Modèle descriptif des signes pour un traitement automatique des langues des signes

Michael Filhol

▶ **To cite this version:**

Michael Filhol. Modèle descriptif des signes pour un traitement automatique des langues des signes. Informatique et langage [cs.CL]. Université Paris sud, 2008. Français. NNT : . tel-01848869

HAL Id: tel-01848869
https://hal.science/tel-01848869

Submitted on 25 Jul 2018

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.

N° d'ordre : 9065

Thèse

pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Paris 11
Spécialité : Informatique

présentée par

Michael Filhol

Modèle descriptif des signes pour un traitement automatique des langues des signes

---

Soutenue le 27 juin 2008 devant le jury composé de

Anne Vilnat présidente
Patrice Dalle rapporteur
Robert E. Johnson rapporteur
Sylvie Gibet examinatrice
Annelies Braffort directrice

Thèse préparée au sein du

Laboratoire d'informatique pour la mécanique
et les sciences de l'ingénieur (Limsi)

CNRS UPR 3251

À personne.

Pour tout le monde.

Résumé

Les approches formelles de représentation des signes des langues des signes sont majoritairement paramétriques et nous montrons en quoi celles-ci ne sont pas suffisantes dans l'optique d'une utilisation informatique. Les plus fortes raisons sont le caractère ni nécessaire ni suffisant de l'ensemble de paramètres traditionnellement utilisé, leur nature fixe alors qu'un signe est dynamique et évolue au cours du temps, et le fait que les descriptions ne rendent pas compte de l'adaptabilité des signes décrits à différents contextes, pourtant à l'origine de leur réutilisabilité et de la force de concision des langues des signes. Nous proposons Zebedee, un modèle de description en séquence d'unités temporelles décrivant chacune un ensemble de contraintes nécessaires et suffisantes, appliquées à un squelette. L'espace de signation est vu comme un espace euclidien dans lequel toute construction géométrique annexe est possible. Les dépendances entre éléments des descriptions ou sur des valeurs contextuelles sont non seulement possibles mais pertinentes, et reposent sur des considérations à la fois articulatoires, cognitives et sémantiques. Nous donnons ensuite deux processus complémentaires d'évaluation : en informatique où nous discutons l'implantation de Zebedee dans une plateforme d'animation de signeur virtuel et son utilisation pour la diffusion d'informations en gare, et en linguistique où nous décrivons l'avantage d'une base de données et les nouvelles possibilités de requêtes offertes au linguiste. En perspectives, nous citons plusieurs domaines informatiques où Zebedee sera utile et plusieurs questionnements linguistiques actuels auxquels il offre des pistes de réponse.

Mots-clés

Traitement automatique des langues, langue des signes, modèle de description, représentation formelle, animation de signeur virtuel.

Abstract

Formal approaches to representing the signs of Sign Languages are traditionally parametric and this work shows that they are inappropriate for use in computer science. The main reasons are: the parameters used are neither all necessary nor do they form a sufficient set; parameters take on fixed values whereas signs are dynamic in nature and values change through time; parametric descriptions do not account for the signs' adaptability to context, hence are not reusable, which brings them to disregard the power in concision of sign languages. We propose a model called Zebedee, which describes signs in a sequence of timing units, each of which specifies a set of necessary and sufficient constraints to apply to a skeleton. The signing space is regarded as a Euclidean geometric space where any auxiliary geometric object may be built. Dependencies between elements of the descriptions or indeed on context are not only possible but also made relevant, and are based on articulatory, semantic and cognitive issues. We then give two complementary processes for evaluation: in computer science with the implementation of Zebedee in a signing avatar animation platform and an information display system for train stations, and in linguistics with a data base and new possibilities of queries that linguists may want to test. As prospects, we discuss different computational fields in which Zebedee should be useful, and several present linguistic problems for which it holds pieces of solutions.

Keywords

Language processing, Sign Language, descriptive model, formal representation, signing avatar animation.

Table des matières

1 Introduction **7**

2 Contexte de l'étude **9**

2.1 « Langue des signes » ? . . . 9

2.1.1 Statut de langue . . . 9

2.1.1.1 Un système linguistique propre . . . 10

2.1.1.2 Une parmi d'autres . . . 10

2.1.1.3 Interface langue-culture . . . 11

2.1.2 Contexte socio-linguistique . . . 12

2.1.2.1 Historique . . . 12

2.1.2.2 Actuel . . . 12

2.1.2.3 Légal . . . 13

2.1.3 Éléments de linguistique . . . 13

2.1.3.1 Deux façons de dire . . . 14

2.1.3.2 Structures de grande iconicité . . . 15

2.1.3.3 Rôle indicateur du regard . . . 17

2.2 Situation du travail . . . 18

2.2.1 Domaine linguistique ou informatique . . . 18

2.2.2 Niveau phonologique ou morphologique . . . 18

2.2.3 Description de l'intention ou de la production . . . 20

2.3 Défis . . . 21

2.3.1 Construction : un plan peut valoir mieux qu'une photo . . . 21

2.3.2 Formalisme : pas d'interprétation . . . 21

2.3.3 Ouverture : l'acceptable doit pouvoir être décrit . . . 22

3 Tas de lard et analyse des besoins 23

3.1 Approches historiques et actuelles 23

3.1.1 Approches exactes ou réalistes 23

3.1.2 Approches paramétriques 25

3.1.3 SignWriting, une approche hybride 28

3.1.4 Approche temporelle 31

3.1.5 Résumé des problématiques 32

3.2 Analyse par problématique 33

3.2.1 Formel ? 33

3.2.2 Souplesse de spécification et ouverture du modèle 35

3.2.3 Configurations manuelles 38

3.2.4 Positionnement 43

3.2.5 Éléments non manuels 45

3.2.6 Variation dans le temps et dynamique des signes 46

3.2.6.1 Description des mouvements manuels 46

3.2.6.2 Synchronisation des variations temporelles 48

3.2.6.3 Dynamisme des modèles et des signes décrits 50

3.2.7 Construction, dépendances et intentionnalité 52

3.2.8 Réutilisabilité dans différents contextes 55

3.3 Réponses, cahier des charges 56

3.3.1 Formel ! 57

3.3.2 Souplesse de structure et liberté de (non-)spécification 58

3.3.3 Configurations ? 60

3.3.4 Placement des articulateurs 60

3.3.5 Le « non-manuel » 61

3.3.6 Mouvement, synchronisation et dynamisme 62

3.3.7 Construction et dépendances 65

3.3.7.1 Dépendances entre éléments 67

3.3.7.2 Objets annexes 67

3.3.8 Réutilisabilité, déformations en contexte 68

3.4 Philosophie du modèle proposé 69

4 *Zebedee* : un modèle de représentation des signes 71

4.1 Un modèle spatio-temporel . . . 72

4.1.1 De l'espace... . . . 72

4.1.2 ...et du temps . . . 73

4.1.2.1 Séquence temporelle et unités de description . . . 73

4.1.2.2 Répartition dans le temps . . . 75

4.2 Un squelette . . . 77

4.2.1 Définition formelle . . . 77

4.2.1.1 Modélisation . . . 77

4.2.1.2 Objets liés . . . 81

4.2.2 Notre squelette . . . 82

4.3 Spécification des unités temporelles . . . 85

4.3.1 Primitives articulatoires aux postures-clés . . . 85

4.3.1.1 Positionnement d'un site corporel . . . 86

4.3.1.2 Orientation directrice . . . 88

4.3.1.3 Orientation dans un plan . . . 89

4.3.2 Transitions et contraintes maintenues . . . 91

4.3.3 Options sur les transitions . . . 93

4.3.3.1 Option d'arc . . . 94

4.3.3.2 Option de dynamisme . . . 95

4.3.4 Options « faibles » sur les unités . . . 97

4.3.4.1 Les trills . . . 97

4.3.4.2 Options de précédence . . . 98

4.4 Dépendances de construction . . . 99

4.4.1 Dépendances internes . . . 100

4.4.2 Dépendances contextuelles . . . 100

4.4.3 Options faibles et dépendances . . . 102

4.5 Alias, macros et sucres de syntaxe . . . 103

4.5.1 Alias d'objet . . . 104

4.5.2 Macro-contraintes . . . 105

4.5.3 Boucles . . . 106

4.6 Exemple commenté . . . 107

4.7 Résumé . . . 111

5 Évaluation du modèle **113**

5.1 Bilan . . . 113

5.1.1 Vérification du cahier des charges . . . 113

5.1.2 Questionnements et limites . . . 115

5.1.2.1 La question des frottements . . . 115

5.1.2.2 La question des trajectoires . . . 116

5.2 Évaluation en linguistique . . . 118

5.2.1 Utilité du modèle et mise en œuvre . . . 118

5.2.2 Propositions pour une évaluation . . . 119

5.3 Évaluation en informatique . . . 122

5.3.1 Implantation d'un système de synthèse . . . 123

5.3.1.1 À chaque instant son « CSP » . . . 124

5.3.1.2 Aux postures-clés . . . 125

5.3.1.3 En transition . . . 127

5.3.1.4 Résolutions impossibles . . . 128

5.3.2 Évaluation . . . 130

6 Perspectives et conclusions **133**

6.1 Perspectives . . . 133

6.1.1 En linguistique . . . 133

6.1.1.1 Recouvrement des visées . . . 133

6.1.1.2 Origine cognitive des signes . . . 135

6.1.1.3 Nature des signes et nivellement linguistique . . . 136

6.1.1.4 Naissance de « constructeurs » morphémiques ? . . . 138

6.1.2 En informatique . . . 141

6.2 Résumé et conclusion . . . 143

A Langue des signes **157**

A.1 Vignettes des exemples . . . 157

A.1.1 Signes lexicaux . . . 157

A.1.2 Dactylologie . . . 162

A.2 La grande iconicité . . . 163

B Définition du squelette **165**

C Cinématique inverse **175**

D Référence du langage de spécification **177**

D.1 Langage de spécification 177

D.1.1 Éléments lexicaux 177

D.1.2 Syntaxe 177

D.1.2.1 Définition de macro 178

D.1.2.2 Définition d'une séquence 178

D.1.2.3 Expressions 179

D.1.2.4 Divers 180

D.2 Expressions et typage 180

D.2.1 Priorité et associativité des opérateurs 180

D.2.2 Typage des expressions 180

D.2.2.1 Unaire 180

D.2.2.2 Binaires 181

D.2.2.3 Ternaires 181

E Exemples supplémentaires de description **183**

E.1 [ARBRE] 183

E.2 [SANTÉ] 184

E.3 [FILM] 184

Chapitre 1

Introduction

Les langues sont des objets passionnants et mystérieux. Difficilement modélisables, elles sont d'une souplesse et d'une évolutivité qui déconcertent facilement l'informaticien naïf. Alors qu'il y a quelques dizaines d'années, l'on pensait que quelques dizaines d'années suffiraient à l'informatique pour accomplir des traductions automatiques de qualité, on constate aujourd'hui qu'elle en est très loin...

