propension au transfert peut nous éclairer sur un second aspect des liens que la LOCini et le MOUV entretiennent.

Pour mieux comprendre l'existence de cette tendance, exploitons dans un premier temps les données touchant au flux du mouvement, soit les MOUV dont les DDLS activés présentent un décalage temporel, qu'il y ait chevauchement ou non au sein de cette temporalité interne.

Notre hypothèse (c) postule qu'il existe une majorité de flux de propagation du mouvement disto-proximal, présentant une mise en mouvement qui remonte le long du membre supérieur. Pour cela, nous avons réparti chaque MOUV dans une de ces six catégories suivantes :

- CatA – Non concerné
- CatB – Pas de flux (simple)
- CatC – Pas de Flux (répété)
- CatD - Flux Temp Dist-Prox
- CatE - Flux Temp Prox-Dist
- CatF - Flux Indet

La fig. 6.16 (annexe C.7) récapitule les résultats obtenus.

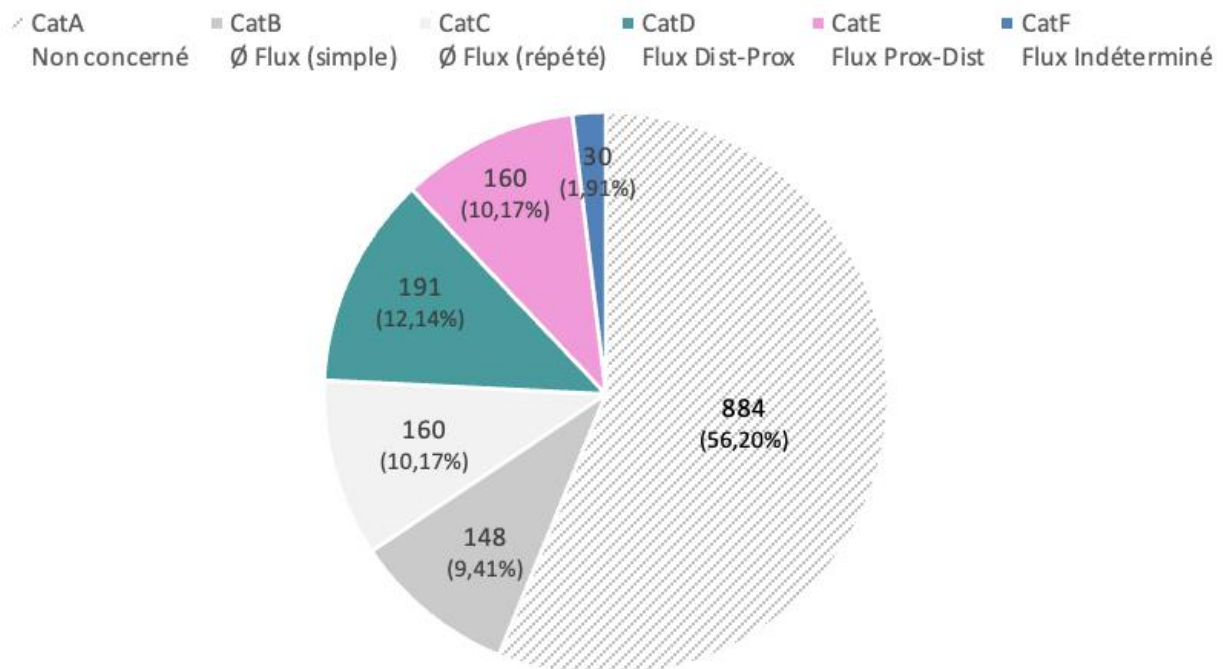


Figure 6.16 – Catégorisation des 1573 signes en différents types de flux ou d'absence de flux

Il est normal de retrouver dans ce diagramme une CatA majoritaire rassemblant l'ensemble des signes uni-segmentaux (Cat1, 2 & 3 de la fig. 6.16). Parce qu'ils se déploient sur un seul segment, aucun flux ne les anime ; ils ne nous intéressent donc pas dans le cadre de ce traitement.

La CatB concerne bien des MOUV pluri-segmentaux, mais les DDLs qui les composent s'actionnent en même temps. Ils ne présentent ni décalage temporel ni flux, ce qui les exclut également de la démonstration, comme d'ailleurs les MOUV de la CatC dont les DDLs sont actionnés plusieurs fois, toujours sans décalage temporel. En plus des 56,20% des signes uni-

segmentaux, nous avons donc 19,58% de signes pluri-segmentaux ne présentant pas de décalage temporel interne ; 75,78% du corpus se trouvent donc rejetés du cadre de notre étude du flux de propagation du mouvement.

Nous allons nous concentrer sur les 381 signes de la CatD, E et F qui présentent les deux caractéristiques nécessaires (i.e. les MOUV pluri-segmentaux qui témoignent d'un décalage dans la temporalité d'activation de leurs DDLs).

Nous les avons isolés dans un nouveau graphique (fig. 6.17).

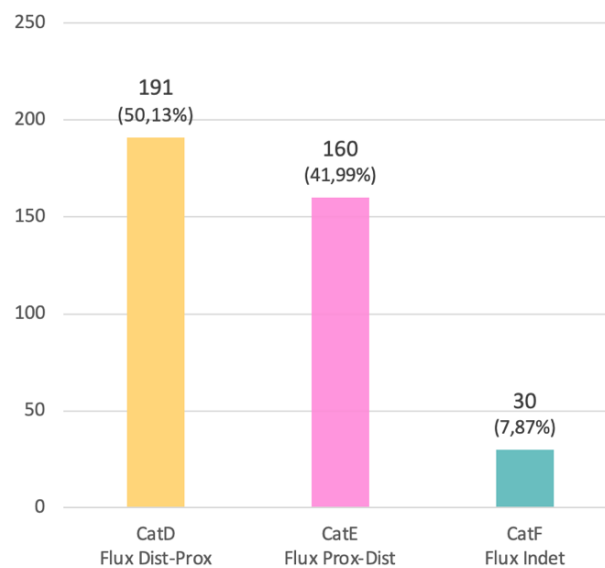


Figure 6.17 – Catégorisation en flux de propagation du mouvement des signes présentant un décalage temporel entre les DDLs actifs sur différents segments

Le taux de flux indéterminé est faible (7,87%), ce qui démontre que l'ordre d'activation des DDLs est, dans l'ensemble, clairement dirigé dans un sens, soit en descendant (i.e. flux proximo-distal), soit en remontant (i.e. flux disto-proximal) le membre supérieur. Ce dernier est légèrement majoritaire puisqu'il touche 50,13% des signes concernés, alors que le flux proximo-distal en implique 41,99%.

Ces proportions sont de bon augure pour la validation de notre hypothèse (c), mais une étape est encore nécessaire pour conforter notre démonstration. Nous rappelons que le principe sous-jacent à cette hypothèse suppose que l'effort moteur nécessaire aux MOUV composés d'un flux disto-proximal reste le plus important. En effet, les segments distaux ont une force d'inertie plus faible que leurs voisins proximaux (Boutet *et al.* 2016) ; ils sont donc moins aptes à provoquer le mouvement d'un autre segment. Parce qu'ils naissent dans des segments moins

massifs, les flux disto-proximaux verraient alors leurs MOUV se stabiliser naturellement en s'affaiblissant dès le début de leur transfert.

Afin de nous assurer que ce phénomène se manifeste bien au sein de notre corpus, nous avons récupéré les *outputs* de la tâche 5 et de la tâche 6 regroupant les indices de flux de propagation du mouvement ainsi que l'ordre d'activation des segments, puis nous avons indiqué combien de segments participent à chacun des MOUV relatifs à des flux temporels disto-proximaux et proximo-distaux⁹⁰ (tab. 6.2).

Tableau 6.2 – Ajout de la colonne « number of segment » permettant d'indiquer le nombre de segments activés au cours d'un MOUV à flux disto-proximal ou proximo-distal

. Sign number	Order of segment activation	Flow category	Number of segment
LOC 2 SIGN 030	Arm&Forearm -> Hand	CatE - Flux Temp Prox-Dist	3
LOC 2 SIGN 031	Forearm	CatA - Not affected	
LOC 2 SIGN 032	Arm -> Forearm -> Hand	CatE - Flux Temp Prox-Dist	3
LOC 2 SIGN 033	Arm&Hand	CatB - No Flux (simple)	
LOC 2 SIGN 034	Forearm	CatA - Not affected	
LOC 2 SIGN 035	Arm&Forearm	CatB - No Flux (simple)	
LOC 2 SIGN 036	Forearm	CatA - Not affected	
LOC 2 SIGN 037	Forearm	CatA - Not affected	
LOC 2 SIGN 038	Forearm&Hand	CatC - No Flux (repeated)	
LOC 2 SIGN 039	Hand -> Forearm	CatD - Flux Temp Dist-Prox	2
LOC 2 SIGN 040	Forearm -> Arm	CatD - Flux Temp Dist-Prox	2
LOC 2 SIGN 041	Forearm&Hand	CatB - No Flux (simple)	
LOC 2 SIGN 042	Forearm&Hand	CatC - No Flux (repeated)	
LOC 2 SIGN 043	Arm	CatA - Not affected	
LOC 2 SIGN 044	Forearm	CatA - Not affected	
LOC 2 SIGN 045	Hand -> Forearm	CatD - Flux Temp Dist-Prox	2

Si les flux disto-proximaux présentent une tendance naturelle à la faible propagation du MOUV, ce dernier ne devrait toucher que deux segments sur les trois composant le membre supérieur. Quant aux flux proximo-distaux, ils devraient présenter une tendance à se déployer sur l'ensemble du membre supérieur, soit sur les trois segments le composant.

Voici les résultats concernant les MOUV qui se déploient sur deux segments (fig. 6.18).

⁹⁰ Nous ne prenons pas en compte le flux indéterminé, qui ne présente pas assez d'occurrences.

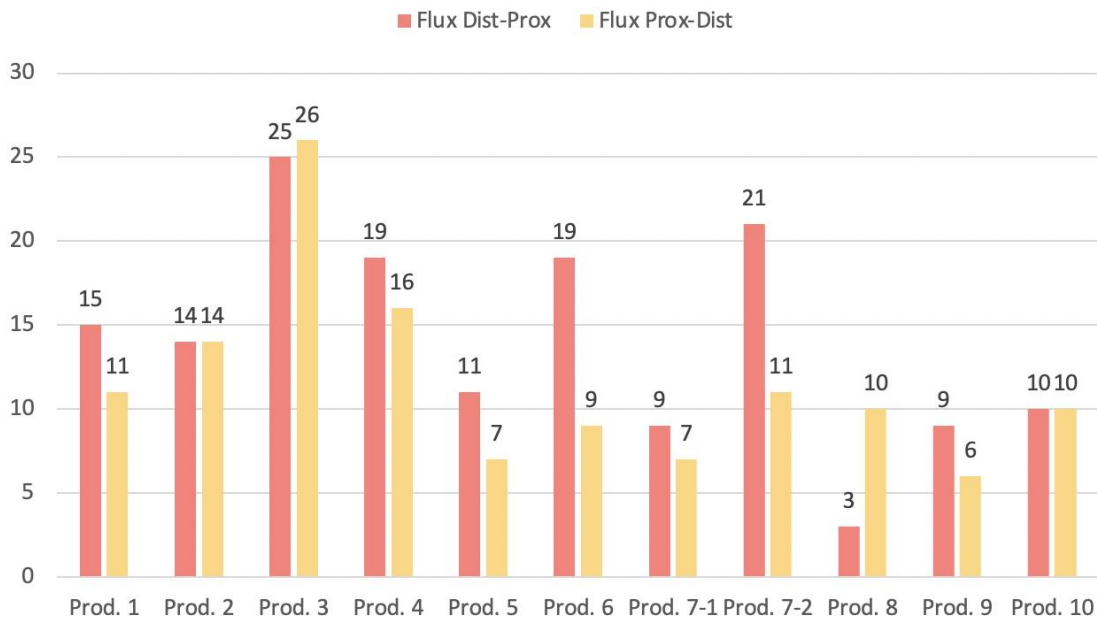


Figure 6.18 – Nombre de signes dont les MOUV sont composés de deux segments actifs, selon un flux disto-proximal ou proximo-distal

Nous y trouvons une légère prédominance du flux disto-proximal. Ce flux est effectivement majoritaire dans sept des productions signées sur onze, représentant en tout 54,96% de cas. La différence est faible entre les deux flux, mais suit pour l’instant la logique présentée ci-dessus. Confirmons cela par l’observation de la distribution des signes qui se déploient sur trois segments (fig. 6.19).

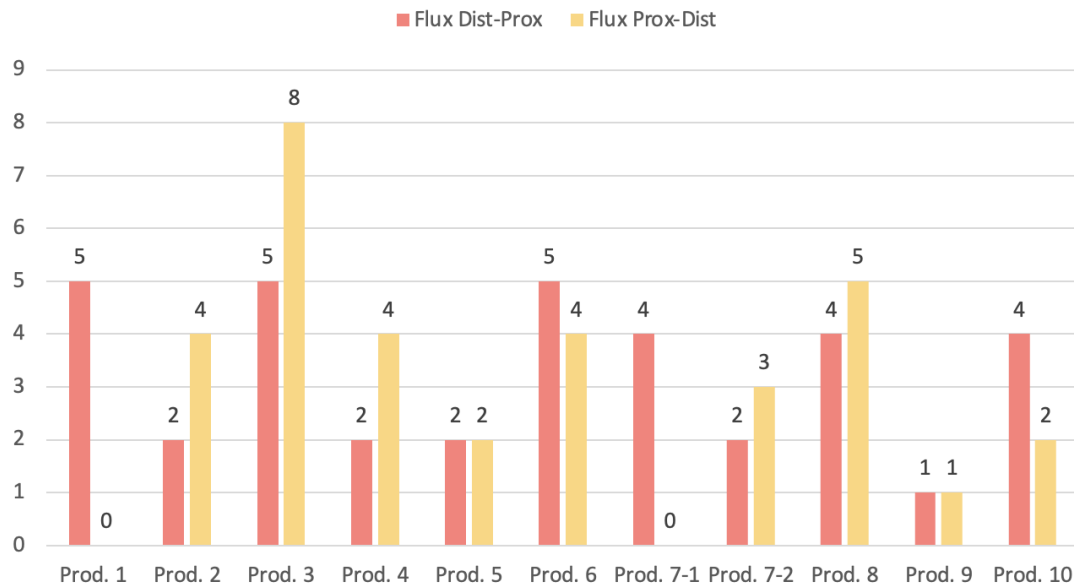


Figure 6.19 – Nombre de signes dont les MOUV sont composés de trois segments actifs, selon un flux disto-proximal ou proximo-distal

Contrairement aux attentes, le flux disto-proximal est toujours présent au sein des MOUV se propageant sur trois segments. Il est même toujours majoritaire puisque son taux de présence s'élève à 52,17%. Il n'y a donc aucune différence d'aptitude interne de déploiement du MOUV entre les deux flux.

Il n'est alors plus question de valider ou d'invalider notre hypothèse. Le flux de propagation du mouvement ne peut plus être considéré comme un critère valable dans le cadre d'une spécification de la structure stabilisée de la forme des signes pluri-segmentaux.

Passons désormais à l'analyse des liens synergiques entretenus entre les DDLs.

6.1.2.3. Relation entre les degrés de liberté actifs (LOCini et MOUV)

Nous parvenons désormais aux résultats relatifs à notre dernière hypothèse portant sur la présence de liens synergiques préférentiels (Rosenbaum 2010) au sein des MOUV.

Chaque groupement de DDLs formé au sein d'un MOUV est classé dans l'une de ces quatre catégories :

- non traité ;
- synergique ;
- partiellement synergique ;
- non synergique.

Rappelons que lorsque la main est impliquée, le niveau de prono-supination de ce segment doit être identifié puisque c'est lui qui conditionne les rapports entre les DDLs actifs. Si une

modification advient au cours du MOUV, il n'est plus possible de déterminer la nature des liens des groupements de DDLs qui sont alors « non traités ».

En revanche, lorsqu'aucune prono-supination n'est activée, les groupements de DDLs se répartissent entre les trois autres catégories établies à partir de la liste des transferts de mouvements proposée par Boutet (2018 : 58). Cette liste, que nous avons complétée et remaniée sous forme de tableaux (5.18, 5.19 et 5.20), montre que seulement 12,5% de l'ensemble des combinaisons des pôles entre deux segments présentent un lien synergique. En effet, parmi les 64 possibilités naissant de l'association du bras et de l'avant-bras, 8 sont synergiques ; et parmi les 320 possibilités respectives des duos « bras/avant-bras » et « bras/main », 40 sont synergiques. Nous pouvons donc nous attendre à retrouver un taux proportionnel équivalent au sein des productions signées de notre corpus.

Voyons d'abord si cela est le cas en ce qui concerne l'union de DDLs entre le bras et l'avant-bras (fig. 6.20, annexe C.8).

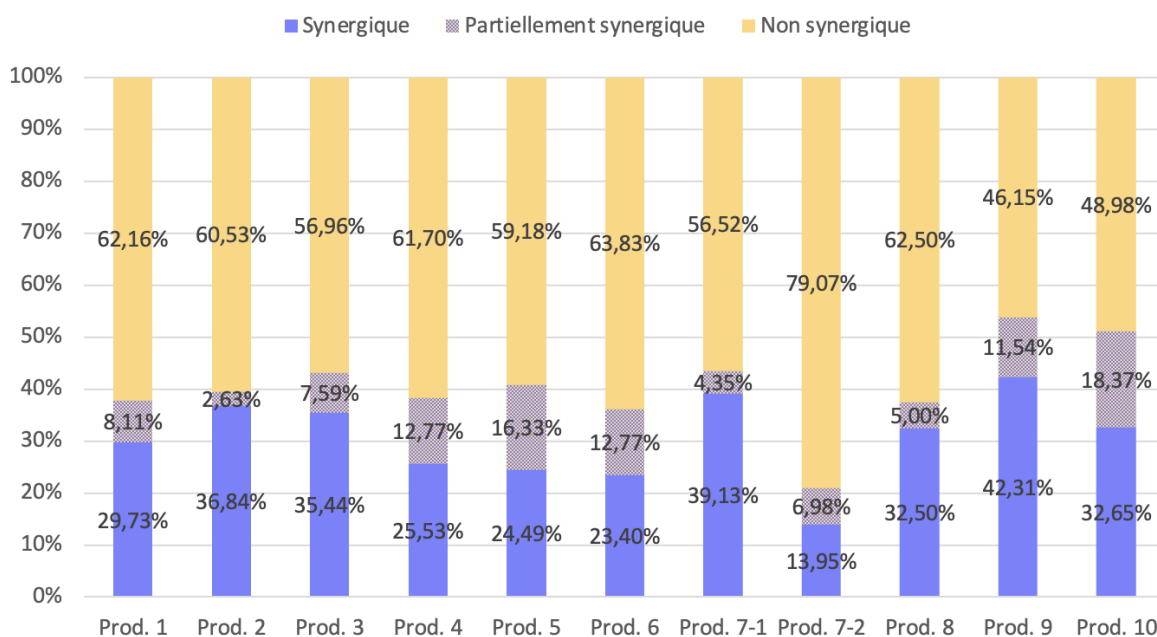


Figure 6.20 – Types de liens entre groupements de DDLs entre le bras et l'avant-bras

La moyenne transversale de la présence des groupements synergiques atteint 30,54%. Elle est donc plus élevée que celle attendue, et cela pour l'ensemble des productions puisque le pourcentage le plus faible atteint est de 13,95% (production 7-2).

Passons aux groupements de DDLs situés sur l'avant-bras et la main (fig. 6.21, annexe C.9).

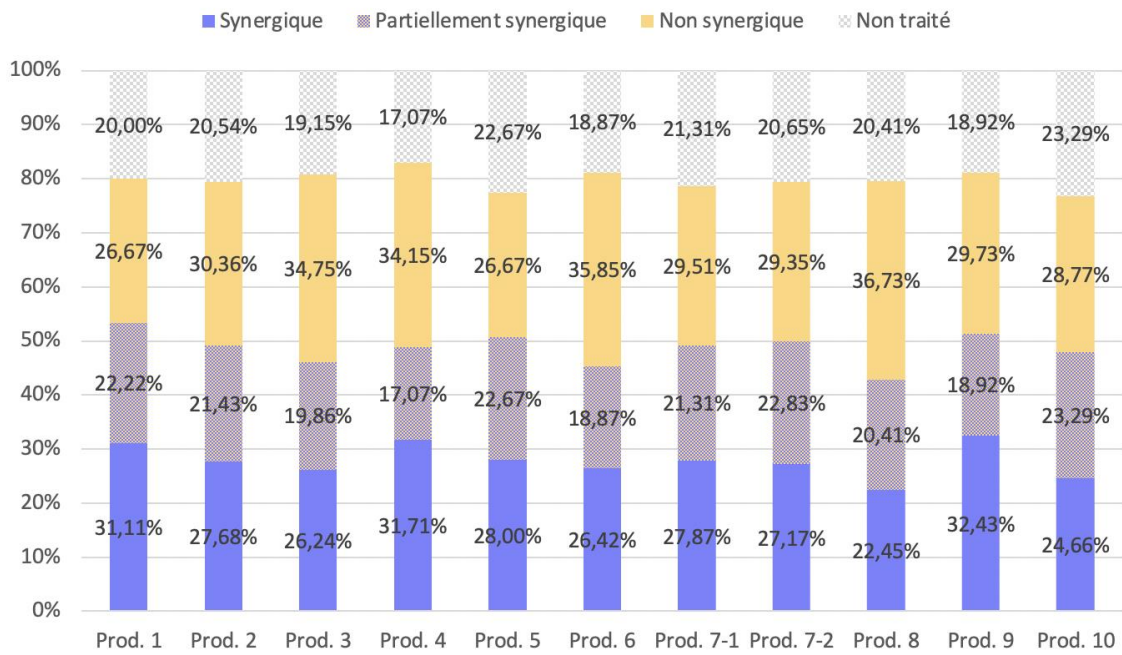


Figure 6.21 – Types de liens entre groupements de DDLs entre l'avant-bras et la main

Ce graphe montre une nouvelle fois un taux de groupements synergiques plus élevé qu'attendu avec une moyenne transversale de 27,79%. L'écart entre les productions est faible, allant de 22,45% (production 8) jusqu' à 32,43% (production 9).

Enfin, en ce qui concerne les DDLs entre le bras et la main, nous obtenons les résultats suivants. (fig. 6.22, annexe C.10).

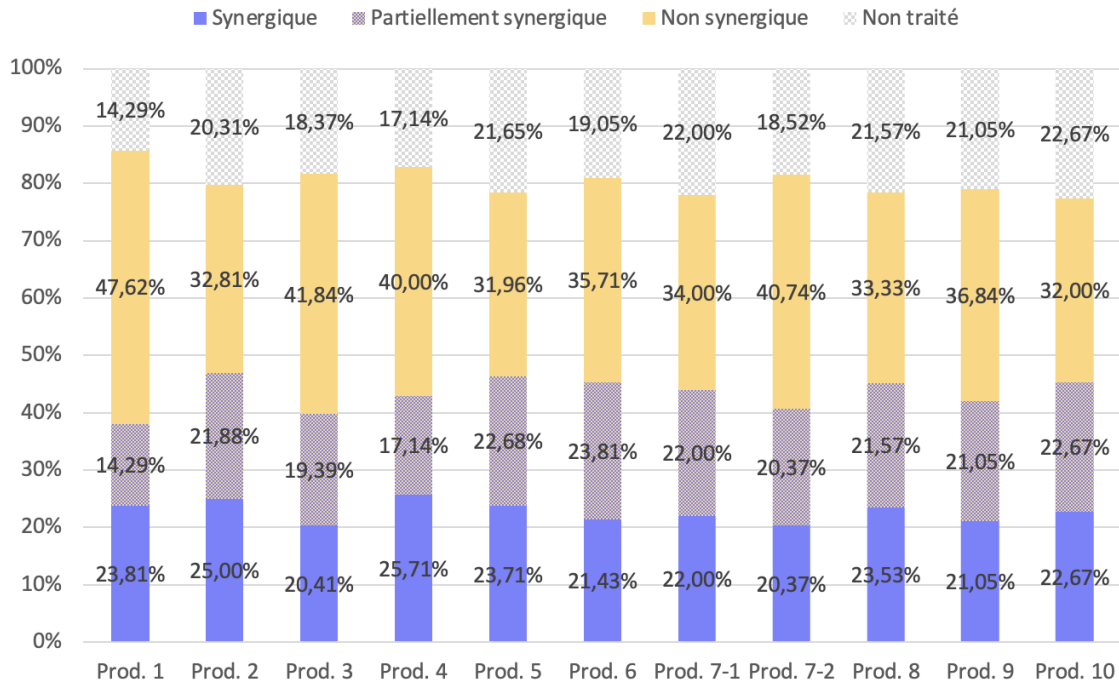


Figure 6.22 – Types de liens entre groupements de DDLs entre le bras et la main

Le taux de représentativité des liens synergiques est ici le plus faible avec une moyenne à 22,70%⁹¹, pouvant être imputé à la non-contiguïté des segments concernés. Cela étant dit, les productions présentent des taux homogènes bornés entre 20,41% et 25,71% toujours au-dessus de la moyenne que nous avons anticipée.

Finalement, chaque paire de segments contient des groupements de DDLs synergiques moyen qui multiplie par 2,44, 2,22 et 1,81 celui observé au sein de l'ensemble des possibilités corporelles. Cette présence marquée de mouvements préférentiels nous permet de valider notre dernière hypothèse.

6.1.3. Caractérisation d'une économie structurelle

Le traitement conjoint ou isolé de la LOCini du MOUV des 1573 signes transcrits de notre corpus nous ont apporté des réponses quantifiées à l'ensemble de nos hypothèses. Nous avons désormais toutes les informations nécessaires pour formaliser les liens qu'entretiennent la

⁹¹ Notons que dans les graphiques 6.21 et 6.22, les groupements de DDLs non traités représentent respectivement 20,26% et 19,69%. Il serait possible en notant l'amplitude de la variation articulaire de la pronation et/ou de la supination, de connaître le nouveau cran qui doit être pris en compte, et ce faisant d'établir les liens existants entre les groupements de DDLs lui succédant.

LOCini et le MOUV. Une fois notre postulat de départ validé ou invalidé, nous ouvrirons une réflexion portant sur les notions de simplicité formelle et d'économie linguistique.

6.1.3.1. Tout est une question d'organisation

Nos premiers résultats ont permis d'analyser le mécanisme interne aux LOCini. Leurs structures ne sont en rien hasardeuses ou aléatoires. Du point de vue de la fréquence d'utilisation des DDLs, les profils sont récurrents. En effet, on retrouve des données comparables entre les productions, avec une présence marquée des crans 0 (\square) et une sous-exploitation des crans -4 ou +4 (\blacksquare et \boxplus). Malgré cela, chaque LOCini est composée d'une moitié de DDLs qui se distingue de leurs postures de référence, permettant alors une forte hétérogénéité de profils (en moyenne 84,62% de LOCini singulières). Afin de savoir si cette diversité a bien pour but de simplifier le MOUV, nous avons analysé le taux de modification articulaire généré par ce dernier. Les données ont révélé que la majorité des MOUV implique peu de modifications articulaires, et ce pour chacune des productions étudiées. Effectivement, pour 56,20% des signes, le MOUV implique la transformation d'un seul segment. Parmi ces 884 signes, 666 n'activent d'ailleurs qu'un seul DDL du segment concerné. Cela confirme que la LOCini amène le membre supérieur dans une disposition qui présente une configuration pertinente et appropriée à la forme du signe, qu'il suffit d'actualiser afin de la compléter. Au regard de ces analyses, nous pouvons déjà observer que la LOCini et le MOUV présentent un fonctionnement en binôme, basé sur une recherche de simplicité motrice : la forme du signe est simplifiée parce qu'elle est anticipée.

Nous nous sommes ensuite tournés vers les MOUV qui présentent une activation de plusieurs segments, afin d'y déceler des formes différentes de simplification motrice imputables à l'association de ces deux paramètres.

Nous nous sommes alors penchés sur les différences de temporalité d'activation des DDLs à partir de l'idée suivante : la présence d'un flux disto-proximal majoritaire serait le reflet d'une simplification motrice basée sur l'inertie ; autrement dit, le MOUV s'affaiblirait proportionnellement à l'augmentation de la masse des segments. Mais l'identification des différents flux observés nous a amenés à conclure qu'il ne s'agit pas d'une caractéristique pertinente. En effet, bien que le flux disto-proximal soit légèrement majoritaire, il suscite la transformation d'un nombre équivalent de segments par rapport au flux proximo-distal. Il n'est cependant pas exclu que ce constat soit dû au faible taux de représentativité des MOUV avec un décalage temporel présent au sein de notre corpus (i.e. 381 signes sur 1573, soit 24,22%).

Le dernier traitement effectué concerne l'analyse des liens synergiques que les DDLs actifs entretiennent entre eux. Nous avons observé que les MOUV pluri-segmentaux sont composés de groupements de DDLs qui sont préférentiels pour le système musculo-squelettique et ce, que ce soit au sein du couple bras/avant-bras, avant-bras/main ou bras/main (i.e. taux respectif de groupements de DDLs synergiques à 30,54%, 27,79% et 22,70%). Cela nous permet d'identifier un nouveau type de simplification : malgré les contraintes appliquées par la formation de signes sur le corps, celui-ci garde en partie un comportement spontané dans lequel il peut se « réfugier ». Dès lors, la présence de ces coordinations stables au sein des MOUV pluri-segmentaux diminue l'investissement et l'effort nécessaire pour les déployer. Cette facilitation motrice naturelle dépend dans deux cas sur trois de la LOCini de la prono-supination. Le MOUV se repose sur celle-ci pour réduire la complexité motrice : si la supination est totale, ce sera – par exemple – la paire composée d'une flexion de la main et d'une flexion de l'avant-bras qui fera office de mouvement « attracteur » (Kelso 1981) ; en revanche, si la main se place cette fois-ci en pronation totale, ce sera la paire constituée de l'extension de la main et de la flexion de l'avant-bras qui sera plus simple à produire.

Bien qu'il s'agisse ici d'une analyse basée sur la relation entre les DDLs actifs au sein d'un MOUV, la LOCini prend une fois de plus une part active dans le déploiement de la forme des signes et influence le MOUV, rappelant le binôme que ces deux paramètres composent.

En définitive, la vérification de nos hypothèses – exceptée la (c) – nous permet de valider notre postulat selon lequel une simplification motrice de la forme des signes est recherchée par le corps, et que celle-ci est rendue possible par l'association entre la LOCini et le MOUV (fig. 6.23).

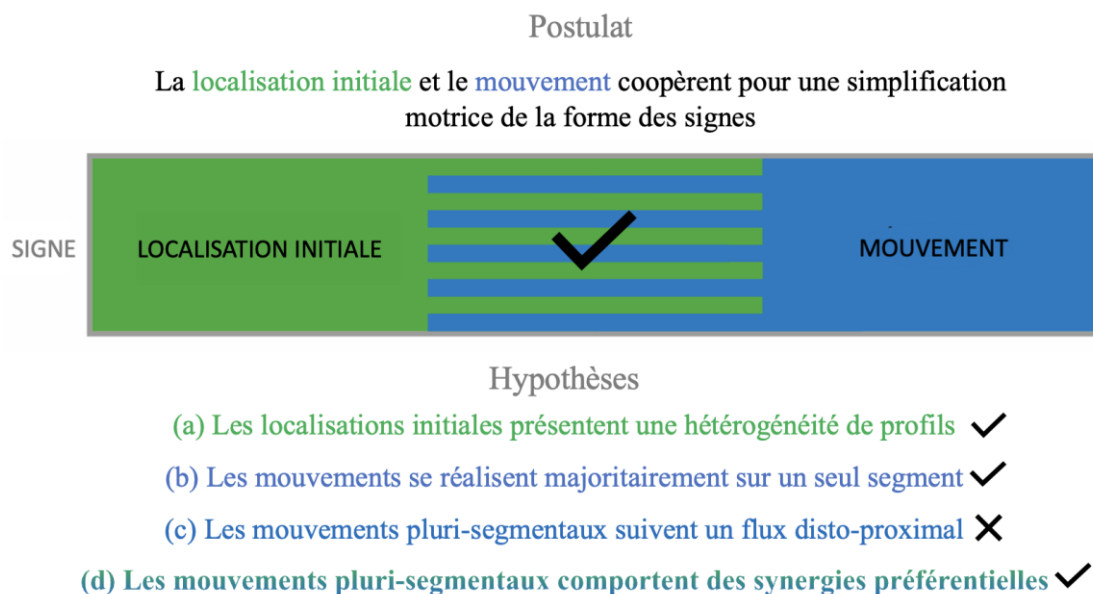


Figure 6.23 – Schématisation du postulat général validé et récapitulatif des hypothèses de recherche qui ont été vérifiées ou non

6.1.3.2. Entre simplicité et économie

Est-ce que l'ensemble de ces considérations est suffisant pour affirmer que les LS font preuve d'une économie linguistique structurelle corporelle ? Autrement dit, est-ce que la simplicité et l'économie sont des notions synonymiques ? Pour parvenir à établir une réponse, nous devons croiser deux de nos résultats, ceux qui émanent du traitement de l'hypothèse (b) et ceux de l'hypothèse (d).

Notre hypothèse (b) résolue, nous avons considéré qu'il existe une proportionnalité croissante entre le nombre de DDLs et de segments actifs au cours d'un MOUV, et la complexité de ce même MOUV. Les Cat1, 2 et 3 relèvent de MOUV simples impliquant la modification articulaire d'un seul segment au maximum ; et les Cat4 et 5 comprennent des MOUV considérés comme complexes, puisqu'ils impliquent des modifications articulaires sur plusieurs segments (fig. 6.24, annexe C.6).

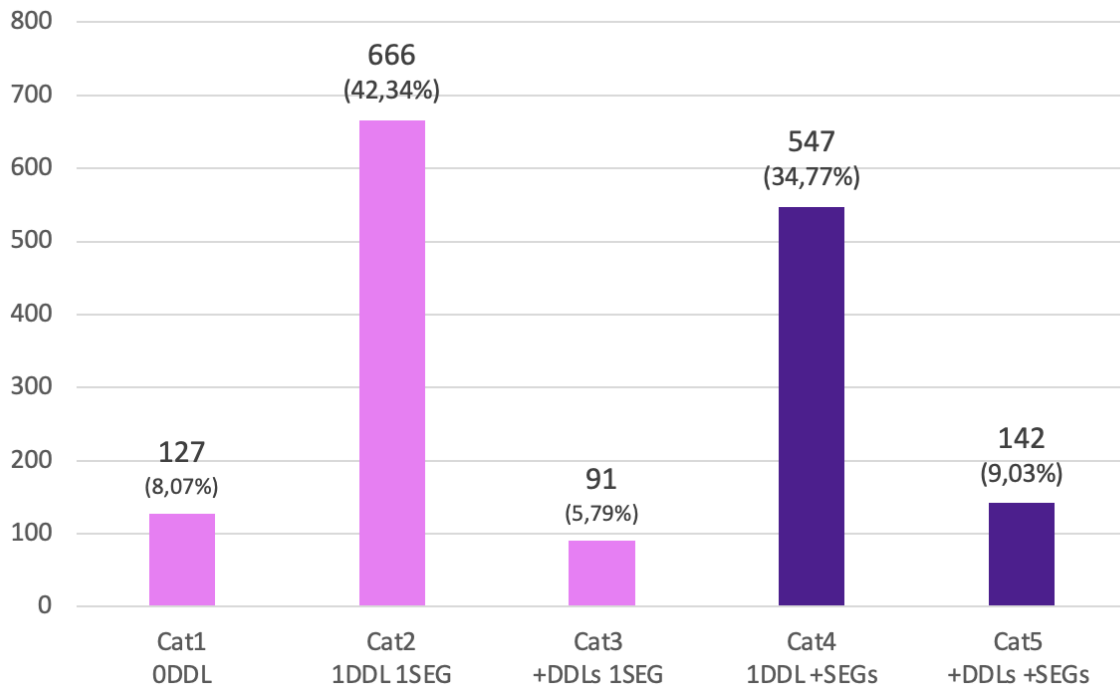


Figure 6.24 – Répartition des 1573 signes selon une catégorisation bipartite de leur complexité

Mais les résultats de l'hypothèse (d) viennent a priori modifier cette vision bipartite de la complexité.

Nous avons effectivement dévoilé la présence de groupements synergiques au sein des Cat4 et 5. Les signes pluri-segmentaux (fig. 6.24 en violet) seraient alors divisés en MOUV qui demandent un effort cognitif et articulaire conséquent (i.e. signes non synergiques), et ceux qui sont composés d'un MOUV qui ne requiert pas plus d'effort que les MOUV uni-segmentaux (i.e. signes synergiques). Mais, pour pouvoir pleinement mettre en parallèle les résultats de ces deux hypothèses, il nous faut opérer quelques remaniements de données. Actuellement, nous avons une cartographie des synergies par *groupements de DDLs* (fig. 6.20, 6.21, 6.22), et nous devons parvenir à une catégorisation par *signe*.

Pour cela, il ne suffit pas d'additionner toutes les catégories identiques entre elles selon les duos de segments, puisqu'un même signe peut être composé de plusieurs groupements de DDLs, et donc de liens synergiques différents. Nous devons plutôt mettre en place des règles de croisements conditionnelles. Les voici.

- Nous n'avons pas les informations nécessaires pour classer un signe lorsque celui-ci présente un MOUV contenant au moins un groupement de DDL non traité.
- Un signe comporte un MOUV entièrement synergique à partir du moment où il est composé exclusivement de groupements de DDLs synergiques.

- Un signe comporte un MOUV partiellement synergique à partir du moment où il est composé :
 - d'au moins un groupement de DDLs classé comme partiellement synergique ;
 - d'au moins un groupement de DDLs synergique, d'au moins un groupement de DDLs non synergique.
- Un signe comporte un MOUV entièrement non synergique à partir du moment où il est exclusivement composé de groupements de DDLs non synergiques.

Ci-dessous, un extrait de notre exploitation de données (tab. 6.3) accompagné des résultats que nous en avons tirés (fig. 6.25, annexe C.11).

Tableau 6.3 – Output du traitement de la synergie des groupements de DDLs pour obtenir une catégorisation par signe

Sign Number	Nbr of phase "Synergy"	Nbr of phase "Partial synergy"	Nbr of phase "No synergy"	Nbr of phase "Not processed"	Sign synergy
LOC1 SIGN 038					
LOC1 SIGN 059					
LOC1 SIGN 060	1	1	2		Partial synergy
LOC1 SIGN 061	2				Synergy
LOC1 SIGN 062		1	4		Partial synergy
LOC1 SIGN 063					
LOC1 SIGN 064					
LOC1 SIGN 065					
LOC1 SIGN 066			2		No synergy
LOC1 SIGN 067					
LOC1 SIGN 068			2		No synergy
LOC1 SIGN 069	1		1		Partial synergy
LOC1 SIGN 070					
LOC1 SIGN 071					
LOC1 SIGN 072	2		2		Partial synergy
LOC1 SIGN 073			2		No synergy
LOC1 SIGN 074			1		No synergy
LOC1 SIGN 075					

× Non traité ■ Synergique ■ Partiel. synergique ■ Non synergique

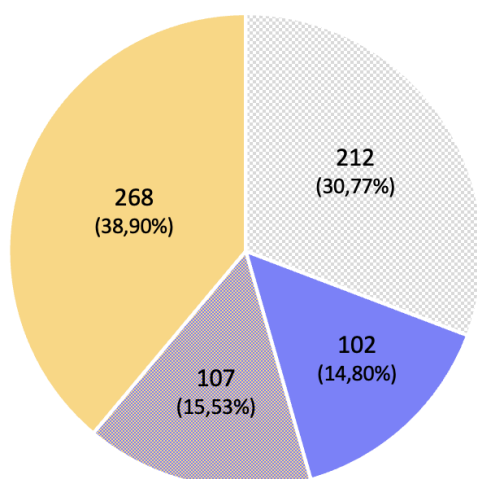


Figure 6.25 – Proportionnalité des différents liens synergiques de 689 signes pluri-segmentaux

Ce graphe montre que sur les 689 signes pluri-segmentaux, 102 présentent bien une structure qui est entièrement synergique ; autrement dit 14,80% des signes pluri-segmentaux présentent un même niveau de complexité que les signes uni-segmentaux.

Nous pouvons maintenant fusionner ces nouvelles informations avec ceux de la fig. 6.24 (fig. 6.26, annexe C.12).

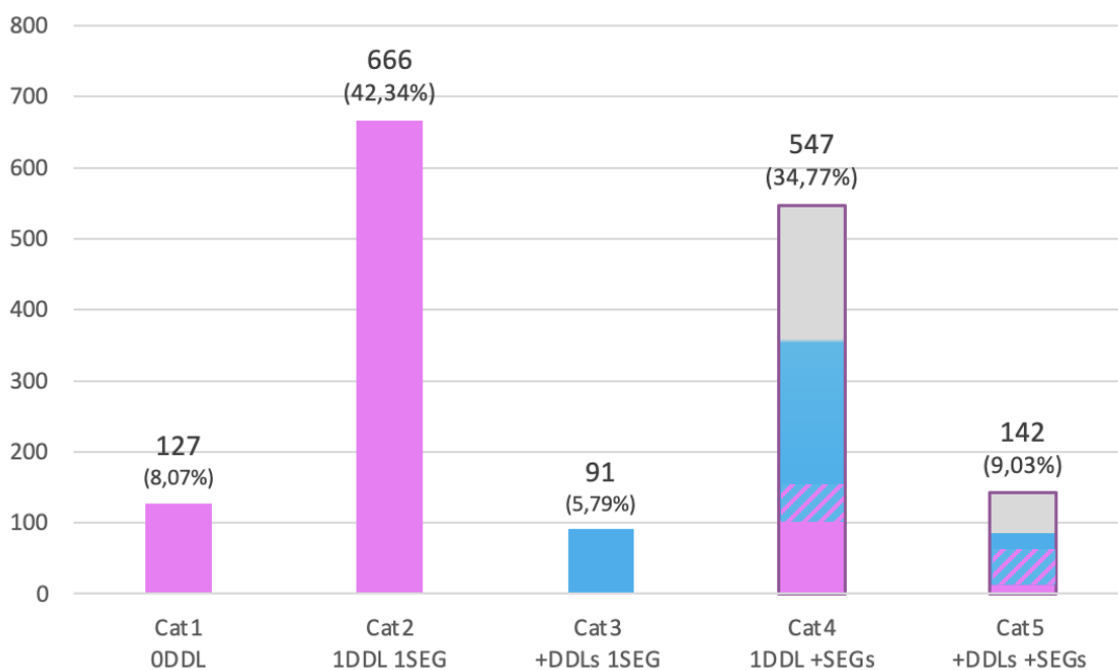


Figure 6.26 – Répartition des 1573 signes selon une catégorisation de leur déploiement économique

Dans le graphique ci-dessus, le violet a laissé sa place aux deux couleurs primaires le composant : le magenta et le cyan⁹².

Le magenta, qui recouvrait uniquement les MOUV a-segmentaux ou uni-segmentaux, symbolise désormais des MOUV a-segmentaux, uni-segmentaux, et pluri-segmentaux qui suivent ces types de structurations internes :

- aucune variation de DDL ;
- une unique variation de DDL ;
- plusieurs variations de DDLs qui relèvent toutes d'une structure synergique.

Quant au cyan, il regroupe des MOUV pouvant être uni-segmentaux et pluri-segmentaux présentant ces types de structuration interne :

- plusieurs variations de DDLs sur un même segment ;
- une ou plusieurs variations sur plusieurs segments présentant des liens non synergiques.

Nous pouvons penser que ces nouvelles informations servent alors à préciser les données de la fig. 6.26. Mais, il s'agit en réalité de deux types d'informations différentes :

La fig. 6.24 établit une distinction touchant à la simplicité *visible* des productions motrices. En effet, en se basant sur une observation du nombre de segments et de DDLs impliqués, il est possible d'établir le niveau d'éléментарité ou de complexité d'un MOUV.

La fig. 6.26, quant à elle, touche à un niveau *organisationnel* de la forme des signes. Une nouvelle réalité se manifeste alors : l'économie. On ne s'attache pas ici à regarder le déploiement du MOUV, mais à découvrir les répertoires moteurs émergents du corps. En étudiant la manière de répartir et de combiner ses unités motrices, nous retrouvons le fait que pour produire du sens, le corps humain – comme tout organisme vivant faisant face à des contraintes particulières – doit faire preuve d'une certaine adaptabilité. Et on retrouve au sein de cette adaptabilité des habitudes forgées au cours de la production de mouvements non langagiers, faisant émerger des techniques de coordination.

La simplicité et l'économie sont des notions qui se basent sur deux niveaux d'analyse différents, mais elles s'entrecroisent : les signes présents dans les Cat1 et 2, qui sont représentées en magenta au sein des deux graphiques, sont à la fois simples et économiques. Ce n'est pas le cas des signes compris dans la Cat3 qui sont simples, mais peu économiques. Si le fait qu'un MOUV concentré sur un seul segment ne soit pas économique peut sembler surprenant, cela apporte pourtant une explication à l'interrogation que nous avons formulé au §6.1.2.2 : pourquoi

⁹² Le gris quant à lui représente les signes dont les groupements des DDLs n'ont pas pu être traités.

ces signes qui présentent une simplicité formelle (fig. 6.24, Cat3) sont moins nombreux que ceux qui présentent une complexité formelle (fig. 6.24, Cat4 et Cat5) ?

La réponse peut tenir à ceci : parce que les DDLs activés se situant sur un même segment ne présentent aucune possibilité synergique. Il s'agit alors de configurations non économiques, et donc peu utilisées. Quant aux signes des Cat4 et 5, ils sont visuellement complexes, mais peuvent cependant présenter une distribution économique⁹³.

Cet ensemble d'informations semble finalement induire l'existence d'un type d'économie linguistique au sein de la LSF. Cette langue, comme l'ensemble des LS, n'a pas émergé d'un milieu vierge de tout mouvement, mais d'un corps vivant déjà empreint d'une expérience ancestrale. La forme des signes est en partie le reflet d'un système qui a ses propres règles d'organisation et de stabilisation formelle ; il nous semble que nier cette dimension de l'écologie du corps reviendrait à nier une partie majeure de la structuration des LS.

6.2. Vers une reconnaissance automatique des DDLs

L'ensemble du cheminement effectué jusqu'ici exige que le transcritteur maîtrise les notions de biomécanique du corps humain, en particulier celles afférentes aux DDLs du membre supérieur. Les difficultés que ce type de traitement occasionne en termes de reproductibilité demande de pouvoir se reposer sur l'utilisation d'instruments de suivi quantifié du mouvement humain, perspective envisagée par le système de transcription Typannot. Le travail engagé de traitement des données quantitatives fournies par le *Perception Neuron* nous permet de créer un premier cadre théorique et pratique à cette perspective.

6.2.1. Traitement des données

Il n'existe pas à l'heure actuelle de norme ou de méthode permettant de générer des courbes sous la forme d'angles comparables aux DDLs telle que la convention de Typannot que nous avons utilisée (i.e. la position de référence) l'exige⁹⁴. Il a donc été nécessaire de mettre en place une méthodologie permettant de traduire les informations obtenues avec le *Perception Neuron* et de les rendre intelligibles selon cette même convention. Une fois le procédé établi, chaque

⁹³ Dans l'état actuel de notre recherche, nous comptabilisons un total de 27,97% de signes pluri-segmentaux qui présentent une synergie totale et 39,44% qui présentent une synergie partielle. Ces pourcentages seront toutefois susceptibles d'augmenter lorsqu'un moyen de traiter les signes dont le MOUV contient une prono-supination active aura été mis en place.

⁹⁴ Nous pouvons tout de même noter l'existence d'une étude récente sur le *Perception Neuron* dont la validation des données enregistrées s'est basée sur le calcul des angles du coude, de l'épaule, de la hanche, du genou ainsi que de la cheville (Choo *et al.* 2022).

étape a été formalisée sous la forme de scripts MATLAB permettant d’obtenir des courbes de suivi du mouvement dont les variations d’angles peuvent être comparées avec les celles des DDLs observables sur le corpus vidéo⁹⁵.

6.2.1.1. Exposition de la méthodologie utilisée

La méthodologie que nous avons choisi de mettre en place est basée sur la récupération de coordonnées de *points* dans l’espace 3D afin de calculer des *angles* 3D. Ce choix est motivé par le fait qu’un DDL peut être schématisé par une mesure d’angle entre deux vecteurs. Par exemple, un premier vecteur peut être créé par le segment avant-bras, et un second par le segment bras. Le niveau d’éloignement et de rapprochement de l’avant-bras par rapport au bras peut alors être quantifié et mesuré (fig. 6.27).

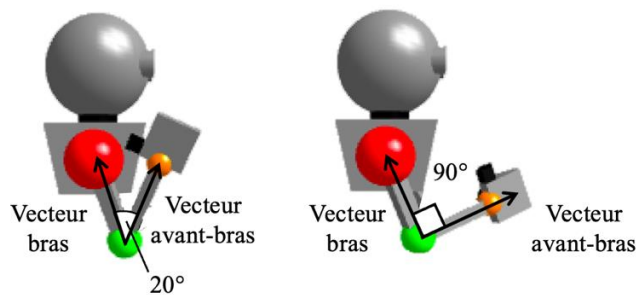


Figure 6.27 – Deux mesures d’angle entre le vecteur du bras et celui de l’avant-bras se croisant au niveau du coude, dont les coordonnées sont connues (vue sagittale)

Ces segments peuvent être considérés comme deux vecteurs qui se croisent à l’intersection du coude. Ce dernier, le coude, est une articulation qui permet un seul DDL, la flexion-extension⁹⁶ : utiliser les coordonnées de l’épaule, du coude et du poignet se révèle alors optimal pour déterminer avec précision l’angle 3D de flexion-extension de l’avant-bras qui sera défini comme le plus petit angle tridimensionnel (3D) entre le segment bras et le segment avant-bras. Cette approche se basant sur les coordonnées de points 3D pour mesurer les *angles articulaires* s’avère toutefois limitée en ce qui concerne certains des segments composants le membre supérieur. Pour le bras, par exemple, aucun segment ne peut faire office de vecteur référentiel

⁹⁵ Il ne s’agit pas d’exposer une méthode qui permettrait de confirmer ou d’infirmer nos hypothèses de recherche ni d’apporter des corrections aux transcriptions déjà réalisées, mais de dresser un premier tableau des possibilités concernant une mise en parallèle de nos deux sources de données initiales.

⁹⁶ La pronosupination ne fait pas varier le positionnement 3D de la coordonnée du poignet utilisée pour calculer ce DDL ; même si le poignet tourne sur lui-même, cela ne modifie pas sa coordonnée 3D. Il en est de même pour la rotation intérieure-extérieure du bras qui ne modifie pas les coordonnées 3D de l’épaule, ni même du coude lors de son activation.

se situant dans le même plan. Il est donc préférable de créer un point virtuel placé à la verticale de l'épaule, permettant de créer un *vecteur virtuel de référence* (ce vecteur a son origine au niveau de l'épaule et est dirigé verticalement vers le bas). Cet ajout permet alors de calculer le niveau d'éloignement et de rapprochement du bras par rapport au vecteur virtuel et d'obtenir une mesure en degrés des angles tridimensionnels créés par le croisement des deux vecteurs (fig. 6.28).

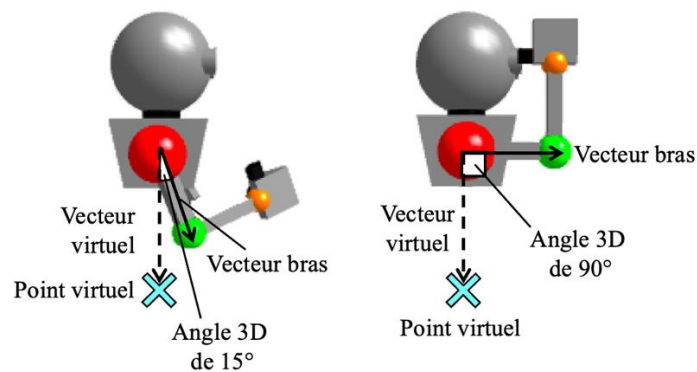


Figure 6.28 – Deux mesures d'angle entre le vecteur virtuel orienté à la verticale de l'épaule et celui du bras se croisant au niveau de l'épaule (vue sagittale)

Il s'agit ici d'angles *segmentaires*, c'est-à-dire d'angles décrivant le mouvement de rotation d'un vecteur créé par l'axe longitudinal du segment par rapport à un vecteur virtuel.

Pour calculer ces deux types d'angles - articulaires et segmentaires - nous utilisons le produit scalaire. Le produit scalaire de deux vecteurs est égal au produit de leurs normes (i.e. la longueur d'un vecteur) par le cosinus de l'angle qu'ils forment. Une fois le cosinus isolé, il est possible d'obtenir l'angle présent entre les deux vecteurs. Par exemple, si les coordonnées sont 1, 32 et 4, alors la norme du vecteur est :

$$\sqrt{(1^2 + 32^2 + 4^2)} = \sqrt{(1041)} = 32.264$$

Ces coordonnées sont récupérées à partir de la variable Dxyz créée lors de la phase de prétraitement. Cette variable correspond aux déplacements des points issus du modèle anthropométrique construit par le *Perception Neuron* par rapport à une référence commune à toutes les articulations du corps.

Nous sommes donc, à ce stade, capable d'obtenir des mesures d'angle *tridimensionnelles* pour les DDLs du membre supérieur. Elles peuvent donc dépendre des mouvements qui se font conjointement entre plusieurs DDLs.

Or, afin que la valeur mesurée soit bien celle d'un DDL particulier, il faut projeter les mouvements sur deux dimensions, et non trois. Il ne faut alors se concentrer que sur les rotations possibles autour d'un unique axe de l'espace 3D (fig. 6.29).

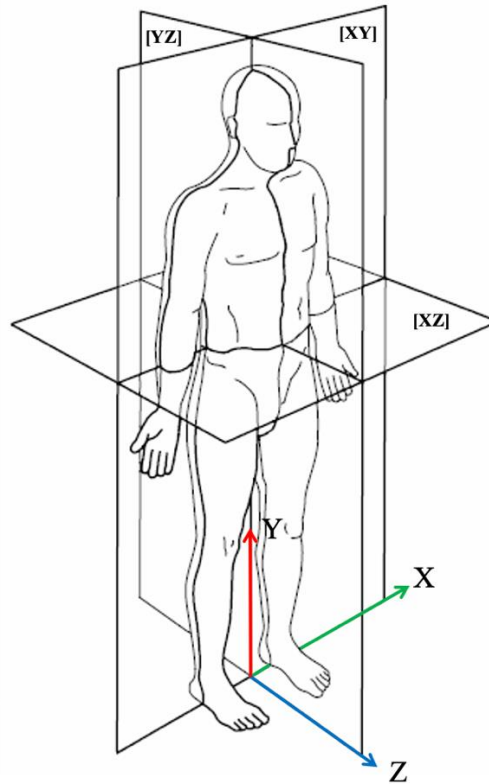


Figure 6.29 – Axes [XYZ] et les plans correspondants

Par exemple, si les seules rotations autour de l'axe X sont conservées, alors le bras est contraint de se déplacer dans le plan [YZ] uniquement, qui se trouve être le plan dans lequel se déploie la flexion-extension. Si c'est l'axe Z qui est conservé, alors seuls des mouvements réalisables dans le plan [XY] sont possibles, plan qui correspond à l'abduction-adduction de ce segment. Cette méthode nous permet d'obtenir des mesures d'angle en 2D correspondant bien à un seul DDL.

Il faut désormais établir un dernier ajustement. L'angle 2D qui est fraîchement calculé est le plus petit angle entre les deux vecteurs. Peu importe le positionnement du vecteur du segment étudié par rapport au vecteur de référence, les données récupérées sont systématiquement positives. Or, selon le fonctionnement du système de transcription que nous avons utilisé, certains pôles ont des valeurs positives (flexion, abduction, rotation intérieure, pronation), d'autres sont associés à des valeurs négatives (extension, adduction, rotation extérieure, supination). Afin que la correspondance avec les données telles que nous les avons transcrites

soit optimum, il faut donc corriger les angles obtenus afin que leurs valeurs nulles (0°) correspondent à la position neutre de chacun des segments (fig. 6.30).

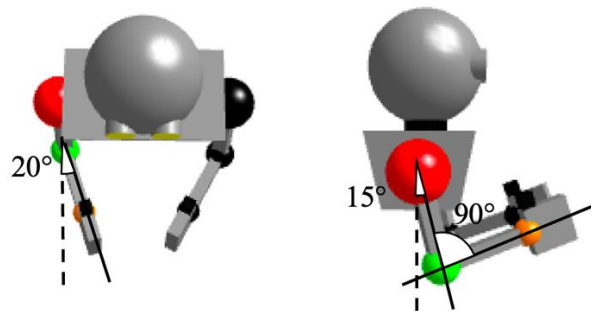


Figure 6.30 – Posture de référence employée et quantifications en degrés des différences avec la position de référence anatomique

Ce n'est qu'à partir du moment où la correspondance des données est réalisée qu'il est possible d'indiquer dans quel pôle des DDLs se situent les angles 2D.

En somme, ces trois étapes nous permettent d'obtenir des mesures d'angle en 2D pour un seul DDL à la fois dont les valeurs nulles correspondent aux positions de référence des segments ; les valeurs positives aux pôles de flexion, d'abduction, de rotation intérieure, ainsi que de pronation ; les valeurs négatives concordent avec l'extension, l'adduction, la rotation extérieure et la supination.

Avant de passer à la mise en pratique de cette méthodologie, il est nécessaire d'éclaircir quelques aspects touchant au système de coordonnées établi par le *Perception Neuron*.

6.2.1.2. Système de référence

Le choix d'utiliser des coordonnées 3D projetées dans des *plans* 2D rend primordiale l'identification des plans dans lesquels se projettent les DDLs. C'est à partir d'un système de coordonnées cartésiennes XYZ que se construit l'ensemble de la hiérarchie des données enregistrées par le *Perception Neuron*. Comme nous l'avons spécifié au §5.3.1.1, ce repère initial se situe au niveau du sol, entre les jambes du signeur de la figure 3D. Le prendre en compte permet d'associer les plans de référence anatomiques aux plans cartésiens utilisés au sein des données cinématiques (fig. 6.31) : au plan anatomique sagittal correspond le plan [YZ], au plan frontal correspond le plan [XY] et au plan transversal correspond le plan [XZ].

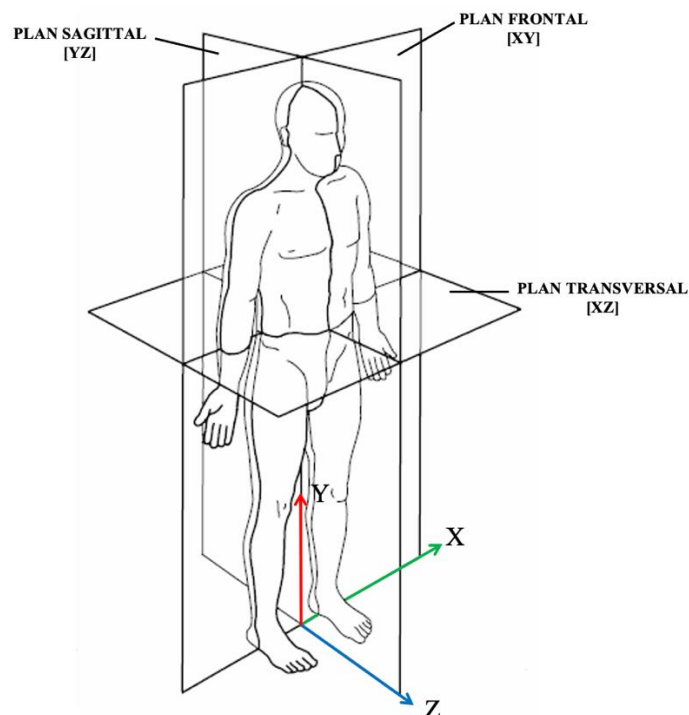


Figure 6.31 – Correspondances entre les plans [XYZ] et les plans anatomiques par rapport au repère initial

Ce système de référence est matérialisé dans le logiciel *Axis Neuron* par la présence d'une croix rouge qui devrait être orientée de manière à ce que l'axe Z qui pointe vers l'avant de la représentation 3D des participants. Or, lors de la phase de vérification du système de coordonnées, nous nous sommes rendu compte qu'une différence d'orientation de 90° vers la droite est observable par rapport à ce positionnement initial. Ce changement d'orientation a un impact sur l'analyse du mouvement : la correspondance entre les plans anatomiques et l'espace XYZ que nous avons établie n'est plus d'actualité. Désormais, le plan sagittal correspond au plan [XY], le plan frontal au plan [YZ] et le plan transversal au plan [YZ] (fig. 6.32).

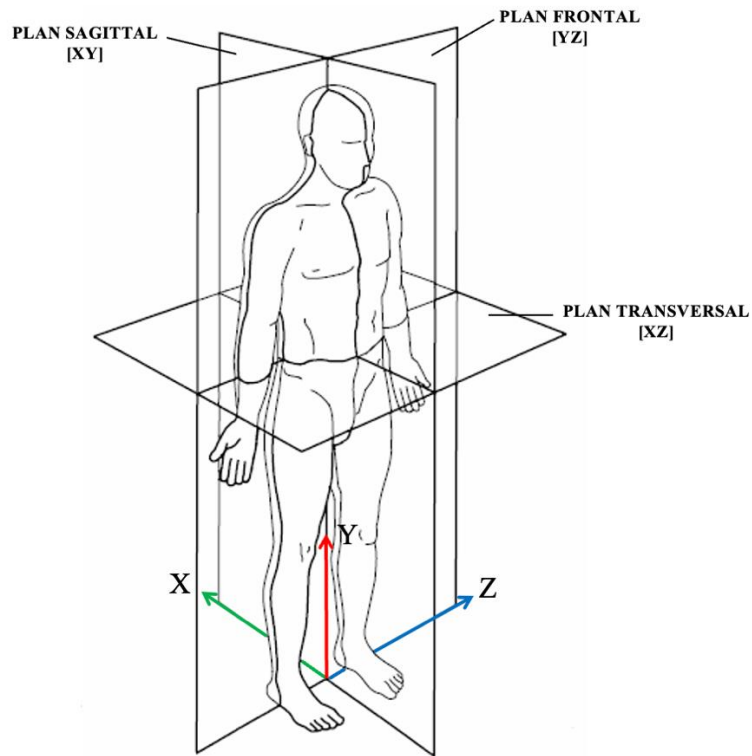


Figure 6.32 – Correspondances entre les plans [XYZ] et les plans anatomiques par rapport au repère effectif (rotation des axes X et Z de 90° vers la droite selon l'axe Y)

Sans l'identification et la prise en compte de ce changement d'orientation par rapport au référentiel initial, il n'aurait pas été possible d'obtenir des données cohérentes de suivi du mouvement 3D selon la méthode que nous avons établie.

Voyons maintenant comment cette dernière peut être appliquée aux DDLs du membre supérieur.

6.2.1.3. Applications théoriques aux DDLs

Commençons par les DDLs du bras. Que ce soit pour la flexion-extension ou l'abduction-adduction, l'absence de segment de référence suppose la création d'un point virtuel à la verticale de l'épaule permettant de définir un vecteur segmentaire (fig. 6.33).

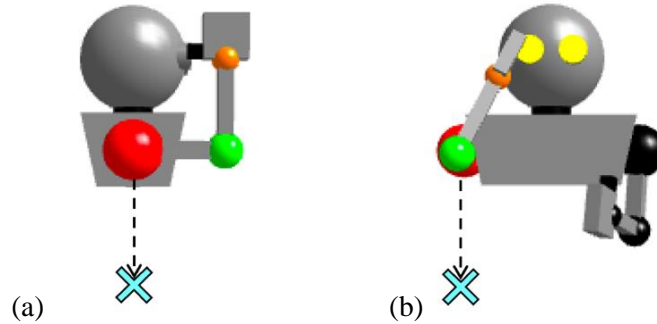


Figure 6.33 – Création d'un point virtuel à la verticale de l'épaule pour l'estimation de la flexion-extension (plan sagittal) et de l'abduction-adduction (plan frontal) du bras

La présence de ce vecteur rend le calcul des angles 3D segmentaires possible. Il faut maintenant projeter ces angles dans un espace à deux dimensions afin de distinguer les composantes du mouvement qui relèvent de la flexion-extension et celles qui relèvent de l'abduction-adduction. Afin d'obtenir les données concernant la flexion-extension, il faut modifier la coordonnée Z^{97} du coude pour qu'elle soit égale à la coordonnée Z de l'épaule, et de ce fait, contraindre le bras à se déplacer dans l'unique plan $[XY]$. Toute mesure d'angle obtenue sera alors relative à une modification du niveau de flexion-extension.

Enfin, il faut corriger les données obtenues afin d'être à même de discerner les *pôles* de ce DDL. Pour cela nous considérons le placement du bras dans sa position de référence, qui est décalé sur Z de 15° par rapport au vecteur virtuel. Cette position de référence est désormais considérée comme la nouvelle valeur 0. Si le coude se situe plus en arrière de cette position sur le plan sagittal, alors les valeurs seront négatives et il s'agira d'une extension ; si le coude est plus en avant de cette position selon un plan sagittal, alors les données seront positives et il s'agira d'une flexion (fig. 6.34).

⁹⁷ Nous nous référons au système de coordonnées de la fig. 6.32 et non de la fig. 6.29.

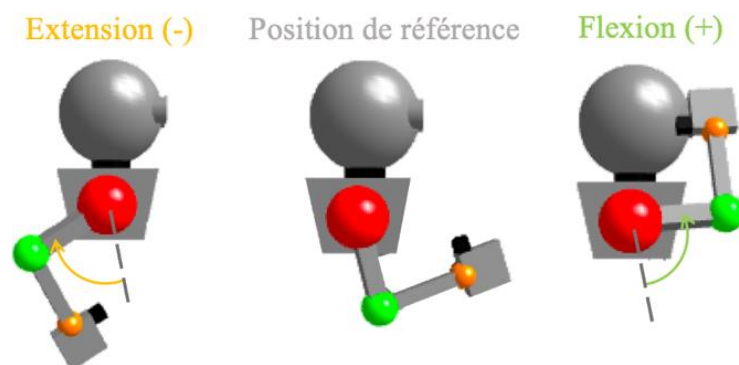


Figure 6.34 – Identification des pôles de la flexion-extension du bras (plan sagittal)

Nous pouvons désormais passer à l'application de notre méthodologie au DDL de l'abduction-adduction concernant ce même segment.

Nous utilisons le même vecteur virtuel que celui préalablement établi, mais visualisé selon le plan frontal (fig. 6.33 (b)). Ici, c'est la coordonnée sur X du coude qui est modifiée pour être égale à la coordonnée sur X de l'épaule. Le bras est alors contraint à effectuer un mouvement à deux dimensions, contenu exclusivement dans le plan [YZ].

Afin de discerner les pôles de ce DDL il faut considérer le placement du bras dans sa position de référence, qui a cette fois-ci les mêmes coordonnées que le vecteur virtuel. À partir de là, si le coude se situe plus à la droite que la position de référence du bras sur le plan frontal, alors les valeurs seront négatives et il s'agira d'une adduction ; si le coude est plus à la gauche sur le plan frontal que la position de référence, alors les données seront positives et il s'agira d'une abduction (fig. 6.35).

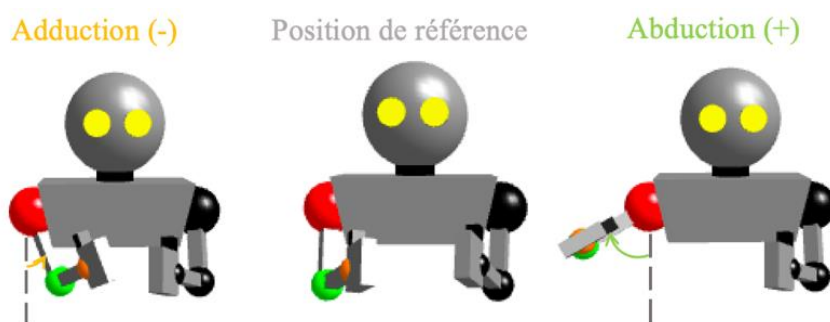


Figure 6.35 – Identification des pôles de l'abduction-adduction du bras (plan frontal)

Nous pouvons désormais adapter cette méthodologie aux DDLs de l'avant-bras.

Commençons par les angles de rotation intérieure et extérieure. Le point virtuel se place cette fois-ci à l'avant du coude sur l'axe X (fig. 6.36), créant un vecteur à la verticale du sol.

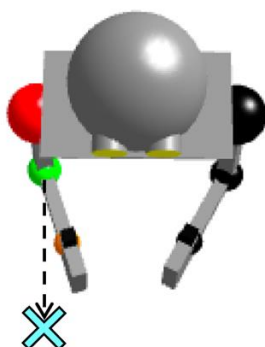


Figure 6.36 – Création d’un point virtuel à l’horizontale du coude pour l’estimation de la rotation intérieure-extérieure de l’avant-bras (plan transversal vu de dessus)

Afin d’obtenir les données concernant la rotation intérieure-extérieure, il faut modifier la coordonnée sur Y du poignet pour qu’elle soit égale à la coordonnée sur Y du coude, afin de contraindre l’avant-bras à se déplacer dans l’unique plan [XZ]. Toute mesure d’angle obtenue sera alors relative à une modification du niveau de rotation sur ce plan.

Il reste encore à corriger les données générées. Pour cela, il faut tenir compte d’un écart de 20° entre le vecteur virtuel et la position de référence de l’avant-bras (fig. 6.30) en rotation intérieure selon le plan transversal. Cette position de référence est considérée comme la nouvelle valeur 0° de l’angle obtenu.

Désormais, si les coordonnées du poignet se situent plus en latéral que la position de référence du coude sur le plan transversal, alors les valeurs seront négatives et il s’agira d’une rotation extérieure ; si les coordonnées du poignet sont plus en médial que la position de référence sur le plan transversal, alors les données seront positives et il s’agira d’une rotation intérieure (fig. 6.37).