Le passage d'un système linguistique à un autre que représente une traduction nécessite un modèle de chacun des deux systèmes en jeu, plus un algorithme effectuant la traduction. Avant même ce stade, la représentation informatique d'un système linguistique seul est déjà un défi de taille. Comme nous le verrons dès le début de notre exposé, une langue comprend des subtilités non quantifiables dont les descriptions formelles sont encore bien loin d'être triviales. Le *traitement automatique des langues*, discipline informatique se penchant sur ces questions, a de beaux jours devant lui.

Cette thèse relève du traitement automatique des langues et s'intéresse au cas des *langues des signes* en particulier. Exotiques par leur mise en œuvre de gestes et non de sons, celles-ci sortent du cadre phonologique traditionnel et ne disposent pas d'une écriture phonétique internationale comme les langues vocales pour transcrire leurs réalisations. Exotiques aussi par leur multilinéarité, elles mettent à profit leur canal gestuel pour véhiculer plusieurs éléments d'information en même temps tandis que l'appareil vocal ne permet la production que d'un son à la fois. La modélisation des langues gestuelles pour des applications en informatique pose donc naturellement des questions différentes de celles posées par les langues vocales. Le travail présenté dans les chapitres qui suivent traite la question de la description formelle des unités signées.

Comment décrire une séquence gestuelle, par exemple un signe (une unité lexicale en langue des

signes), en vue d'applications informatiques ? Pour y répondre, nous découpons notre présentation en cinq chapitres distincts. Le chapitre 2 présente d'abord la langue des signes, objet de notre modélisation : son statut, sa place en société et les bases de sa théorie. Nous situons ensuite nos réflexions pour en préciser la problématique scientifique, et formulons les grands défis à poser pour un modèle descriptif le moins restrictif possible. Le chapitre 3 dresse un état des lieux des travaux existants en la matière, puis en propose une analyse critique et détaillée. Une réponse est ensuite apportée à chaque critique formulée. Le chapitre 4 constitue le cœur de notre travail en ce sens où nous y exposons le modèle élaboré pendant la thèse. Il fait état d'une approche nouvelle et complète. Notons que nous présentons ce chapitre de manière indépendante de telle sorte qu'il puisse être détaché du reste de notre mémoire pour une utilisation autonome. Le chapitre 5 procède à un bilan, en vérifiant que le modèle répond aux exigences énoncées plus tôt et ouvre un volet d'évaluation. Celui-ci détaille le protocole que nous proposons pour juger de la pertinence et de l'utilisabilité du modèle. Enfin, le chapitre 6 annonce de multiples perspectives d'utilisation et de valorisation, avant de conclure par un résumé de l'exposé.

...

Illustration extraite de [Verlaine]

Chapitre 2

Contexte de l'étude

L'objectif de ce chapitre est de situer le travail de recherche rapporté dans cette thèse. Il présente en trois parties successives son objet, son cadre et son but. La première section s'intéresse à définir la langue des signes, du moins à en préciser la notion d'un point de vue linguistique pour comprendre les enjeux scientifiques à considérer. La deuxième section situe le travail parmi les différentes approches possibles de la question. Enfin, la troisième section énonce les défis que nous nous posons, établissant le cadre pour traiter la problématique dans les chapitres qui suivront.

2.1 « Langue des signes » ?

Cette section clarifie ce que nous entendons par *langue des signes* (LS) tout au long de cet ouvrage et en présente la substance. Pour l'introduire, et comme pour mieux faire sentir la manière dont nous voulons l'appréhender, nous avons choisi de présenter son statut de langue propre — à cette occasion, le lecteur comprendra d'ailleurs l'abus de la dénomination du titre —, son histoire et sa place en société. Dans un deuxième temps, nous en présentons les fondements théoriques linguistiques qui constituent le cadre dans lequel nous plaçons notre travail de modélisation.

2.1.1 Statut de langue

Il est dans bien des esprits que le « langage des signes » serait aux sourds ce que le braille est aux aveugles, à savoir une prothèse langagière pour une communauté handicapée à qui il manque un des sens ou organes nécessaires à la communication orale habituelle. Ce langage aurait alors été conçu, plus ou moins récemment, comme substitut de la parole en contournant le canal auditif au profit d'un canal visuel. Tant qu'à faire, l'inventeur aura pris soin de le rendre universel, les sourds

ayant déjà du mal à communiquer localement !

Mais cette idée reçue est erronée et ne reflète absolument pas la réalité socio-linguistique de la langue des signes. Nous voulons prendre le soin dans un premier temps de donner quelques éléments pour préciser en quoi elle nécessite un regard scientifique à la fois plus complet et plus respectueux.

2.1.1.1 Un système linguistique propre (langage → langue)

La langue des signes possède un vocabulaire de signes, parfois appelé « signaire », qui lui est propre. Il n'est pas la transcription gestuelle d'un vocabulaire existant ; chacun de ses signes peut être défini par périphrase sans recours nécessaire à une autre langue, comme le font les dictionnaires unilingues écrits. Elle possède également un système de règles permettant entre autres de combiner et d'altérer ces signes pour construire des énoncés porteurs de sens. Ces règles sont plus ou moins souples, peuvent faire l'objet d'exceptions ou permettre l'ambiguïté de sens comme c'est le cas en français, et forment un système linguistique complexe et complet.

Elle offre aussi :

- différents registres et niveaux de langue : celui de la rue, de la conférence, de l'enfant, du théâtre, de l'insulte ;
- un vocabulaire complexe de notions abstraites ;
- une capacité gigantesque à la nuance et la subtilité ;
- la possibilité de jeux de signes pour l'humour ou l'allusion ;
- la poésie...

L'objet de notre étude est une **langue** en soi, non un langage formel simple ni un système réductible à d'autres systèmes connus.

2.1.1.2 Une parmi d'autres (langue → langues)

La quasi-totalité des langues orales[1], qu'elles soient vocales (LV) ou gestuelles (ou signées, LS), se sont formées naturellement dans une communauté pour la communication entre ses membres. Elles n'ont pas été conçues a priori pour ensuite s'imposer à des locuteurs. Les langues en usage aujourd'hui et leur pratique proviennent de phénomènes à l'origine locaux ; les besoins culturels et les influences d'autres langues donnent lieu à des néologismes, des emprunts, etc.

Ces phénomènes font également l'histoire des langues des signes. Ceci explique que dans une communauté donnée, on parle *une* langue des signes (parmi d'autres), et non *la* langue des signes

[1] Par opposition aux langues écrites.

(qui serait universelle). Dans cet ouvrage, « la langue des signes » les désigne dans leur ensemble lorsque la propriété observée n'est pas spécifique à l'une d'elles mais partagée par toutes. Les exemples seront tirés de la langue des signes française[2] (LSF) mais nous pourrons être amenés à en citer d'autres.

L'objet de notre étude est en réalité une **multitude de langues**, non une seule en particulier, et surtout pas créée sur décision mais existant aujourd'hui de fait.

2.1.1.3 Interface langue-culture (langues → langues naturelles)

Ainsi l'origine finalement plutôt mystérieuse de ces langues se trouve au sein des communautés des locuteurs[3]. Leur lien avec les cultures de celles-ci est donc fort. Comme toute langue, une langue des signes portera donc la marque de croyances historiques locales, un vocabulaire adapté aux choses et coutumes de la société et une finesse de description fidèle à la perception de l'environnement par l'ensemble des locuteurs. Or il se trouve que pour un sourd, cette perception est différente et ses besoins le sont aussi. Si le sourd évolue au milieu d'une société dont la culture est déjà forte, la sienne en est tout de même différente. Les nuances sonores lui sont étrangères ainsi que tout l'attirail de vocabulaire ayant trait à ces nuances. Inversement un entendant nommera « téléphone » un appareil fixe ou portable car la fonction reste la même, alors que le sourd y voit spontanément deux objets bien différents, notamment par la forme.

Un exemple célèbre de ce lien entre langue et culture entre langues vocales est celui du concept de neige vu par les Européens et les Inuits. Si l'on trouve à ce sujet plus de caricatures et de légendes urbaines que d'études ayant un fondement scientifique, il reste naturel qu'un mot générique soit moins utile — et donc moins utilisé — dans le quotidien polaire qu'en Europe, où les mots spécifiques sont rarement nécessaires. De même, les différentes essences de bois dont les noms sont courants en menuiserie sont souvent inconnues hors de ce champ. Les habitudes, les besoins, l'environnement, etc. d'un peuple ou d'une communauté (en un mot, sa culture) font le vocabulaire de leur communication et son emploi.

L'objet de notre étude est finalement non seulement un ensemble de langues, mais un ensemble de **langues naturelles**, et en l'occurence l'ensemble des seules langues véritablement naturelles à la communication des sourds.

[2] Comprenez « langue des signes employée en France » et non « langue française signée ».

[3] [Fusellier 04] relate le cas particulier des locuteurs sourds isolés de la communauté signante, vivant en famille entendante où se développe une langue des signes.

Conclusion

Les caractéristiques historiques, linguistiques, psychologiques, sociologiques... des langues des signes ne diffèrent pas de celles des autres langues naturelles du monde.

2.1.2 Contexte socio-linguistique

Nous avons discuté le statut linguistique des langues des signes, mais n'avons qu'effleuré la question de leur place dans nos sociétés plutôt « vocales ». Cette question socio-linguistique fait partie de notre contexte de recherche, et nous la traitons ici sur un plan social, historique d'abord et actuel ensuite, puis commentons l'élan donné à notre recherche par la législation récente.

2.1.2.1 Historique

La langue des signes a souffert de bien des maux avant d'être aujourd'hui reconnue comme langue légitime, notamment pour l'éducation et l'information [Moody 86a]. Au Moyen-Âge, les « gesticulations » des sourds étaient moins une preuve de leur besoin humain de communication intelligente qu'un gage, au contraire, de débilité mentale ou de folie. Les entendants se sont ensuite intéressés au cas « sourd-muet », mais pour les éduquer à la parole ou au français seulement. L'hommage rendu à l'abbé de l'Épée par les sourds aujourd'hui n'est pas celui de l'invention généreuse de la langue des signes, mais tout de même celui de l'idée nouvelle au milieu du XVIIIème siècle que les gestes des sourds vaudraient la parole pour l'expression d'une pensée. Il les utilisa pour enseigner le français.

L'oppression exercée sur les sourds devenue moins forte, ceux-ci se sont mobilisés, l'identité et la culture sourdes se sont vues renforcées et la communauté a pu accéder à des postes-clés. Mais ceci était sans compter sur l'organisation truquée du *congrès de Milan* (1880), où il fut décidé d'avance que les sourds, n'étant pas muets, pouvaient et devaient accéder à la parole par la méthode oraliste. Les signes furent interdits et le restèrent dans l'éducation en France jusqu'en 1991 (amendement Fabius) et on attendra février 2005 (voir 2.1.2.3) pour qu'elle soit reconnue comme langue.

C'est donc dans un contexte social de grande nouveauté que nous inscrivons notre travail de recherche, mais également dans un effort de respect et de neutralité face à une langue véritablement riche et complexe encore peu connue de la science.

2.1.2.2 Actuel

Si les langues des signes sont bien des langues, elles restent minoritaires dans les sociétés entendantes. Elles sont de ce fait souvent ignorées au profit de langues dominantes officielles ou

environnantes. Il en va de même pour les langues minoritaires vocales comme beaucoup de langues régionales en Europe. Pour ce qui est de l'administration d'un pays ainsi que du dialogue avec ses administrés, une ou plusieurs langues nationales sont établies. Ainsi, toutes les informations officielles doivent être mises à disposition dans ces langues d'une part, et toute personne se doit d'en comprendre une d'autre part.

Le cas des sourds est particulier : alors que la langue des signes ne fait pas partie des langues officielles, le recours à la langue écrite reste difficile (70% des sourds en France sont illettrés [Goudenove 04] selon le rapport Gillot[4] de 1997) et celui à la langue vocale non naturel. Il s'ensuit un besoin et une demande de taille dans le quotidien de la population sourde, notamment dans l'éducation, la diffusion d'informations et le dialogue avec leurs différentes administrations.

2.1.2.3 Légal

La loi numéro 2005-102 *pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées*[5] du 11 février 2005 exige que tous les lieux publics et informations soient rendus accessibles aux personnes en situation de handicap, entre autres les « personnes sourdes ou malentendantes ». Il faut reconnaître à cette loi d'avoir initié les efforts débutant aujourd'hui pour une accessibilité des informations en langue des signes. Les vidéos bourgeonnent (sans vraiment fleurir encore) sur internet et les services de relai ou d'interprétation se multiplient dans les administrations, lentement mais sûrement.

Ainsi la loi oblige-t-elle aujourd'hui les lieux publics à satisfaire la demande que nous mentionnions plus haut. L'ère technologique permet aux structures concernées de donner une place aux langues des signes dans nos sociétés modernes. Nous espérons bien y contribuer par notre travail.

Nous exposons maintenant un certain nombre de bases linguistiques des langues des signes, à savoir celles de la théorie de l'iconicité de C. Cuxac.

2.1.3 Éléments de linguistique

Les théories linguistiques sur les langues des signes sont récentes et peu nombreuses. La plupart sont des adaptations de théories des langues écrites ou vocales existantes, motivées par la thèse générativiste selon laquelle les langues seraient toutes descriptibles par un unique système. Celle de l'iconicité [Cuxac 00], aujourd'hui aboutie et encouragée par les linguistes sourds eux-mêmes, fait figure de référence, notamment en France. Elle fut constituée en considérant la langue comme

[4]Sur internet : rapport Gillot `www.ladocfrancaise.gouv.fr/brp/notices/984001595.shtml`.

[5]Le texte intégral se trouve sur internet : loi du 11 fév. 2005 `www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000809647`.

un système indépendant et sans faire usage a priori de théories de langues étrangères. C'est dans son cadre linguistique que nous nous plaçons, et nous consacrons cette section à en présenter les fondements. Nous nous limitons ici aux bases sur lesquelles repose notre travail, mais le lecteur pourra se référer à [Cuxac 00] pour plus de détails, ouvrage dont ce bref exposé est largement inspiré.

2.1.3.1 Deux façons de dire

Le cœur de la théorie de Cuxac est l'hypothèse selon laquelle il existe deux visées possibles pour un énoncé en langue des signes, et qu'un discours signé alterne (ou plutôt fluctue) entre les deux. L'une est la visée dite *iconicisatrice* ou *illustrative*, par opposition à l'autre, sans visée iconicisatrice. Un signeur expérimenté replace sans cesse son discours sur le continuum entre ces deux visées pour gagner en expressivité et en concision selon son gré.

FIG. 2.1 – Continuum des visées discursives en langue des signes

Le **discours sans visée iconicisatrice**, à gauche sur la figure 2.1, fait usage des **signes standard**, c'est-à-dire les signes du vocabulaire de la langue disponibles tels les mots d'une langue vocale, ainsi que :

- des lignes de temps, axes horizontaux (sagittal et transversal) pour exprimer la précédence d'événements ;
- des balancements du corps, par exemple pour relater des tours de parole ;
- des gestes déictiques (pointages) ;
- des expressions du visage, presque en permanence ;
- etc.

Comme déjà énoncé, les unités gestuelles s'organisent suivant les règles propres à la langue et sont soumises à la prosodie discursive. La visée du discours standard est tout à fait comparable à l'énoncé vocal typique comme, mettons, un énoncé informatif neutre. Dans un tel énoncé, tous les outils de la langue sont mis en œuvre pour véhiculer un sens, et à la manière du roman, l'interlocuteur peut interpréter et mettre en scène ce qui est dit en utilisant son imagination.

Le **discours avec visée iconicisatrice** consiste non seulement à dire, mais à dire en montrant. Cuxac compare cette visée avec l'intention du pêcheur qui raconte de vive voix avoir pêché un

poisson gros « comme ça », présentant ses mains de telle sorte que la taille de son trophée soit directement perceptible par l'interlocuteur. Cette fois, l'interlocuteur du pêcheur n'interprète pas ses paroles pour se représenter librement la taille du poisson ; l'illustration lui est donnée à voir en même temps que le propos illustré. La langue des signes faisant usage du canal visuel, c'est naturellement qu'elle permet cette illustration sans recours extérieur comme le sont ici pour la langue vocale les mains du pêcheur. Pour ce faire, la langue des signes, fondamentalement iconique, dispose d'outils puissants : les structures de grande iconicité (SGI).

Un signifiant est dit *iconique* lorsqu'il est en relation naturelle avec son signifié, par exemple une ressemblance visuelle. L'iconicité s'observe constamment à l'étude des langues des signes et de leur vocabulaire. Leurs pourfendeurs ont longtemps invoqué la proximité entre les signes et les objets du réel signifiés pour laisser entendre qu'ils collaient au concret et que l'abstraction serait par conséquent impossible ou fortement limitée. Au contraire pour Cuxac, l'iconicité dans le canal visuo-gestuel est naturelle et la langue n'en souffre pas ; elle en profite constamment dans son vocabulaire — y compris pour les concepts abstraits — mais aussi dans ses structures. Nous présentons ci-après trois structures d'iconicité imagique[6] de base sachant que d'autres existent encore, variantes ou composées de celles-ci et de lexique standard [Sallandre 03]. Ces trois structures, nommées *structures de grande iconicité* par Cuxac, sont extrêmement productives du point de vue linguistique et identifiées comme les trois outils principaux du discours avec visée illustrative. Un schéma général résumant la grande iconicité et ses structures est fourni en annexe A.2.

2.1.3.2 Structures de grande iconicité

Une première structure possible est le **transfert de taille et/ou de forme** (généralement abrégé TTF chez les linguistes). Il s'agit de représenter, par une forme manuelle installée par le signeur et éventuellement suivie d'un déploiement dans l'espace, la forme ou la taille (ou les deux conjointement) d'une entité du discours. Le regard précède les mains et suit le déploiement de la forme et le tout est en général accompagné d'une « gestuelle » non manuelle, faciale ou carrément corporelle. Le processus de description d'une fleur par des TTF est illustré[7] figure 2.2.

La deuxième structure que nous présentons est le **transfert situationnel** (TS). Cette structure permet de montrer la position ou le déplacement d'un actant (d'un objet, d'une personne participant à l'action...) relativement à un locatif. La plupart du temps, l'une des mains joue le premier rôle et l'autre celui du locatif. Chaque main prend une configuration représentative de

[6] Il existe aussi l'iconicité diagrammatique, illustrant les liens entre les actants des énoncés, que nous ne détaillons pas dans cette section.

[7] Les dessins de cette section sont tirés de [Verlaine].

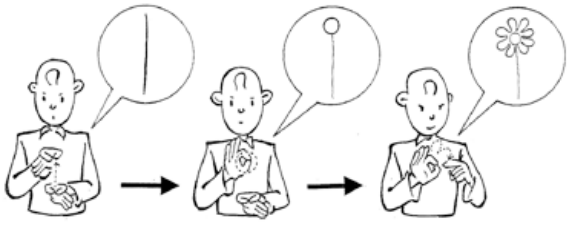


FIG. 2.2 – Transferts de taille et de forme

l'entité qu'elle représente : index tendu vers le haut pour une personne, main plate pour une voiture, etc. On appelle cette configuration un *proforme*, et dans le cas d'un signe standard fortement iconique, celui-ci peut être repris tel quel par la main. L'emplacement ou le mouvement de la main dominante est alors suivi du regard tout au long du transfert. La figure 2.3 montre le placement de feux tricolores, puis d'une voiture qui s'y arrête brutalement.

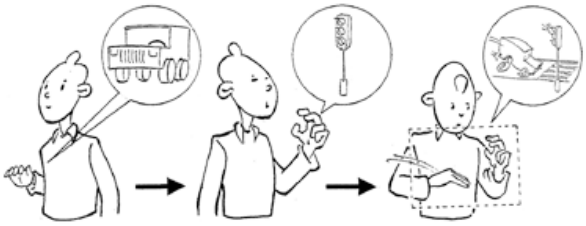


FIG. 2.3 – Transfert de situation

Le dernier transfert dont nous parlerons est le **transfert personnel** (TP). Celui-ci offre au signeur la possibilité de se substituer à un actant pour illustrer ses actions ou celles qu'il subit (i.e. pouvant être agent ou patient des actions). Le temps du transfert, le signeur « devient » la personne ou même l'objet ou le lieu dont il parle. Du point de vue réceptif, on détecte le transfert au décrochement du regard du signeur comme un acteur ne regarde pas la caméra à qui s'adresse le jeu. L'implication du corps du signeur dans cette prise de rôle est plus ou moins complète mais tant que le regard ne se repose pas sur une forme stable ou sur l'interlocuteur, la gestuelle illustre les actions de l'actant et n'est pas à interpréter comme une suite de signes lexicaux. L'originalité et la puissance productive de ce transfert est qu'il convient aussi bien pour illustrer les actions d'un être animé que pour, en quelque sorte, personnifier un objet ou même, pourquoi pas, un concept abstrait. En figure 2.4, nous illustrons la prise du rôle d'un chien, être animé, puis celui de la personnification d'une fleur, être inanimé.

Dans LS-Colin, corpus LSF issu d'un projet national pluridisciplinaire [Cuxac 02], on trouve des TP d'objets tels des jaunes d'œufs flottant sur le blanc ! La figure 2.5 en est un extrait.