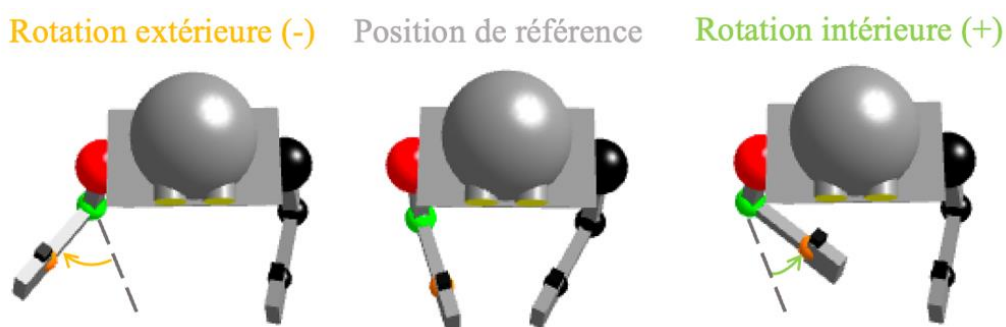


Figure 6.37 – Identification des pôles de la rotation intérieure-extérieure de l’avant-bras (plan transversal)

Passons aux angles relatifs à la flexion-extension de l’avant-bras. Il s’agit ici d’angles articulaires, car les segments bras et avant-bras exprimés l’un par rapport à l’autre, ne

permettent qu'un seul DDL, il n'y a donc pas besoin d'utiliser le vecteur virtuel précédemment créé.

Le placement de l'avant-bras dans sa position de référence est à 90° par rapport au bras. Si l'amplitude de l'angle mesuré est supérieure à 90° , alors les valeurs seront négatives et il s'agira d'une extension ; si l'amplitude de l'angle mesuré est inférieure à 90° , alors les données seront positives, et il s'agira d'une flexion (fig. 6.38). Les corrections des données permettent de considérer un angle de 90° comme la nouvelle valeur 0° .

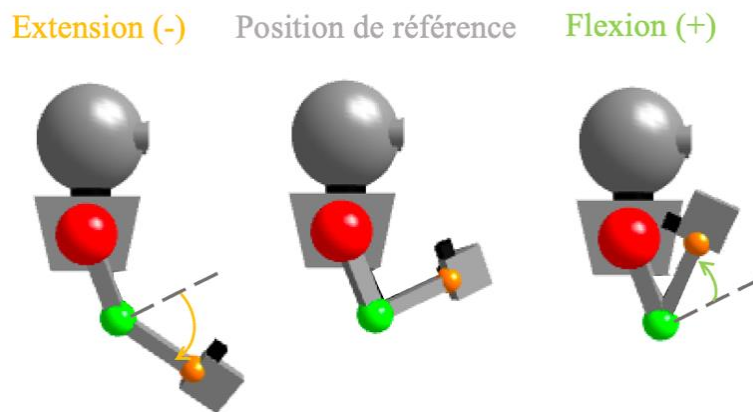


Figure 6.38 – Identification des pôles de la flexion-extension du bras (plan sagittal)

Cette technique présente néanmoins des limites concernant les segments les plus distaux. Voyons pourquoi.

Le bras est le segment le plus proximal du membre supérieur. Il est attaché au torse, membre qui ne subit pas – ou peu – de changement d'orientation au cours du temps dans le cadre de nos enregistrements de corpus. Le torse n'a donc pas réellement d'impact sur le bras en modifiant par son propre mouvement les plans dans lesquels se déploient les DDLs du bras.

L'avant-bras est quant à lui attaché au bras, segment qui effectue bel et bien différents changements d'orientation au cours du temps. L'avant-bras est alors *dépendant* du positionnement du bras. Si le bras est bien le long du corps, les plans demeurent identiques à ceux que nous avons établis (fig. 6.32) ; si ce n'est pas le cas, ou si le bras effectue un mouvement concomitant à l'avant-bras, les plans s'en trouvent modifiés. Cette constatation fixe les limites de notre approche : plus le segment est distal, plus il est dépendant des positions et des mouvements des segments proximaux. En cela, nous considérons le traitement de l'avant-bras comme pertinent – car le bras est principalement utilisé dans sa position de référence (§6.1.2.1) – mais pas celui de la main.

La méthodologie telle que nous l'avons présentée précédemment pourrait théoriquement lui être appliquée. Nous pourrions, par exemple, isoler trois articulations - le coude, le poignet et le point le plus proximal du majeur (i.e. le point qui subit le moins de modifications produites par les mouvements des doigts) – et calculer le plus petit angle 3D entre ces points. Selon le plan dans lequel se déploie le mouvement, il s'agirait de la flexion-extension ou de l'abduction-adduction. Concernant la prono-supination, il faudrait créer un premier point virtuel sur la base des coordonnées du pouce alignées avec celles du poignet dans le plan [YZ], sans la composante X, puis créer un second point à la verticale du poignet sur Y. Ce n'est qu'à partir de ces deux vecteurs virtuels qu'il serait possible de calculer l'angle entre les trois points formés par la verticale du poignet, le pouce dans le plan [YZ] du poignet ainsi que l'articulation du poignet.

Plusieurs problèmes se posent ici. Le fait que la main n'est pas dépendante d'un seul segment proximal, mais de deux, rend plus difficile d'isoler ses DDLs respectifs sur un seul plan de l'espace 3D et donc de déterminer la catégorisation d'un mouvement en deux DDLs distincts. La flexion-extension et l'abduction-adduction demeureraient indifférenciées. Quant à la prono-supination, elle requiert l'ajout de deux vecteurs virtuels, ce qui complexifie nettement les calculs à mettre en place au sein des scripts MATLAB, et peut impacter la qualité des résultats obtenus. Compte tenu de ces remarques, nous estimons préférable de nous concentrer sur les quatre DDLs du bras et de l'avant-bras avec la technique choisie.

6.2.2. Exploitation des scripts et exportation des résultats

Comme nous l'avons établi (section 5.3.2), afin de transformer les données brutes contenues dans les colonnes du fichier BVH en données interprétables par MATLAB, nous utilisons le script `skeleton_complet.m` accompagné de la fonction `loadbvh_modified.m`⁹⁸. Nous présentons maintenant les scripts qui permettent d'appliquer notre méthodologie d'exploitation des données⁹⁹.

6.2.2.1. Utilisation des scripts MATLAB

Faisons une mise en situation.

⁹⁸ L'ensemble des scripts MATLAB ont été rédigés par Brice Guignard (Université de Rouen Normandie), co-encadrant de ce travail de thèse.

⁹⁹ Bien que la représentation puisse laisser penser qu'il s'agit du membre gauche, il s'agit là d'une déformation optique. Ce sont bien les informations du membre dominant du signeur qui sont récoltées, soit celles du membre droit.

Nous avons sélectionné un signe de notre corpus, le signe [FRANCHIR L'ARRIVÉE ENSEMBLE] (fig. 6.39). Celui-ci présente une LOCini du bras droit en flexion-extension neutre et en légère abduction (①) ; le MOUV débute par un léger mouvement de recul du bras (②) qui se projette ensuite vers l'avant par une forte flexion et une adduction (③).



Figure 6.39 – Réalisation du signe [FRANCHIR L'ARRIVÉE ENSEMBLE] (signeur 1 signe 036, vidéo [6.6](#))

Voici les scripts mis en place et employés pour parvenir à obtenir les courbes de suivi 2D de ces mouvements.

Script 1 : Détermination de la séquence temporelle

Le premier script est `decoup_signes.m`¹⁰⁰. Ce script permet de sélectionner la variable `results_num.mat` - créée lors de la phase de pré-traitement - dans laquelle se trouvent les données cinématiques de l'enregistrement associé au signe. Il permet également d'indiquer la temporalité exacte du signe en renseignant :

- le décalage entre le temps d'allumage de la caméra et celui du système de Mocap ;
- le temps de début du signe ;
- le temps de fin du signe.

Nous tirons la première information de notre travail de synchronisation des enregistreurs ; quant à la deuxième et la troisième information, elles sont disponibles sur ELAN. Seules les données se trouvant dans ce laps de temps sont alors récupérées et enregistrées au sein d'une nouvelle variable.

¹⁰⁰ Ce script peut être consulté [ici](#).

Script 2 : Création d'un squelette dynamique (facultatif)

La nouvelle variable créée contient effectivement toutes les informations chiffrées concernant le signe sélectionné. Il est toutefois difficile pour le regard humain d'établir si toutes les données nécessaires à l'analyse ont bien été sauvegardées. Un ensemble de scripts¹⁰¹ a alors été mis en place permettant de visualiser le signe sous la forme d'un squelette 3D (fig. 6.40).

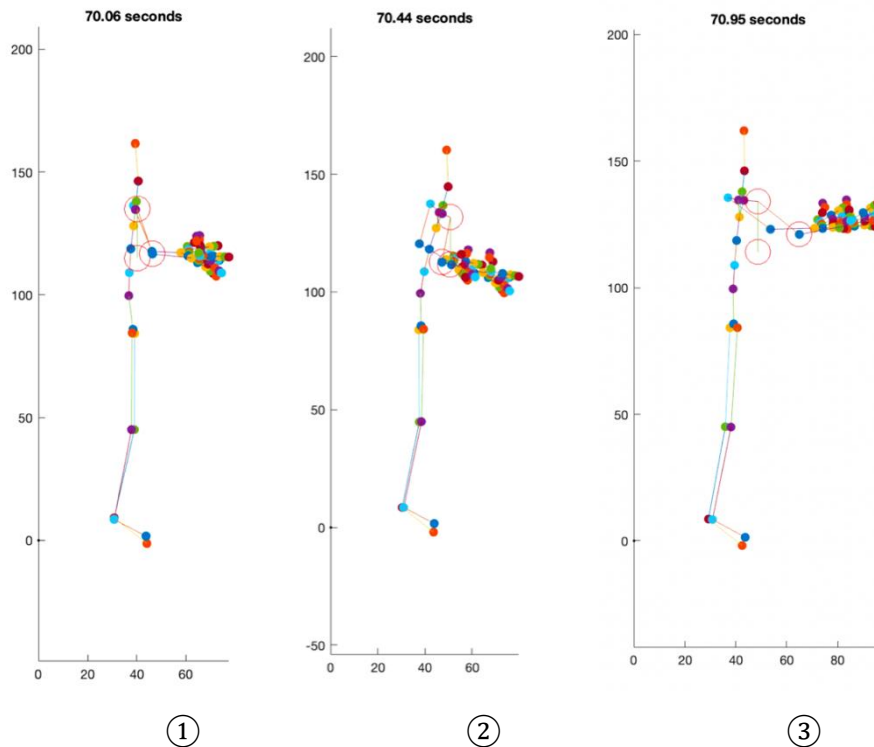


Figure 6.40 – Représentation squelettique des données cinématiques relatives au signe [FRANCHIR L'ARRIVÉE ENSEMBLE] (vidéo [6.7](#))

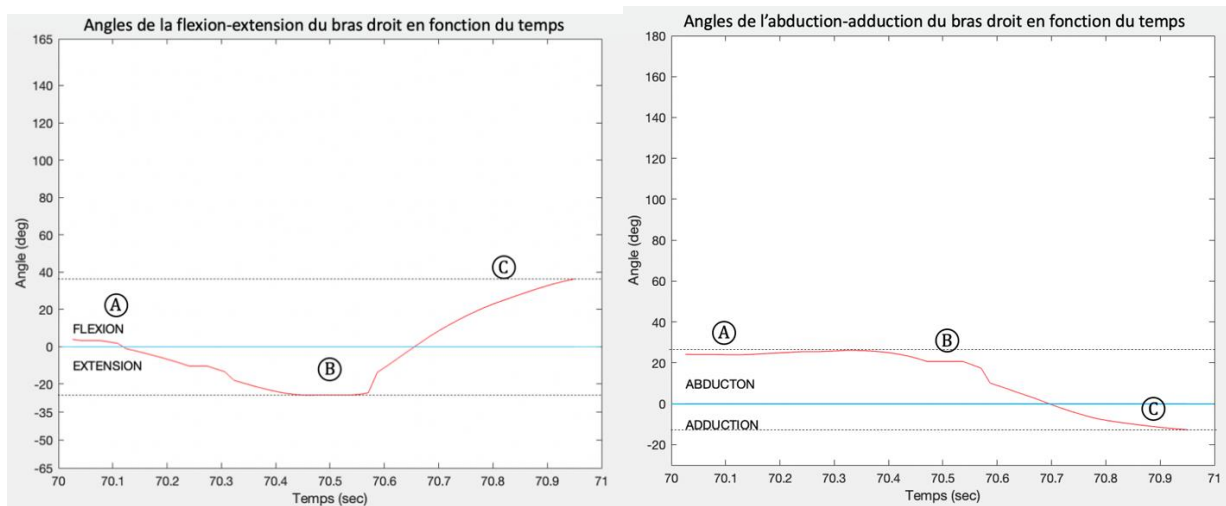
Cette visualisation « incarnée » atteste qu'il n'y a pas eu d'erreur lors de la segmentation temporelle du signe. La représentation squelettique permet aussi de visualiser les points à l'origine du calcul de la flexion-extension. Nous pouvons effectivement observer la présence de trois cercles rouges, un situé à l'épaule, un autre au niveau du coude et un troisième à l'extrémité du vecteur virtuel. Cela permet de vérifier aisément que ce sont les trois bons points d'origine, et donc les bons angles, qui sont pris en compte. Un script spécifique a été créé pour chacun des plans anatomiques, offrant ainsi des points de vue (de face, de profil ou plongeant) adaptés au DDL traité.

¹⁰¹ Les scripts concernés – videoflexextbras, videoabdaddbras, videoflexextavantbras, videorotintextavantbras – sont consultables [ici](#).

Script 3 : Générer les courbes d'angle

Le dernier script utilisé, `angles_DDL`¹⁰², permet de générer les courbes de suivi d'angles 2D des DDLs du bras et de l'avant-bras. Les graphiques produits ont tous la même composition. En ordonnée se trouvent les amplitudes des DDLs (en degrés) adaptés aux butées articulaires de chaque DDL, et en abscisse se trouve la temporalité du signe étudié (exprimée en secondes). Les données 2D y sont visualisables sous la forme d'une courbe, encadrée par des lignes pointillées marquant l'angle le plus haut et le plus bas atteint par cette même courbe.

Nous pouvons observer ci-dessous les graphiques obtenus concernant la flexion-extension (fig. 6.41 à gauche) et l'abduction-adduction (fig. 6.41 à droite) du bras du signeur ayant réalisé le signe [FRANCHIR L'ARRIVÉE ENSEMBLE].



Les trois scripts permettant d'obtenir les données d'angles des DDLs du bras et de l'avant-bras présentés, nous pouvons maintenant vérifier la concordance entre les informations livrées par l'extrait vidéo avec les courbes qui en ont été tirées.

Nous avons considéré que le signe présentait un LOCini du bras droit en flexion-extension neutre et en légère abduction. Nous pouvons observer ici une première concordance des données avec une LOCini dont la flexion de 5° reste proche de la position neutre (Ⓐ), ainsi qu'une abduction un peu plus marquée, atteignant les 23°. Nous avons ensuite observé un léger mouvement de recul du bras qui se retrouve ici avec une extension de 25°, alors que l'abduction reste constante (Ⓑ). Nous avons enfin considéré une forte flexion et adduction du segment vers

¹⁰² Le script est consultable [ici](#).

l'avant du torse. Ces données correspondent bien à la flexion de 60° ainsi qu'à l'adduction de 30° (©) indiquées dans la représentation graphique.

Il y a donc concordance entre la vidéo et les données cinématiques concernant les DDLs du bras, ce qui apporte une première confirmation du bon fonctionnement de notre méthode.

6.2.2.2. Résultats DDLs du bras

Voyons si d'autres comparaisons permettent de tirer la même conclusion. Sélectionnons un nouveau signe, le signe [PLONGER] (fig. 6.42). Nous pouvons observer que le bras droit présente une LOCini avec une flexion et une abduction marquées (①). Une extension et une adduction viennent ensuite réduire ces amplitudes (②) sans que celles-ci atteignent pour autant les positions de référence (③).

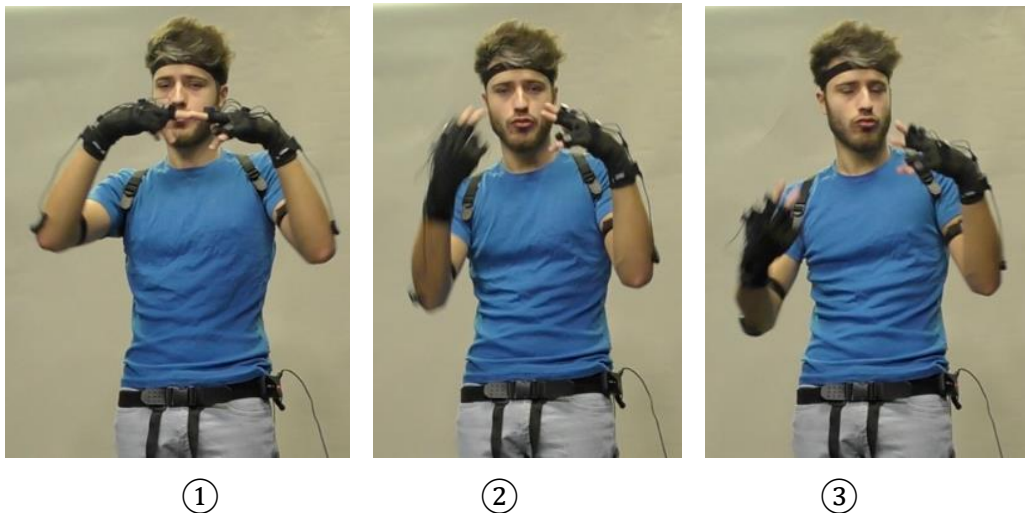


Figure 6.42 – Réalisation du signe [PLONGER] (signeur 2 signe 213, vidéo [6.8](#))

Une fois l'utilisation des scripts de `decoup_signes.m` et `angles_DDL` réitérée, nous obtenons les courbes de suivi du mouvement des deux DDLs (fig. 6.43) qui présentent des pentes négatives pouvant convenir à notre description. Examinons cela de plus près.

Les graphiques dépeignent un mouvement qui débute sa course avec une flexion marquée à 60° et abduction à 100° (Ⓐ). La flexion est ensuite réduite à vitesse angulaire constante alors que l'abduction suit une diminution plus rapide et plus courte (Ⓑ), puis la flexion diminue encore en fin de signe, alors que l'abduction s'est déjà stabilisée aux alentours des 20° (©).

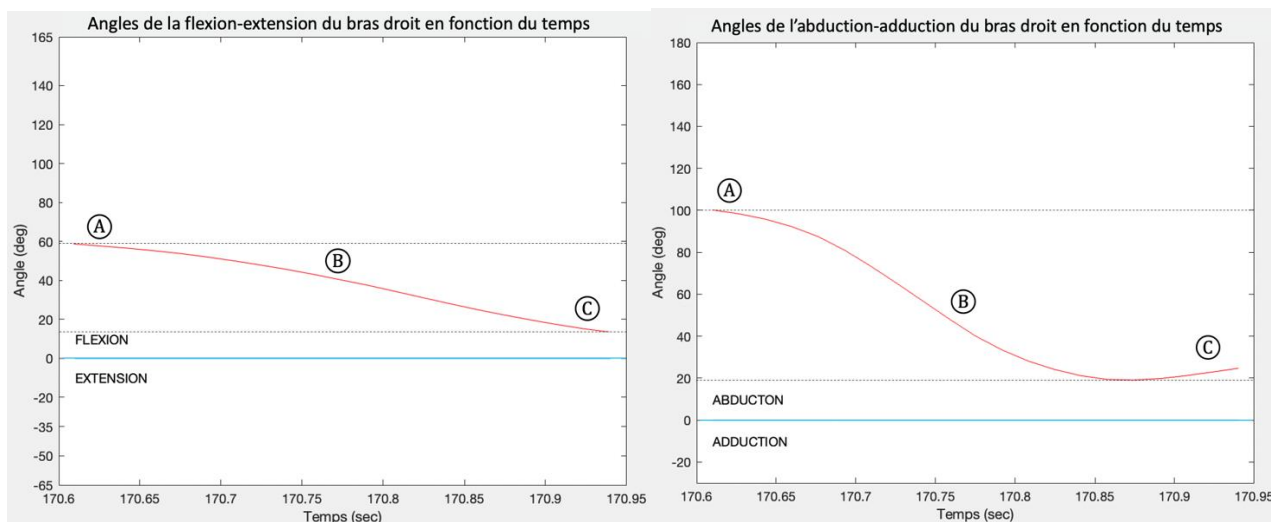


Figure 6.43 – Graphiques représentant le suivi d’angles de la flexion-extension et de l’abduction-adduction du bras droit en fonction du temps du signe [PLONGER]

Si les formes générales de ces courbes sont effectivement cohérentes, le niveau d’abduction nous semble trop élevé de 30° par rapport à ce que nous observons sur la vidéo. Nous pouvons faire l’hypothèse que cette surévaluation est due à la présence de la forte flexion concomitante. Voyons maintenant ce qu’il en est pour le signe [GROSSE MOUSTACHE] (fig. 6.44) qui présente un bras droit en flexion marquée et en abduction légère (①), abduction qui augmente ensuite considérablement au cours du mouvement (② et ③).

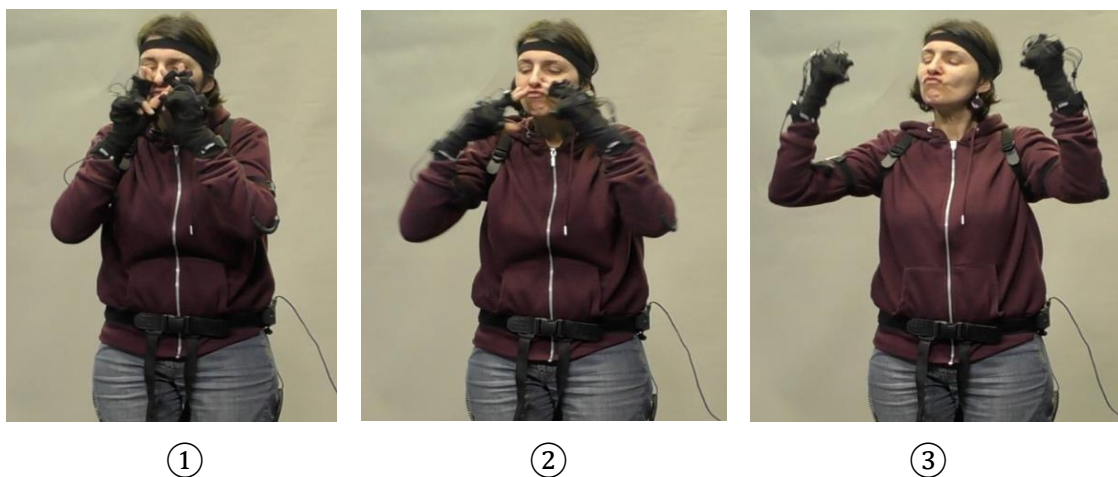


Figure 6.44 – Réalisation du signe [GROSSE MOUSTACHE] (signeur 3 signe 43, vidéo [6.9](#))

Les graphiques obtenus confirment cette observation, avec une courbe d’abduction-adduction (fig. 6.45 à droite) qui augmente de 50° entre la donnée exprimée en début de mouvement (A) et celle affichée en fin de mouvement (C), alors que la courbe de la flexion (fig. 6.45 à gauche) reste stable, stagnante autour des 40° . Nous pouvons tout de même remarquer une légère flexion

en début de signe (Ⓐ) qui ne semble pas être dû au mouvement d'abduction puisque la flexion a lieu temporellement avant ce dernier.

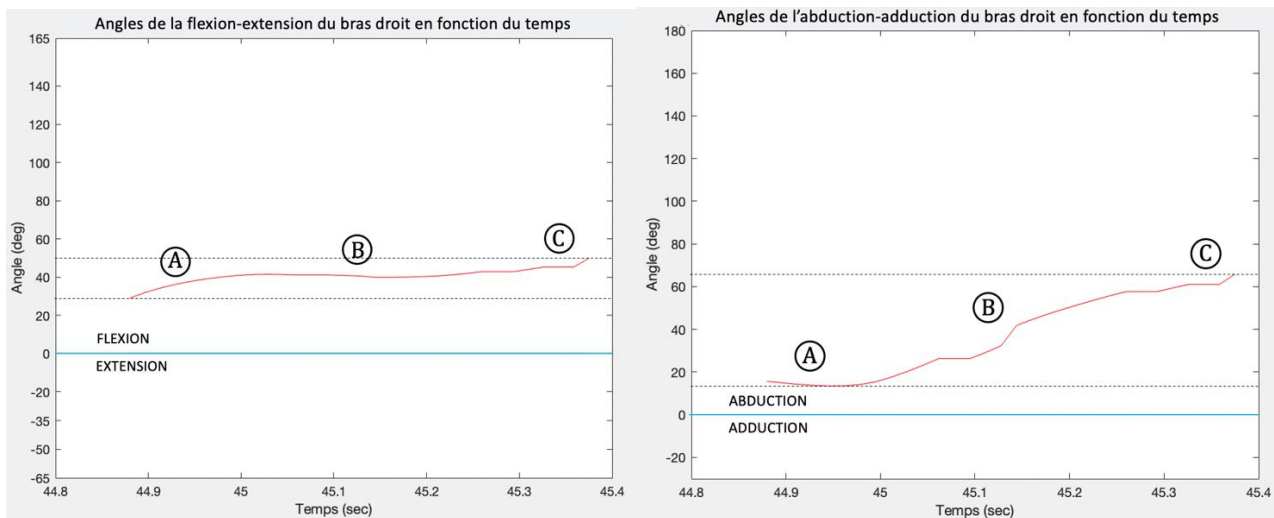


Figure 6.45 – Graphiques représentant le suivi d’angles de la flexion-extension et de l’abduction-adduction du bras droit en fonction du temps du signe [GROSSE MOUSTACHE]

La comparaison des données vidéo et de MoCap de ces trois signes (i.e. [FRANCHIR L'ARRIVÉE ENSEMBLE], [PLONGER] et [GROSSE MOUSTACHE]) nous permet d'affirmer que nous sommes parvenus à obtenir des courbes pertinentes de suivi d'angles 2D des DDLs du bras. Nous notons tout de même une survalorisation de la valeur de l'abduction du signe [PLONGER]. Une déformation des données apparaîtrait donc à partir d'un certain degré d'amplitude des DDLs.

Passons désormais aux traitements des deux DDLs de l'avant-bras.

6.2.2.3. Résultats DDLs de l'avant-bras

Afin de mener une première analyse des DDLs de l'avant-bras, nous avons sectionné le signe [SE RAPPROCHER] (fig. 6.46). Le segment étudié débute sa course en flexion-extension neutre et en légère rotation extérieure (Ⓐ), puis réalise une flexion marquée accompagnée d'une rotation intérieure (Ⓑ et Ⓒ).



Figure 6.46 – Réalisation du signe [SE RAPPROCHER] (signeur 3 signe 396, vidéo [6.10](#))

Les graphiques obtenus présentent une cohérence formelle globale puisqu'ils présentent des courbes qui possèdent toutes deux des pentes ascendantes (fig. 6.47). Le mouvement débute avec une extension à -16° et une rotation extérieure à -4° (Ⓐ). Nous pouvons noter ensuite l'activation déjà engagée de la flexion et une faible augmentation de l'amplitude de la rotation intérieure (Ⓑ). Le mouvement se termine sur une flexion toujours en augmentation et une rotation intérieure qui stagne autour des 10° (Ⓒ).

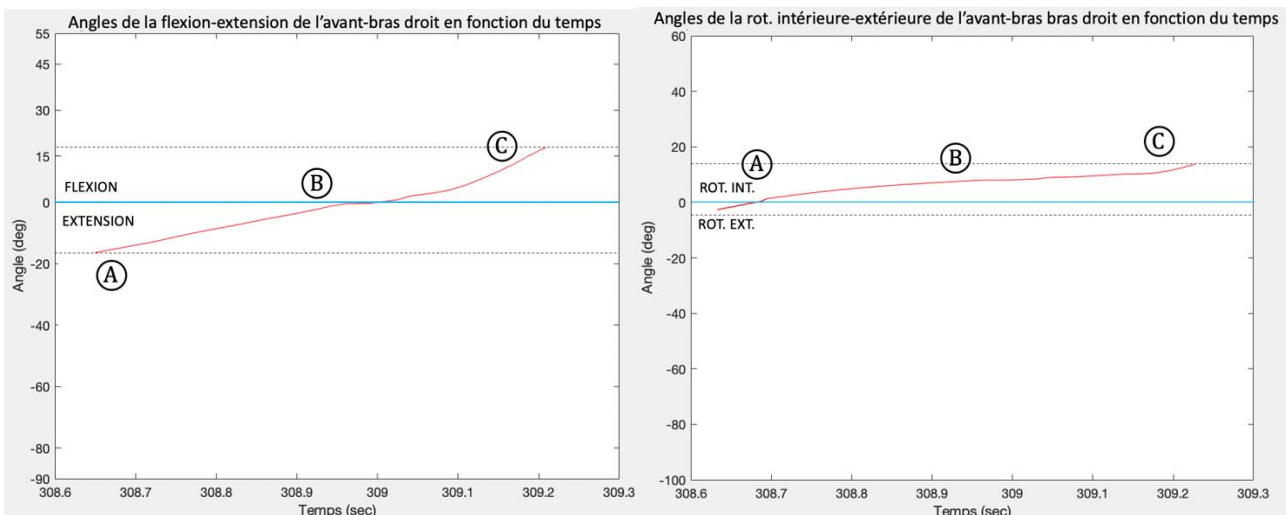


Figure 6.47 – Graphiques représentant le suivi d'angles de la flexion-extension et de la rotation intérieure-extérieure de l'avant-bras droit en fonction du temps du signe [SE RAPPROCHER]

La seule différence notable ici est celle du degré initial du DDL de la flexion-extension de l'avant-bras. Si nous l'avions considéré comme neutre, il apparaîtrait ici comme relevant d'une légère extension. Il ne nous est pas possible en l'état de savoir si cette disparité est due à l'angle

de la caméra qui ne permet pas d'apprécier visuellement le degré d'extension du bras, ou si cela est imputable au segment proximal, le bras, dont la position non neutre peut influencer les données de MoCap concernant l'avant-bras.

Voyons désormais un MOUV qui ne concerne l'activation que d'un seul DDL (fig. 6.48). C'est le cas pour le signe [FRANCE] : nous pouvons observer une LOCini de l'avant-bras en légère flexion et en rotation intérieure marquée (①). Le MOUV est quant à lui composé d'une forte rotation extérieure (②) et ③).



Figure 6.48 – Réalisation du signe [FRANCE] (signe 5 signe 144, vidéo [6.11](#))

Les graphiques de suivi d'angles de l'avant-bras (fig. 6.49) dépeignent une position initiale en extension de -5° et en rotation intérieure de 46° (Ⓐ). Cette dernière se réduit nettement atteignant une rotation extérieure dont l'amplitude est de -20° . L'extension quant à elle augmente pour atteindre une amplitude de -18° (Ⓑ). Le mouvement se termine sur une stagnation des deux DDLs (Ⓒ).

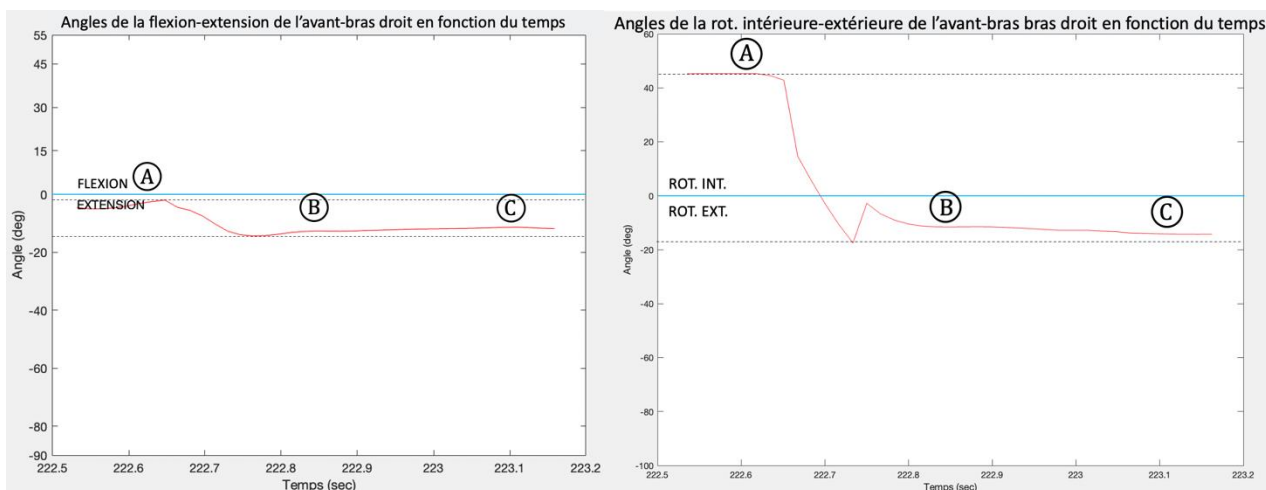


Figure 6.49 – Graphiques représentant le suivi d’angles de la flexion-extension et de la rotation intérieure-extérieure de l’avant-bras au sein du signe [FRANCE]

Des écarts sont perceptibles entre la représentation graphique et nos observations du corpus vidéo concernant le DDL de la flexion-extension. La flexion nous semble effectivement légèrement sous-valorisée et surtout, nous n’avons détecté aucun mouvement d’extension comme la courbe descendante entre 222.60 sec et 222.75 sec semble le suggérer. Il s’agit, selon nous, d’une influence du DDL de la rotation. En effet, bien que les amplitudes soient différentes, les courbes descendantes de ces deux DDLs adviennent dans des temporalités similaires. Cela semble démontrer la présence d’une influence persistante entre les deux DDLs malgré leur projection respective dans des plans différents.

Décrivons un dernier signe.

Le signe [DATE] (fig. 6.50) présente une LOCini au sein de laquelle les DDLs de la flexion-extension et rotation intérieure-extérieure sont neutres (①) ; le MOUV est composé d’une rotation intérieure (② et ③).