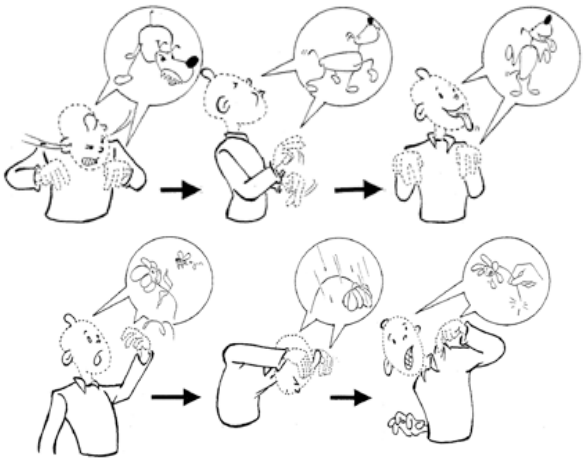


FIG. 2.4 – Transferts personnels

FIG. 2.5 – Transfert personnel, exemple

2.1.3.3 Rôle indicateur du regard

Dans la section précédente, on remarque à propos du regard que :

- en TTF, il se dirige vers la forme déployée dans l'espace ;
- en TS, il suit la main reprenant l'évolution spatiale d'un actant ;
- en TP, il se détache du regard de l'interlocuteur.

Or, en discours sans visée illustrative, un signeur regarde systématiquement son interlocuteur. Cuxac note là une correspondance entre les parties du discours possédant une visée iconicisatrice et celles où le regard n'est pas dirigé vers l'interlocuteur. Il démontre ainsi le rôle déterminant du regard en langue des signes.

Cette première section a clarifié à la fois le statut de la langue des signes et la théorie qui la gouverne. Dans la section qui suit, nous nous efforçons de situer notre problématique scientifique et en donnons le cadre.

2.2 Situation du travail

Nous présentons ici trois distinctions possibles parmi les approches en vue d'un modèle descriptif de signes : le domaine scientifique dont relève le modèle, la couche linguistique où se situent les descriptions, et leur objet (ce qu'elles décrivent). À chaque fois, nous plaçons notre travail dans un cadre transversal pour souligner son caractère pluridisciplinaire.

2.2.1 Domaine linguistique ou informatique

La première distinction que nous faisons est celle du domaine dans lequel se place l'étude. L'informatique et la linguistique ont chacune leurs propres objectifs, différents d'un domaine à l'autre. La linguistique s'emploie à **décrire** les composants de la langue ainsi que les règles qui gouvernent leur emploi, à destination de **lecteurs humains** capables d'en interpréter les termes, de s'en approprier les règles pour se représenter une logique interne et en nuancer les implications, guidés par leur propre expérience. L'informatique **modélise** ces descriptions en des termes formels sans ambiguïté d'interprétation. Elle ne compte pas sur une lecture intelligente de ce qui est formulé mais au contraire sur une **lecture systématique** et déterministe par un ordinateur.

Le travail de cette thèse se situe dans le domaine de l'informatique, car son but est de permettre une interprétation non discutable des descriptions (par exemple pour la génération automatique d'énoncés signés) et ne vise pas uniquement des êtres capables de pensée. Cependant, nous voulons qu'il respecte aussi les réalités linguistiques fondamentales des langues des signes, présentées ci-avant, voire qu'il serve aux linguistes pour appuyer leurs discussions.

Nous voulons en somme un modèle descriptif informatique souple, contrastant avec la rigidité du déterminisme des points de vue informatiques « purs ».

2.2.2 Niveau phonologique ou morphologique

La linguistique telle qu'utilisée traditionnellement par le traitement automatique des langues non signées et plus particulièrement des langues écrites, distingue plusieurs niveaux d'étude d'un objet langue donné, correspondant à des paliers de mises en forme de la langue. Comme nous le représentons sur la figure 2.6, il est généralement admis un minimum de cinq paliers distincts, hiérarchisés de telle sorte que chacun :

- est un procédé d'assemblage de briques provenant du niveau immédiatement inférieur ;
- fait office de brique de base du niveau immédiatement supérieur.

Le niveau le plus bas est le niveau phonétique, qui étudie le signal lui-même et/ou son origine articulatoire au niveau de l'appareil vocal : bouche, lèvres, contrôle du souffle, langue contre le palais, ou les dents, etc. Le premier palier de construction est le niveau phonologique, qui regroupe ces sons en *phonèmes* lorsque leur différence n'est pas supposée linguistiquement pertinente au locuteur. On parle alors de plusieurs allophones (variations) du même phonème. Le phonème est vu comme le segment minimal (indivisible) du signal acoustique pour la langue condidérée. Il est dépourvu de sens, mais en se combinant les phonèmes composent les *morphèmes*. Le morphème, étudié au niveau morphologique, est pour une langue l'unité minimale portant un sens. Les morphèmes s'assemblent en *lemmes* (en général les mots), dont l'ensemble forme le lexique. Le niveau lexical est le niveau d'approche des dictionnaires. Les phrases sont des agencements d'unités lexicales en *syntagmes*, décrits par les études syntaxiques. On construit habituellement aussi un niveau sémantique, s'attachant à décrire le *sens* à partir des syntagmes, et parfois un niveau pragmatique encore supérieur, qui s'intéresse aux variations de signification (de sens) selon le contexte énonciatif. Toutefois, les limites entre ces niveaux linguistiques sont moins nettes, et elles sortent du cadre de notre travail.

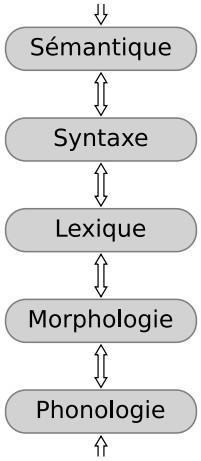


FIG. 2.6 – Paliers de construction en linguistique traditionnelle

L'application brutale de ce nivellement aux langues des signes situerait notre travail quelque part en deçà du niveau syntaxique car nous fournissons une description des gestes effectués par le corps et ne formulons pas de règles quant à l'ordre que les unités décrites pourraient prendre en discours. Sans doute se situerait-il près du niveau phonologique, vu l'objectif de description articulatoire.

Ceci dit, en linguistique des langues signées, on ne trouve pas de consensus sur la possibilité ou non d'appliquer ce même découpage. L'objectif de notre travail est la formalisation des productions

gestuelles sans parti pris sur la composition phonémique, morphémique... de celles-ci. Le cas échéant, les linguistes de chaque langue des signes pourront ensuite grâce au système identifier des morphèmes à partir de points communs qui se dégageraient des unités décrites. Ils pourront au contraire en remarquer l'absence ou procéder à d'autres types de recoupement et mettre au jour de nouvelles propriétés. Nous reviendrons sur cette question dans le volet des perspectives afin de lancer des pistes de discussion dans ce sens.

Ne faisant aucune hypothèse particulière, nous ne situons pas notre modèle sur ce plan.

2.2.3 Description de l'intention ou de la production

La dernière distinction de taille que nous voulons faire quant aux approches possibles de description porte sur ce qui est décrit. La plupart du temps, on décrit la perception que l'on a de la production en tant qu'observateur, ici les mouvements des différents articulateurs observés. La description porte sur ce qui est fait par le locuteur et vu par l'interlocuteur. Par exemple, à partir du signe [LIRE] de la figure 2.7 et pour signer « lire de loin », on pourra parler d'un placement plus haut et près du corps de la main droite du signeur car c'est ce qui sera à la fois produit par le locuteur et observable par les interlocuteurs. Réciproquement, cette description permet de reproduire ce signe et de transmettre le même message, a priori sans perte.

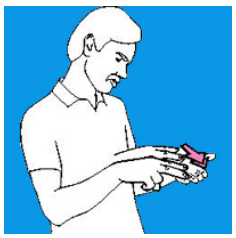


FIG. 2.7 – [LIRE]

Une autre approche consiste non pas à décrire exclusivement ce qui est observé, mais plutôt ce qui l'a motivé. Dans l'exemple ci-dessus, on observe un positionnement différent de la main droite, mais il se trouve qu'une inversion des mains est possible, et que, mettons, la main droite ne fut choisie que par confort par un locuteur droitier. On préférera dans cette optique la notion de main forte, dite *dominante*, plutôt que de main droite. Ainsi un locuteur gaucher signera différemment la même description car il l'aura réinterprétée, différemment. De même, le placement de cette main décrit comme proche du corps peut être vu comme un éloignement de la paume de l'autre main (dite *dominée*) dans la direction inverse de celle désignée par les doigts. Vu la sémantique du signe, le rôle iconique des yeux qu'on attribue à la main dominante et celui du support de la lecture

attribué à la main dominée, ceci semble être la motivation de la réalisation du signe. Comme pour le cas du choix de la main, toute production à partir d'une telle description devra réinterpréter le mouvement en fonction du positionnement de l'autre main et de la direction des doigts.

Tandis que la première approche se base sur l'observation des articulations effectuées, la seconde se base sur l'intention. Nous verrons que notre travail encourage nettement les descriptions de l'intention, porteuses de plus d'information, tout en permettant la transcription précise de productions.

2.3 Défis

Dans les sections suivantes, nous nous donnons trois défis pour l'élaboration d'un modèle de description dans le cadre énoncé ci-dessus.

2.3.1 Construction : un plan peut valoir mieux qu'une photo

Nous trouvons intéressant car potentiellement exploitable de garder une trace de l'origine d'un phénomène (sa motivation) plutôt que de s'en tenir à une description de son seul résultat visible. Selon la section 2.2.3, nous nous plaçons sous l'éclairage de l'intention (motivation) lorsqu'elle existe. En effet les différentes étapes de l'élaboration d'un signe constituent une information plus complète et peuvent faire l'objet d'analyses plus fructueuses qu'une observation finale, en tout cas rien ne laisse penser qu'elles sont superflues.

Avec la démarche de construction, on peut non seulement connaître l'origine du résultat mais également le reproduire. Par contre, la simple donnée du résultat nous empêche de retracer le chemin suivi pour l'obtenir s'il en existe plusieurs. Pour illustrer, nous préférons noter la recette d'un gâteau que d'en goûter une part. L'avoir tout prêt nous permet de le goûter mais pas d'en connaître la fabrication, alors que la recette de fabrication nous permet de le reproduire et, en conséquence, également de le goûter.

Notre modèle doit permettre d'intégrer tout élément ou démarche nécessaire à la construction d'un signe et pas seulement (mais aussi) d'en transcrire la gestuelle.

2.3.2 Formalisme : pas d'interprétation

Nous travaillons dans la perspective d'utiliser les descriptions lexicales dans des applications informatiques comme l'animation de signeurs virtuels de manière automatique. C'est-à-dire que

le modèle doit formater les descriptions de telle sorte qu'elles soient utilisables en entrée d'un programme qui puisse sans assistance produire correctement l'animation du signe en sortie[8].

Il faut pour cela que le modèle soit **formel**. Nous ne misons sur aucune interprétation humaine des descriptions. Nous voulons un modèle à la fois respectueux des réalités linguistiques et utile aux analyses des linguistes, mais avant tout interprétable par un ordinateur sans ambiguïté. Un robot (de manière équivalente, un programme informatique de génération d'animations) doit être capable de reproduire exactement un signe à partir de sa description, sans faire appel à des connaissances ou à une expérience du monde.

La propriété voulue se résume comme suit : tout ce qui spécifie le signe doit être décrit. Par contraposée, une conséquence de la propriété précédente est que s'il subsiste une imprécision, c'est que cette imprécision fait partie du signe. Si par exemple la description ne précise rien pour une orientation, c'est que le signe est valable, quelle que soit celle-ci.

2.3.3 Ouverture : l'acceptable doit pouvoir être décrit

Enfin, nous voulons naturellement proposer un modèle complet, au sens où tout signe de toute langue des signes peut être décrit avec le même degré de précision. Voire, tout signe non standard mais acceptable comme néologisme pour les locuteurs référents d'une langue des signes doit également être descriptible dans ce modèle. Les langues des signes, langues orales, évoluent sans cesse et rapidement. Encore en cours d'institutionnalisation, de nombreux nouveaux signes apparaissent régulièrement. C'est pourquoi dans un souci d'**évolutivité** du modèle, nous ne voulons pas nous limiter à une simple couverture des signes connus, mais comptons sur une **ouverture** suffisante du modèle pour permettre la spécification de tout signe, même inexistant si celui-ci « sonne signe » à la personne signante.

L'acceptabilité linguistique d'un énoncé est l'ensemble des conditions selon lesquelles celui-ci est conforme à l'usage naturel de la langue considérée. Cependant, ces conditions ne sont qu'empiriques et intuitives ; nous ne saurions établir de règles quant à l'acceptabilité en langue des signes, ni même en général.

Nous avons maintenant le contexte et le cadre de notre recherche. Dans le chapitre suivant, nous procédons à un état des lieux et de la littérature sur la question de la représentation des signes.

[8] On peut tout de suite observer l'illustration de ce principe sur la figure 5.6 page 123.

Chapitre 3

Tas de lard et analyse des besoins

Ce chapitre recense les approches descriptives actuellement disponibles et en précise à la fois les forces et les lacunes. Il commence par classer les différents modèles selon leur objectif et leur approche en présentant à chaque fois leurs points communs. Ensuite, il procède à une analyse précise des apports de chaque modèle au regard de huit problématiques particulières qui auront été dégagées au cours de l'exposé. Dans une troisième section, il reprend point par point ces problématiques pour formuler la piste retenue en guise de réponse, à suivre lors de l'élaboration du modèle. Il conclut en proposant un résumé des propriétés essentielles que le modèle devra vérifier.

3.1 Approches historiques et actuelles

Cette section présente les différents points de vue connus concernant la représentation des signes. Elle termine par la formulation de huit problématiques qui méritent selon nous d'être reprises en détail dans la suite.

3.1.1 Approches exactes ou réalistes

Nous évoquons ici les approches qui fournissent une information sur les signes plus réaliste que formelle, et dont l'objectif est de conserver la plus grande proximité possible entre les données observées et les données conservées.

La vidéo est le support visuel le plus réaliste. Une caméra enregistre le résultat visuel d'une production sous la forme d'une vidéo. Avec celle-ci, le signeur voulant signer le signe enregistré n'a qu'à reproduire l'enregistrement en le visualisant. Plusieurs vues peuvent être couplées comme sur la figure 3.1, par exemple une vue du dessus pour mieux observer les balancements du corps vers

l'avant et l'arrière [Cuxac 02].

FIG. 3.1 – Enregistrement vidéo de 3 vues simultanées

La rotoscopie est un procédé qui permet de s'affranchir de l'identité du signeur [Segouat 08]. En effet, comme une sorte de calque logiciel (fig. 3.2), on copie par superposition à l'écran les mouvements du signeur de la vidéo pour animer un personnage virtuel tridimensionnel. Les mouvements « décalqués » ont un aspect quasiment aussi naturel que la vidéo d'origine, mais on visualise ensuite un humanoïde et non une personne physique qui disposerait de droits sur son image.

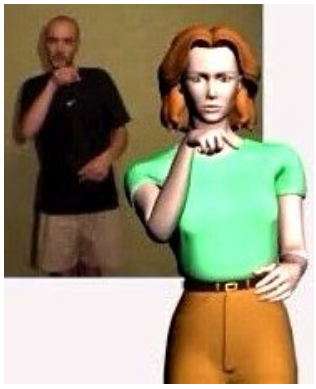


FIG. 3.2 – Rotoscopie

La capture de mouvement (ou *mocap*, voir fig. 3.3), elle, enregistre les rotations et positions de points du corps grâce à des capteurs placés sur le corps du signeur par exemple. Ensuite, les articulations enregistrées peuvent être reprises telles quelles par un humanoïde à l'écran ou un robot de même morphologie pour reproduire le signe. Souvent le nombre de capteurs est limité par le coût ou les difficultés de mise en place mais le résultat peut approcher celui de l'animation par rotoscopie. Le problème en langue des signes est la finesse des nuances dans les expressions faciales et dans le regard dont les mouvements restent difficiles à capturer.

Enfin, le dessin est une autre approche réaliste en cela qu'il se veut figuratif de ce qui est perçu.

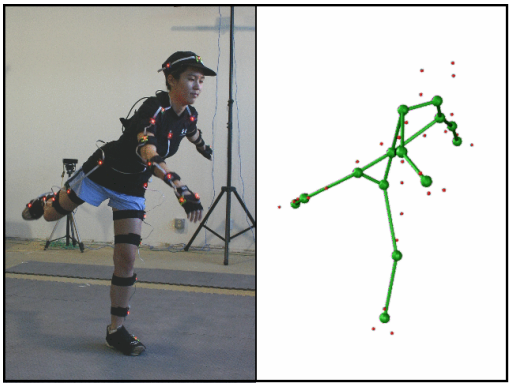


FIG. 3.3 – Capture de mouvement (source : [Kirk 05])

À l'instar de la vidéo, le signeur doit reproduire la posture dessinée, aidé par son appréciation du dessin. Cette technique est en général la méthode utilisée dans les dictionnaires bilingues LV-LS [Moody 86b, Moody 89] ou les supports pédagogiques car ils sont intuitifs et n'exigent pas de support informatique ou multimédia pour être diffusés. Les méthodes citées précédemment ne permettent pas le support papier. Un certain nombre de sources différentes sont présentées en annexe A.1 ; on remarque que les dessins sont complétés par des flèches et autres symboles que nous commentons plus loin.

3.1.2 Approches paramétriques

Plus formelles, les approches paramétriques reposent sur l'hypothèse que tous les signes possèdent une structure identique, à savoir un n-uplet de valeurs, chacune prise dans un ensemble fini. Chaque terme du n-uplet représente un paramètre, et l'attribution d'une valeur à chacun de ceux-ci spécifie un signe. Changer un paramètre change le signe et changer le signe change la valeur d'au moins un paramètre. On dit que deux signes qui ne diffèrent que par un paramètre forment une *paire minimale*, au même titre que les mots « pain » et « bain » en langue vocale qui ne diffèrent que par un phonème. Le paramètre en question est le seul critère discriminant pour la paire de signes donnée.

L'idée est attribuée à Bébian (1825), suggérant une décomposition des signes pour un système de notation. Stokoe [Stokoe 60], plus d'un siècle et demi plus tard[1], reprend l'idée et propose qu'un signe soit le produit de trois paramètres manuels : DEZ, TAB et SIG, respectivement la configuration (*designator*), l'emplacement (*tabula*) et le mouvement (*signation*), définis comme suit :

– la **configuration** est la forme que prend la main, par exemple plate, ouverte et présentant

[1] Les recherches sur les LS ont été quasiment mises au point mort par l'omniprésence oraliste ; voir le congrès de Milan dans l'exposé historique (2.1.2.1).

les doigts écartés, qu'il notait « 5 » ;

- l'**emplacement** est celui de la main (ou des mains) dans l'espace ou sur le corps ;
- le **mouvement** est celui des mains, les rotations du poignet ou leur déplacement dans l'espace.

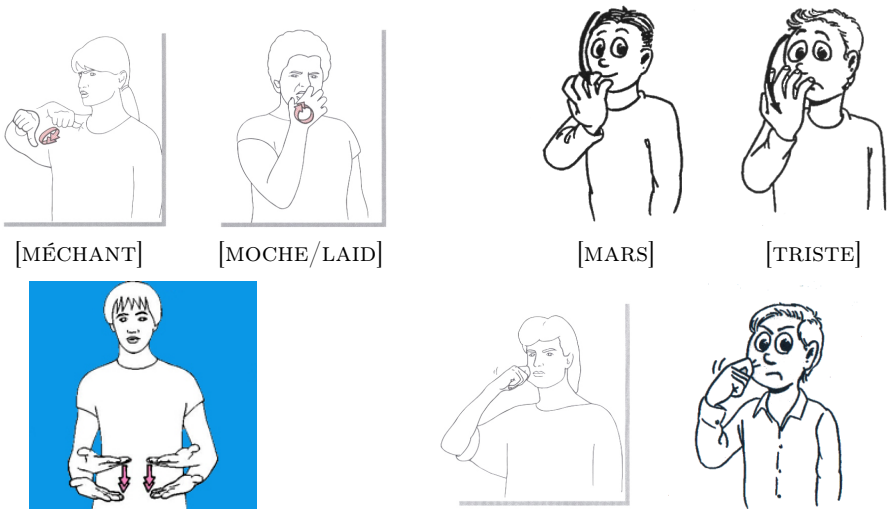
L'approche paramétrique est prépondérante depuis lors, mais a évolué. Elle a d'abord été augmentée d'un nouveau paramètre manuel : l'orientation [Battison 78]. Ce paramètre fait de [ÂGE] et [CLASSE] (fig. 3.4), deux signes effectivement distincts en LSF, une paire minimale car identique à l'orientation près d'une des mains.

[ÂGE] [CLASSE]

FIG. 3.4 – Une paire minimale par l'orientation

Un cinquième paramètre, non manuel cette fois, fut intégré : la « mimique faciale » déjà suggérée par Bébian. Pour cause, certains signes comme [MÉCHANT] ou [MOCHE/LAID] contiennent typiquement une expression du visage, voire certaines paires de signes comme [MARS] (une des variantes) et [TRISTE] (qui s'accompagne normalement d'une expression) sont minimales et différenciables par la mimique, alors qu'homonymes sans ce paramètre. De même, on trouve en LSF les paires [AUJOURD'HUI]/[MAINTENANT], [PEAU]/[RACISTE]... Nous présentons tous ces signes dans le tableau 3.1.