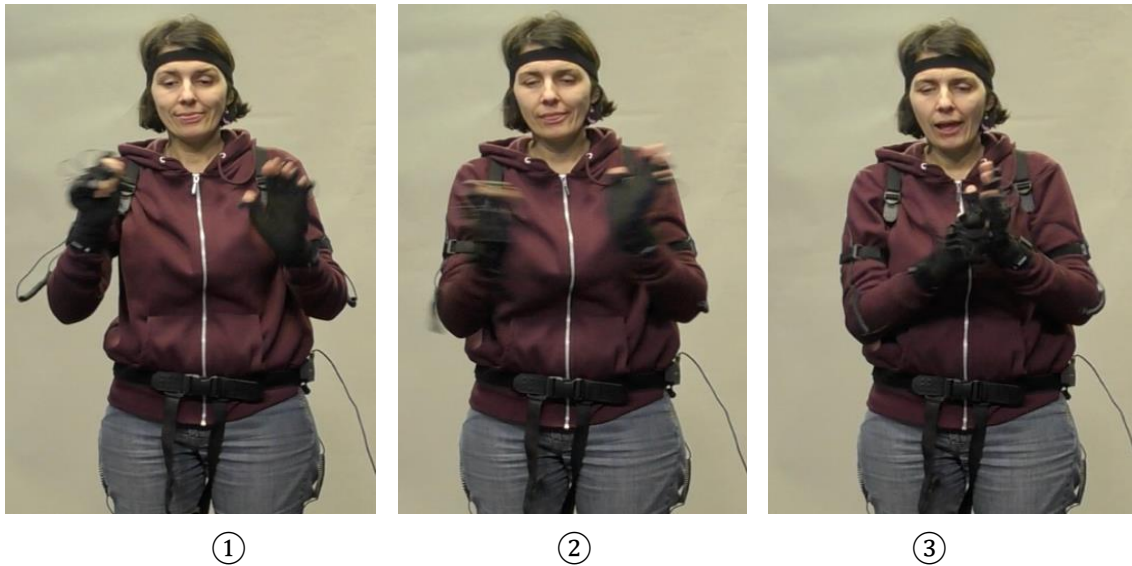


Figure 6.50 – Réalisation du signe [DATE] (signeur 3 signe 339, vidéo [6.12](#))

Dans les graphiques ci-dessous (fig. 6.51), nous retrouvons une rotation qui débute en amplitude -2° (A) pour ensuite augmenter considérablement et atteindre les 40° (B) et se stabiliser à 35° (C). La saccade présente entre 280.15 et 280.22 sec peut être une conséquence du contact avec la main. La flexion-extension demeure quant à elle stable tout au long du signe.

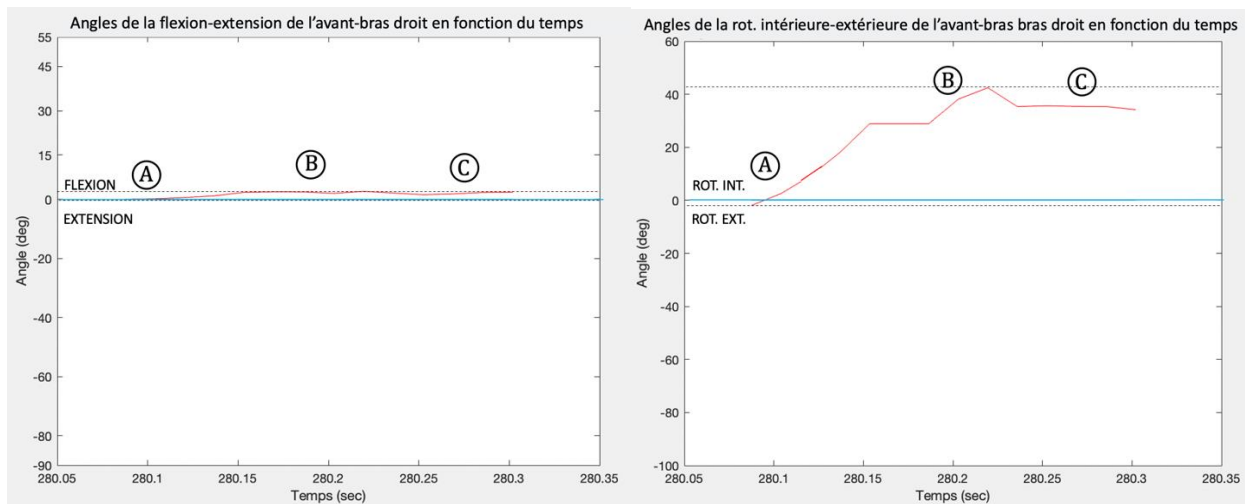


Figure 6.51 – Graphiques représentant le suivi d'angles de la flexion-extension et de l'abduction-adduction du bras droit en fonction du temps du signe [DATE]

Contrairement au signe précédent, nous ne retrouvons pas ici l'influence de l'activation d'un DDL sur un autre. Cela peut être dû au fait que pour ce signe nous avons une rotation intérieure présentant une amplitude diminuée de 20° par rapport à l'amplitude de la rotation extérieure

étudiée au sein du précédent signe. L'impact sur le DDL de la flexion-extension peut alors être réduit.

Ces comparaisons nous permettent donc d'établir que notre méthode donne lieu à une bonne appréciation des mouvements 2D de l'avant-bras, bien que - comme cela été le cas pour le bras - une interaction non systématique entre les DDLs peut parfois se manifester.

Nous concluons plus largement sur ce travail dans la section suivante.

6.2.3. Limites et ouvertures

Les résultats présentés ci-dessus sont le fruit d'une union entre un système de captation, le *Perception Neuron*, et un processus de traitement des données par calculs d'angles segmentaires et articulaires. Nous souhaitons revenir ici sur les avantages et les inconvénients de ces deux entités – matérielle et méthodologique – afin d'envisager au mieux les perspectives de cette association.

6.2.3.1. Retour sur le système de MoCap employé

Malgré les précautions que nous avons prises, les spécificités de la combinaison *Perception Neuron* et de son utilisation nous ont amenés à recueillir trois enregistrements non exploitables. Le premier cas est à imputer à la sensibilité des IMUs au champ magnétique. En dépit de l'attention portée au taux de magnétisme dans les salles d'enregistrements, nous avons été confrontés à un cas de déviation. Cette anomalie n'a pas pu être repérée avant que l'enregistrement ne débute puisque la représentation 3D du participant a d'abord présenté une forme générale cohérente (fig. 6.52 (a)), avant que le torse ne se déplace finalement dans l'espace au fil du temps, indépendamment du reste de l'avatar (fig. 6.52 (b)).

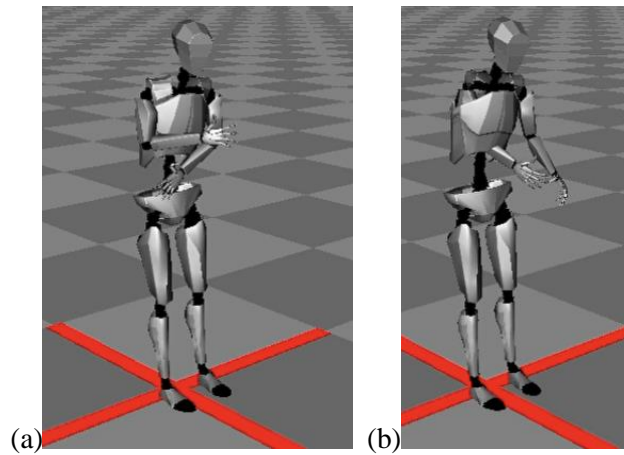


Figure 6.52 – Représentation 3D du participant sur le logiciel *Axis Neuron* en début d’enregistrement (à gauche) et en cours d’enregistrement (à droite), avec déplacement du torse vers l’avant

N’étant pas en mesure d’anticiper le niveau de répercussion que ce type de dysfonctionnement pouvait avoir sur les autres IMUs, nous avons jugé préférable d’écarter les données obtenues par cet enregistrement. L’IMU concernée a pu être isolée afin que ce phénomène ne se reproduise pas.

La détection d’autres enregistrements inexploitable est advenue durant la phase de traitement des données, causée par un changement d’orientation de l’avatar par rapport au système de coordonnées XYZ interne au système. Comme relaté précédemment, nous avons effectivement remarqué que la croix représentant le système de coordonnées dans le logiciel *Axis Neuron* n’était pas placée en dessous de la représentation 3D des participants. Si les différences de translations par rapport à cette dernière ne posent pas de problème pour le traitement des données, ce n’est pas le cas du changement d’orientation. Nous avons cependant observé que dans la majorité des cas le changement d’orientation était de 90° vers la droite, déterminant ainsi un nouveau système de coordonnées qui a été pris en compte. Mais nous avons dû renoncer à trois enregistrements supplémentaires.

Afin que ces déplacements par rapport au système de coordonnées n’adviennent plus, il aurait fallu actionner le bouton « ZERO » situé à gauche de la cartographie des capteurs (fig. 6.53 encadré rouge) avant le début de chaque enregistrement. Cela permet de modifier les coordonnées dans l’espace de la représentation 3D des sujets afin qu’elles soient égales à $[0,0,0]$, avec l’axe Z qui pointe vers l’avant de celle-ci.

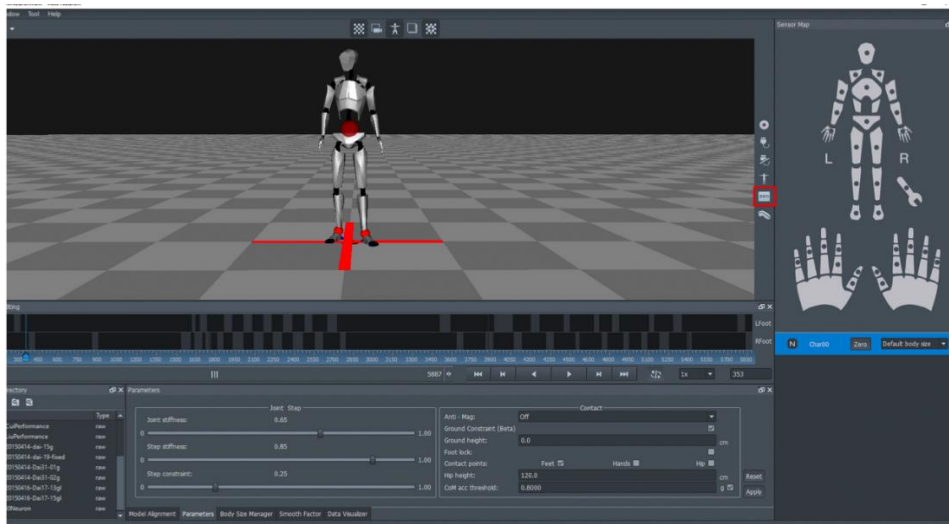


Figure 6.53 – Représentation de la représentation 3D du sujet et de la croix rouge une fois le bouton « ZERO » actionné (Axis Neuron 2019 : 7)

Les difficultés que nous avons rencontrées signalent la rigueur avec laquelle tout enregistrement utilisant un système de MoCap doit être réalisé. Ceci étant dit, nous sommes aujourd’hui pleinement avertis des dispositions à prendre lors de l’utilisation du *Perception Neuron*. Cela nous permet d’envisager de futures exploitations de ce système dans des conditions qui seront optimums.

Ajoutons que les sept enregistrements que nous avons retenus présentent une précision de données considérable ; le système parvient à enregistrer des mouvements de faibles amplitudes comme nous pouvons l’observer avec le signe [CHIC] (fig. 6.54) dont le MOUV est composé d’une succession rapide et peu ample d’une flexion et d’une extension du bras. L’enregistrement a été réalisé en 120Hz (i.e. 120 données recueillies par seconde).

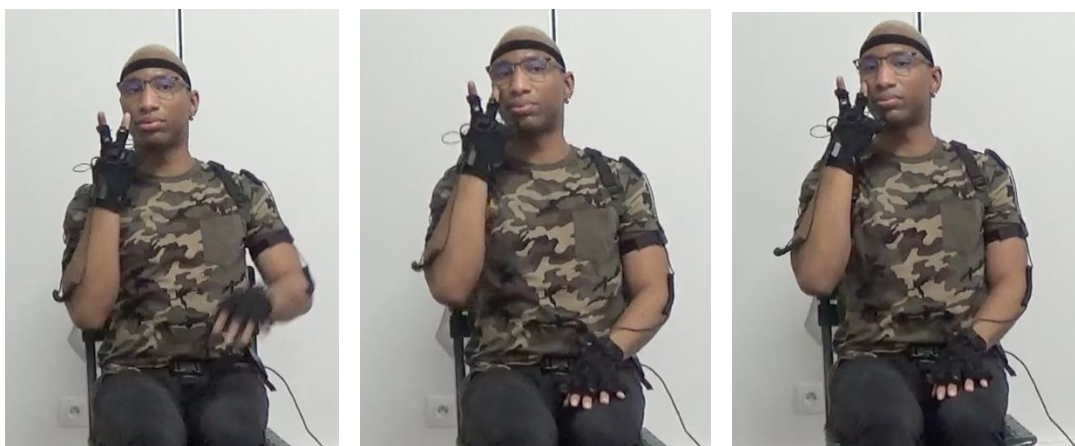


Figure 6.54 – Réalisation du signe [CHIC] (signeur 7-2 signe 25, vidéo [6.13](#))

Le graphique relatif à ce DDL (fig. 6.55 (a)) montre une courbe arquée qui dépeint la présence de la flexion de 177.3 à 177.8 sec ; puis de l'extension qui est réalisée de 177.8 sec à la fin du signe. Il est d'ailleurs possible, en modulant les valeurs en ordonnée des graphiques préalablement fixées, d'obtenir des informations encore plus explicites sur les mouvements de faibles amplitudes (fig. 6.55 (b)).

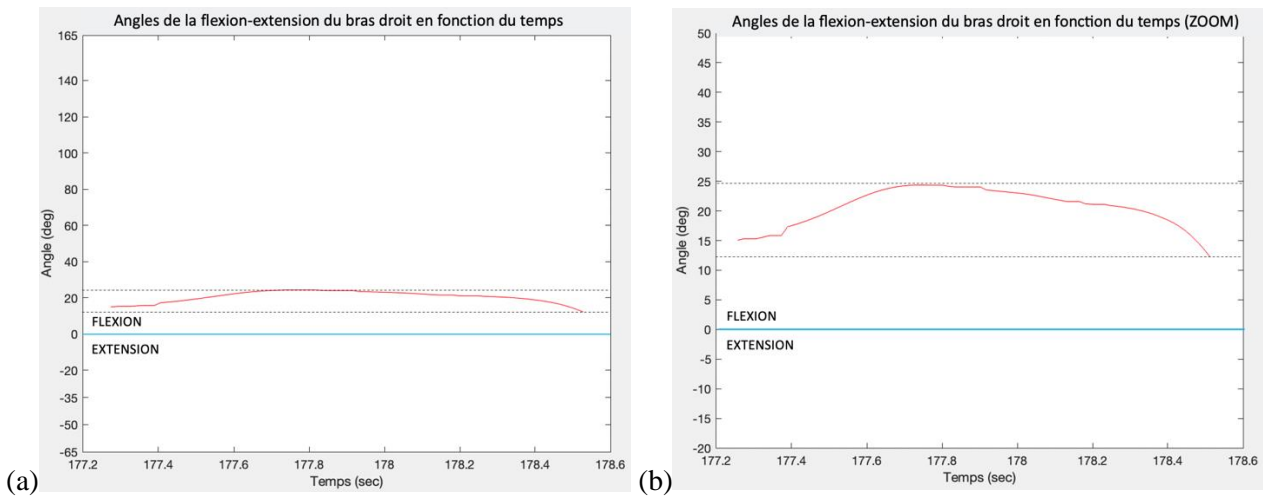


Figure 6.55 – Suivis d'angles de la flexion-extension du bras droit en fonction du temps du signe [CHIC] selon (a) l'amplitude totale du DDL et (b) une amplitude réduite du DDL

Le *Perception Neuron* enregistre aussi précisément les données du poignet, bien que nous n'ayons pas pu les exploiter ici. Pour toutefois en faire la démonstration, recomposons en squelette (fig. 6.57) les données cinématiques du signe [ALORS] (aussi enregistrées en 120 Hz), dont la réalisation présente une légère extension en fin de signe (fig. 6.56).

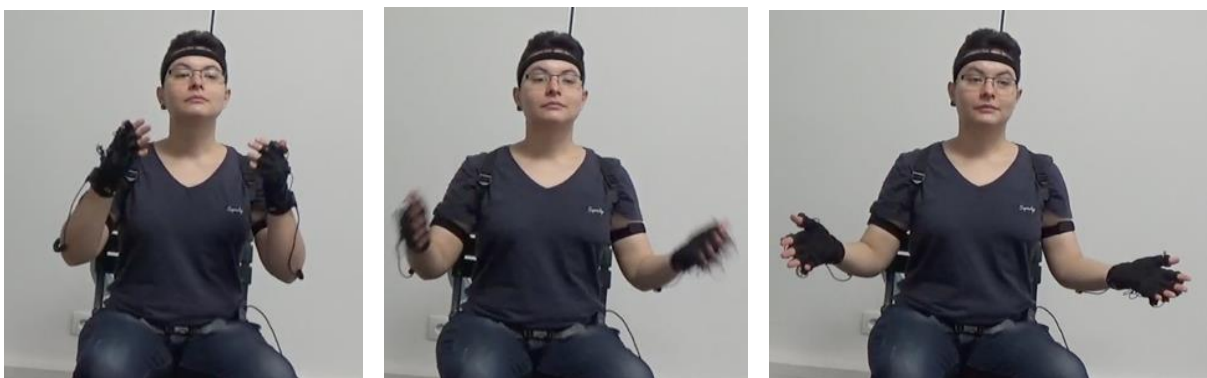


Figure 6.56 – Réalisation du signe [ALORS] (signeur 10 signe 006, vidéo [6.14](#))

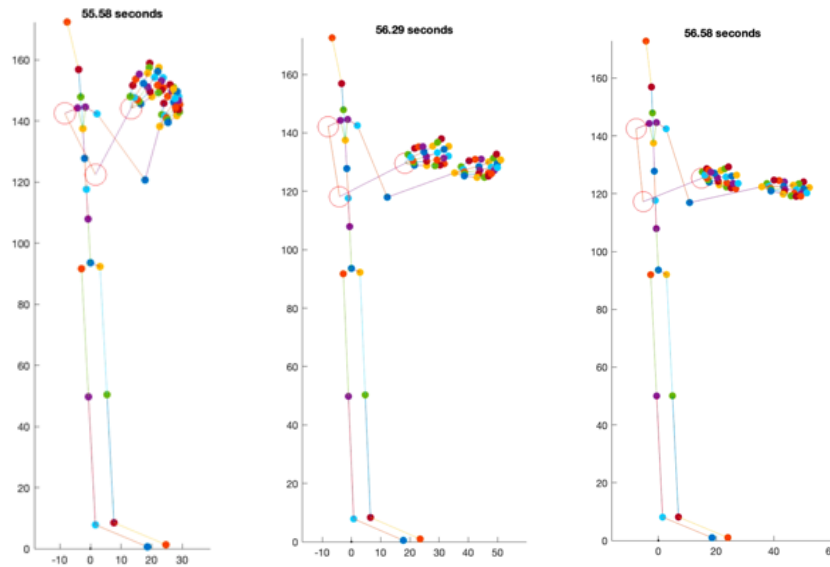


Figure 6.57 – Représentation sous forme de squelette des données cinématiques relatives au signe [ALORS] (vidéo [6.15](#))

Le *Perception Neuron* est donc un système qui est adapté à l’enregistrement du mouvement du membre supérieur dans des temps de captation particulièrement courts de l’ordre de quelques centaines de millisecondes.

6.2.3.2. Retour sur la méthode employée

Venons-en désormais à la méthodologie de traitement basée sur le calcul et la transformation des angles 3D. Cette technique présente des limites évidentes. L’impossibilité de sortir des mesures d’angle concernant les mouvements de la main est due au fait que la référence de coordonnées a été prise sur un repère externe au corps. Les plans de ce segment sont alors dépendants du mouvement des deux segments précédents, et sont trop instables pour permettre de rendre les mesures d’angle exploitables.

Pour que l’analyse du mouvement soit généralisable à l’ensemble du membre supérieur, l’orientation de chaque segment doit être prise en compte dans un système de coordonnées qui lui soit *propre* (i.e. un repère au niveau de l’épaule, un autre au niveau du coude et un dernier au niveau du poignet), avec un positionnement d’un des trois axes qui doit être longitudinal à chacun des segments. Contrairement au système de référence actuellement utilisé, posé en dehors du sujet et donc fixe, les repères de chaque articulation seront mobiles, et s’adapteront à l’ensemble des mouvements réalisés.

Nous pouvons toutefois souligner que nous basons notre travail sur Typannot dont les critères d’exploitation des DDLs leurs sont spécifiques (i.e. position de référence). Nous sommes les

premiers à utiliser ce système de transcription pour l'exploitation d'un corpus vidéo, mais aussi à rechercher un protocole de traitement de données cinématiques qui y soit adapté.

En cela, nous sommes parvenus à générer des graphiques de suivi du mouvement concernant les DDLs du bras et de l'avant-bras qui permettent de synthétiser l'ensemble des informations rassemblées dans nos transcriptions, notamment la valeur de la LOCini (i.e. première donnée qui apparait au sein de la courbe) du DDL concerné, ainsi que les pôles actifs au cours du MOUV.

Ce n'est pas tout. Les résultats que nous avons présentés ont servi à établir le niveau de différenciations possibles entre les DDLs d'un *même* segment, mais nous n'avons pas observé les possibles décalages temporels entre les activations des DDLs de *différents* segments. Réalisons ce test maintenant.

Prenons pour cela le signe [LE TIRER] (fig. 6.58) caractérisé par la présence d'un flux disto-proximal, débutant sur l'avant-bras pour ensuite remonter sur le bras.

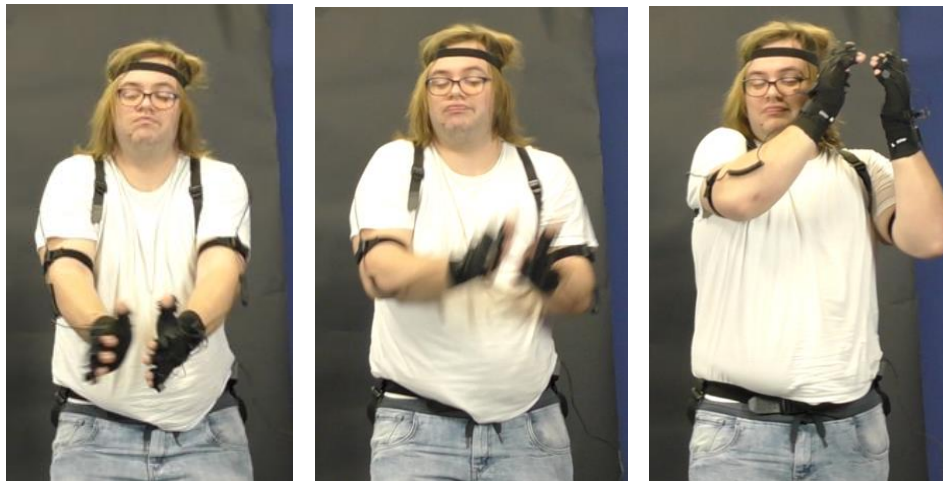


Figure 6.58 – Réalisation du signe [LE TIRER] (signeur 6 signe 288, vidéo [6.16](#))

Les graphiques générés concernent la flexion-extension de l'avant-bras (fig. 6.59 (a)) ainsi que la flexion-extension du bras (fig. 6.59 (a)). La flexion de l'avant-bras, représentée par un rectangle orange, débute dès le début du signe, à 271.29 sec pour se terminer à 271.39 sec ; quant à la flexion du bras, représentée par un rectangle bleu, elle débute à 271.37 ms pour se terminer à 271.61 ms.

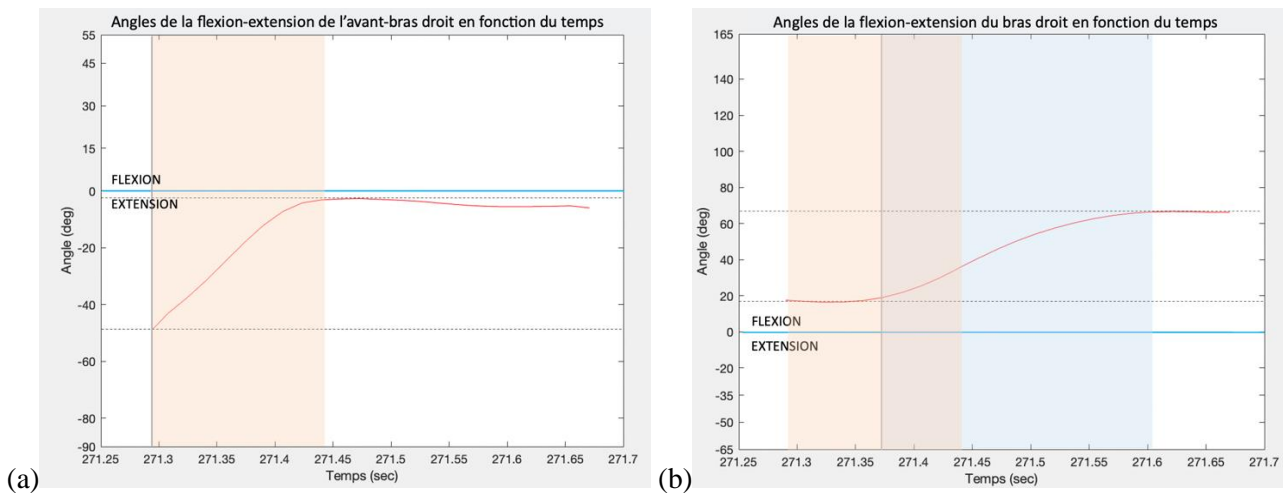


Figure 6.59 – Angles de la flexion-extension de l’avant-bras et de la flexion-extension du bras droit en fonction du temps pour la réalisation du signe [LE TIRER]

Ces graphiques nous permettent de bien observer la présence d’un flux disto-proximal, avec une courte phase de superposition d’activation de ces deux DDLs.

Observons maintenant un signe qui présente un flux proximo-distal, le signe [LUI] (fig. 6.60) produit par un MOUV qui débute sur le bras avant de remonter sur l’avant-bras.

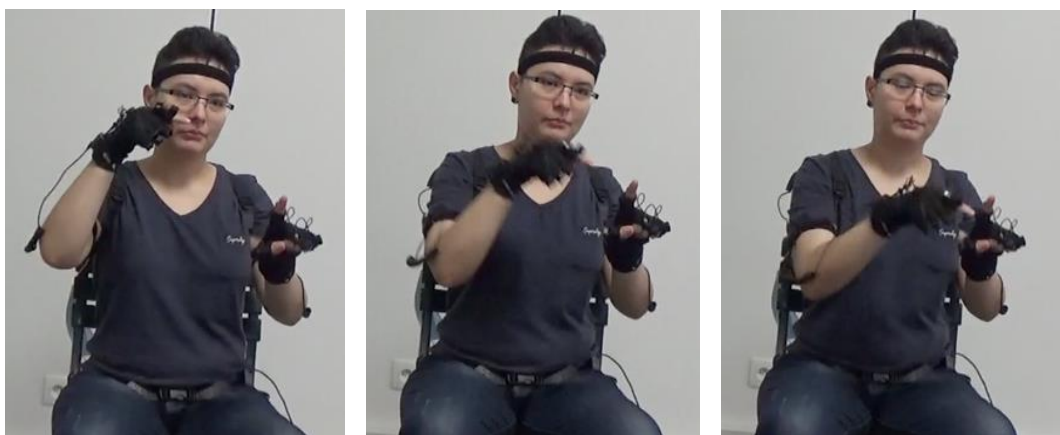


Figure 6.60 – Réalisation du signe [LUI] (signeur 10 signe 018, vidéo [6.17](#))

Les graphiques générés concernent cette fois-ci l’abduction-adduction du bras (fig. 6.61 (a)) ainsi que la flexion-extension de l’avant-bras (fig. 6.61 (a)). Comme précédemment, nous pouvons observer un décalage temporel au sein de ces deux courbes. C’est ici l’adduction du bras – toujours représentée par un rectangle bleu – qui est actionnée en premier lieu, à 72.22 sec. L’extension de l’avant-bras – incarnée par le rectangle orange – s’enclenche quant à elle légèrement plus tard, à partir de 72.4 sec (fig. 6.61 (b)).

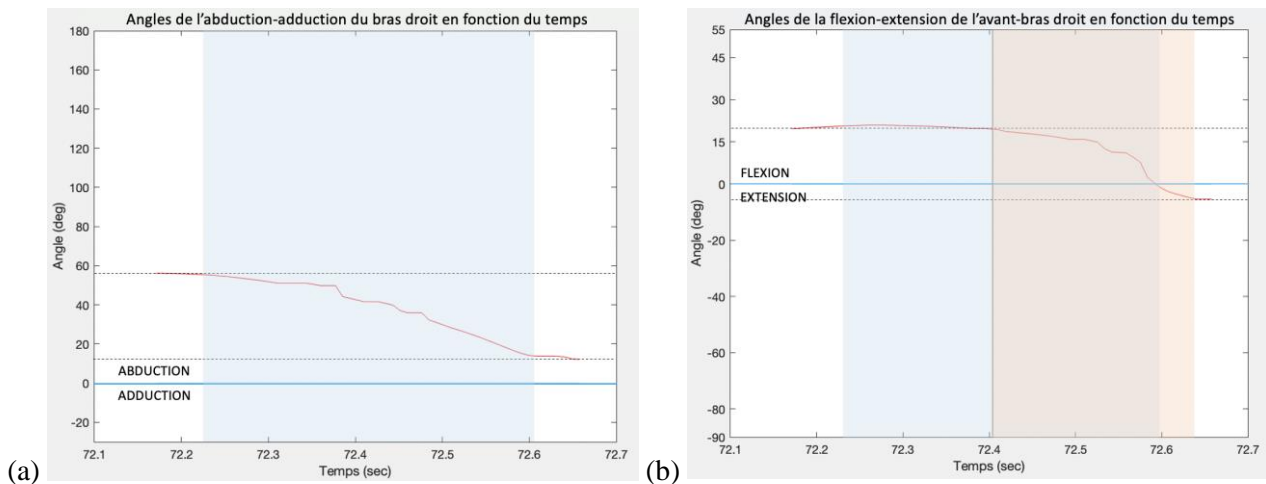


Figure 6.61 – Angles d’abduction-adduction du bras et de la flexion-extension de l’avant-bras droits en fonction du temps pour la réalisation du signe [LUI]

Nous sommes donc en mesure de quantifier le flux, qu’il soit disto-proximal ou proximo-distal, à partir de données enregistrées en 60 Hz (i.e. signe [LE TIRER]) ou en 120 Hz (i.e. signe [LUI]). Une recherche orientée vers l’automatisation de ce type de caractéristiques peut être particulièrement pertinente pour repérer mais aussi quantifier avec précision le flux, déjà mis en lien avec des propriétés sémantiques telles que la perfectivité et la télélicité (§3.3.3.2).

Nous pouvons donc conclure que notre méthodologie d’exploitation relève d’un travail concluant et préliminaire qui permet de nous insérer dans un programme plus vaste établi par Goldin-Meadow & Brentari (2017), qui considèrent les systèmes de MoCap comme étant les nouveaux moyens d’enregistrements nécessaires à l’étude des réalisations gestuelles.

6.3. Pour une kinésio-linguistique

La modalité visuo-spatiale communément utilisée pour l’analyse des signes rend compte d’une construction de la langue motivée par son lien avec la culture dans laquelle elle se déploie, et par des principes théoriques méthodologiques hérités de la linguistique des LV. Cette approche, féconde en bien des domaines, connaît toutefois une limite à laquelle nous nous confrontons dans ce travail : elle fait l’impasse sur les constructions basées sur l’organisation corporelle. Il faut interroger le corps afin de prendre en compte son rôle dans la structuration qui sous-tend les formes observables productrices de signes, et donc de sens. Pour Stokoe (1991), qui fut pourtant le père de la linguistique des LS, cette mise en correspondance ne peut se faire sans déconstruire les principes phonologiques qui se sont développés au cours du XX^e siècle.

6.3.1.1. Inconstance phonologique

En 1955, Stokoe est nommé professeur de littérature anglaise à l'Université de Gallaudet, institution destinée aux sourds et aux malentendants, mais dans laquelle les cours sont dispensés en anglais. En ces années-là, l'ASL, qui est pratiquée par bon nombre d'étudiants de Gallaudet, est dévalorisée, considérée comme un succédané informel des LV. Pourtant, l'expérience de Stokoe en tant qu'enseignant lui permet de se rendre compte que cette langue, pratiquée par ses étudiants, est bien plus qu'une façon de traduire tant bien que mal les leçons reçues en classe. Elle se révèle être un mode d'accès autonome et efficace au savoir le plus complexe.

“Moreover, in my own work (lectures, small classes, and twenty-five or thirty tutorial sessions a week), I soon discovered that sign language was my students' first language, the language in which they understood things possibly obscure in English. For instance, a point missed in a text suddenly became clear to the student-eureka!-when translated into sign language.” (Stokoe 1991 : éditorial)

« De plus, dans mon propre travail (cours magistraux, petites classes et vingt-cinq ou trente séances de tutorat par semaine), j'ai rapidement découvert que la langue des signes était la première langue de mes étudiants, la langue dans laquelle ils comprenaient des choses peut-être obscures en anglais. Par exemple, un point manqué dans un texte devenait soudainement clair pour l'étudiant - eureka ! - lorsqu'il était traduit en langue des signes. » (Traduction personnelle, Stokoe 1991 : éditorial)

Afin de faciliter leur apprentissage, Stokoe souhaite alors créer des ressources pédagogiques permettant aux étudiants de faire le pont entre l'anglais et l'ASL, et s'applique à confectionner un dictionnaire dans lequel les signes sont classés selon un ordre qui n'est pas celui alphabétique des gloses anglaises. Cela permettra de libérer ses utilisateurs d'une connaissance préalable de ces dernières.

Reste à créer un système de notation des LS, et l'exercice n'est pas simple : il faut contraindre la quadridimensionnalité de l'espace-temps impliquée par la LS à la surface bidimensionnelle des pages du dictionnaire tout en décomposant les signes en composantes unitaires requêtables. L'enseignant y parvient, son travail aboutissant en 1960 à la *Stokoe Notation*, et en 1965 à la parution du dictionnaire.

Un signe est dès lors un assemblage d'*aspects* (i.e. paramètres), auxquels sont associés des symboles graphiques. Mais ce n'est pas tout. Ce découpage paramétrique est aussi utilisé par l'auteur pour créer le premier système *chérologique* (i.e. phonologique) dédié à une LS. En établissant le rapport entre « paramètre » et « phonème », Stokoe (1960) dévoile la superposition structurelle existant entre LS et LV. Les phonèmes – ici paramètres – se combinent pour former des morphèmes – ici signes – qui à leur tour forment des constructions phrasiques. Si l'ASL est doublement articulée, il s'agit bien, alors, d'une langue. Dépassant son

entreprise première, mais atteignant son ambition de faire reconnaître l'ASL comme étant plus élaborée que de simples gesticulations, le travail de Stokoe (1960) fait entrer les LS dans la sphère sélective de la linguistique.

À partir de ce moment, les études des LS font systématiquement référence à Stokoe (1960), s'inspirant et complétant le travail engagé. Des propositions de structures phonologiques segmentales sont faites comme celles de Liddell & Johnson (1989, 2011) ou de Sandler (1989), qui reposent sur le découpage paramétrique de Stokoe. Ces paramètres, initialement au nombre de trois (configuration, emplacement et mouvement), augmentent avec l'ajout de l'orientation de la paume de la main (Stokoe 1965), de spécifications concernant les expressions du visage, du regard ou encore des mouvements du buste ou de la tête (Sallandre 2020). Toujours dans cette intention d'améliorer la précision de description des signes, Klima et Bellugi (1979) définissent par ailleurs des zones de contact que la main dominante peut avoir avec le corps (front, épaule, main dominé...).