Un système paramétrique repose non seulement sur les paramètres choisis — aujourd'hui en général les cinq mentionnés ci-dessus — mais également sur l'inventaire des valeurs possibles pour chacun. Stokoe dénombrait seulement 19 configurations pour l'ASL, Moody 57 pour la LSF dans [Moody 86b], etc. L'inventaire dépend de la langue observée et est régulièrement révisé, notamment pour les configurations et les emplacements où l'on observe de plus grandes différences que pour les orientations. Toutefois, quelle que soit la liste définie pour chaque paramètre, celle-ci contient toutes les valeurs décrétées possibles, et en cela est considérée exhaustive. Seul le paramètre de mouvement semble faire exception à ce principe. Ce dernier contenant tout le dynamisme du signe, il est difficile d'y voir un ensemble limité de valeurs car, aux trajectoires rectilignes ou courbes simples, s'ajoutent tous les changements d'orientation, de tension des muscles et même toute combinaison ces variations. Les changements de configuration sont alternativement répertoriés comme relevant



TAB. 3.1 – Paires minimales en LSF au sens paramétrique

du paramètre de configuration et faisant alors l'objet d'une double valeur à expliquer, et comme partie des mouvements du signe, notamment lorsqu'il s'agit d'une ouverture ou d'une fermeture des doigts. Par exemple, la configuration des mains dans [CLAIR] figure 3.5 est :

- soit « problématique » car possède deux valeurs à ordonner : celle du S dactylologique de la LSF — ce que nous noterons dorénavant 'S' — suivie d'une main en « 5 » ;
- soit donnée comme 'S', avec un mouvement d'ouverture des doigts à expliciter (différente de [SALON] par exemple).

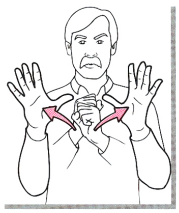


FIG. 3.5 – [CLAIR]

Toutes les études linguistiques reposent sur une vision paramétrique, et les exemples de systèmes s'en inspirant sont nombreux. En informatique, on remarque HamNoSys [Prillwitz 89], le plus abouti, et SigML [Elliott 04], son adaptation compatible XML. SigML a été créé pour le projet ViSiCAST[2] d'animation de signeur virtuel. La figure 3.6 montre un exemple de notation HamNoSys et les spécifications paramétriques qu'il contient. La figure 3.7 présente une description au format de SigML. On y voit la séparation des éléments non manuels (`sign_nonmanual`) et les spécifications

[2]ViSiCAST `http://www.visicast.cmp.uea.ac.uk`

paramétriques d'emplacement (`location_bodyarm`) et de configuration manuelle (`handconfig`).

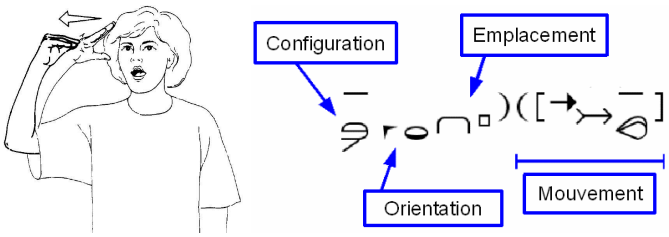
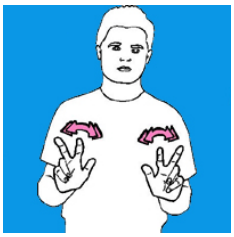


FIG. 3.6 – Notation paramétrique HamNoSys (signe [HAMBOURG])



```
<hamgestural_sign gloss="INFORMATIQUE">
  <sign_nonmanual>
    <head_tier> <head_movement
      movement="TL"/></head_tier>
  </sign_nonmanual>
  <sign_manual both_hands="true">
    <handconfig handshape="finger23spread"
      thumbpos="out"/>
    <handconfig extfidir="u"> </handconfig>
    <handconfig palmor="d"> </handconfig>
    <location_bodyarm location="shouldertop"/>
    <wristmotion motion="swinging"/>
  </sign_manual>
</hamgestural_sign>
```

FIG. 3.7 – Représentation SigML de [INFORMATIQUE]

3.1.3 SignWriting, une approche hybride

Le système d'écriture SignWriting se situe entre le dessin et la description paramétrique. Il se présente sous forme de vignettes, chacune illustrant un signe de l'énoncé, ce dont la figure 3.8 montre un exemple. Il s'utilise comme support écrit par les équipes pédagogiques de certains établissements scolaires [Brugeille 06]. Il est graphique et relativement iconique en ce sens où une ressemblance nette existe entre les vignettes et les productions signées qui leur correspondent.

Ceci dit, l'approche paramétrique y est très présente et un grand rôle est donné à la configuration et à l'orientation des mains. Le mouvement, au sens des approches paramétriques, fait également l'objet de symboles propres.

SignWriting utilise un nombre fini de symboles pour signifier la configuration (cf. fig. 3.9) des mains et leur coloration en noir et blanc détermine leur orientation (cf. fig. 3.10). Ils sont ensuite positionnés sur une vignette de manière à suggérer leur emplacement relatif, ou placés relativement à un cercle représentant le visage pour suggérer un emplacement dans l'espace — en réalité, le plan du dessin, avec le visage comme unique repère. Il existe pour le mouvement un ensemble de flèches supposé couvrir tous les déplacements manuels et rotations possibles du poignet. SignWriting note

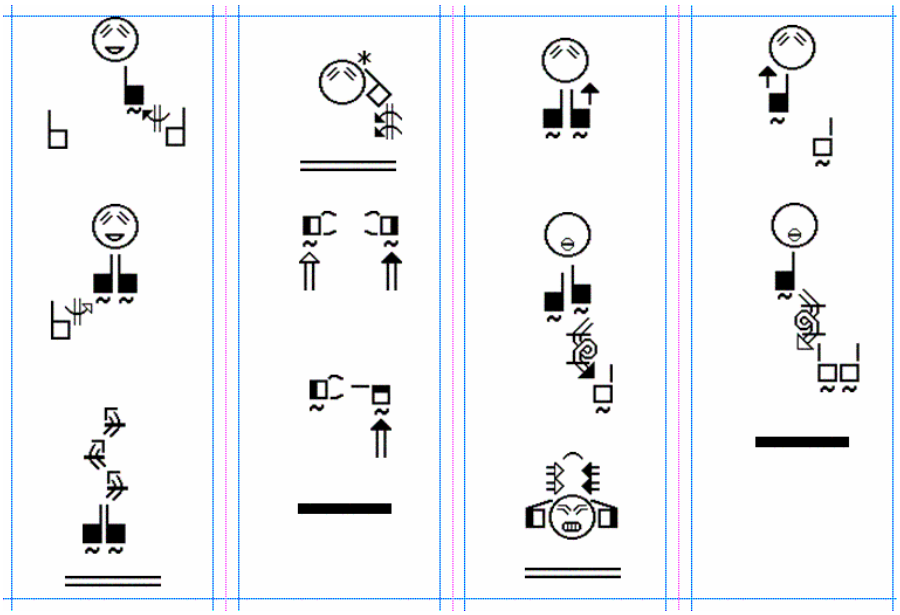


FIG. 3.8 – Exemple de récit écrit en SignWriting

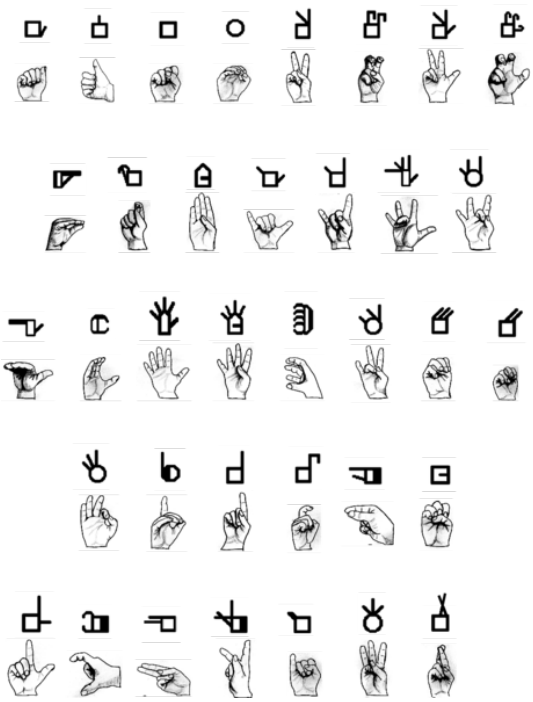


FIG. 3.9 – Les configurations en SignWriting

aussi le contact, plus récemment la mimique faciale en complétant le cercle représentant le visage, et même les mouvements d'épaules, des bras voire des jambes (!).

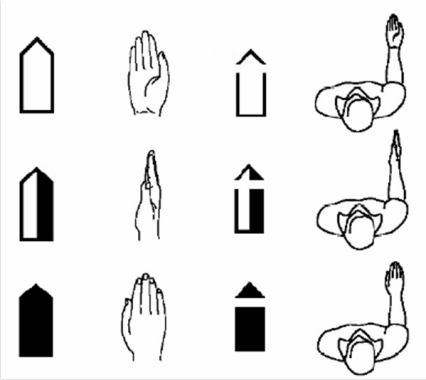


FIG. 3.10 – Les orientations en SignWriting

Le tout repose sur une discrétisation des ensembles des valeurs paramétriques possibles et donne donc au système une réelle place parmi les approches paramétriques, sauf l'emplacement. Ce dernier n'est pas écrit mais déduit de la position relative des différents symboles présents sur la vignette.

Comme pour HamNoSys, une version XML a été proposée pour SignWriting, à savoir SWML [Da Rocha 03]. SWML repère les différents symboles de chaque vignette par leurs coordonnées absolues dans le plan du dessin, mais n'apporte rien aux représentations. Un extrait est donné en figure 3.11.

```
- <signbox>
  - <symb x="60" y="48" x-flop="0" y-flop="0" color="0,0,0">
      <category>03</category>
      <group>08</group>
      <symbnum>003</symbnum>
      <variation>01</variation>
      <fill>01</fill>
      <rotation>01</rotation>
    </symb>
  - <symb x="60" y="48" x-flop="0" y-flop="0" color="0,0,0">
      <category>03</category>
      <group>02</group>
      <symbnum>004</symbnum>
      <variation>01</variation>
      <fill>01</fill>
      <rotation>01</rotation>
    </symb>
</signbox>
```

FIG. 3.11 – SWML

3.1.4 Approche temporelle

Les descriptions de Liddell et Johnson [Liddell 89], utilisées par [Speers 01] dans ses travaux en traduction automatique, reprennent les trois paramètres manuels présentés plus haut pour spécifier les postures manuelles (configuration, emplacement, orientation), mais ceux-ci sont relégués à un plus bas niveau de description. Le premier niveau, et en cela le plus essentiel pour les signes selon cette approche, est un axe temporel sur lequel se suivent des « unités de temporisation », que nous abrégerons dorénavant TU (pour *timing unit*). Chaque TU correspond à un repérage dans le temps d'une posture ou d'une transition entre deux postures, et la séquence de ces différentes TU constitue la structure temporelle de base du signe, sa progression dans le temps. Dans un second temps, chaque TU spécifie la totalité de ce qui est produit pendant sa durée.