Néanmoins, tout cela ne fait pas consensus. En fait, la pertinence concernant la double articulation est remise en cause (Cuxac 2000) et les divisions paramétriques posent des questions de définition (Boutora 2008). Pour que les unités paramétriques puissent être l'équivalent des phonèmes, il faudrait que ces derniers soient dépourvus de sens, or ce n'est pas le cas. Par exemple, les signes qui sont réalisés sur la ou les tempes, comme [INTELLIGENT], [CULTURE] ou [SAVOIR], ont trait à la cognition ; ceux ayant une configuration dont l'index seul et étendu figurent des objets qui sont longs et fins, comme [STYLO]. L'expression du sens n'attend donc pas que tous les paramètres soient réunis, mais advient en chacun d'eux.

Plusieurs théories émergent alors. Pour Millet, les paramètres sont assimilables aux phonèmes ; ces derniers, en tant qu'Unités Linguistiques Intermédiaires, peuvent être motivés et porteurs de sens (Millet 1998). Cuxac, qui réfute les modèles paramétriques affirmant qu'il n'est pas pertinent de décomposer la LSF à un niveau inférieur à celui des signes, prône la théorie de l'iconicité (Cuxac 2000). À travers l'ensemble des propositions théoriques, celle de Stokoe datant de 1991 ne fait pas grand bruit.

Dans son article de 1991, l'auteur est radical : la phonologie des LS telle qu'elle s'est développée au cours du XXe siècle, fait fausse route. Pour Stokoe, il faut faire marche arrière et mettre fin au morcelage arbitraire des signes.

“...no features, no autosegments, no orientation, no contacting or contacted parts, no HOLDS, no MOVEs, no tiers, no tears-just something acting (limb or limbs, head, face, whatever) along with its action.” (Stokoe 1991 : 111)

« ...pas de caractéristiques, pas d'autosegments, pas d'orientation, pas de parties en contact ou contactées, pas de HOLDS, pas de MOVEs, pas de tiers, pas de pleurs - juste quelque chose qui agit (membre ou membres, tête, visage, peu importe) en même temps que son action. » (Traduction personnelle, Stokoe 1991 : 111)

Nous l'avons rapidement présenté en §1.1.3.3, pour Stokoe, un signe est une association agent-verbe.

L'agent, ce qui agit, peut être n'importe quel articulateur du corps, bras et avant-bras compris. L'auteur met alors un arrêt à la monocentration de la main, pour remettre les membres supérieurs, « [c]eux que les signes utilisent et ont toujours utilisé¹⁰³ » (Stokoe 1991 : 109), au cœur de l'analyse.

Le verbe est quant à lui l'action réalisée par cet agent et cette action doit être décrite selon les termes ordinairement attribués au mouvement humain. Stokoe fait ici référence aux DDLs des segments.

Si prendre le corps dans sa globalité semble compliquer la tâche déjà ardue de la description phonologique, pour l'auteur, elle est en fait facilitée. L'orientation n'est plus nécessaire, et c'est aussi le cas de la spécification de la région contactée par l'agent. Stokoe prend l'exemple du signe tiré de l'ASL [STUPID] qui se réalise avec le poing fermé en contact répété avec le front (fig. 1.22). Si la description articulaire de la *position* et du *mouvement* du bras, de l'avant-bras et de la main est faite, il n'y a aucune ambiguïté possible sur ce que la main peut, ou non, toucher. Elle se retrouve à un endroit précis de l'espace qui ne peut être autre que celui permettant à la main, par un mouvement de flexion de l'avant-bras, d'atteindre le front. Pour que la description soit complète, il n'est donc pas nécessaire d'ajouter l'information « front » qui devait permettre de situer la main « volante » dans l'espace. Non seulement cela libère d'une spécification redondante des zones de contact, mais cela affranchit aussi d'une spécification qui est sémantiquement peu à propos : pour Stokoe (1991), le sens d'un signe qui présente un contact peut être complet même si ce dit contact n'est pas réalisé. Ce serait le cas du signe ASL [STUPID], pour lequel le sens n'apparaîtrait pas une fois que le poing a touché le front, mais dès le début de l'engagement du mouvement du poing en direction de celui-ci.

Une description unifiée du membre supérieure permet donc de faciliter la description, mais aussi de s'approcher du lien entre la forme corporelle et la construction du sens.

Mais alors, pourquoi avoir débuté l'analyse phonologique sur un découpage paramétrique ?

¹⁰³ "Those are what signing uses and always has used." (Stokoe 1991 : 109)

Parce que la création du système *phonologique* s'est basée sur la mise en place d'un système de *notation*. La phonologie porte donc le poids des contraintes qui sont inhérentes à ce dernier (i.e. découpage en unités graphiques bidimensionnelles et requêtables).

Nous n'affirmons pas ici que les deux systèmes ne présentent aucun parallélisme de structuration, mais il nous semble intéressant de soulever deux points :

- Le fait que la phonologie ait trouvé son origine dans des paramètres à buts scripturaux participe peut-être à l'oscillation terminologique et théorique qu'elle connaît aujourd'hui encore.
- Le fait que la surexploitation du découpage paramétrique et la focalisation sur la main aient augmenté la fragmentation corporelle, éloignant les possibilités de saisir le corps dans sa motricité globale et de comprendre son rôle dans la formation du sens.

Les principes de la phonologie-sémantique (Stokoe 1991), comme ceux de l'approche kinésiologique (Boutet 2000, 2008), proposent des alternatives convaincantes à cette réalité.

6.3.1.2. Synergie et sémantique

Pour Stokoe (1991), la description phonologique et la sémantique sont intrinsèquement liées. L'image qu'il utilise pour faire comprendre cette intrication est celle du ruban de Möbius. Ce ruban, une fois en torsion, ne présente qu'une seule face ; c'est cette unique face qui accueille à la fois la phonologie et la sémantique (fig. 6.62).

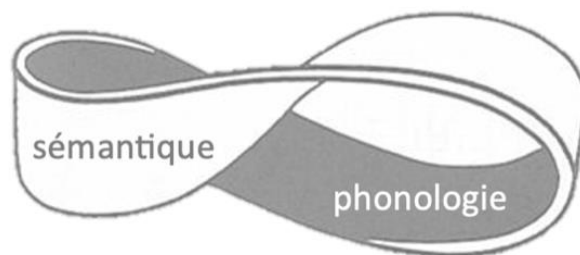


Figure 6.62 – Ruban de Möbius comme métaphore du lien qui unit phonologie et sémantique utilisée par Stokoe (1991)

Le signe renferme donc des qualités *formelles* qui sont *sémantiques* et vice versa. Le signe est forme et sens, d'un seul tenant. Cependant, ce n'est qu'en prenant en compte *la globalité* des actions motrices que le lien entre forme et sens peut être saisi. Tout découpage ne reposant pas sur le fonctionnement du corps ne peut rendre compte de cette réalité : si la réalité corporelle est morcelée, alors le sens l'est tout autant.

Comme Stokoe (1991), Boutet (2000, 2008) s'intéresse au lien existant entre les actes moteurs du corps et leur sens. Les travaux de cet auteur se sont principalement concentrés sur l'alliage entre le flux de propagation du mouvement et les catégories sémantiques liées à deux types de gestes : la négation épistémique et le geste de présentation (§1.3.2.3). Aucune donnée formelle ne sépare *a priori* ces gestes « manuels ». Pourtant, une fois le flux de propagation du mouvement le long du membre supérieur prit en compte, la distinction apparaît. Pour l'un le flux est disto-proximal, et pour l'autre il est proximo-distal. C'est ici l'encours interne des mouvements, la manière dont les segments s'organisent, qui produit du sens.

Nous pourrions nous demander si cette intrication forme/sens peut être enrichie par ce que nous avons appelé « synergie » tout au long de ce travail.

Autrement dit, nous nous demandons si, au de-là de la question de l'économie structurelle des LS, le fait qu'un signe soit composé de groupements de DDLs synergiques ou non a un impact sur la structuration du sens qu'il déploie. Explorons d'abord un signe dont les DDLs activés présentent un lien synergique (fig. 6.63).



Figure 6.63 – Réalisation du signe [JAMAIS] (signeur 9 signe 168, vidéo [6.18](#))

Dans cette réalisation du signe [JAMAIS], le bras effectue une forte abduction accompagnée d'une rotation extérieure de l'avant-bras. De cette observation, nous pourrions partir du principe que ces deux DDLs sont nécessaires à la formation du sens [JAMAIS]. Or il existe aussi des occurrences de ce même signe au sein desquelles seule la rotation est activée (fig. 6.64).

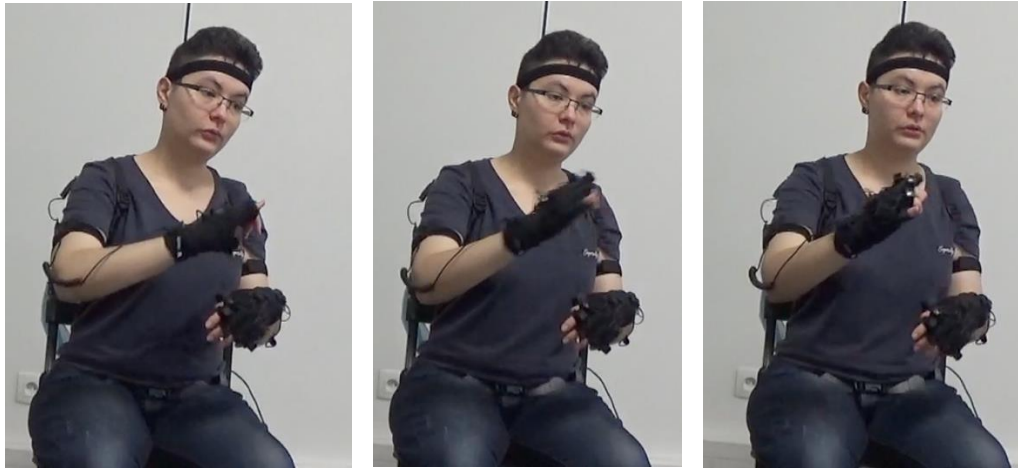


Figure 6.64 – Réalisation du signe [JAMAIS] (signeur 10 signe 183, vidéo [6.19](#))

Le sens serait alors transmis par la rotation extérieure, seul DDL commun à ces deux types de réalisation. L’abduction du bras aurait ici une fonction prosodique.

En réalité, ce n’est toujours pas exact : si la LOCini le permet (i.e. présence d’une légère rotation interne de l’avant-bras), il est possible de n’activer que l’abduction du bras, sans rotation extérieure (vidéo [6.20](#)), et de retrouver le sens du signe [JAMAIS]. Plus que cela, il serait possible de transmettre ce même sens par le seul intermédiaire d’une adduction de la main (vidéo [6.21](#)).

L’explication se situe dans le fait que tout mouvement synergique à la rotation extérieure (présente dans la forme de citation du signe) a la capacité de porter à lui seul le sens du signe. Nous pouvons faire la même démonstration pour le signe [GAGNER]. La fig. 6.65 présente un groupement de DDLs synergiques entre le bras, l’avant-bras et la main. Le premier réalise une adduction, le second une rotation intérieure et le troisième une flexion.

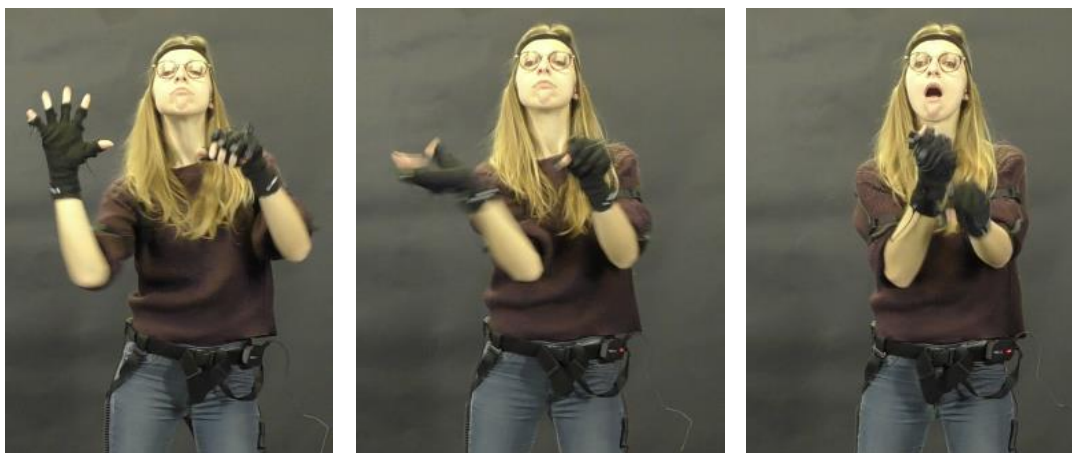


Figure 6.65 – Réalisation du signe [GAGNER] (signeur 5 signe 264, vidéo [6.22](#))

Une fois de plus, il est possible de transmettre le sens de [GAGNER] avec l'adduction seule (vidéo [6.23](#)), la rotation intérieure seule (vidéo [6.24](#)) ou la flexion de la main seule (vidéo [6.25](#)). Pour ces deux MOUV, si tous les DDLs sont activés, cela aura un impact sur l'amplitude et donc la prosodie du signe : les DDLs synergiques permettent donc de prolonger la forme du signe, et de moduler le sens sans pour autant le modifier.

Qu'en est-il des groupements non synergiques ?

Prenons le cas de la fig. 6.66 représentant le signe [REEMPLIR LE FORMULAIRE]. Nous y observons des mouvements légers de rotation intérieure-extérieure ainsi qu'une extension du bras.



Figure 6.66 – Réalisation du signe [REEMPLIR LE FORMULAIRE] (signeur 4 signe 173, vidéo [6.26](#))

Les rotations expriment le mouvement de rédaction et l'extension sert à signaler que cet acte concerne l'ensemble du formulaire, complété de haut en bas. Ces activations de DDLs, qui ne présentent pas de liens synergiques, remplissent alors un *rôle actif* de formation du sens.

À l'inverse de ce que nous avons vu précédemment, si l'un des deux n'est pas réalisé, le sens n'est pas complet.

Prenons un dernier exemple, celui de la réalisation du signe [RICHE] (fig. 6.67) pour lequel le bras réalise une flexion et l'avant-bras, une extension.

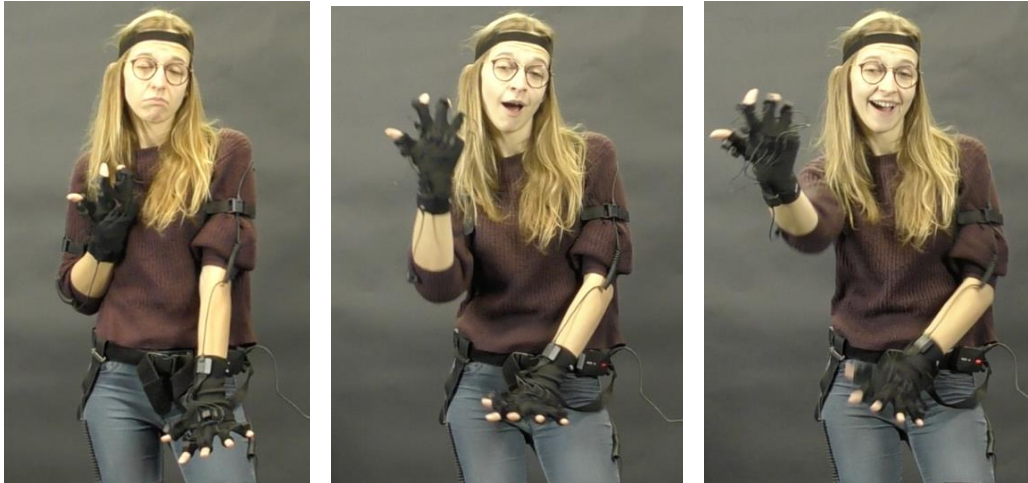


Figure 6.67 – Réalisation du signe [RICHE] (signeur 5 signe 052, vidéo [1.11](#))

Nous sommes dans une configuration similaire avec une activation conjointe de deux DDLs non synergiques. Pourtant, au sein du signe précédent, il y avait une intrication de deux notions (i.e. écrire et remplir l'ensemble d'un formulaire) pouvant expliquer le besoin de deux mouvements distincts. Ici, ce n'est pas le cas. Voyons quelle serait donc la raison de la présence de ces deux activations.

Si l'amplitude de celle-ci n'est pas trop marquée, il serait possible de réaliser le signe [RICHE] avec une simple extension de l'avant-bras (vidéo [6.27](#)). Or, dans l'exemple donné ci-dessus, l'amplitude de l'extension est belle et bien forte, arrivant pratiquement à la butée articulaire. Si nous gardons le même niveau d'amplitude utilisé par la signeuse 4 - et donc le même niveau d'emphase - l'extension seule ne suffit plus : le sens est perdu (vidéo [6.28](#)) puisque le MOUV n'est plus une droite perpendiculaire au torse du signeur, mais un arc, orienté vers le sol. La flexion du bras est donc ici nécessaire pour *contrebalancer* l'extension marquée de l'avant-bras et produire un MOUV porteur du sens [RICHE] (vidéo [6.29](#)).

Les groupements non synergiques sont donc nécessaires pour associer des portions de sens (i.e. [REEMPLIR LE FORMULAIRE]) ou permettre à ce sens d'être formé malgré des modulations d'amplitude (i.e. [RICHE]). Ils sont alors, chacun, nécessaires au déploiement des signes.

Si ce type de distinctions permet de réinterroger le déploiement et la manifestation prosodique et sémantique au sein du mouvement, cela pourrait aussi servir, par exemple, à une distinction des indices concernant les informations qu'un système de notation des LS doit être en mesure de noter. Dans le cas d'un mouvement pluri-segmental :

- au sein d'un groupement synergique, si un seul des DDLs actifs est noté, les autres peuvent en être déduits ;

- au sein d'un groupement non synergique, tous les DDLs actifs doivent être notés, sans quoi une partie du sens ou le sens complet n'est pas notifié.

Aussi brève soit-elle, cette présentation permet de pointer du doigt les possibilités qu'offre une analyse biomécanique et kinésiologique des signes. Elle laisse alors présager l'intérêt présenté par l'émergence d'une kinésio-linguistique, dont les principes peuvent reposer sur les technologies évolutives de la MoCap, pour une compréhension étendue de la réalité des langues, qu'elles soient vocales ou signées.

BILAN DU CHAPITRE 6

Les résultats issus du traitement des transcriptions réalisées sous ELAN nous ont permis de vérifier trois des quatre hypothèses que nous avons formulées, et de spécifier formellement le rôle de la LOCini et du MOUV dans la simplification motrice de la forme des signes.

La forte contingence de profils des LOCini au sein de chaque production signée, associée au fait que les variations articulaires ne touchent majoritairement qu'un unique segment au cours d'un MOUV a mis en évidence le processus d'adaptation et d'anticipation à l'œuvre entre ces deux paramètres. Cette anticipation est aussi présente au sein des signes pluri-segmentaux puisque la formation des groupements de DDLs synergiques repose dans les deux tiers des cas sur la LOCini de la prono-supination. Cette coopération paramétrique n'a pas pour but unique de simplifier la forme du signe, mais aussi de rendre son déploiement économique pour le corps. Il s'agit là d'une différence notable : si la notion de *simplification motrice* se base sur le nombre de segments impliqué, celle d'*économie structurelle* est contenue dans la nature même des DDLs engagés dans le MOUV.

Au-delà des conclusions théoriques que notre recherche propose, nous avons cherché à mettre en corrélation nos descriptions formelles de la LOCini et du MOUV avec les données 3D enregistrées par le système de MoCap utilisé. Pour cela nous avons mis en place une technique de calcul des angles 3D entre deux vecteurs. Ce travail exploratoire nous a permis d'obtenir des graphiques de suivi du mouvement des DDLs du bras et de l'avant-bras et de franchir un premier pas permettant d'identifier le flux de propagation du mouvement à travers ces deux mêmes segments. Cette modélisation des caractéristiques internes du mouvement, mais aussi la formalisation des liens synergiques entre les DDLs, place ce travail de recherche dans une perspective plus large, celle d'une kinésio-linguistique dont le socle est formé par les organisations formelles et sémantiques du corps.

CONCLUSION

La linguistique appliquée aux LS s'est construite sur une division bipartite du paramètre du mouvement : il existe des mouvements *locaux* prenant principalement naissance au niveau des articulations des doigts et du poignet, et des mouvements à *trajectoire*, qui se déploient majoritairement à partir des articulations proximales telles que l'épaule ou le coude. La profusion des études concernant ces trajectoires manifeste l'empan considérable des phénomènes linguistiques qui s'y déploient. La *direction* de la trajectoire génère, par exemple, des informations concernant les fonctions sémantiques d'un signe. Si le contexte discursif est préalablement connu, l'observation de la direction du mouvement dans l'espace donne effectivement des indications précises concernant la flexion des verbes directionnels produits (Millet 2019). Wilbur (1987) s'est penchée sur l'exploration de traits suprasegmentaux déployés au sein des trajectoires, et postule que ce sont les indices de *vitesse*, de *durée* et d'*amplitude* qui participent directement au développement prosodique des signes. Ces mêmes caractéristiques de débit permettent également de distinguer et de catégoriser des phénomènes sémantiques telles que la télicité (Wilbur & Malaia 2008). L'*itération* de la trajectoire peut être un marqueur du pluriel ou être l'empreinte d'un processus de nominalisation des verbes (Supalla & Newport 1975, Brentari 1998). Enfin, la *forme* de la trajectoire est le canal privilégié de l'iconicité, permettant d'imiter une réalité observable ou métaphorique (Millet 2019).

La direction, l'amplitude, la vitesse, l'itération, la forme – et d'autres encore – sont autant de caractéristiques du mouvement linguistiquement pertinentes, qui montrent la place centrale de ce paramètre dans le déploiement sémiotique des signes. Pourtant, aujourd'hui encore, il s'agit du paramètre qui « pose le plus de problèmes à la description » (Millet 2019 : 71). Une question émerge alors : quelles sont les informations nouvelles ou complémentaires auxquelles ces problèmes descriptifs nous empêchent d'accéder ? Avant d'apporter quelques éléments de réponse, il est nécessaire de comprendre les *raisons* de cette difficulté d'appréhension du mouvement.

A priori, cela est dû au fait que le mouvement produit par notre système musculosquelettique est incontestablement variable. Cette variabilité peut être expérimentée au quotidien par tout en chacun : une action comme celle d'allumer une source lumineuse peut être réalisée en tendant l'index jusqu'à ce qu'il atteigne l'interrupteur ; mais elle peut aussi être exécutée en tendant un

quelconque doigt ; ou alors en utilisant le coude, le front, voire le pied si les mains sont chargées. Bien dirigés, nos articulateurs nous permettent de réaliser des tâches selon une infinité de possibilités. Cette variabilité transparait aussi lorsque ce sont les *mêmes* segments qui sont mis à l'œuvre pour réaliser plusieurs fois une même tâche. Elle touche alors à l'amplitude, aux angles de rotations ou encore à la vitesse d'exécution du mouvement. Ce type de variabilité comportementale n'est d'ailleurs pas une tendance, mais une règle (Bernstein 1967).

Cependant, notre système musculo-squelettique possède une deuxième caractéristique. Celle-ci est moins perceptible parce que profondément ancrée dans nos habitudes motrices. Il s'agit de l'auto-organisation (Turvey 1990). Les approches dynamiques du contrôle moteur nous apprennent que cette particularité découle pleinement de la première : c'est *parce que* le corps a une grande liberté de mouvement – rendue possible par des centaines de muscles et d'articulations – qu'il a mis en place des techniques lui permettant de rendre le système contrôlable. Ces agencements auto-organisés des segments émergent de contraintes intra et extra-corporelles (Newell 1986) et régulent les groupements musculaires afin de réduire le nombre de degrés de liberté (DDLs) nécessaires au bon déroulé d'une action. C'est donc en cherchant à réaliser un geste de la manière la plus adaptée que se manifeste une coordination *économique* du mouvement.

Les productions signées étant des manifestations du système musculo-squelettique, elles sont entièrement soumises à la variabilité du mouvement. Un signe réalisé par différentes personnes – ou plusieurs fois par la même personne – n'est jamais identique. Parmi les paramètres manuels, le mouvement est celui qui est d'ailleurs celui qui est le plus modulable. Cette versatilité peut être due à différents contextes sémantiques, à diverses coarticulations ou simplement à la variabilité que nous venons d'évoquer. Si elle reflète la richesse des communications en LS, elle participe aussi sans nul doute à la difficile appréhension du paramètre du mouvement.

Et qu'en est-il de la deuxième caractéristique que nous avons évoquée, celle de l'auto-organisation ? Puisqu'il s'agit d'une propriété qui touche à l'organisation d'un ensemble de segments, il faudrait – pour la repérer – être en mesure d'étudier les segments qui composent le membre supérieur, membre effecteur des productions signées. Mais, malgré quelques critiques (Crasborn 1972, Stokoe 1991), l'unique entité sémantique habituellement retenue est la main. Détachée de l'avant-bras et du bras, la main se meut depuis et vers un nombre infini

d'emplacements et trace une multitude de trajectoires sans qu'aucune organisation collective ne puisse être relevée.

L'approche de Boutet (2000, 2008, 2018) se détache de cette pratique. Ce dernier propose une phonologie articulaire fondée sur les notions de biomécaniques. Cette approche kinésiologique cherche à être au plus près des gestes et à donner la possibilité de rendre compte du mouvement de chacun des segments du membre supérieur selon sa dynamique propre et les liens qu'ils entretiennent entre eux. Tout cela nécessite un repérage avec un référentiel articulaire dont l'unité est le DDL. L'analyse proposée est à la fois « intrinsèque » puisqu'elle se base sur les possibilités articulaires d'un segment, et « multiple » puisqu'elle prend en compte l'ensemble des segments d'un même membre.

En récupérant son contexte corporel, la main se trouve de nouveau soumise aux contraintes anatomiques qui sont les siennes et auxquelles elle ne peut échapper. Pour celle-ci, comme pour le bras et l'avant-bras, aucune variation articulaire – et donc aucun mouvement – n'est possible en dehors des DDLs. Cependant, la prise en compte d'un mouvement prenant naissance dans un membre composé de trois entités contiguës n'est pas sans conséquence. Par exemple, la mise en mouvement d'un DDL peut provoquer une diminution d'amplitude d'un autre DDL (i.e. plus la flexion de l'avant-bras est marquée, plus l'amplitude de la rotation-intérieure extérieure est faible), voire engendrer sa disparition (i.e. en extension forte de la main, la pronation-supination et l'abduction-adduction de ce segment se confondent). Ou à l'inverse, l'action consécutive de deux DDLs peut déclencher la mise en mouvement automatique et involontaire d'un troisième DDL, comme le pseudo-paradoxe de Codman le révèle (Codman 1934).

Ce type d'approche semble alors aggraver la difficulté de traitement du paramètre du mouvement. Pourtant, ce n'est pas le cas. Ou plus précisément, nous n'avons plus à faire ici au *même* paramètre. Le fait de considérer le membre supérieur selon un cadre de référence intrinsèque et multiple provoque effectivement un changement de paradigme important. Ce n'est plus la *trajectoire* de la main, mais les *modifications articulaires* ayant permis de la réaliser qui sont étudiées. Cela nous permet alors de discerner les types d'interactions possibles entre les éléments qui constituent le mouvement et d'interroger le processus gestuel de création des formes. Les soubassements pour la mise en œuvre d'un pont entre l'étude du mouvement en linguistique et les théories dynamiques de la motricité sont alors créés. Afin de poursuivre ce travail initié par Boutet et permettre à ce rapprochement d'aboutir, nous sommes partis du

postulat général suivant : dans les productions en LSF, l'interaction entre la localisation initiale (LOCini) et le mouvement (MOUV) engendre une simplification motrice de la forme des signes.

De la mise en place de ce postulat a découlé un double exercice de réflexions théoriques et appliquées : nous avons constitué un ensemble d'hypothèses permettant d'obtenir des données quantifiables, et mis en place un protocole de recueil et de traitement de productions en LSF adapté aux hypothèses nouvellement établies.

Revenons d'abord sur les caractéristiques principales de ce corpus. Il s'agit d'un corpus hybride, enregistré par vidéo et par capture de mouvement (MoCap). Si seul le versant vidéo a servi à traiter nos hypothèses, il nous semblait primordial d'ouvrir les utilisations de ce corpus immédiates ou futures.

Nous avons collecté les productions de dix signeurs, six femmes et quatre hommes. Les protocoles qui leur ont été proposés sont divers, comprenant des tâches narratives, descriptives, procédurales et dialogiques. Un ensemble de 2977 signes a ainsi été collecté.

Le premier traitement du corpus vidéo a été réalisé sur le logiciel ELAN. Nous avons commencé par un travail de segmentation des données permettant de distinguer la phase de préparation de la phase signifiante des productions sémiotiques. Puis nous avons glosé et labellisé chacun des signes repérés. Une transcription réalisée avec le système Typannot et centrée sur les deux paramètres concernés par notre postulat a ensuite été effectuée sur 1573 signes. Il s'agit de la première application de ce système de transcription – qui est encore en cours de développement – à une recherche appliquée. Son utilisation nous a permis de recueillir des données hautement requêtables, qui ont été exportées et traitées via des scripts Python afin d'obtenir des résultats quantitatifs exploitables.

Les deux premières hypothèses concernent indépendamment chacun de nos paramètres. La première pose une contingence de profils des LOCini au sein de chaque production signée. La deuxième suppose que des variations articulaires ne touchent qu'un unique segment au cours d'un MOUV.

Le taux de LOCini singulières réalisées par les signeurs est effectivement élevé puisqu'il concerne 84,50% des cas. Ce résultat semble déjà présumer que ce paramètre joue un rôle actif dans le déroulé des signes. Associé au fait que 56,20% des MOUV ne se déploient effectivement que sur un seul segment, nous pouvons alors déduire que les DDLs se retrouvent,

dans une large majorité des cas, *déjà* dans une position initiale pertinente par rapport au signe qui est en cours de production. Il nous est alors possible d'établir formellement le fonctionnement coopératif de ces deux paramètres : non seulement la LOCini s'adapte de manière individualisée aux MOUV, mais cette anticipation a un objectif précis de *simplification* de la forme du signe.

Nous ouvrons à ce propos une parenthèse afin de nous pencher quelques instants sur la définition donnée à la LOCini. Il s'agit de la « position stable assumée par les SEG¹⁰⁴ du/es membre(s) supérieur(s) du signeur avant le déploiement du MOUV¹⁰⁵ » (traduction personnelle, Bianchini *et al.* 2018 : 4). Un élément de cette définition nous intrigue, il s'agit de l'emploi de l'adjectif « stable ». L'exercice de transcription de la LOCini d'un signe revient à indiquer les positions articulaires d'un segment par rapport à son homologue proximal adjacent, et non à rechercher une quelconque information concernant la stabilité de ces positions. Il nous semblerait alors plus juste de parler de « postures articulaires » plutôt que de « positions stables ». Cela étant dit, nous venons de voir que la LOCini de certains DDLs perdure tout au long du signe. La LOCini continue alors d'exister *pendant* le MOUV. En ce sens, la LOCini relèverait effectivement d'une notion d'espace/temps plutôt que d'espace seul. Il y a donc bien une notion de stabilité, mais elle n'est pas cantonnée à l'« avant » mouvement, comme cela est spécifié dans la présente définition. Il ne s'agit pas de deux paramètres qui se succèdent sans se croiser, mais de deux phénomènes physiques, une posture et un mouvement, faisant partie d'une même réalité sémiotique. Fermons la parenthèse.

Venons-en maintenant aux deux dernières hypothèses traitées. Il s'agit désormais de rechercher des phénomènes de coordination motrice qui seraient observables au sein des 43,80% de signes présentant des MOUV pluri-segmentaux considérés comme complexes.

Nous avons d'abord questionné le concept de Boutet du flux de propagation du mouvement (2001, 2008, 2018). Parmi les 381 signes présentant un flux du mouvement, une majorité disto-proximale (191 signes) est repérée, présentant une possible simplification motrice basée sur l'inertie : les segments distaux sont les plus fins et donc les moins à même de transférer leurs mouvements sur les segments proximaux, plus épais. Or, les signes concernés par un flux disto-proximal n'ont pas témoigné d'un nombre moins important de segments engagés dans le

¹⁰⁴ Il s'agit de la contraction du terme « segment ».

¹⁰⁵ “[...] the stable position assumed by the SEGs of the signer's upper limb(s) before the deployment of MOV” (Bianchini *et al.* 2018: 4)

MOUV, que ceux dont le flux est proximo-distal. Le flux n'est donc pas une caractéristique pertinente dans le cadre de la validité ou de l'invalidité de notre postulat. Le fait que les signes sont réalisés dans un court laps de temps (i.e. 2,6 signes sont produits par seconde selon Bellugi & Fisher 1972) a pu jouer dans notre capacité à repérer d'éventuels décalages temporels (i.e. 24,22% de l'ensemble des MOUV traités au sein de notre corpus attestent d'un décalage d'activation des DDLs). Seules des données cinématiques quantitatives de la MoCap pourraient alors permettre une analyse pertinente de ce type de caractéristique du MOUV.

Ensuite, nous avons émis l'hypothèse que des groupements de DDLs synergiques seraient identifiables au sein des MOUV de ces mêmes signes pluri-segmentaux. Il s'agit d'un axe de notre analyse qui n'a pas été aisé à mettre en place puisqu'il résulte d'une hybridation entre la définition des mouvements préférentiels de Rosenbaum (2010) et la description des différents transferts de mouvement le long du membre supérieur fait par Boutet (2018). L'un nous a apporté la terminologie à utiliser, l'autre la méthodologie d'investigation à suivre. Les taux de présence de groupements de DDLs synergiques pour les couples bras/avant-bras, avant-bras/main et bras/main ont été respectivement de 30,54%, 27,79% et 22,70%. Compte tenu du fait que seulement 12,5% de l'ensemble des combinaisons possibles entre deux segments présentent un lien synergique, nous estimons que ces résultats confirment bel et bien notre dernière hypothèse. Cette présence marquée de coordinations stables au sein des MOUV pluri-segmentaux permet de diminuer l'investissement et l'effort nécessaire pour produire les signes concernés, démontrant qu'une stratégie de simplification motrice existe bien au sein des MOUV pluri-segmentaux. Cette réalité devrait alors nous amener à modifier notre représentation de ce qu'est la simplicité motrice : le niveau de simplicité d'un MOUV ne se baserait plus exclusivement sur le nombre de segments engagés dans un MOUV, mais aussi sur la relation que les DDLs actifs entretiennent. Ce n'est cependant pas la conclusion vers laquelle nous nous sommes arrêtés.

Notre appréciation de la notion de simplicité s'est fondée sur des caractéristiques observables. Or, ces stratégies de coordination du corps ne peuvent pas être révélées en se penchant sur du visible. En effet, celles-ci ont été détectées en prenant en compte les liens qu'entretiennent les DDLs actifs au cours d'un mouvement entre eux. Il y a donc un déplacement du cadre d'interprétation d'une même réalité : nous sommes passés de celui de l'observateur, à celui de l'effecteur ; passant ainsi de la notion de *simplicité*, à celle d'*économie*.

Enfin, la validation de trois hypothèses sur quatre nous a permis de vérifier, mais aussi de préciser le postulat que nous avons posé initialement : la LOCini et le MOUV coopèrent effectivement pour un déploiement du signe qui est simple dans 56,20% des cas, et qui tend à l'économie dans 63,69% des cas.

L'utilisation du terme « économie » rend d'ailleurs difficile de ne pas faire allusion à la notion d'économie linguistique. Nous avons remarqué que les acceptions recensées pour les LS trouvent toutes racines dans celles déjà observées au sein des LV. Il n'y a pas de prise en compte des différences de modalité entre les deux familles de langues. L'ensemble de ce travail permet alors de rappeler les propriétés spécifiques dont relève le médium des LS, et indique quelques raisons pour les prendre en compte. La structuration de la LSF ne peut pas être pleinement considérée si le système complexe qu'est le corps ne l'a pas été auparavant. C'est parce que le corps a ses propres règles d'organisation et de stabilisation que les LS, comme toutes langues, ne sont pas figées. Les signes ne relèvent alors pas de réalisations provenant d'une collection de répertoires pré-observés (i.e. droite, courbe, zigzag), mais sont le reflet d'une réalité écologique plus globale.

Parvenir à cette conclusion suppose de prendre le contre-pied de certaines pratiques phonologiques traditionnellement utilisées. Si les paramètres sont parfois décrits comme agissant simultanément (Stokoe 1960) ou séquentiellement (Liddell & Johnson 1989), leur indépendance n'est, elle, jamais interrogée. Des études mettent bien en exergue certaines connexions, mais elles ne se concentrent que sur des *unités* de paramètres. C'est le cas de Bouvet (1992) qui constate que la configuration « quatre doigts étendus et pouce replié » est pratiquement toujours utilisée au sein de signes comprenant un contact¹⁰⁶. Pour l'auteur, cette configuration serait une « variante libre » (Bouvet 1992 : 89) de la configuration « main plate » pour laquelle les cinq doigts sont étendus, la rétractation n'ayant d'existence que pour faciliter la réalisation du signe. Les analyses transversales de ce type pointent le fait que les paramètres ne seraient alors pas des entités compartimentées.

Dans notre cas, l'analyse conjointe de la LOCini et du MOUV nous semble être une des clés permettant d'outrepasser la difficulté d'appréhension du mouvement au sein des études linguistiques des LS.

¹⁰⁶ C'est le cas des signes [ÉTAGÈRE] qui nécessite un contact avec entre la main dominante et la main non-dominante ; [GENTIL] pour lequel la main est en contact avec la joue ; ou [RESPONSABLE] pour lequel on observe un contact avec l'épaule.

En effet, le fait d'avoir observé que la LOCini permet de décharger le nombre de DDLs à activer au cours du MOUV, indique que la *transcription* de la LOCini permet de décharger la *transcription* du MOUV. Effectivement, à partir du moment où la LOCini de l'ensemble des DDLs articulateurs du membre supérieur est identifiée, une partie significative de la forme du signe se trouve déjà décrite. Il ne reste ensuite qu'à compléter cette forme en notant les variations articulaires qui adviennent sur un nombre restreint de DDLs ¹⁰⁷.

Il serait possible de rétorquer que le problème n'est alors pas résolu, mais seulement déplacé. Si la transcription du MOUV ne concerne que peu de DDLs, celle de la LOCini suppose effectivement la description systématique de l'*ensemble* des DDLs. À cela nous pouvons répondre que le processus de notation de la LOCini revient à se concentrer sur un phénomène non dynamique et donc aisément repérable et descriptible. De plus, le système de transcription Typannot travaille à la mise en place d'un outil, le clavier virtuel, dont le but premier est justement de faciliter l'appréhension des paramètres kinésiologiques. Ce clavier est composé d'un avatar dont il sera possible de modifier les caractéristiques articulaires. Ce visuel permet de vérifier en temps réel la concordance entre la LOCini établie et celle observée au sein du corpus. Une fois que la posture est bien celle qui est attendue, la formule générique complète est automatiquement produite et peut être exportée vers ELAN (ou tout autre logiciel de traitement de texte). Les membres du groupe de recherche GestualScript travaillent aussi à la mise en place d'une interface gestuelle conçue pour les transcriptions automatiques : en connectant un dispositif de MoCap, il sera possible de reproduire une configuration corporelle qui sera reconnue automatiquement, et transcrite avec les caractères de Typannot.

C'est pour participer activement à ce type de développement que nous avons aussi orienté notre démarche de recherche vers la familiarisation de l'utilisation des nouvelles technologies, ainsi que la mise en place d'un maillon préliminaire à la constitution d'une reconnaissance automatique des DDLs.

Pour cela nous avons utilisé le deuxième empan de notre corpus, celui qui résulte de l'enregistrement effectué avec le *Perception Neuron*. Nous avons obtenu pour chacun des enregistrements des données qui relèvent de séries temporelles numériques, captées en 60Hz (signeurs 1 à 6) ou en 120Hz (signeurs 7-1 à 10). Ces données chiffrées telles qu'elles nous parviennent ne sont pas directement exploitables sans un prétraitement. D'abord, afin de

¹⁰⁷ Bien sûr, le MOUV n'est pas réduit à une ou des activations de DDLs, il est aussi composé de différentes amplitudes et de caractéristiques cinématiques, qu'il reste aussi à décrire.

distinguer les informations pertinentes (intra-signes) de celles qui ne le sont pas (extra-signes), il a été nécessaire d'établir des synchronisations entre la chronologie des enregistrements MoCap et vidéo. Cela nous a permis de récupérer les zones d'intérêt précédemment établies sur ELAN au sein des données cinématiques. Après avoir rendu les données exploitables par le logiciel MATLAB, une réflexion concernant la mise en place d'une méthodologie de traitement des données 3D sur ce logiciel a pu débuter. L'enjeu a été de parvenir à obtenir une correspondance avec les données telles que nous les avons transcrites, c'est-à-dire sous la forme d'un mouvement en 2D, mais aussi de générer des courbes dont la valeur nulle correspond à la position de référence des segments. Voici les principales étapes que nous avons réalisées : nous avons contraint artificiellement chaque articulation à ne pouvoir se déplacer que sur un unique plan de l'espace ; puis récupéré les valeurs d'angles que le segment concerné présente sur ce plan durant le laps de temps correspondant à un signe. Finalement, nous avons établi les mesures d'angle qui correspondent à un pôle ou un autre du DDL concerné. Si cette méthode est efficace, elle atteint rapidement sa limite : le choix d'un référentiel extérieur au corps ne nous permet de prendre en compte que des angles se trouvant dans les plans d'origine des segments (i.e. ceux dans lesquels ils se trouvent dans leur position de référence). Or, plus le segment est distal, plus il est soumis aux variantes de déplacements de ceux qui lui sont proximaux, et moins les données récupérées sont fiables avec cette approche. Cela ne nous a alors pas permis de traiter les DDLs de la main, segment le plus distal du membre supérieur. Pour produire des résultats qui soient exhaustifs et en lien direct avec le cadre de référence intrinsèque et multiple de l'approche kinésiologique, il faut traiter des mesures basées sur un repère de coordonnées propre à chaque articulation. Cela dit, le fait que nous ayons obtenu des courbes d'angles en fonction du temps comparables à ce que nous pouvons observer sur les vidéos concernant deux des trois segments du membre supérieur démontre deux choses. D'abord, le *Perception Neuron* est un système de MoCap suffisamment précis (Choo *et al.* 2022) pour la récupération de données n'excédant pourtant pas quelques centaines de millisecondes ; son coût accessible et sa portabilité en font un candidat valable pour les analyses réalisées au sein de laboratoires de linguistique. L'obtention de ces courbes témoigne également de la qualité du travail fourni : la reconstruction de l'avatar et les données d'angles sont cohérentes avec les réalisations filmées, ce qui démontre la justesse des calculs établis en sein des scripts. Il s'agit alors d'un travail préliminaire pouvant servir de base solide à un mode de détection des DDLs dans l'ensemble de leurs configurations possibles, dont la mise en place nécessite une recherche pleinement orientée vers des notions de biomécanique et de contrôle du mouvement. Nous pouvons ajouter qu'organiser et traiter un corpus de MoCap est

particulièrement formateur. Nous sommes aujourd'hui pleinement au fait du protocole méthodologique à suivre pour la mise en place d'un corpus de qualité alliant plusieurs types d'enregistreurs.

Nous souhaitons, pour terminer cette conclusion, développer un dernier enjeu heuristique de notre travail de recherche. Notre étude est la première à se baser sur l'approche kinésiologique de Boutet (2008). Si cette dernière nous a apporté le bagage théorique nécessaire pour structurer notre recherche, nous avons de notre côté apporté une méthodologie de traitement fonctionnelle concernant le flux de propagation du mouvement, considéré comme la principale contribution à la linguistique des LS de Boutet (2018 : 9). Par l'examen de nos données, nous avons mis au point un procédé d'exploitation complet concernant le déploiement interne du mouvement le long du membre supérieur, de sa transcription sous ELAN, aux traitements algorithmiques permettant de les catégoriser, en passant par des perspectives de traitement automatique. Nous espérons que l'existence de cette procédure permettra d'appliquer l'approche de Boutet à de futures recherches et d'ancrer le flux de propagation du mouvement au sein des études des productions signées et gestuelles.

Il faut aussi rappeler que Boutet accorde une valeur sémantique au flux : ce dernier structure le déroulé du geste tout en lui assignant un *sens* particulier. Nous avons aussi tenté de mettre en correspondance la forme corporelle et le sens. Pour cela, nous avons de nouveau utilisé la notion de synergie. En nous penchant sur quelques réalisations signées, nous avons remarqué que les DDLs synergiques composant un signe ont la possibilité de se remplacer ou de se cumuler sans que cela ait d'influence sur le sens transmis. Seule l'amplitude, et donc les aspects prosodiques du signe, s'en trouve modifiée. Au contraire, lorsqu'un groupement non synergique compose un signe, chaque DDL est nécessaire à la formation complète du sens.

Il s'agit pour l'instant de quelques linéaments de structuration du sens, mais cela participe à dépeindre des contours de plus en plus nets des intérêts multiples que le type d'approche proposé par Stokoe (1991) et développé par Boutet (2008) recouvre. Elle nous semble suffisamment prometteuse pour lui allouer le néologisme disciplinaire de « kinésio-linguistique ». Cette kinésio-linguistique propose, comme toute linguistique, l'analyse d'un signifié et d'un signifiant, à la différence que ce dernier relève ici des structures de productions articulatoires du corps ainsi que de ses caractéristiques organisationnelles. En cela, elle peut être employée pour étudier les 157 LS recensées dans le monde, tout comme la gestuelle co-

verbale de toutes langues et cultures. D'ailleurs, si tout porte à penser que les résultats obtenus au sein de cette étude puissent être similaires pour l'ensemble des LS, l'analyse de la gestuelle co-verbale pourrait témoigner de quelques différences. Le fait que les gestes non conventionnels présentent une forme générale plus lâche et moins contrôlée que celle des signes suggère la présence d'un mécanisme de simplification et d'économie motrice engagé d'une autre façon. Nous faisons l'hypothèse qu'à l'inverse des signes, ce type de gestes est composé de mouvements majoritairement pluri-segmentaux, dont les formes visuellement complexes relèvent de groupements synergiques proportionnellement plus importants : un DDL mènerait alors le déploiement économique de la production gestuelle par un transfert de son mouvement sur les autres segments. Observer et quantifier ce type de caractéristiques permettrait de franchir un pas supplémentaire dans la définition d'une frontière entre le geste et le signe, laissant entrevoir la pertinence de l'unification des sciences du langage et de la kinésiologie pour l'élucidation des mécanismes en jeu dans la communication visuo-gestuelle.

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111-150.
- Adegboku, D. (2011). De l'économie en langue ou dans le langage : une linguistique « des temps qui pressent ». *Synergies Afrique Centrale et de l'Ouest (Gerflint)*, 4, 25-37.
- Al-dor, N. (2019). Enhancing motor coordination: an Eshkol-Wachman movement notation (EWMN) perspective. *Journal of Movement Arts Literacy*, 5(1), #2.
- Amadi, H. O., & Bull, A. M. (2010). A motion-decomposition approach to address gimbal lock in the 3-cylinder open chain mechanism description of a joint coordinate system at the glenohumeral joint. *Journal of Biomechanics*, 43(16), 3232-3236.
- Arbeau T. (1589). *Orchésographie ou Traicté en forme de dialogue par lequel toutes personnes peuvent facilement apprendre & practiquer l'honneste exercice des dances*. Langres: Jehan des Preyz.
- Aristidou, A., Cameron, J., & Lasenby, J. (2008). Real-time estimation of missing markers in human motion capture. In: *2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering* (pp. 1343-1346). IEEE.
- Avola, D., Petracca, A., Placidi, G., & Spezialetti, M. (2014). Markerless hand gesture interface based on Leap Motion controller. In: *20th International Conference on Distributed Multimedia Systems* (pp. 260-266). DMS.
- Battison, R. (1973). Phonology in American sign language: 3-D and digitvision. In: *California Linguistic Association Conference*.
- Battison, R. (1974). Phonological deletion in American sign language. *Sign Language Studies*, 5, 1-19.
- Battison, R. (1978). *Lexical borrowing in American sign language*. Silver Spring, MD: Linstok Press.
- Battista, L. A. (1435). *De pictura / De la peinture* [traduction par Jean Louis Schefer (1992)]. Paris : Macula.
- Bébian, A. (1825). *Mimographie ou essai d'écriture mimique, propre à régulariser le langage des sourds-muets*. Paris: Louis Colas.

Belissen, V., Braffort, A. & Gouiffès, M. (2020). Dicta-Sign-LSF-v2: Remake of a Continuous French Sign Language Dialogue Corpus and a First Baseline for Automatic Sign Language Processing, *12th Conference on Language Resources and Evaluation*, LREC.

Bellugi, U., & Fisher, S. (1972). A comparison of sign language and spoken language. *Cognition*, 1, 173-200.

Benchiheub, M. (2017). *Contribution à l'analyse des mouvements 3D de la Langue des Signes Française (LSF) en action et en perception*. Orsay: Paris Sud.

Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movement*. Oxford: Pergamon.

Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Paris : Odile Jacob.

Berthoz, A., & Pozzo, T. (1988) Intermittent head stabilization during postural and locomotory tasks in humans. In: Amblard, B., Berthoz, A., & Clarac, F. (eds), *Development, adaptation and modulation of posture and gait* (pp. 189-198). Amsterdam: Elsevier.

Bianchini, C. S. (2012), *Analyse métalinguistique de l'émergence d'un système d'écriture des Langues des Signes : SignWriting et son application à la Langue des Signes Italienne (LIS)*, Thèse de doctorat, Université de Paris VIII et Università degli Studi di Perugia.

Bianchini, C. S. (2021). Représenter les langues des signes sous forme écrite : questions qui ont besoin (encore aujourd'hui) d'être posées. *Corela : Cognition, Représentation, Langage*, 19(2), 1-37.

Bianchini, C. S., Chèvrefils, L., Danet, C., Doan, P., Rébulard, M., Contesse, A., & Boutet, D. (2018). Coding movement in sign languages: the Typannot approach. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Movement and Computing* (pp. 1-8). ACM

Block, B. A. (1998). Keep them in their "place": applying Laban's Notion of kinesphere and place in teaching scientific concepts. *Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, 69(3), 43-47.

Blondel, M. (2003). De la syllabe en LSF à travers un registre poétique. In : *Abstract de La Linguistique de la LSF: Recherches Actuelles / French Sign Language Linguistics: Current Researchs*.

Blondel, M. (2009). Acquisition bilingue LSF-français : l'enfant qui grandit avec deux langues et dans deux modalités. *Acquisition et Interaction en Langue Étrangère [AILE]*, 1, 169-194.

Blondel, M., Boutora, L., & Parisot, A. M. (2009). Inventaire et mesures du marquage spatial dans la grammaire des langues des signes. In : *Colloque International sur les Langues des Signes [CILS]*.

Blondel, M., & Boutet, D. (2011). Annotations des langues des signes... et plus généralement de la gestualité humaine. École thématique du CNRS à Biarritz.

Boutet, D. (2001). *Approche morpho-dynamique du sens dans la gestuelle conversationnelle*. Thèse de doctorat, Université de Paris VIII.

Boutet, D. (2005). Pour une iconicité corporelle. In : *Atelier Traitement Automatique des Langues des Signes, TALN2005*.

Boutet, D. (2008). Une morphologie de la gestualité : structuration articulaire. *Cahiers de Linguistique Analogique*, 5, 80-115.

Boutet, D. (2010). Structuration physiologique de la gestuelle : modèle et tests. *Lidil*, 42, 77-96.

Boutet, D. (2015). Conditions formelles d'une analyse de la négation gestuelle. *Vestnik of Moscow State Linguistic University*, 6(717), 116-129.

Boutet, D. (2018). *Pour une approche kinésiologique de la gestualité : synthèse*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Rouen-Normandie.

Boutet, D., Sallandre, M., & Fusellier-Souza, I. (2010). Gestualité humaine et langues des signes : entre continuum et variations. *Langage et Société*, 131, 55-74.

Boutet, D., Morgenstern, A., & Cienki, A. (2016). Grammatical aspect and gesture in French: a kinesiological approach. *Russian Journal of Linguistics*, 3, 132-151.

Boutet, D., & Blondel, M. (2016). Les corpus de Langue des Signes Française. In : Braffort, A. (ed.), *La Langue des Signes Française (LSF) : modélisations, ressources et applications* (pp. 47-85). ISTE Éditions.

Boutet, D., Doan, P., Danet, C., Bianchini, C. S., Goguely, T., Contesse, A., & Rébulard, M., (2018). Systèmes graphématiques et écritures des langues signées. *Signata*, 9, 391-426.

Boutet D., Jégo, J-F., & Meyrueis, V. (2018). *POLIMOD Pipeline: tutorial: step-by- step tutorial: motion capture, visualization & data analysis for gesture studies*. Technical Report Université de Rouen, Université Paris VIII, Moscow State Linguistic University.

Boutet, D., Müller, C., & Morgenstern, A. (2018). Categories used for the analysis of event construal in gesture. In: Cienki, A. & Iriskhanova, O. K. (eds), *Aspectuality across languages*, (pp. 67-76). Amsterdam: John Benjamins.

Boutet, D., & Morgenstern, A. (2020). Prélude et Ode à l'approche kinésiologique de la gestualité. *Travaux Interdisciplinaires sur la Parole et le Langage [TIPA]*, 36.

Boutora, L. (2008). *Fondements historiques et implications théoriques d'une phonologie des langues des signes : étude de la perception catégorielle des configurations manuelles en LSF et réflexion sur la transcription des langues des signes*. Thèse de doctorat, Université Paris VIII.

Boyes-Braem, P. (2012). Evolving methods for written representations of Sign Languages of the deaf. In: Ender, A, Leemann, A., & Wälchli, B. (eds), *Methods in contemporary linguistics*. Berlin: de Gruyter Mouton.

Braffort, A. (1996). *Reconnaissance et compréhension de gestes, application à la langue des signes*. Thèse de doctorat, Université Paris XI.

Braffort, A. [ed.] (2016). *Langue de Signes Française (LSF) : modélisations, ressources et applications*. ISTE Éditions.

Braffort, A., Boutora, L., & Sérasset, G. [eds] (2012). *Actes de la Conférence conjointe JEP-TALN-RECITAL, Atelier DEGELS : DEfi GEste Langue des Signes*.

Brentari, D. (1990). *Theoretical foundations of American Sign Language phonology*. Doctoral dissertation, University of Chicago.

Brentari, D. (1993). Establishing a sonority hierarchy in American Sign Language: the use of simultaneous structure in phonology. *Phonology*, 10(2), 281-306.

Brentari, D. (1998). *A prosodic model of sign language phonology*. Cambridge: MIT Press.

Brentari, D. (2012). Phonology. In: Pfau, R., Steinbach, M., & Woll, B. (eds), *Sign Language: an international handbook* (ch. 3, pp. 21-54). Boston: de Gruyter-Mouton.

Brouland, J. (1855). *Spécimen d'un dictionnaire des signes, accompagné d'une Explication du tableau spécimen d'un dictionnaire des signes du langage mimique*. Paris : Institution impériale des sourds-muets. [les dessins de signes ont été réédités dans Renard, A., & Delaporte, Y. (2002). *Aux origines de la langue des signes française : Brouland, Pélissier, Lambert, les premiers illustreurs (1855-1865)*. Paris : Langue des Signes Éditions].

Brown, P., & Levinson, S.C. (1993). Frames of spatial reference and their acquisition in Tenejapan Tzeltal. In: *Culture, thought, and development* (pp. 167-197). Mahwah: Erlbaum.

Calbris, G. (1990). *The semiotics of French gestures* [vol. 1900]). Bloomington, IN: Indiana University Press.

Calbris, G. (2003). From cutting an object to a clear cut analysis: gesture as the representation of a preconceptual schema linking concrete actions to abstract notions. *Gesture*, 3(1), 19-46.

Calbris, G. (2011). *Elements of meaning gestures*. Amsterdam: John Benjamins.

Carse, B., Meadows, B., Bowers, R., & Rowe, P. (2013). Affordable clinical gait analysis: an assessment of the marker tracking accuracy of a new low-cost optical 3D motion analysis system. *Physiotherapy*, 99(4), 347-351.

Caruso L., Russo R., & Savino S. (2017). Microsoft Kinect V2 vision system in a manufacturing application. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48, 174-181.

Catteau, F., Blondel, M., Vincent, C., Guyot, P., & Boutet, D. (2016). Variation prosodique et traduction poétique (LSF/français) : que devient la prosodie lorsqu'elle change de canal ?. In : *31^e Journées d'Étude sur la Parole* (pp.750-758).

Chai, X., Li, G., Lin, Y., Xu, Z., Tang, Y., Chen, X., & Zhou, M. (2013). Sign language recognition and translation with kinect. In: *10th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition [vol. 655]*. IEEE.

Channon, R. E. (2002). Signs are single segments: phonological representations and temporal sequencing in ASL and other sign languages. *Sign Language & Linguistics*, 5(1), 99-102.

Chételat, E. (2010). *Les gestes non manuels en langue des signes française, annotation, analyse et formalisation : application aux mouvements des sourcils et aux clignements des yeux*, Thèse de doctorat, Université de Provence.

Chevrefils, L. (2021). *CLM-MOCAP* [Corpus]. ORTOLANG (Open Resources and TOols for LANGuage) - www.ortolang.fr ,<https://hdl.handle.net/11403/clm-mocap>

Chevrefils, L., Danet, C., Doan, P., Thomas, C., Rébulard, M., Contesse, A., Dauphin, Bianchini, C.S. (2021). The body between meaning and form: kinesiological analysis and typographical representation of movement in sign languages. *Languages and Modalities*, 1(1): 40-63.

Chèze, L. (2014). *Analyse cinématique du mouvement humain*. ISTE Éditions.

Chomsky, N., & Halle, M. (1965). Some controversial questions in phonological theory. *Journal of Linguistics*, 1(2), 97-138.

Choo, C. Z. Y., Chow, J. Y., & Komar, J. (2022). Validation of the Perception Neuron system for full-body motion capture. *PloS One*, 17(1), e0262730.

Chuan, C., Regina, E., & Guardino, C. (2013). American Sign Language recognition using Leap Motion sensor. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Machine Learning and Applications* (pp. 541–544).

Codman, E.A. (1934). *The shoulder: rupture of the supraspinatus tendon and other lesions in or about the subacromial bursa*. Boston: Thomas Todd Co.

Collomb, A., Braffort, A., & Kahane, S. (2018). L'anatomie du proforme en langue des signes française : quand il sert à introduire des entités dans le discours. *Travaux interdisciplinaires sur la parole et le langage [TIPA]*, 34.

Contesse, A., Thomas, C., Rébulard, M., Danet, C., Bianchini, C.S., Chevrefils, L., Doan, P. (2022). Designing a Transcription Font for Mouth Actions in Sign Languages: The Typannot Typographic System. Intl. Conf. "Grapholinguistics in the 21th century", Palaiseau.

Corina, D. (1990b). Reassessing the role of sonority in syllable structure: Evidence from a visual-gestural language. In: *Papers from the 26th Annual Meeting of the Chicago Linguistic Society - Vol. 2: Parasession on the Syllable in Phonetics and Phonology*. Chicago, IL: Chicago Linguistic Society.

Crasborn, O. A. (2015). Transcription and notation methods. In: Orfanidou, E, Woll, B., & Morgan, G. (eds), *Research methods in sign language studies: a practical guide* (pp. 74-88). Copenhagen: Wiley.

Crasborn, O. A., & van der Kooij, E. (1997). Relative orientation in sign language phonology. *Linguistics in the Netherlands*, 14(1), 37-48.

Cuesta-Vargas, A. I., Galán-Mercant, A., & Williams, J. M. (2010). The use of inertial sensors system for human motion analysis. *Physical Therapy Reviews*, 15(6), 462–473.

Cutting, J. E., & Kozlowski, L. T. (1977). Recognizing friends by their walk: gait perception without familiarity cues. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 9(5), 353-356.

Cuxac, C. (1983). *Le langage des sourds*. Paris : Payot.

Cuxac, C. (2000), *La Langue des Signes Française (LSF) : les voies de l'iconicité*, Paris : Ophrys.

Cuxac, C., & Abbou, M.-T. (1985). LSF et pantomime : tentative de démarcation linguistique. In : 10^e *Journées d'Études Autour de la langue des signes* (pp. 27-33). Université Paris V.

Cuxac, C., & Sallandre, M-A. (2007). Iconicity and arbitrariness, in French sign language: highly iconic structures, degenerated iconicity and diagrammatic iconicity. In: Pizzuto, E., Pietrandrea, P., & Simone, R. (eds), *Verbal and signed languages: comparing structures, constructs and methodologies* (pp. 13-33). Berlin: de Gruyter-Mouton.

Dalle-Nazébi, S., Dalle, J., Dalle, P., & Lefebvre-Albaret, F. (2010). Traitement des corpus en Langue des Signes en recherches sociolinguistiques. *Cahiers de praxématique*, 54-55, 103-118.

- Danet, C., Boutet, D., Doan, P., Bianchini C. S., Contesse A., Chèvrefils, L., Rébulard, M., Thomas, C., & Dauphin, J.-F. (2020). Transcribing sign languages with TYPANNOT: the typographic system that retains and displays layers of information. *Grapholinguistics and its Applications*, 5, 1007-1035.
- Dauids, K., & Seifert, L. (2014). Functional variability. In: Eklund, R. C., & Tenenbaum, G. (eds), *Encyclopedia of sport and exercise psychology*. Sage Publications.
- Davidson, K., Kocab, A., Sims, A., & Wagner, L. (2019). The relationship between verbal form and event structure in sign languages. *Glossa: a Journal of General Linguistics*, 4(1), #123.
- Déléage, P. (2013), *Le geste et l'écriture : Langue des signes, Amérindiens, Logographies*, Paris, Armand colin.
- Delecraz, S. (2018). *Approches jointes texte/image pour la compréhension multimodale de documents*. Thèse de doctorat, Université de Aix-Marseille.
- Descartes, R. (1641). *Méditations métaphysiques*. Paris (réimprimé 2004. Nathan).
- Dittrich, W. H., Troscianko, T., Lea, S., & Morgan, D. (1996). Perception of emotion from dynamic point- light displays represented in dance. *Perception*, 25, 727-738.
- Dixon, R. H., & Bouchaud, J. (2006). Markets and applications for MEMS inertial sensors. In: *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, 6113.
- Doan, P., Boutet, D., Danet, C., Rébulard, M., Goguely, T., Miletitch, R., Bianchini, C. S., Renna, I. (2015). GestualScript. *Culture et recherche*, 130, 43-44.
- Dubuisson, C., & Grimard, C. (2006). *La surdit  vue de près*. Québec : PUC.
- Dumas, R., Ch ze, L., & Verriest, J.-P. (2007). Adjustments to McConville *et al.* and Young *et al.* body segment inertial parameters. *Journal of Biomechanics*, 40(3), 543-553.
- Duncan, S. (2005). Gesture in signing: a case study from Taiwan Sign Language. *Language and Linguistics -Taipei*, 6(2), 279-318.
- Emmorey, K. (1999). Do signers gesture? In: Messing, L., & Campbel, R. (eds), *Gesture, Speech, and Sign* (pp. 133-159). Oxford Academic.
- Emmorey, K., McCullough, S., Mehta, S., Ponto, L. L. B., & Grabowski, T. J. (2013). The biology of linguistic expression impacts neural correlates for spatial language. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(4), 517-533.

- Emmorey, K. (2015). The neurobiology of sign language. In: Toga, A. W. (ed.), *Brain mapping: an encyclopedic reference* (vol. 3, pp. 475-479). Elsevier Academic Press.
- Eshkol, N., & Wachman, A. (1958). *Movement notation*. London: Weidenfeld & Nicolson.
- Eshkol, N., & Harries, J. G. (2011). *EW Movement Notation: the system of reference*. Internal note.
- Feuillet, R. A. (1701). *Choregraphie : ou l'art de décrire la danse, par caracteres, figures et signes démonstratifs, avec lesquels on apprend facilement de soy-même toutes sortes de dances. Ouvrage très utile aux maîtres à danser & à toutes les personnes qui s'appliquent à la danse*. Chez l'auteur et chez Michel Brunet.
- Fitts, P. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381–391.
- Fodor, J. A. (1975). *The language of thought* (Vol. 5). Harvard University Press.
- Friedman, L. A. [ed.]. (1977). *On the other hand: new perspectives on American Sign Language*. Elsevier Academic Press.
- Frishberg, N. (1975). Arbitrariness and iconicity: historical change in American Sign Language. *Language*, 51(3), 696-719.
- Frishberg, N. (1983). Writing systems and problems for sign language notation. *Journal for the Anthropological Study of Human Movement*, 2(4), 169–195.
- Frishberg, N., Hoiting, N., & Slobin, D. I. (2012). Transcription. In: Pfau, R., Steinbach, M., & Woll, B. (eds), *Sign language: an international handbook* (pp. 1045-1075). Berlin: de Gruyter-Mouton.
- Fusellier-Souza, I. (2006). Processus de création et de stabilisation lexicale en Langues des Signes (LS) à partir d'une approche sémiogénétique. *Glottopol*, 7.
- Garcia, B., L'Huillier, M.-T., & Sallandre, M.-A. (2013). Creagest : enjeux linguistiques, patrimoniaux et socio-éducatifs d'un grand corpus de Langue des signes française. *La Nouvelle Revue de l'Adaptation et de la Scolarisation*, 64, 81-91.
- Gibet, S., Courty, N., Duarte, K., & Le Naour, T. (2011). The signcom system for data-driven animation of interactive virtual signers: methodology and evaluation. In: *Transactions on Interactive Intelligent Systems* (vol. 1). ACM.
- Gibet, S., Heloir, A., Courty, N., Kamp, J., Gorce, P., Rezzoug, N., Multon, F., & Pelachaud, C. (2006). Virtual agent for deaf signing gestures. *Journal of the Association for the Advancement of Modelling and Simulation Techniques in Enterprises [AMSE]*, 67, 127–136.

Gibet, S., Lefebvre-Albaret, F., Hamon, L., Brun, R., & Turki, A. (2015). Interactive editing in French sign language dedicated to virtual signers: requirements and challenges. *Universal Access in the Information Society*, 15(4), 525–539.

Gibson, E. J., & Walk, R. D. (1960). The "visual cliff". *Scientific American*, 202(4), 64-71.

Gibson, J. J. (1977). *The theory of affordances*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA: Houghton Mifflin.

Goldin-Meadow, S. (2015). From action to abstraction: gesture as a mechanism of change. *Developmental Review*, 38, 167-184.

Goldin-Meadow, S., & Brentari, D. (2017). Gesture, sign and language: the coming of age of sign language and gesture studies. *The Behavioral and Brain Sciences*, 40, #e46, 1-82.

Godwin, A., & Stevenson, J. (2009). Accuracy of inertial motion sensors in static, quasistatic, and complex dynamic motion. *Journal of Biomechanical Engineering*, 131(11), #114501.

Gosselin, L. (2021). *Aspect et formes verbales en français*. Paris : Classiques Garnier.

Guillaume, G. (1929). Temps et verbe : théorie des aspects, des modes et des temps, suivi de L'architectonique du temps dans les langues classiques. Paris : Honoré Champion (réimprimé 1984).

Guna, J., Jakus, G., Pogačnik, M., Tomažič, S., & Sodnik, J. (2014). An analysis of the precision and reliability of the Leap Motion sensor and its suitability for static and dynamic tracking. *Sensors*, 14, 3702-3720.

Habert, B., Nazarenko, A., & Salem, A. (1997). *Les linguistiques de corpus*. Paris: Armand Colin/Masson.

Hadley, L. F. (1893). *Indian Sign talk*. Chicago: Baker & Co. [at Rare Books Division, The New York Public Library].

Haviland, J. B. (1993). Anchoring, iconicity, and orientation in Guugu Yimithirr pointing gestures. *Journal of Linguistic Anthropology*, 3(1), 3-45.

Hayes, B. (1993). Against movement: comments on Liddell's article. In: *Current issues in ASL phonology* (pp. 213-226). Elsevier Academic Press.

- Hoffmeister, R., & Wilbur, R. (1980). Developmental: the acquisition of sign language. In: Lane, H., & Grosjean, F. (eds), *Recent perspectives on American Sign Language*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Hoiting, N., & Slobin, D. (2002). Transcription as a tool for understanding: the Berkeley transcription system for sign language research (BTS). In: Morgan, G., & Woll, B. (eds), *Directions in sign language acquisition*. Amsterdam: John Benjamins.
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception and Psychophysics*, 14, 201–211.
- Johnson, R. E., & Liddell, S. K. (2011). A segmental framework for representing signs phonetically. *Sign Language Studies*, 11(3), 408-463.
- Johnson, R. E., & Liddell, S. K. (2010). Toward a phonetic representation of signs: sequentiality and contrast. *Sign Language Studies*, 11(2), 241-274.
- Johnston, T. (2008). Corpus linguistics and signed languages: no lemmata, no corpus. In: Crasborn, O., Efthimiou, E., Hanke, T., Thoutenhoofd, E. D., & Zwitserlood, I. (eds), *5th Workshop on the Representation and Processing of Signed Languages: Construction and Exploitation of Sign Language Corpora* (pp. 82-87). Paris: ELRA.
- Kang, G. E., & Gross, M. M. (2016). Concurrent validation of magnetic and inertial measurement units in estimating upper body posture during gait. *Measurement*, 82, 240–245.
- Kapandji, I. A. (1997). L'épaule. In : *Physiologie articulaire. tome I : membre supérieur* (pp. 10-79). Paris : Éditions Maloine.
- Kapandji, A. I. (2005). *Anatomie fonctionnelle : physiologie de l'appareil locomoteur, tome I : membres supérieurs*. Paris: Éditions Maloine.
- Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70(6 p1), 387-403.
- Kelso, J. A. S., Holt, K. G., Rubin, P., & Kugler, P. N. (1981). Patterns of human interlimb coordination emerge from the properties of non-linear, limit cycle oscillatory processes: theory and data. *Journal of Motor Behavior*, 13(4), 226-261.
- Kendon, A. (2004). Gesture units, gesture phrases and speech. In: *Gesture: visible action as utterance* (ch. 7, pp. 108-126). Cambridge University Press.
- Kleida, D. (2018). On the technological conditions of the representation of movement: dance notation systems & annotation practices as gestures.