Pour Liddell et Johnson, la position du corps (des mains surtout, mais le peu relaté sur le non manuel suit le même principe) à un instant donné est donnée par un ensemble de paramètres, chacun non pas affecté d'une valeur répertoriée dans une liste mais d'un ensemble de *features* (traits) binaires identifiés. Par exemple, le trait SP de la configuration (*spread* en anglais = étaler) distingue 'U' de 'V'. Pour l'emplacement, on trouve le trait SOMATIC distinguant les emplacements de contact corporels de ceux de l'espace.

Ainsi lors de la production du signe, ces traits peuvent varier au cours du temps, en fonction des déplacements, des changements de configuration, etc. Mais on note qu'à certains moments, la totalité des traits sont maintenus, suffisamment pour obtenir au moins une image nette dans une vidéo. Ces instants constituent le premier type de TU du modèle : les TU non transitoires. Elles sont définies par opposition aux TU transitoires qui représentent les transitions entre les précédentes, et qui donnent les images floues sur vidéo. En résumé :

- dans une TU transitoire, il existe au moins un trait en train de varier à tout instant ;
- dans une TU non transitoire, les traits atteignent tous un état stable.

On distingue ensuite deux types de TU non transitoires, à savoir :

- la tenue (notée D pour *detention*), période pendant laquelle est maintenue une posture, où l'image vidéo est nette pendant un certain nombre d'images ;
- la posture instantanée (notée P pour *posture*), moment non maintenu mais où les traits sont stables, par exemple un point de passage entre deux déplacements.

Ainsi, un signe est décrit à partir de ces TU non transitoires définies comme les instants du signe où tous les traits du corps prennent une valeur motivée et aucun n'est en transition, entre lesquelles on trouve des transitions, elles-mêmes porteuses de traits comme des indications d'arc de déplacement ou d'oscillation. Les TU non transitoires définissent une position pour le corps, et les TU

transitoires représentent les passages entre celles-ci, apportant éventuellement des caractéristiques à ces passages. Par exemple, le passage d'un emplacement à un autre implique un déplacement. Un déplacement se fait en ligne droite à moins que la TU transitoire au cours de laquelle il s'effectue précise un arc, auquel cas il suit un demi-cercle. Le modèle offre également une catégorisation des TU transitoires que nous verrons plus tard en étudiant le dynamisme des modèles (3.2.6.3), et d'autres types de TU non transitoires, variantes de celles exposées ici.

Soulignons qu'au plus haut niveau de la description, le seul élément visible est la séquence temporelle du signe, les valeurs paramétriques apportant « seulement » une précision aux TU formant la séquence. Ceci est l'inverse des approches précédentes, où les paramètres formaient l'essentiel de la description du signe, et où la progression temporelle se déduisait de leurs valeurs, celui de mouvement notamment.

3.1.5 Résumé des problématiques

Dans les modèles résumés ci-dessus, nous relevons quelques points forts mais ils ont chacun leurs limites. Cette section résume les huit problématiques que nous jugeons importantes, avant de procéder à une étude critique des modèles en section suivante. Les deux premières concernent la nature des modèles, les quatre suivantes portent sur leur utilisation, la manière d'appréhender les signes et d'en formuler les descriptions, et les deux dernières visent à juger de leur apport à la lecture des descriptions.

Les questions essentielles à discuter sont :

1. Le système est-il formel ? Quel degré d'interprétation est nécessaire pour relire une description ?
2. Le système est-il souple ? Quelle liberté a-t-on pour décrire un signe ?
3. Comment décrit-on une configuration manuelle ?
4. Comment localise-t-on des articulateurs ?
5. Quid du non-manuel ?
6. Comment traite-t-on le changement au cours du temps ? Quelle part du système est laissée aux questions de dynamisme ?
7. Est-on renseigné sur la démarche de construction du signe et/ou la motivation du signeur ?
8. Quelle réutilisabilité ont les descriptions ?

3.2 Analyse par problématique

Cette section reprend successivement les 8 points énumérés ci-avant, en appliquant à chaque fois une analyse couitik aux modèles présentés en 3.1.

3.2.1 Formel ?

La question posée est celle de savoir si reproduire le signe à partir de sa spécification dans un modèle nécessite une interprétation humaine ou si un algorithme déterministe peut être formulé pour qu'à une description donnée soit associée une signation nécessairement correcte.

Parmi les approches réalistes présentées en 3.1.1, ni la vidéo ni le dessin ne peuvent être qualifiés de système formel car il s'agit de données visuelles globales, certes contenant une production signée mais dont le format (quel qu'il soit) n'est pas spécifique. Elles ne reposent pas sur une grammaire ou un vocabulaire fini ; il faut une intelligence en amont pour déterminer le signe à reproduire, celui-ci n'étant pas isolé. Au plus, grâce aux travaux menés en analyse d'image [Dalle 01, Dalle 06] sur les vidéos de discours signés, une machine peut récupérer des propriétés articulatoires (positions et déplacements des mains et du visage), mais ce ne sont que des indices de signation et non des descriptions entières et fiables.

Si les dessins se limitent en général au signeur et au signe (tandis que la vidéo enregistre le fond, etc.), ils doivent en revanche être agrémentés de flèches ou de divers symboles légendés qui demandent à leur tour une interprétation. En effet, les signes se mouvant non seulement dans le plan mais dans l'espace 3D et le temps, il faut pallier la perte dimensionnelle du passage au dessin. Notons par ailleurs que nombre de dictionnaires légendent leurs vignettes avec des précisions en langue écrite, en plus de la traduction du signe. Parmi beaucoup d'autres dans [Moody 86b], le signe [YEUX EN AMANDE] est légendé par l'explication plus ou moins précise : « le signe suit la forme des yeux ».

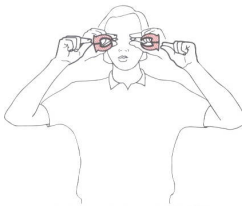
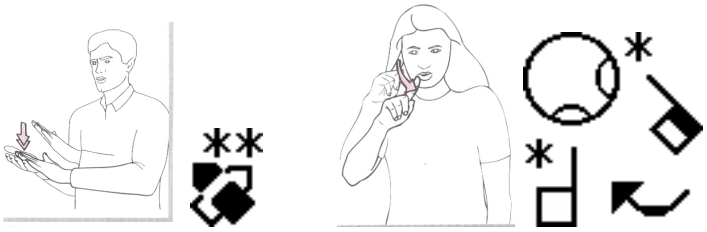


FIG. 3.12 – [YEUX EN AMANDE]

La réponse est différente pour le cas d'une animation 3D, obtenue par rotoscopie d'une vidéo brute ou par capture de mouvement. En effet, à partir de la séquence des articulations du squelette

ou des positions de points stratégiques du corps, on peut reproduire exactement le signe enregistré. Néanmoins, il s'agit de données brutes et elles ne représentent pas une formalisation à proprement parler. Elles n'ont aucune base linguistique et sont dénuées de toute considération propre aux LS. On note cette fois des travaux de mesure sur de telles captures afin par exemple de faire émerger des régularités dans le dynamisme des mouvements en langue des signes selon les signeurs et les contextes [Gibet 97, Heloir 06].

SignWriting reste proche du dessin sur la question du déterminisme. Moins un système de description que d'écriture, de nombreuses ambiguïtés sont compensées par la conscience qu'a le relecteur du contexte et de la sémantique de l'énoncé. Par exemple, le système possède de grandes lacunes pour ce qui relève des indications spatiales. Une troisième dimension est codée dans les flèches de mouvement, mais pas dans l'expression des positions fixes de mains. Elle peut seulement parfois être déduite d'un chevauchement des symboles de configuration le cas échéant, comme dans [ÂGE], figure 3.13. De même les contacts, notés par une étoile entre deux symboles, ne sont que partiellement spécifiés. Le signe [SOURD] sur la figure indique deux contacts, mais il revient au lecteur de comprendre (deviner ?) quelles parties exactes de la main et du visage sont en contact.



[ÂGE], à droite en SignWriting [SOURD], à droite en SignWriting

FIG. 3.13 – Emplacements ambigus avec SignWriting

L'approche paramétrique est une approche tout à fait formelle, pourvu que les inventaires des valeurs pour chaque paramètre soient clairement établis. En général, une étude paramétrique sur une langue des signes propose un inventaire des configurations possibles et des emplacements utilisés. La liste est moins triviale pour ce qui est du mouvement, mais le système HamNoSys parvient à un ensemble fini de symboles à partir desquels les mouvements sont décrits. De même pour l'expression faciale, les études linguistiques apportent souvent des descriptions librement formulées en langue écrite comme « expression de dégoût » dans [DÉTESTER/HAÏR] (voir fig. 3.14), alors qu'HamNoSys offre une liste de mimiques possibles pour ce paramètre, statiques ou dynamiques (fig. 3.15). Elles sont en général données hors des notations, en supplément de celles-ci.

Rappelons que le système de Liddell et Johnson présenté en 3.1.4 fait en premier lieu apparaître un découpage temporel en unités temporelles et que la spécification des unités temporelles est

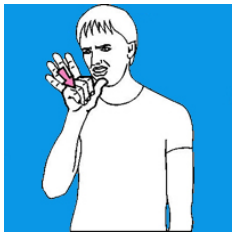


FIG. 3.14 – [DÉTESTER/HAÏR]

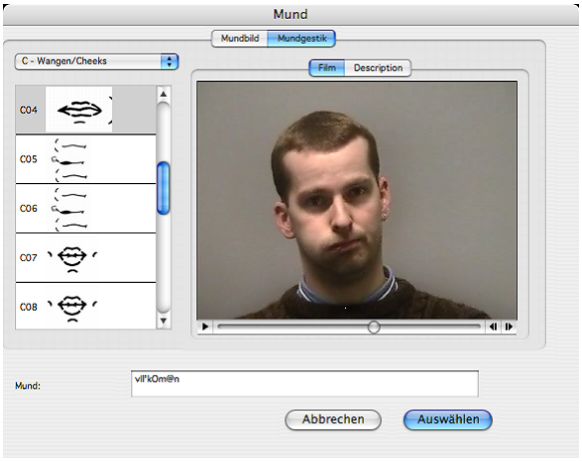


FIG. 3.15 – Liste des expressions faciales en HamNoSys/SigML [Hanke 02a]

organisée de manière paramétrique. Le système est formel car chaque paramètre est décrit sous forme d'un ensemble fini de traits binaires.