Klima, E. S., & Bellugi, U. (1979). *The signs of language*. Harvard University Press.

Knight, H., & Simmons, R. (2014). Expressive motion with x, y and theta: Laban effort features for mobile robots. In: *23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication* (pp. 267–273).

Kots, Y. M., & Syrovegin, A. V. (1966). Fixed set of variants of interaction of the muscles of two joints used in the execution of simple voluntary movements. *Biophysics*, 11(6), 1212-1219.

Laban, R. (1928). Grundprinzipien der Bewegungsschrift [Fundamental principles of movement notation]. *Schrifttanz*, 1(2), 4-5.

Lachat, E., Macher, H., Mittet, M.-A, Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2015). First experiences with kinect V2 sensor for close range 3D modelling. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [ISPRS]*, 40(5/W4), 93-100.

Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54(1-3), 115-130.

Lang, S., Block, M., & Rojas, R. (2012). Sign language recognition using kinect. In: *Intl Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing* (pp. 394-402). Berlin: Springer.

Langolf, G. D., Chaffin, D. B., & Foulke, J. A. (1976). An investigation of Fitts' law using a wide range of movement amplitudes. *Journal of Motor Behavior*, 8(2), 113-128.

Latash, M.L. (1993). *Control of human movement*. Champaign, IL: Human Kinetics.

Le Corre, G. (2007). La langue des signes française (LSF). *Enfance*, 59(3), 228-236.

Le Guen, O. (2011). Modes of pointing to existing spaces and the use of frames of reference. *Gesture*, 11(3), 271-307.

Lee, S., Henderson, V., Brashear, H., Starner, T., Hamilton, S., & Hamilton, H. (2005). User-centered development of a gesture-based American Sign Language game. In: *Proceedings of Instructional Technology and Education of the Deaf Symposium*. Rochester, NY: NTID.

Lee, Y.-H., & Tsai, C.Y. (2009). Taiwan sign language (TSL) recognition based on 3D data and neural networks. *Expert Systems with Applications*, 36(2/1), 1123-1128.

Lefebvre-Albaret, F. (2010). *Traitement automatique de vidéos en LSF Modélisation et exploitation des contraintes phonologiques du mouvement*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III.

- Levinson, S.C. (1996). Frames of reference and Molyneux's question: crosslinguistic evidence, In: Bloom, P., Peterson, M., Nadel, L., & Garrett, M. (eds), *Language and space* (pp. 109-169). Cambridge, MA: MIT Press.
- Liddell, S. K. (1984). Think and believe: sequentiality in American Sign Language. *Language*, 60, 372–399.
- Liddell, S., & Johnson, R. (1989). American sign language: the phonological base. *Sign Language Studies*, 64, 195–277.
- Johnson, R. E., & Liddell, S. K. (2011). A segmental framework for representing signs phonetically. *Sign Language Studies*, 11(3), 408-463.
- Limousin, F. (2011). Acquisition de la référence personnelle en LSF : analyse longitudinale des pointages, des formes nulles et des noms signés chez une enfant sourde de parents sourds. Thèse de doctorat, Université Paris VIII.
- Lu, W., Tong Z., & Chu J. (2016). Dynamic hand gesture recognition with Leap Motion controller. *IEEE Signal Processing Letters*, 23(9), 1188-1192.
- MacConaill, M. A. (1948). The movements of bones and joints. *Journal of Bone & Joint Surgery, British Volume*, 30-B(2), 322-326.
- McGinley, J.L., Baker, R., Wolfe, R., & Morris, M.E. (2009). The reliability of three-dimensional kinematic gait measurements: a systematic review. *Gait Posture*, 29, 360–369.
- McMahon, T. A. (1984). *Muscles, reflexes, and locomotion* (vol. 10). Princeton University Press.
- McNeill, D. (1992). *Hand and mind: what gestures reveal about thought*. University of Chicago Press.
- Malaia, E., & Wilbur, R. B. (2010). Representation of verbal event structure in sign languages. In: Bertinetto, P.M., Korhonen, A., Lenci, A., Melinger, A., Schulte im Walde, S., & Villavicencio, A. (eds.), *Proceedings of the Interdisciplinary Workshop on Verbs. The Identification and Representation of Verb Features*, Italy, 165–170.
- Martinet, A., 1965. *La linguistique synchronique*. Paris : Payot (réimprimé 1974).
- Meredith, M., & Maddock, S. (2001). *Motion capture file formats explained*. University of Sheffield, Department of Computer Science Technical Report CS-01.
- Merriau, P., Dupuis, Y., Boutteau, R., Vasseur, P. & Savatier, X. (2017). A study of Vicon system positioning performance. *Sensors*, 17, #1591.

- Mihail, R.P., Jacobs, N., & Goldsmith, J. (2012). Static hand gesture recognition with 2 kinect sensors. In *Proceedings of the International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition (IPCV)* (p. 1).
- Miller, C. (2000). Regards sur la phonologie des langues signées. *Recherches Linguistiques de Vincennes*, 29.
- Millet, A. (2006). Le jeu syntaxique des proformes et des espaces dans la cohésion narrative en LSF. *Glottopol*, 7, 96–111.
- Millet, A. (2004). La langue des signes française (LSF) : une langue iconique et spatiale méconnue. *Cahiers de l'APLIUT*, 23(2), 31-44.
- Millet, A. (2019). *Grammaire descriptive de la langue des signes française : dynamiques iconiques et linguistique générale*. Grenoble: UGA Éditions.
- Moeslund, T. B., & Granum, E. (2017). A survey of computer vision-based human motion capture. *Computer Vision and Image Understanding*, 81(3), 231-268.
- Mondada, L. (2010). Constitution et exploitation de corpus vidéo en linguistique interactionnelle : rendre disponibles les détails multimodaux de l'action située. *Cahiers de Praxématique*, 54-55, 327-350.
- Moody, B. (1983). *La langue des signes : dictionnaire bilingue élémentaire*. Vincennes : IVT.
- Moody, B. (1986). *La langue des signes : dictionnaire bilingue élémentaire* (tome 1, 2, 3). Vincennes : IVT.
- Morgenstern, A., Chevrefils, L., Blondel, M., Vincent, C., Thomas, C., Jégo, J.F., Boutet, D. (2021). “Of thee I sing”: an opening to Dominique Boutet’s kinesiological approach to gesture. *Languages and Modalities*, 1(1): 3-16.
- Morgenstern, A., & Parisse, C. (2019). *Le langage de l'enfant : de l'éclosion à l'explosion*. Paris : Presses Sorbonne Nouvelle.
- Moussaïd, M. (2010). *Étude expérimentale et modélisation des déplacements collectifs de piétons*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III.
- Naert, L. (2020). *Capture, annotation and synthesis of motions for the data-driven animation of sign language avatars*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud.
- Nagahara, H. (1988). *Toward an explicit phonological representation for American Sign Language*. MA thesis, University of California Los Angeles.

Newell, K. M., van Emmerik, R. E. A., & McDonald, P. V. (1989). Biomechanical constraints and action theory. *Human Movement Science*, 8(4), 403-409.

O'Brien, J., Bodenheimer, R. Jr., Brostow, G., & Hodgins, J. (2000). Automatic joint parameter estimation from magnetic motion capture data. In: *Proceedings of the Graphics Interface 2000 Conference* (pp. 53-60).

Older, S. J. (1968). Movement of pedestrians on footways in shopping streets. *Traffic Engineering and Control*, 10, 160-163.

Pederson, E., Danziger, E., Wilkins, D., Levinson, S., Kita, S., & Senft, G. (1998). Semantic typology and spatial conceptualization. *Language*, 74(3), 557-589.

Pélissier, P. (1856). *Iconographie des signes faisant partie de l'Enseignement primaire des sourds-muets*. Paris : P. Dupont. (réimprimé 2016. Hachette)

Perlmutter, D. M. (1992). Sonority and syllable structure in American Sign Language. *Linguistic Inquiry*, 23, 407-442.

Poizner, H., Bellugi, U., & Lutes-Driscoll, V. (1981). Perception of American sign language in dynamic point-light displays. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7(2), 430-440.

Potter, L. E., Araullo, J., & Carter, L. (2013). The Leap Motion controller: a view on sign language. In: *Proceedings of the 25th Australian Computer-Human Interaction Conference* (pp. 175-178). ACM.

Poudat, C., & Landragin, F. (2017). *Explorer un corpus textuel : méthodes - pratiques - outils*. Louvain : De Boeck Supérieur.

Priesters, M. A., & Mittelberg, I. (2013). Individual differences in speakers' gesture spaces: multi-angle views from a motion-capture study. In: *Tilburg Gesture Research Meeting [TiGeR]*.

Prillwitz, S., Leven, R., Zienert, H., Hanke, T., & Henning, J. (1989). *Hamburg Notation System for Sign Languages: an introductory guide, HamNoSys version 2.0*. Hamburg: Signum Press.

Proffitt, D. R., Bhalla, M., Gossweiler, R., & Midgett, J. (1995). Perceiving geographical slant. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2(4), 409-428.

Rehm, M., Bee, N., & André, E. (2008). Wave like an Egyptian: accelerometer based gesture recognition for culture specific interactions. In: *People and Computers XXII: Culture, Creativity, Interaction* (pp. 13-22).

- Reynolds, C. W. (1987). Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model. In: *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (pp. 25-34).
- Ribeiro, N. F., & Santos, C. P. (2017). Inertial measurement units: a brief state of the art on gait analysis. In: *5th Portuguese Meeting on Bioengineering [ENBENG]*. IEEE.
- Risler, A. (2007). Les classes lexicales en LSF envisagées à partir de la fonction adjectivale. *Silexicales*, 5, 103-125.
- Robert-Lachaine, X., Mecheri, H., Larue, C., & Plamondon, A. (2017). Validation of inertial measurement units with an optoelectronic system for whole-body motion analysis, *Medical & Biological Engineering & Computing*, 55, 609–619.
- Robert-Lachaine, X., Mecheri, H., Muller, A., Larue, C., & Plamondon, A. (2020). Validation of a low-cost inertial motion capture system for whole-body motion analysis. *Journal of Biomechanics*, 99, #109520.
- Rosenbaum, D. A. (2009). *Human motor control*. Elsevier Academic Press.
- Saint-Léon, A. (1852). *La sténochorégraphie ou Art d'écrire promptement la Danse, avec portrait et biographie des plus célèbres maitres de ballets anciens et modernes*. Paris : Brandus.
- Sallandre, M.-A. (2003). *Les unités de discours en Langue des Signes Française : tentative de catégorisation dans le cadre d'une grammaire de l'iconicité*. Thèse de doctorat, Université de Paris VIII.
- Sandler, W. (1986). The spreading hand autosegment of American Sign Language. *Sign Language Studies*, 50, 1–28.
- Sandler, W. (1989). *Phonological representation of the sign: linearity and nonlinearity in American Sign Language*. Dordrecht: Foris.
- Sandler, W. (1993). Hand in hand: the roles of the nondominant hand in Sign Language Phonology, *10(4)*, 337-390.
- Sandler, W. (2012). The phonological organization of sign languages: sign language phonology. *Language and Linguistics Compass*, 6(3), 162-182.
- Saussure, F. D. (1916). *Cours de linguistique générale*, publié par Charles Bally et Albert Sechehaye. Paris: Payot (réimprimé 1967).

Schembri, A., Jones, C., & Burnham, D. (2005). Comparing action gestures and classifier verbs of motion: evidence from Australian Sign Language, Taiwan Sign Language, and nonsigners' gestures without speech. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 10(3), 272-290.

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4), 225-260.

Sers, R., Forrester, S., Moss, E., Ward, S., Ma, J., & Zecca, M. (2020). Validity of the Perception Neuron inertial motion capture system for upper body motion analysis. *Measurement*, 149, #107024.

Sharma, P. (2018). The fingertip detection and character recognition technique by using Leap Motion controller in air. *Asian Journal for Convergence in Technology [AJCT]*, 4(1).

Slobin, D. I., Hoiting, N., Anthony, M., Biederman, Y., Kuntze, M., Lindert, R., Pyers, J., Thumann, H., & Weinberg, A. (2001). Sign language transcription at the level of meaning components: the Berkeley Transcription System. *Sign Language & Linguistics*, 4, 63-104.

Smisek, J., Jancosek, M., & Pajdla, T. (2013). 3D with kinect. In: *Consumer depth cameras for computer vision* (pp. 3-25). London: Springer.

Stack, K. M. (1988). Tiers and syllable structure in American Sign Language: evidence from phonotactics. Master's thesis, University of California Los Angeles.

Stokoe, W. C. (1960). *Sign Language structure: studies in Linguistics*. Occasional Papers, 8. Buffalo, NY: University of Buffalo Press.

Stokoe, W. C. (1991). Editorial. *Sign Language Studies*, 71(1), 99-106.

Stokoe, W. C. (1991). Semantic phonology. *Sign Language Studies*, 71(1), 107-114.

Stokoe, W., Casterline, D., & Croneberg, C. (1965). *A dictionary of ASL on linguistic principles*. Silver Spring, MD: Linstok Press.

Sumi, S. (1984). Upside-down presentation of the Johansson moving light-spot pattern. *Perception*, 13, 283-286.

Strickland, B., Geraci, C., Chemla, E., Schlenker, P., Kelepir, M., & Pfau, R. (2015). Event representations constrain the structure of language: sign language as a window into universally accessible linguistic biases. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), 5968-5973.

Supalla, T., & Newport, E. L. (1975). *In search of categorical perception in sign*. Working paper, University of California San Diego.

- Sutton V. (1995). *Lessons in SignWriting: textbook & workbook*. La Jolla, CA: Deaf Action Committee for Sign Writing.
- Talmy, L. (1985). Lexicalization patterns: semantic structure in lexical forms. *Language Typology and Syntactic Description*, 3(99), 36-149.
- Tartter V. C., & Fischer S. D. (1982). Perceiving minimal distinctions in ASL under normal and point-light display conditions, *Perception & Psychophysics*, 32(4), 327-334.
- Teston, B. (2004). L'œuvre d'Etienne-Jules Marey et sa contribution à l'émergence de la phonétique dans les sciences du langage. *Travaux Interdisciplinaires du Laboratoire Parole et Langage d'Aix-en-Provence (TIPA)*, 23, 237-266.
- Thewlis, D., Bishop, C., Daniell, N., & Paul, G. (2013). Next-generation low-cost motion capture systems can provide comparable spatial accuracy to high-end systems. *Journal of Applied Biomechanics*, 29, 112-117.
- Tognini Bonelli, E. (2001). *Corpus linguistics at work*. Amsterdam: John Benjamins.
- Troje, N. F. (2002). Decomposing biological motion: a framework for analysis and synthesis of human gait patterns. *Journal of Vision*, 2, 371-387.
- Thompson, D. W. (1942). *On growth and form* (vol. 2). Cambridge: Cambridge University Press. (réimprimé en français, 2009).
- Turvey, M.T. (1990). Coordination. *American Psychologist*, 45, 938-953.
- Uyechi, L. (1996). *The geometry of visual phonology*. Stanford, CA: CSLI.
- Valade, Y. R. (1854). *Etudes sur la lexicologie et la grammaire du langage naturel des signes*. Paris: Librairie Philosophique de Ladrange.
- van der Hulst, H. (1993). Units in the analysis of signs. *Phonology*, 10(2), 209-241.
- van Ingen Schenau, G. J. (1989). From rotation to translation: constraints on multi-joint movements and the unique action of bi-articular muscles. *Human Movement Science*, 8(4), 301-337.
- Varela, F., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodied mind* (vol. 10). Cambridge, MA: MIT Press.

Vieilledent, S. (2002). *Comparaison de systèmes d'analyse du mouvement 3D*. Rapport de recherche au Ministère de la Jeunesse et des Sports. Paris : Institut National du Sport et de l'Education Physique.

Viviani, P., & Schneider, R. (1991). A developmental study of the relationship between geometry and kinematics in drawing movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(1), 198-218.

Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10(5), 683-703.

Watkins, J. (2017). *Laboratory and field exercises in sport and exercise biomechanics*. Abingdon-on-Thames: Routledge.

Weichert, F., Bachmann, D., Rudak, B., & Fisseler, D. (2013). Analysis of the accuracy and robustness of the Leap Motion controller. *Sensors*, 13(5), 6380-6393.

Wilbur, R. B. (1993). Syllables and segments: hold the movement and move the holds!. In: *Current issues in ASL phonology* (pp. 135-168). Elsevier Academic Press.

Wilbur, R. B., & Malaia, E. (2008). Contributions of sign language research to gesture understanding: what can multimodal computational systems learn from sign language research. *International Journal of Semantic Computing*, 2(1), 5-19.

Winter D. A. (1990). *Biomechanics and motor control of human movement*. New York: Wiley.

Wittmann, H. (1991). Classification linguistique des langues signées non vocalement. *Revue Québécoise de Linguistique Théorique et Appliquée*, 10(1), 215-288.

Zafrulla, Z., Brashear, H., Starner, T., Hamilton, H., & Presti, P. (2011). American sign language recognition with the kinect. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Multimodal Interfaces [ICMI '11]* (pp. 279-286). ACM.

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 – Pérennisation de la trace laissée par la main au cours du signe [EN FORME], ainsi que le type de réalisation graphique pouvant en est tiré (Boutet <i>et al.</i> 2018 : 418)	3
Figure 1.1 – Réalisation du signe [VOITURE] (signeur 6 signe 106, vidéo 1.1)	9
Figure 1.2 – Réalisation du signe [MONTER DANS LE VÉHICULE] (signeur 3 signe 246, vidéo 1.2).....	10
Figure 1.3 – Visualisation de la structuration de l’espace de signation (Millet 2019 : 127)....	11
Figure 1.4 – Réalisation des signes [DONNER L’ALLIANCE] (signeur 7 session 2 signes 293-294, vidéo 1.3).....	12
Figure 1.5 – Plan frontal et plan sagittal par rapport au corps servant l’expression de la temporalité.....	13
Figure 1.6 – Dactylologie en ASL des lettres A, S et T	14
Figure 1.7 – Réalisation du signe [SAVOIR] (signeur 9 signe 083, vidéo 1.4).....	17
Figure 1.8 – Réalisation du signe [MER] (signeur 2 signe 201, vidéo 1.5).....	18
Figure 1.9 – Réalisation du signe [INVITER DES PERSONNES] (signeur 3 signe 320, vidéo 1.6).....	19
Figure 1.10 – Découpage syllabique du morphème « SEGMENT »	20
Figure 1.11 – Traits inhérents (IF) et traits prosodiques (PF) ainsi que leurs caractéristiques respectives (Brentari 2012 : 25)	21
Figure 1.12 – a) Mouvement de transition interne, et b) pas de mouvement de transition (reproduction de Blondel 2004 : 12)	23
Figure 1.13 – Deux personnages se serrent la main, l’un est enjoué et l’autre a la mine renfrognée. À gauche [TENDRE LA MAIN] (signeur 3 signe 138, vidéo 1.7); à droite [SERRER LA MAIN] (signeur 3 signe 140, vidéo 1.8)	24
Figure 1.14 – Différentes configurations qui représentent un chat qui grimpe un tuyau : (a) l’index et le majeur sont légèrement courbés, (b) l’index est tendu, (c) l’index et le majeur sont tendus (Duncan 2005 : 303-304).....	24
Figure 1.15 – (a) Signe lexical de [LIGHT] et (b) construction de classificateur de la lumière posée sur la table (Emmorey 2013 : 519).....	25
Figure 1.16 – Chronophotographie de la réalisation du signe ASL [CHICAGO] (Liddell & Johnson 2011 : 411)	27

Figure 1.17 – Organisation séquentielle du signe ASL [CHICAGO] en fonction de quatre composantes structurelles (Liddell & Johnson 2011 : 417)	27
Figure 1.18 – Décomposition du segment « localisation » du modèle <i>Hand Tier</i> de Sandler (1989)	29
Figure 1.19 – Décomposition du segment « mouvement » du modèle <i>Hand Tier</i> de Sandler (1989)	29
Figure 1.20 – (a) Système de coordonnées cartésiennes qui permet de décrire les droites et (b) système de coordonnées polaires qui permet de spécifier les mouvements arqués (Hayes 1993 : 223).....	31
Figure 1.21 – Réalisation du signe ASL [YES]	32
Figure 1.22 – Réalisation du signe ASL [STUPID]	33
Figure 1.23 – Proximité de chaque segment du membre supérieur avec le tronc.....	36
Figure 1.24 – Systèmes de référence anatomique à trois plans et trois axes.....	37
Figure 1.25 – Vue postérieure du squelette du tronc et du membre supérieur droit en position anatomique de référence. En jaune, les os qui participent à l’articulation scapulo-thoracique et à l’articulation gléno-humérale	38
Figure 1.26 – DDL « flexion-extension » du bras et ses amplitudes (Kapandji 2004 : 7)	39
Figure 1.27 – DDL « abduction-adduction » du bras et ses amplitudes (Kapandji 2004 : 7-8)	40
Figure 1.28 – DDL « rotation intérieure-extérieure » et ses amplitudes (Kapandji 2004 : 11).....	40
Figure 1.29 – Vue antérieure du complexe articulaire de l’avant-bras dans la position anatomique de référence.....	41
Figure 1.30 – DDL « flexion-extension » et son amplitude (Kapandji 2004 : 99).....	41
Figure 1.31 – DDL « prono-supination » et son amplitude. La flèche présente sur chaque schéma correspond à l’orientation de la paume de main (Kapandji 2004 : 107).....	42
Figure 1.32 – Basculement du radius sur l’ulna durant un mouvement de pronation (vidéo 1.9)	42
Figure 1.33 – Vue antérieure du complexe articulaire de la main, en position anatomique de référence	43
Figure 1.34 – DDL « flexion-extension » de la main et son amplitude (Kapandji 2004 : 151).....	44
Figure 1.35 – DDL « adduction-abduction » de la main et ses amplitudes, en prenant trois références différentes (la paume en rouge, le poignet en bleu et les doigts en vert) (Kapandji 2004 : 151)	44

Figure 1.36 – La main commence avec la paume vers l’intérieur et termine avec la paume vers l’extérieur, et ce, sans avoir effectué une supination durant le mouvement (Mac Conaill 1948 : 323).....	46
Figure 1.37 – Triangle rectangle créé dans un espace à géométrie non plane permettant l’explication schématisée des mouvements involontaires.....	47
Figure 1.38 – Tentative de création d’un triangle rectangle créé dans un espace à géométrie plane	48
Figure 1.39 – Deux droites se coupant en deux points selon une géométrie sphérique.....	50
Figure 1.40 – Réalisation du signe [MUSCLÉ] (signeur 3 signe 003, vidéo 1.10)	51
Figure 1.41 – Réalisation du signe [RICHE] (signeur 5 signe 052, vidéo 1.11).....	51
Figure 1.42 – Réalisation du signe [FERMETURE DES PORTES] (signeur 9 signe 046, vidéo 1.12).....	52
Figure 1.43 – La main droite du signeur est en pronation complète pour la réalisation de (a) [SE REGARDER] et de (b) [NIVEAU QUI MONTE] (signeur 5 signes 020 et 089).....	52
Figure 1.44 – Réalisation du signe [ALLER] (signeur 6 signe 110, vidéo 1.13).....	54
Figure 1.45 – Réalisation du signe [ANNÉE DERNIÈRE] (signeur 1 signe 123, vidéo 1.14).....	54
Figure 1.46 – Réalisation du signe [REGARDER L’HEURE] (signeur 6 signe 092, vidéo 1.15)	55
Figure 1.47 – Réalisation du signe [JUSQU’À] (signeur 10 signe 174, vidéo 1.16).....	56
Figure 1.48 – Réalisation du signe [FINI] (signeur 3 signe 142, vidéo 1.17).....	58
Figure 1.49 – Réalisation du signe [SECOUER LES MAINS] (signeur 3 signe 132, vidéo 1.18)	58
Figure 1.50 – Réalisation du signe [SONNERIE] (signeur 7 session 1 signe 022, vidéo 1.19)	59
Figure 1.51 – Parallélisme des axes de rotation : les tiges bleues représentent les DDLs de la flexion-extension, les vertes ceux de l’abduction-adduction et les rouges ceux de la rotation intérieure-extérieure et de la prono-supination	60
Figure 1.52 – (a) Geste de présentation et (b) geste de négation épistémique (extraits de Dilili à Paris de Michel Ocelot, tirés de Boutet & Morgenstern 2020 : 12).....	62
Figure 2.1 – Réalisation du signe [LÀ] (signeur 3 signe 124, vidéo 2.1)	66
Figure 2.2 – Réalisation du signe [MOI] (signeur 7 session 1 signe 023, vidéo 2.2)	67
Figure 2.3 – Représentation d’une page du dictionnaire de Pélissier (1856 : 11).....	69
Figure 2.4 – Traduction de psaumes religieux en LSIP réalisée par Hadley (1893) (tiré de Déléage 2013 : 68)	71

Figure 2.5 – Représentations graphiques d'un dictionnaire bilingue LSF/français (I.V.T. éditions, collection thématique 2003 : 145)	72
Figure 2.6 – Extrait de notation en SignWriting (Boyes-Braem 2012 : 417)	73
Figure 2.7 – (a) Réalisation d'un pointage dirigé vers la gauche du point de vue du scripteur et (b) notation en SignWriting de ce même pointage, les glyphs concernant les paramètres manuels se situent vers la droite du point de vue du scripteur	74
Figure 2.8 – Tableau à double entrée présentant les symboles des trajectoires et directions des mouvements (partie 1) (Bébian 1825 : 8).....	76
Figure 2.9 – Formes du mouvement (partie 2) (Bébian 1825 : 8).....	76
Figure 2.10 – <i>Accens</i> , dynamique du mouvement (partie 3) (Bébian 1825 : 8).....	77
Figure 2.11 – (a) Réalisation du signe ASL [SNAKE] et (b) sa représentation en Stokoe Notation.....	78
Figure 2.12 – (a) Réalisation du signe ASL [BEAR] et (b) sa représentation graphique en HamNoSys	79
Figure 2.13 – (a) Extrait de la notation d'Arbeau et (b) extrait des explications écrites et dessinées des pas concernés (Arbeau 1589 : 44/ 54)	80
Figure 2.14 – (a) Extrait de la notation de Feuillet et (b) symboles utilisés pour représenter le pied (Feuillet 1701 : 102/7).....	81
Figure 2.15 – Notation de Saint-Léon (Saint-Léon : 50)	82
Figure 2.16 – Structure icosaédrique représentant le kinesphère Block (1998).....	83
Figure 2.17 – Schéma de la théorie de l'effort de Laban (Délécras 2018 : 21)	84
Figure 2.18 – Extrait de la Labanotation (Kleida 2018 : 34)	85
Figure 2.19 – Exemples de la notation de l'effort utilisée pour décrire huit combinaisons d'actions (Knight & Simmons 2014 : 269).....	86
Figure 2.20 – (a) Ensemble des systèmes de référence pour chaque segment du corps et (b) zoom sur un de ces référentiels exprimé selon deux chiffres représentant deux plans, vertical et horizontal, par rapport au sol (Eshkol & Harries 2011 : 2/5).....	87
Figure 2.21 – Notation de la danse « Light and Fire » (Al-dor 2019 : 13)	88
Figure 2.22 – Différents types de mouvements et leurs notations au sein du système Eshkol-Wachman (Eshkol & Harries 2011 : 3-4).....	89
Figure 2.23 – Cadre de référence absolu.....	92
Figure 2.24 – Cadre de référence intrinsèque	93
Figure 2.25 – Cadre de référence relatif, point de vue égocentré	93
Figure 2.26 – Cadre de référence relatif, point de vue allocentré	94

Figure 2.27 – Test de reconnaissance de l'utilisation d'un cadre de référence spécifique (Levinson 1996 : 113)	95
Figure 2.28 – Acte de pointer « à droite », (a) selon un cadre de référence relatif et (b) selon un cadre de référence absolu (Le Guen 2011 : 298)	96
Figure 2.29 – Les trois positions de la main droite sont différentes d'un point de vue égocentré, et similaires d'un point de vue intrinsèque (signeur 4 signes 004, 104 et 184)	97
Figure 2.30 – Deux plans sagittal (S, orange) et frontal (F, bleu) sur lesquels se forment deux DDLs, la flexion-extension et l'abduction-adduction de la main (adapté de Kapandji 2018 : 149).....	98
Figure 2.31 – Schématisation des quatre niveaux d'information.....	100
Figure 2.32 – Position de référence choisie selon (a) une vue transversale et (b) une vue frontale	101
Figure 2.33 – Exemple de formule graphématique concernant le paramètre LOCini du membre droit : derrière chaque glyphe se trouve l'information contenue dans la formule graphématique écrite en caractères latins.....	101
Figure 2.34 – Formule composée concernant le paramètre de la LOCini (voir détails dans le texte).....	102
Figure 2.35 – Superposition du corps du signeur et de la transcription sous forme de glyphe composé Typannot	103
Figure 2.36 – Interface paramétrique (Chevrefils <i>et al.</i> 2021).....	104
Figure 2.37 – Interface gestuelle pour le paramètre de la configuration (Danet <i>et al.</i> 2020 : 1026)	105
Figure 3.1 – Daguerre, <i>Boulevard du Temple</i> , 1838	113
Figure 3.2 – Chronophotographie géométrique de 24 images sur plaque fixe, d'un homme en train de courir (1886). Le sujet porte des vêtements noirs ornés de bandes blanches matérialisant les segments du corps humain	115
Figure 3.3 – Schématisation de la technique du <i>pointing light display</i> (Johansson 1973 : 202)	116
Figure 3.4 – Illustrations de la morphologie d'inflexion en ASL du signe [LOOK-AT] ([REGARDER]) (Poizner <i>et al.</i> 1981 : 435)	118
Figure 3.5 – Espace à six dimensions composé de trois axes de translation et trois axes de rotation	119
Figure 3.6 – Formalisation d'une rotation, en l'occurrence d'une flexion du bras.....	120
Figure 3.7 – Cadre de référence fixe relatif.....	121

Figure 3.8 – Caractéristiques principales de la <i>Leap Motion Controller</i>	123
Figure 3.9 – Caractéristiques de la Kinect 2.0	125
Figure 3.10 – (a) Interface du logiciel Brekel ProFace, et (b) du logiciel Brekel ProBody... ..	126
Figure 3.11 – Exemple de l’utilisation d’une capture de mouvement optique à marqueurs actifs de la marque PhaseSpace	128
Figure 3.12 – <i>Markerset</i> et exemples de labellisation des sphères pour le projet MARQSPAT (Blondel <i>et al.</i> 2009).....	130
Figure 3.13 – Visualisation simultanée des courbes de suivi du mouvement accompagnées de leurs représentations 3D (Vicon Nexus 2)	131
Figure 3.14 – Exemple de capture de mouvement magnétique de la marque Ascension et un modèle squelettique associé (O’Brien <i>et al.</i> 2000 : 53)	134
Figure 3.15 – Exemple d’exosquelette, image tirée du site fabricant Technaid	135
Figure 3.16 – Représentation des axes d’analyses de l’accéléromètre au sein d’une IMU ...	136
Figure 3.17 – Représentation des axes d’analyse du gyromètre au sein d’une IMU	136
Figure 3.18 – Représentation schématique du magnétomètre au sein d’une IMU.....	137
Figure 3.19 – Photographie du placement des IMUs et des capteurs optiques (Kang & Gross 2016 : 242)	138
Figure 3.20 – En jaune les données du bras gauche, en bleu celles de l’avant-bras gauche provenant d’un extrait (a) d’un enregistrement vidéo et (b) d’un enregistrement de MoCap à centrales inertielles	143
Figure 3.21 – Exemples tirés du corpus mis en place dans le cadre du projet POLIMOD, montrant un geste annoté comme étant (a) non borné et un second considéré comme (b) borné (Boutet <i>et al.</i> 2016 : 141)	150
Figure 3.22 – Nombre gestes coproduits avec des locutions à l’imparfait, au passé composé, au plus que parfait et au présent (Boutet <i>et al.</i> 2016 : 140)	151
Figure 3.23 – Nombre de gestes coproduits avec des locutions à l’imparfait et au passé composé, selon les flux proximo-distaux et disto-proximaux (Boutet <i>et al.</i> 2016 : 143)	152
Figure 4.1 – Un programme moteur représente l’exécution d’un unique geste	160
Figure 4.2 - Un programme moteur généralisé recouvre l’exécution d’un <i>groupe</i> de gestes, auquel sont ensuite associées les variables (paramétrisation) singulières à chacun	160
Figure 4.3 - Expériences de visualisation d’une colline et d’estimation de son inclinaison (Proffitt <i>et al.</i> 1995 dans Rosenbaum 2010 : 37)	164
Figure 4.4 – Photographie d’une foule qui laisse apparaître deux flux opposés de déplacement : à gauche, la foule avance vers le photographe ; à droite, elle avance vers les arbres.	165

Figure 4.5 – Régulations du comportement de nuées des oiseaux par le biais de trois règles simples (pour visualiser le résultat de l’algorithme développé par Reynolds : vidéo 4.2).....	166
Figure 4.6 – Diagramme schématique des catégories de contraintes qui guident l’émergence du patron de coordination (inspiré de Newell 1986 : 348).....	167
Figure 4.7 – Mouvements d’un pendule à trois axes (vidéo 4.3)	169
Figure 4.8 – Sans contrainte de précision ou de vitesse, le principe d’isochronie stipule que le temps de réalisation de ces deux ellipses est le même, malgré leur différence de tailles	170
Figure 4.9 – La vitesse de réalisation d’une ellipse diminue d’un tiers dans les parties les plus courbées.....	171
Figure 4.10 – Le temps pour atteindre ces deux cibles est sensiblement le même : la cible 1 est petite, mais rapprochée, alors que la cible 2 est éloignée, mais plus large.	172
Figure 4.11 - le triangle équilatéral, le carré et l’hexagone.....	173
Figure 4.12 – La forme circulaire ne peut pas s’agglutiner sans laisser d’espaces vides, contrairement à la forme hexagonale	173
Figure 4.13 – Superposition de chronophotographies permettant de révéler la stabilisation de la tête durant une course (Berthoz 1997 : 111)	174
Figure 4.14 – Deux exercices permettant d’illustrer un type de synergie préférentielle (Rosenbaum 2010 : 16)	176
Figure 4.15 – Le schéma de gauche représente la coordination en phase, le schéma de droite représente la coordination en antiphase (d’après Kelso <i>et al.</i> 1981).....	177
Figure 4.16 – L’évolution du signe issu de l’ASL [<i>DEPEND</i>] concerne la configuration. Celle du signe [<i>ANGRY</i>] concerne l’ajout du deuxième membre supérieur et un déplacement du signe (Frishberg 1975 : 701-702)	179
Figure 4.17 – Évolutions de l’emplacement des signes (a) [<i>PICTURE</i>] / [<i>PHOTOGRAPH</i>] et du signe (b) [<i>FEEL</i>] (Frishberg 1975 : 704-705)	180
Figure 4.18 – Photogrammes présentant la succession entre mouvement transitionnel, LOCini et MOUV (signeur 7-2 signe 136 & 137, vidéo 4.4).....	181
Figure 4.19 – Réalisations des signes [<i>FEMME</i>] (images (a) et (b)) et [<i>LÀ</i>] (images (c) et (d)) (signeur 7-2 signe 42 & 43, vidéo 4.5).....	182
Figure 4.20 – Réalisation du signe [<i>TENIR LE GUIDON</i>] (signeur 1 signe 014, vidéo 4.6).....	182
Figure 4.21 – Réalisation du signe [<i>MUSCLÉ</i>] (signeur 3 signe 004, vidéo 4.7)	183
Figure 4.22 – Réalisation du signe [<i>BIEN SÛR</i>] (signeur 9 signe 136, vidéo 4.8)	185

Figure 4.23 – Schématisation du postulat général et rappel des hypothèses de recherche. L’hypothèse (a) concerne la LOCini (vert) ; les hypothèses (b) et (c) concernent le MOUV (bleu) ; l’hypothèse (d) concerne à la fois la LOCini et le MOUV (vert et bleu).....	187
Figure 5.1- Caractéristiques d’une des IMUs du <i>Perception Neuron</i> (adapté d’Axis Neuron Userguide 2015 : 5).....	191
Figure 5.2 – Composantes de la combinaison du <i>Perception Neuron</i> (adapté d’Axis Neuron Userguide 2015 : 44).....	192
Figure 5.3 - Interface du logiciel <i>Axis Neuron</i> et principales fonctionnalités.....	193
Figure 5.4 – À gauche : aucun signal de l’IMU de l’épaule gauche (absence de couleur). Au milieu : mauvais signal de l’IMU de l’épaule droite et du majeur de la main gauche (en rouge). À droite : signaux de bonne qualité (vert) et de qualité suffisante (jaune) sur l’ensemble des IMUs.....	194
Figure 5.5 – Visualisation des emplacements des IMUs utilisées dans cette étude (cercles rouges) et des marqueurs réfléchissants (cercles blancs) (Sers <i>et al.</i> 2020 : 3)	196
Figure 5.6 – Visualisation des mouvements réalisés (Sers <i>et al.</i> 2020 : 4).....	197
Figure 5.7 – Illustration du déroulé de la tâche de manipulation boîtes. Les participants portent une combinaison <i>Perception Neuron</i> sur corps entier ainsi que des diodes dédiées au système Optotrak (Robert-Lachaine <i>et al.</i> 2019 : 2)	199
Figure 5.8 – Extrait de l’enregistrement (a) monopartite avec la combinaison placée sur l’ensemble du corps et de celui-ci (b) bipartite avec les combinaisons placées sur le haut du corps	201
Figure 5.9 – Reconstitution de l’enregistrement de corpus monopartite	204
Figure 5.10 – Postures à effectuer successivement pour l’étalonnage des IMUs	205
Figure 5.11 – Ordre des déclenchements des différents enregistreurs.....	206
Figure 5.12 – Extrait du travail de transcription réalisé sur ELAN	207
Figure 5.13 – Visualisation des transcriptions et d’un menu déroulant contenant une liste de vocabulaires contrôlés (à gauche la valeur de l’entrée en glyphes Typannot et à droite leurs descriptions).....	208
Figure 5.14 – Exemple pour lequel la LOCini de la main ne peut pas être spécifiée car cette dernière est sortie du cadre (signeur 3 signe 025).....	211
Figure 5.15 – Réalisation du signe [FRANCE] (signeur 2 signe 264, vidéo 5.1).....	213
Figure 5.16 – Présentation de (a) la posture de référence et de (b) la LOCini du signe [FRANCE]	214

Figure 5.17 – Transcription sur le logiciel ELAN de la localisation initiale et du mouvement du signe [FRANCE]	215
Figure 5.18 – Rappel de l’hypothèse (a) qui concerne la LOCini spécifiquement	218
Figure 5.19 – Rappel des hypothèses (b) et (c) qui concernent le MOUV spécifiquement... ..	222
Figure 5.20 – Rappel de l’hypothèse (d) qui concernent les paramètres de la LOCini et du MOUV.....	228
Figure 5.21 - Extrait de la première section du fichier BVH ainsi que les informations concernant son contenu (en orange).....	234
Figure 5.22 - Illustration des axes XYZ selon un repère droit (le sens des axes détermine le signe des valeurs des offsets de chaque segment par rapport à ce repère).....	235
Figure 5.23 - Visualisation de la hiérarchie d'un fichier BVH (le zoom proposé sur la main droite fait état d'un découpage précis de tous les segments identiques sur le côté gauche du corps).....	235
Figure 5.24 - Extrait de la seconde section du fichier BVH ainsi que les informations concernant son contenu (en orange)	237
Figure 5.25 – Visualisation de la forme d’onde du signal sonore du déclenchement du <i>Perception Neuron</i> (signeur 3).....	239
Figure 6.1 – Réalisation du signe [PARTIR] (signeur 4 signe 209, vidéo 6.1)	245
Figure 6.2 – Réalisation du signe [MONDE] (signeur 1 signe 122, vidéo 6.2).....	245
Figure 6.3 – Réalisation du signe [VACANCES] (signeur 5 signe 200, vidéo 6.3).....	246
Figure 6.4 – Réalisation du signe [PÉDALER] (signeur 2 signe 005, vidéo 6.4).....	246
Figure 6.5 – Pourcentages des mouvements associés aux configurations, étude de Braffort sur la base du dictionnaire IVT (Moody 1986) (Braffort 1996 : 62)	248
Figure 6.6 – Première version du template, avec indication du segment qui impulse le mouvement (présence du « 1 » dans le vocabulaire contrôlé)	249
Figure 6.7 – Réalisation du signe [KILO] (signeur 5 signe 084, vidéo 6.5)	250
Figure 6.8 – Pourcentage du nombre de LOCini uniques selon chaque production	252
Figure 6.9 – Fréquences des crans relatifs à la flexion-extension (à gauche) et à l’abduction-adduction (à droite) du bras.....	253
Figure 6.10 – Fréquences des crans relatifs à la flexion-extension (à gauche), la rotation intérieure-extérieure de l'avant-bras (à droite)	254
Figure 6.11 – Fréquences des crans relatifs au DDLs de la main, prono-supination (à gauche), la flexion-extension (milieu) et l’abduction-adduction (à droite)	255

Figure 6.12 – Moyenne par production du nombre de DDLs non neutres au sein des LOCini	257
Figure 6.13 – Nombre d'apparition de DDL non neutre, toute production confondue.....	258
Figure 6.14 – Répartition des phases des MOUV selon le nombre de DDL.s et de segment.s actifs	259
Figure 6.15 – Répartition des 1573 signes selon le nombre de DDL.s et de segment.s actif.s au cours de chaque MOUV	261
Figure 6.16 – Catégorisation des 1573 signes en différents types de flux ou d'absence de flux	262
Figure 6.17 – Catégorisation en flux de propagation du mouvement des signes présentant un décalage temporel entre les DDLs actifs sur différents segments.....	263
Figure 6.18 – Nombre de signes dont les MOUV sont composés de deux segments actifs, selon un flux disto-proximal ou proximo-distal	265
Figure 6.19 – Nombre de signes dont les MOUV sont composés de trois segments actifs, selon un flux disto-proximal ou proximo-distal	266
Figure 6.20 – Types de liens entre groupements de DDLs entre le bras et l'avant-bras.....	267
Figure 6.21 – Types de liens entre groupements de DDLs entre l'avant-bras et la main	268
Figure 6.22 – Types de liens entre groupements de DDLs entre le bras et la main.....	269
Figure 6.23 – Schématisation du postulat général validé et récapitulatif des hypothèses de recherche qui ont été vérifiées ou non.....	272
Figure 6.24 – Répartition des 1573 signes selon une catégorisation bipartite de leur complexité	273
Figure 6.25 – Proportionnalité des différents liens synergiques de 689 signes pluri-segmentaux	275
Figure 6.26 – Répartition des 1573 signes selon une catégorisation de leur déploiement économique	275
Figure 6.27 – Deux mesures d'angle entre le vecteur du bras et celui de l'avant-bras se croisant au niveau du coude, dont les coordonnées sont connues (vue sagittale).....	278
Figure 6.28 – Deux mesures d'angle entre le vecteur virtuel orienté à la verticale de l'épaule et celui du bras se croisant au niveau de l'épaule (vue sagittale).....	279
Figure 6.29 – Axes [XYZ] et les plans correspondants	280
Figure 6.30 – Posture de référence employée et quantifications en degrés des différences avec la position de référence anatomique.....	281

Figure 6.31 – Correspondances entre les plans [XYZ] et les plans anatomiques par rapport au repère initial.....	282
Figure 6.32 – Correspondances entre les plans [XYZ] et les plans anatomiques par rapport au repère effectif (rotation des axes X et Z de 90° vers la droite selon l’axe Y).....	283
Figure 6.33 – Création d’un point virtuel à la verticale de l’épaule pour l’estimation de la flexion-extension (plan sagittal) et de l’abduction-adduction (plan frontal) du bras.....	284
Figure 6.34 – Identification des pôles de la flexion-extension du bras (plan sagittal).....	285
Figure 6.35 – Identification des pôles de l’abduction-adduction du bras (plan frontal).....	285
Figure 6.36 – Création d’un point virtuel à l’horizontale du coude pour l’estimation de la rotation intérieure-extérieure de l’avant-bras (plan transversal vu de dessus).....	286
Figure 6.37 – Identification des pôles de la rotation intérieure-extérieure de l’avant-bras (plan transversal).....	286
Figure 6.38 – Identification des pôles de la flexion-extension du bras (plan sagittal).....	287
Figure 6.39 – Réalisation du signe [FRANCHIR L’ARRIVÉE ENSEMBLE] (signeur 1 signe 036, vidéo 6.6).....	289
Figure 6.40 – Représentation squelettique des données cinématiques relatives au signe [FRANCHIR L’ARRIVÉE ENSEMBLE] (vidéo 6.7).....	290
Figure 6.41 – Graphiques représentant le suivi d’angles de la flexion-extension et de l’abduction-adduction du bras droit en fonction du temps du signe [FRANCHIR L’ARRIVÉE ENSEMBLE].....	291
Figure 6.42 – Réalisation du signe [PLONGER] (signeur 2 signe 213, vidéo 6.8).....	292
Figure 6.43 – Graphiques représentant le suivi d’angles de la flexion-extension et de l’abduction-adduction du bras droit en fonction du temps du signe [PLONGER].....	293
Figure 6.44 – Réalisation du signe [GROSSE MOUSTACHE] (signeur 3 signe 43, vidéo 6.9).....	293
Figure 6.45 – Graphiques représentant le suivi d’angles de la flexion-extension et de l’abduction-adduction du bras droit en fonction du temps du signe [GROSSE MOUSTACHE].....	294
Figure 6.46 – Réalisation du signe [SE RAPPROCHER] (signeur 3 signe 396, vidéo 6.10)	295
Figure 6.47 – Graphiques représentant le suivi d’angles de la flexion-extension et de la rotation intérieure-extérieure de l’avant-bras droit en fonction du temps du signe [SE RAPPROCHER].....	295
Figure 6.48 – Réalisation du signe [FRANCE] (signe 5 signe 144, vidéo 6.11).....	296

Figure 6.49 – Graphiques représentant le suivi d’angles de la flexion-extension et de la rotation intérieure-extérieure de l’avant-bras au sein du signe [FRANCE]	297
Figure 6.50 – Réalisation du signe [DATE] (signeur 3 signe 339, vidéo 6.12).....	298
Figure 6.51 – Graphiques représentant le suivi d’angles de la flexion-extension et de l’abduction-adduction du bras droit en fonction du temps du signe [DATE]	298
Figure 6.52 – Représentation 3D du participant sur le logiciel <i>Axis Neuron</i> en début d’enregistrement (à gauche) et en cours d’enregistrement (à droite), avec déplacement du torse vers l’avant	300
Figure 6.53 – Représentation de la représentation 3D du sujet et de la croix rouge une fois le bouton « ZERO » actionné (<i>Axis Neuron</i> 2019 : 7).....	301
Figure 6.54 – Réalisation du signe [CHIC] (signeur 7-2 signe 25, vidéo 6.13).....	301
Figure 6.55 – Suivis d’angles de la flexion-extension du bras droit en fonction du temps du signe [CHIC] selon (a) l’amplitude totale du DDL et (b) une amplitude réduite du DDL	302
Figure 6.56 – Réalisation du signe [ALORS] (signeur 10 signe 006, vidéo 6.14)	302
Figure 6.57 – Représentation sous forme de squelette des données cinématiques relatives au signe [ALORS] (vidéo 6.15)	303
Figure 6.58 – Réalisation du signe [LE TIRER] (signeur 6 signe 288, vidéo 6.16)	304
Figure 6.59 – Angles de la flexion-extension de l’avant-bras et de la flexion-extension du bras droit en fonction du temps pour la réalisation du signe [LE TIRER]	305
Figure 6.60 – Réalisation du signe [LUI] (signeur 10 signe 018, vidéo 6.17).....	305
Figure 6.61 – Angles d’abduction-adduction du bras et de la flexion-extension de l’avant-bras droits en fonction du temps pour la réalisation du signe [LUI].....	306
Figure 6.62 – Ruban de Möbius comme métaphore du lien qui unit phonologie et sémantique utilisée par Stokoe (1991)	310
Figure 6.63 – Réalisation du signe [JAMAIS] (signeur 9 signe 168, vidéo 6.18).....	311
Figure 6.64 – Réalisation du signe [JAMAIS] (signeur 10 signe 183, vidéo 6.19).....	312
Figure 6.65 – Réalisation du signe [GAGNER] (signeur 5 signe 264, vidéo 6.22).....	312
Figure 6.66 – Réalisation du signe [REEMPLIR LE FORMULAIRE] (signeur 4 signe 173, vidéo 6.26).....	313
Figure 6.67 – Réalisation du signe [RICHE] (signeur 5 signe 052, vidéo 1.11).....	314

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 – Trois types de mouvements (reproduction de Millet 2019 : 72)	16
Tableau 1.2 – Fréquences d’apparition des différentes classes de mouvement répertorié à partir de Moody (1986) (Braffort 1996 : 73)	18
Tableau 1.3 – Mise en exergue des points communs et des différences entre les noms de [YES] et de [STUPID] (le symbole Ø signifie que les segments concernés ne sont pas en mouvement)	33
Tableau 1.4 – Cinq postulats d’Euclide et schémas correspondants	49
Tableau 2.1 – Différents systèmes de notations des LS avec leur objectif premier, le point de vue qu’ils ont adopté et leur représentation graphique du signe [MAISON] (dont les caractéristiques du mouvement sont en bleu)	90
Tableau 2.2 – Glyphes génériques de la LOCini (traduit à partir de Chevrefils <i>et al.</i> 2021). 100	
Tableau 3.1 – Récapitulatif des avantages et inconvénients associés aux différentes familles de MoCap	140
Tableau 5.1 – Métadonnées du corpus	200
Tableau 5.2 – Métadonnées concernant la nature des tâches réalisées par les signeurs, leurs durées ainsi que le nombre de signes produits durant chacune d’elles	203
Tableau 5.3 – Vocabulaire contrôlé concernant la LOCini (colonne de gauche et centrale) et son illustration (colonne de droite)	209
Tableau 5.4 – Vocabulaire contrôlé concernant le MOUV (colonne de gauche et centrale) et son illustration	212
Tableau 5.5 – Temps nécessaire à la transcription d’un signe, temps estimé pour la transcription de l’ensemble du corpus	216
Tableau 5.6 – Nombre de signes transcrits par production	216
Tableau 5.7 – Extrait d’un fichier de base de données de référence, obtenu de l’export des transcriptions réalisées sur ELAN	217
Tableau 5.8 – Visuel des données traitées par le script Python pour l’hypothèse (a)	219
Tableau 5.9 – Extrait de l’ <i>output</i> de la tâche 1	220
Tableau 5.10 – Extrait de l’ <i>output</i> de la tâche 2	220
Tableau 5.11 – Extrait de l’ <i>output</i> de la tâche 3	221
Tableau 5.12 – Visuel des données traitées par le script Python pour les hypothèses (b) et (c)	223

Tableau 5.13 – Extrait de l' <i>output</i> de la tâche 4.....	224
Tableau 5.14 – Extrait de l' <i>output</i> de la tâche 5.....	225
Tableau 5.15 – Extrait de l' <i>output</i> de la tâche 6.....	226
Tableau 5.16 – Extrait de l' <i>output</i> de la tâche 7.....	227
Tableau 5.17 – Visuel des données traitées par le script Python pour l'hypothèse (d).....	229
Tableau 5.18 – Possibilités de relations synergiques entre les pôles du bras et de l'avant-bras	229
Tableau 5.19 – Possibilités de relations synergiques entre les pôles de l'avant-bras et de la main	230
Tableau 5.20 – Possibilités de relations synergiques entre les pôles du bras et de la main ...	231
Tableau 5.21 – Extrait de l' <i>output</i> de la tâche 8.....	233
Tableau 5.22 – Extrait du fichier de synchronisation (exprimé en millisecondes)	239
Tableau 5.23 – Décalages détectables après la phase de synchronisation entre la MoCap et la vidéo	240
Tableau 5.24 – Visuel de la catégorisation des données tirées du fichier BVH opérée par le script <code>skeleton_complete.m</code> et la fonction <code>loadbvh_modified.m</code>	241
Tableau 6.1 – Ajout de la colonne « Nbr of DDL/sign » permettant d'obtenir une seule catégorie par signe	260
Tableau 6.2 – Ajout de la colonne « number of segment » permettant d'indiquer le nombre de segments activés au cours d'un MOUV à flux disto-proximal ou proximo-distal.....	264
Tableau 6.3 – Output du traitement de la synergie des groupements de DDLs pour obtenir une catégorisation par signe	274

ANNEXES

Annexe A

Name	Symbol	Description
Fist	A, A/S, A _t	The hand clasped with thumb in <u>a</u> , <u>s</u> or <u>t</u> , Fig. 1
Flat hand	B, 5	The open or spread hand, thumb out or as in <u>b</u> , Fig. 1
Curved hand	C, C _#	The <u>c</u> and <u>o</u> of Fig. 1
Retracted hand	E	The fingers clenched to palm; <u>e</u> , Fig. 1
F-hand	F	Thumb and forefinger touch, other fingers spread; <u>f</u> , Fig. 1
Index	G	Allocheric forms: <u>g</u> , <u>d</u> , <u>l</u> of Fig. 1
H-hand	H	The <u>h</u> , <u>u</u> , <u>n</u> of Fig. 1; first two fingers extended and joined
Pinkie or I-hand	I	The little finger projects from closed hand; <u>i</u> , Fig. 1
K-hand	K	The index, 2 nd , and thumb make <u>k</u> , Fig. 1
L-hand	L	The thumb and index make right angle; <u>l</u> , Fig. 1
Bent-hand	M	The hand makes a dihedral angle, one allocher is the <u>m</u> of Fig. 1
R-hand	R	The first two fingers crossed; <u>r</u> , Fig. 1
V-hand	V	The index and 2 nd extended and spread; <u>v</u> , Fig. 1
W-hand	W	The first three fingers extended and spread
Y-hand	Y	The thumb and little finger are spread out from fist; allocheric forms: middle finger bent in from spread flat hand; index and pinkie up from closed hand

Annexe A.1 – Liste des dix-neuf configurations recensées par Stokoe, accompagnées de leurs descriptions et symboles respectifs (Stokoe 1960 : 34)

Name	Symbol	Description
Zero tab	Ø	The space in front of signer's body (or blank leftmost space)
Face	○	The head itself and space around it
Brow	∩	The upper face from brows to hair line including temples
Mid-face	◦	The eyes, nose, or any point between ∩ and ∪ contrasting with them
Lower face	∪	The chin, mouth, or lips
Side face	)	The cheek, ear, or jaw
Neck	⌢	The space between chin and chest
Body or trunk	[]	The space from shoulders to hips inclusive
Upper arm	∖	The region of the biceps
Elbow	∟	The distal side of forearm, or elbow itself
Supine arm	Q	The proximal side of forearm or wrist
Prone arm	∅	The distal side of wrist or back or hand

Annexe A.2 – Liste des douze emplacements recensés par Stokoe, accompagnés de leurs descriptions et symboles respectifs (Stokoe 1960 : 34)

Name	Symbol	Description
Vertical motion	^	upward motion
	v	downward motion
	∩	up and down motion
Lateral motion	>	Rightward motion
	<	Leftward motion
	∑	Right and left motion
To and fro motion	τ	Toward signer
	⊥	Away from signer
	∩	To and fro
Twisting motion	∩	Supinative movement
	∅	Pronative movement
	∅	Oscillating twist

Carpal motion	↯	Nodding or shaking motion, pivoting at wrist; may be proximal, distal, or both
Foral motion	□	Opening motion of a configuration
	#	Closing motion of a configuration
Approach	)(	Dez approaches tab*
Touch	×	Dex touches tab*
Graze	↑, →, or ↘	Dez brushes or slides across tab*
Link	⌘	Double dez clasp, hook, etc., or dez grasps tab
Enter	⊗ or ⊙	Dez is inserted or thrust through tab
Cross	≠	Double dez cross, one over other
Separate	÷	Linked, crossed, inserted, or adjacent dez moves away
Interchange	↔	Double dez or tab and dez hands reverse relative positions

*If double dez the interaction is mutual.

Annexe A.3 – Liste des vingt-quatre types de mouvements recensés par Stokoe, accompagnés de leurs descriptions et symboles respectifs (Stokoe 1960 : 34-35)

Annexe B



Formulaire de consentement éclairé

Présentation du projet

Titre du projet : CLM-MOCAP (Corpus pour l'étude de la Localisation initiale et du Mouvement - MOTion CAPture)

Responsables du projet : Léa Chevrefils (doctorante), Dominique Boutet (directeur de thèse), Brice Guignard (co-encadrant de thèse)

Lieu du projet : Université de Rouen à Mont-Saint-Aignan, salle d'enregistrement (salle A 100) dans le bâtiment A.

Dédommagement : La participation se fait sur la base du volontariat. Un repas sera proposé à l'ensemble des participants à la Maison de l'Université le jour de l'enregistrement.

Description du projet : Ce projet d'enregistrement de corpus s'inscrit dans un travail de rédaction d'une thèse de doctorat traitant de la structuration de la langue des signes française (LSF). Le corpus en LSF nécessite des signeurs natifs dont les productions seront enregistrées par un système de captation 3D et par caméra vidéo.

Durée de l'enregistrement : L'ensemble ne dépassera pas 15 minutes d'enregistrement par participant.

Présentation des enregistreurs : Un capteur de mouvement, appelé *Perception Neuron*, sera placé sur l'ensemble du corps du participant avant le début de l'enregistrement. Le *Perception Neuron* permet d'obtenir une représentation 3D de l'ensemble du corps humain.



Le dispositif de captation est très léger à porter et ne présente aucun danger pour les participants. Une caméra vidéo enregistrera aussi l'entièreté de la séance.

Déclaration de consentement

Autorisation du participant pour l'enregistrement vidéo, l'archivage, l'exploitation scientifique et la diffusion des données enregistrées.

- J'ai bien lu et compris la description du projet et le fonctionnement général des enregistreurs présentés. J'ai reçu toutes les réponses à mes questions et je suis d'accord pour contribuer à ce projet dans les limites des conditions acceptées ci-dessous.
- Je sais que la participation à cette étude est entièrement volontaire, je peux communiquer ma volonté de ne plus participer à ce projet à tout moment. Il suffit d'en informer les personnes en charge.
- J'accepte et autorise expressément l'équipe du projet à utiliser les images qui me représentent.
- J'accepte que les enregistrements vidéo soient transcrits intégralement dans le cadre de la constitution d'un corpus informatisé. Ce corpus transcrit ne pourra être utilisé qu'à des fins scientifiques de recherches scientifiques.
- J'accepte l'utilisation par l'équipe des enregistrements et des transcriptions du corpus dans le cadre de publications scientifiques, colloques et cours d'Université.
- J'accepte que le corpus soit déposé en ligne et accessible à la communauté scientifique.

NOM prénom : _____

Date :

Signature :

Coordonnées des responsables scientifiques du projet :

Léa Chevretils, doctorante au laboratoire DyLIS à l'Université Rouen Normandie
lea.chevretils@univ-rouen.fr

Dominique Boutet, Maitre de Conférences habilité à l'Université de Rouen Normandie
dominique_jean.boutet@orange.fr

Brice Guignard, Maitre de Conférences à l'Université de Rouen Normandie
brice.guignard@neuf.fr

Annexe B.1 – Formulaire de consentement éclairé signé par les participants à l'enregistrement du corpus CLM-MOCAP

Annexe C

Annexe C.1 – Nombre de LOCini produites et de LOCini différentes par production

Nombre de LOCini	Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7-1	Prod. 7-2	Prod. 8	Prod. 9	Prod. 10
Produites	86	168	260	121	138	170	160	152	103	89	126
Différentes	79	134	207	100	132	139	129	133	71	79	119

Annexe C.2 – Fréquence d'utilisation des crans relatifs à la flexion-extension et à l'abduction-adduction du bras par production

LOCini		Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7-1	Prod. 7-2	Prod. 8	Prod. 9	Prod. 10
Flexion-extension du bras	☐☐☐☐	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	☐☐☐☐	1	0	2	0	0	0	0	3	3	0	3
	☐☐☐☐	52	94	129	60	38	101	82	76	88	46	71
	☐☐☐☐	27	70	107	50	56	60	75	69	11	39	36
	☐☐☐☐	6	4	20	8	44	7	3	3	1	4	14
	☐☐☐☐	0	0	1	2	0	1	0	1	0	0	2
	☐☐☐☐	0	0	1	0	0	10	0	0	0	0	0
Abduction-adduction du bras	☐☐☐☐	0	0	2	0	0	1	1	0	0	0	0
	☐☐☐☐	0	1	0	5	11	3	1	2	1	0	3
	☐☐☐☐	56	136	152	84	63	77	132	106	74	59	78
	☐☐☐☐	27	30	75	25	46	67	26	38	28	29	38
	☐☐☐☐	3	1	25	6	16	21	0	6	0	1	7
	☐☐☐☐	0	0	6	1	2	1	0	0	0	0	0
	☐☐☐☐	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Annexe C.3 – Fréquence d'utilisation des crans relatifs à la flexion-extension et à la rotation intérieure-extérieure de l'avant-bras par production

LOCini		Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7-1	Prod. 7-2	Prod. 8	Prod. 9	Prod. 10
Flexion-Extension de l'avant-bras	☐☐☐☐	0	0	0	1	3	0	0	1	0	0	1
	☐☐☐☐	0	0	7	3	8	15	0	0	0	2	10
	☐☐☐☐	29	34	53	28	47	47	42	31	8	13	45
	☐☐☐☐	35	105	98	74	66	86	87	63	85	36	40
	☐☐☐☐	22	28	102	15	14	10	30	57	10	38	30
Rotation intérieure-extérieure de l'avant-bras	☐☐☐☐	13	11	37	5	26	10	12	2	4	2	8
	☐☐☐☐	24	89	93	48	44	44	90	30	39	29	28
	☐☐☐☐	40	61	101	45	54	60	47	57	36	30	36
	☐☐☐☐	8	5	22	18	7	41	8	51	23	18	44
	☐☐☐☐	1	2	7	5	7	14	2	12	1	10	10

Annexe C.4 – Fréquence d'utilisation des crans relatifs à la flexion-extension, à l'abduction-adduction et à la prono-supination de la main par production

LOCini	Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7-1	Prod. 7-2	Prod. 8	Prod. 9	Prod. 10	
Flexion-extension de la main	☒☒☒☒	3	21	17	11	10	10	7	17	0	0	13
	☒☒☒☒	16	49	122	32	50	38	51	38	20	18	28
	☒☒☒☒	43	59	80	52	48	74	58	56	69	40	60
	☒☒☒☒	19	33	30	21	24	21	22	26	13	20	15
	☒☒☒☒	5	6	10	5	6	23	20	15	1	11	10
Abduction-adduction de la main	☒☒☒☒	4	8	12	32	14	11	9	7	3	0	5
	☒☒☒☒	17	50	54	34	43	18	27	34	6	9	17
	☒☒☒☒	64	110	194	55	81	134	123	109	94	80	102
	☒☒☒☒	1	0	0	0	0	5	0	2	0	0	2
Prono-supination de la main	☒☒☒☒	20	29	27	7	21	27	52	33	5	27	21
	☒☒☒☒	5	30	35	8	14	25	22	15	21	14	12
	☒☒☒☒	31	46	86	50	39	60	47	38	29	16	49
	☒☒☒☒	15	20	45	16	15	33	20	27	20	14	23
	☒☒☒☒	15	43	63	39	49	25	16	39	28	18	21

Annexe C.5 – Catégorisation des phases de MOUV selon le nombre de DDL.s et de segment.s actif.s par production

Catégorie par phase	Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7-1	Prod. 7-2	Prod. 8	Prod. 9	Prod. 10
Cat1 0SEG	11	16	37	27	21	45	33	37	17	18	44
Cat2 1SEG 1DDL	114	192	291	180	124	181	231	203	110	79	218
Cat3 1SEG +DDLs	29	41	36	14	24	23	28	36	6	18	19
Cat4 1DDL +SEG	66	101	160	83	112	94	73	98	63	42	66
Cat5 +SEG +DDLs	11	8	27	16	51	24	11	24	21	10	32

Annexe C.6 – Catégorisation des MOUV selon le nombre de DDL.s et de segment.s actif.s par production

Catégorie par signe	Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7-1	Prod. 7-2	Prod. 8	Prod. 9	Prod. 10
Cat1 0SEG	4	6	16	10	10	31	17	14	6	7	6
Cat2 1SEG 1DDL	32	77	104	44	52	72	86	55	46	38	60
Cat3 1SEG +DDLs	7	13	16	8	9	7	8	6	2	9	6
Cat4 1DDL +SEG	37	65	101	47	50	48	42	58	41	26	32
Cat5 +SEG +DDLs	6	7	23	12	17	12	7	19	8	9	22

C.7 – Catégorisation des MOUV selon les différents types de flux par production signée

Catégorie par <i>signe</i>	Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7-1	Prod. 7-2	Prod. 8	Prod. 9	Prod. 10
CatA Non concerné	43	96	136	62	71	110	111	75	54	54	72
CatB Ø Flux (simple)	3	21	31	4	15	10	14	17	17	9	7
CatC Ø Flux (répété)	8	13	26	12	26	13	15	20	7	7	13
CatD Flux Dist-Prox	20	16	30	21	13	24	13	23	7	10	14
CatE Flux Prox-Dist	11	18	34	20	9	13	7	14	15	7	12
CatF Flux Indéterminé	1	4	3	2	4	0	0	3	3	2	8

C.8 – Catégorisation des phases de MOUV selon les liens de synergie des DDLs actifs du bras et de l'avant-bras par production

Synergie bras/avant-bras par <i>phase</i>	Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7-1	Prod. 7-2	Prod. 8	Prod. 9	Prod. 10
Synergique	11	14	28	12	12	11	9	6	13	11	16
Partiellement synergique	3	1	6	6	8	6	1	3	2	3	9
Non synergique	23	23	45	29	29	30	13	34	25	12	24

C.9 – Catégorisation des phases de MOUV selon les liens de synergie des DDLs actifs de l'avant-bras et de la main par production

Synergie avant-bras/main par <i>phase</i>	Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7-1	Prod. 7-2	Prod. 8	Prod. 9	Prod. 10
Synergique	14	31	37	13	21	14	17	25	11	12	18
Partiellement synergique	10	24	28	7	17	10	13	21	10	7	17
Non synergique	12	34	49	14	20	19	18	27	18	11	21
Non traité	9	23	27	7	17	10	13	19	10	7	17

C.10 – Catégorisation des phases de MOUV selon les liens de synergie des DDLs actifs du bras et de la main par production

Synergie bras/main par <i>phase</i>	Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7-1	Prod. 7-2	Prod. 8	Prod. 9	Prod. 10
Synergique	5	16	20	9	23	9	11	11	12	4	17
Partiellement synergique	3	14	19	6	22	10	11	11	11	4	17
Non synergique	10	21	41	14	31	15	17	22	17	7	24
Non traité	3	13	18	6	21	8	11	10	11	4	17

C.11 – Catégorisation des MOUV selon les liens de synergie des DDLs actifs par production

Par signe	Prod. 1	Prod. 2	Prod. 3	Prod. 4	Prod. 5	Prod. 6	Prod. 7-1	Prod. 7-2	Prod. 8	Prod. 9	Prod. 10
Synergique	6	17	17	10	8	6	4	7	9	11	7
Partiellement synergique	10	6	21	11	12	12	6	9	5	4	11
Non synergique	17	21	50	29	19	28	17	39	21	12	15
Non traité	10	28	36	9	28	14	22	22	14	8	21

C.12 – Catégorisation des MOUV selon les liens de synergie et le nombre de DDLs actifs

Synergie par signe	Cat4	Cat5
Synergique	100	2
Partiellement synergique	53	54
Non synergique	245	23
Non traité	149	63

Formalisation et modélisation du mouvement en Langue des Signes Française

Pour une approche kinésio-linguistique des productions gestuelles

Ce travail de recherche propose d'observer le déploiement des signes par le prisme des approches dynamiques du contrôle moteur. L'objectif est d'identifier au sein des productions signées le principe de simplicité motrice naturel et spontané qui régit le corps. Pour cela, nous avons mis en place et analysé un corpus de Langue des Signes Française semi-dirigé enregistré par une caméra ainsi que par un système de captation tridimensionnel, le *Perception Neuron*. Une transcription de deux paramètres kinésiologiques – la localisation initiale et le mouvement – a été réalisée avec le système Typannot sur 1573 signes. Les résultats révèlent que le mouvement sollicite majoritairement l'activation d'un unique segment au sein du membre supérieur ; ou qu'il peut relever de coordinations stables, appelées synergies, lorsque plusieurs segments sont employés. À contre-courant des représentations traditionnelles qui font du mouvement le paramètre le plus complexe à appréhender, nous démontrons qu'il est aisément descriptible à partir du moment où il est couplé à celui de la localisation initiale.

Ce travail dévoile l'existence d'une influence directe de la structure corporelle sur celle des signes, ce qui nous permet de dépeindre les contours d'une *kinésio-linguistique*, discipline qui s'appliquerait à décrire comment les organisations corporelles dynamiquement organisées forment des réalisations signifiantes au sein des langues signées ou vocales.

Mots-clés : Langue des Signes Française, phonologie, mouvement, approches dynamiques, capture de mouvement, kinésio-linguistique

In this research the deployment of signs is observed through the prism of dynamic approaches to motor control. The objective is to identify the natural and spontaneous principle of motor simplicity that governs the body within signed productions. For this purpose, we set up and analyzed a corpus of semi-directed French Sign Language productions recorded by a camera as well as by a three-dimensional capture system, the *Perception Neuron*. A transcription of two kinesiological parameters – initial location and movement – was accomplished with the Typannot system on 1573 signs. The results show that movement mainly involves the activation of a single segment within the upper limb. When several segments are used, movement involves stable coordinations called synergies. Contrary to traditional representations in which movement is the most complex parameter, we demonstrate that it can be easily described when coupled with gestures' initial location.

This study uncovers a direct influence of body structure on sign structure. We thus propose to create a new field which we call *kinesio-linguistics* and which could be used to describe how dynamically organized bodies form meaningful realizations within signed or vocal languages.

Keywords: French sign language, phonology, movement, dynamic approaches, motion capture, kinesio-linguistics