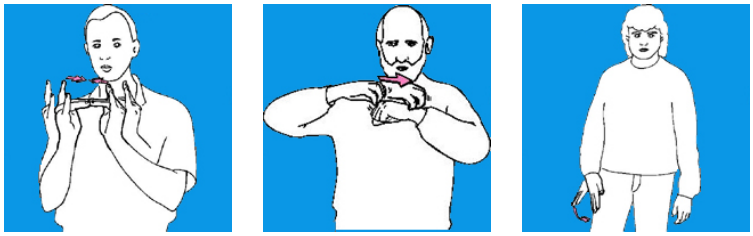
3.2.2 Souplesse de spécification et ouverture du modèle

Nous remarquons que les approches formelles présentées précédemment sont relativement rigides. En effet, elles supposent que tous les signes possèdent une même et unique structure et que les ensembles de valeurs possibles sont les mêmes pour tous les signes. Pourtant en LSF, de nombreux signes ne se conforment pas au cadre paramétrique donné.

Premièrement, les valeurs exceptionnelles ne sont pas recensées dans les inventaires des valeurs pour les paramètres. Une valeur en général inacceptable dans une langue et ne se retrouvant dans aucun néologisme spontané est absente des listes générales, même si elle est exceptionnellement utilisée dans un signe du lexique. La figure 3.16 illustre les cas suivants :

- la configuration dans [LIT], proche de 'H' ;
- le mouvement dans [FOURMI], combinaison complexe de pianotement et de flexion des doigts ;
- l'emplacement dans [JAMBE], sur la cuisse...

Deuxièmement, les paramètres eux-mêmes peuvent ne pas suffire à rendre compte d'un phéno-

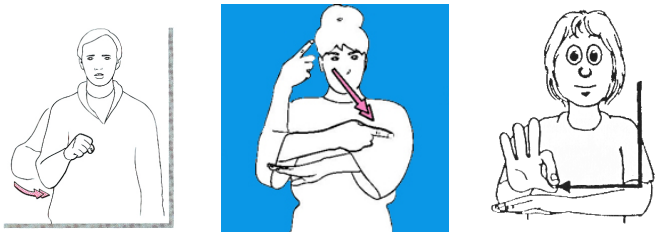


[LIT] [FOURMI] [JAMBE]

FIG. 3.16 – Valeurs paramétriques exceptionnelles

mène à décrire. Par exemple, dans les signes de la figure 3.17 :

- [BINIOU, ÉCOSSE] requiert un mouvement du coude, impossible à décrire dans l'optique paramétrique purement manuelle des modèles ;
- le bras dominé dans [DOUANE] et dans [ARCHITECTE] doit être placé à l'horizontale, la main à elle seule ne suffit pas.



[BINIOU, ÉCOSSE] [DOUANE] [ARCHITECTE]

FIG. 3.17 – Valeurs non paramétriques

Troisièmement, même lorsque les paramètres et leurs ensembles de valeurs suffisent, une description paramétrique spécifie parfois trop le signe, au sens où elle présente une contrainte linguistiquement superflue. Autrement dit, le signe est sur-spécifié après l'affectation d'une valeur à chaque paramètre. Par exemple, l'orientation des doigts (pas de la paume) dans [QUOI ?] varie en général au cours du temps à cause du mouvement ce que nous illustrons figure 3.18. Les spécifier vers l'avant empêche une signation naturelle.

De même, à propos des signes de la figure 3.19 :

- toute orientation accessible de la paume de la main dominée dans [ARBRE] est valable pourvu que les doigts soient dans le prolongement du bras ;
- la configuration dans [ARRÊTER], généralement appelée « angle droit » peut se rapprocher de celle de 'B' si les mains sont plus près du corps ;
- de même pour [PLAFOND] : « angle droit » si les coudes sont au plus bas et 'B' si ceux-ci sont placés plus haut...

On peut suggérer de laisser vide un paramètre si celui-ci n'est pas requis. On ignore déjà im-

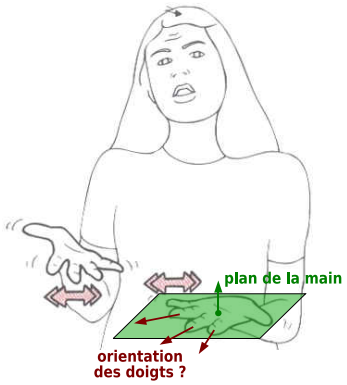
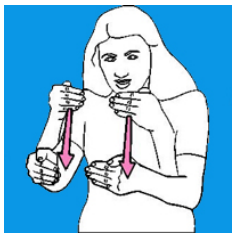


FIG. 3.18 – Orientation fixe de la paume et variable des doigts dans [QUOI ?]

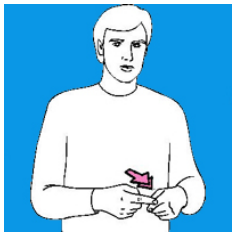
[ARBRE]

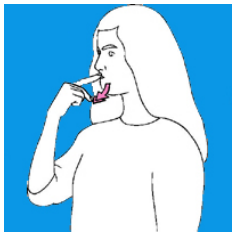

[ARRÊTER]

[PLAFOND]

FIG. 3.19 – Signes sur-spécifiés par les valeurs paramétriques

plicitement la mimique pour de nombreux signes comme [COUTEAU], [ROUGE] ou [MÉTAL] pour ne citer qu'eux (fig. 3.20), de même qu'on ne spécifie rien des quatre paramètres manuels de la main dominée d'un signe monomanuel. Pour l'emplacement, beaucoup de modèles paramétriques choisissent pourtant d'ajouter la valeur « espace neutre » à l'inventaire pour désigner un emplacement non pertinent de l'espace, au lieu de l'ignorer. Cette valeur se traduit en général par une signation devant le signeur à hauteur de bras, mais reste distincte de toute valeur fixe de l'espace ou du corps.


[COUTEAU]


[ROUGE]

[MÉTAL]

FIG. 3.20 – Signes sans valeur paramétrique d'expression faciale

Cependant, les exemples ci-dessus ne permettent pas de simplement laisser vide un paramètre qui sur-spécifierait un signe. Toute valeur acceptable d'orientation pour [ARBRE] spécifie le paramètre de trop, mais laisser ce dernier sans aucune valeur ne le spécifie pas suffisamment. Dans sa

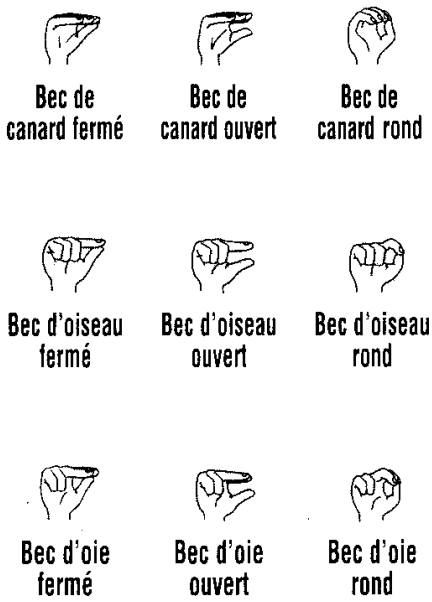
version 4, HamNoSys a proposé d'indicer les valeurs sur-spécifiantes par l'opérateur « ... » pour les « assouplir » mais il n'est pas spécifié en quoi les valeurs à prendre peuvent différer des valeurs données. Cet opérateur étant insuffisamment spécifié (voir fig. 3.21), il n'est en pratique jamais utilisé.

FIG. 3.21 – Opérateur de sous-spécification en HamNoSys

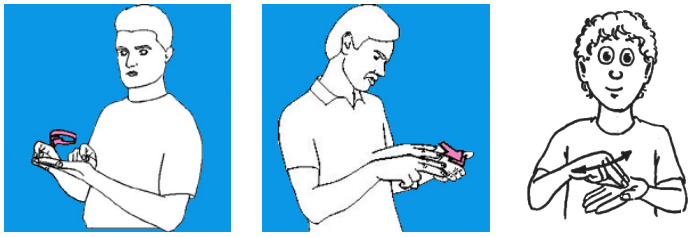
Avec l'approche temporelle de Liddell et Johnson, le problème des instances rares de configuration ou d'emplacement n'en est pas un, car les configurations possibles ne forment pas une liste dont il est difficile de sortir mais forment le produit d'un nombre relativement élevé de traits binaires (voir 3.2.3). Ainsi, toute liste de 0/1 appliquée à l'ensemble des traits de la « grille » de description des TU non transitoires convient au modèle. La notion d'inventaire des valeurs possibles pour un paramètre disparaît au profit de celle d'un inventaire des caractéristiques possibles pour ces valeurs. Toutefois, les mains demeurent le centre de toutes les descriptions et les signes [BINIOU, ÉCOSSE] et [DOUANE] restent problématiques.

3.2.3 Configurations manuelles

Nous l'avons vu, les configurations pour les modèles à paramètres sont inventoriées dans une liste réputée exhaustive propre à la langue étudiée. Spécifier la configuration d'un signe revient à donner une valeur prise dans cette liste. Celles-ci font parfois l'objet de groupes comme les « becs » en LSF, illustrés dans le tableau 3.2. Ces groupes prennent un intérêt lorsqu'un classement est souhaité, par exemple pour une recherche de signe dans un dictionnaire par la configuration. Cependant, ces regroupements n'existent qu'une fois les listes établies, et s'ils sont indicatifs, ils ne participent pas à l'élaboration de ces listes. Aussi, la différence entre deux configurations du même groupe est, d'un point de vue du modèle, aussi grande que celle entre deux configurations de deux groupes distincts. Par exemple, on peut classer dans un groupe « becs » toutes les configurations présentant une opposition entre la pulpe du pouce et celui de l'index et pour lesquelles un contact est possible ou présent. Ceci n'est qu'indicatif d'un air de famille entre toutes les configurations du groupe. Pour autant, changer d'un bec à un autre changerait le signe au même titre que si l'on passait à un poing fermé ou une main plate. D'après la figure 3.22, les signes [ÉCRIRE], [COLORIER] et [LIRE] forment deux à deux des paires minimales de même nature alors que les configurations des deux premiers sont deux becs donc devraient selon ce classement apparaître moins distantes.



TAB. 3.2 – Les familles de « becs » dans les configurations en LSF



[ÉCRIRE] [LIRE] [COLORIER]

FIG. 3.22 – Paires minimales deux à deux par la configuration

Pour ce qui est des configurations, HamNoSys se distingue d'un simple modèle « à la Stokoe ». Il décrit les configurations de manière détaillée grâce à un nombre conséquent de symboles combinables. À partir d'une forme de base, on utilise divers symboles diacritiques pour spécifier :

- la position du pouce traitée séparément, avec quatre positions de base possibles ;
- la pliure des doigts levés ;
- les doigts faisant exception aux spécifications données.

Il existe ensuite de nombreuses variations graphiques des formes de base, notamment en cas de contact avec le pouce pour spécifier celui-ci, ou de croisement des doigts. Au fil des versions, le système a gagné en précision. Il couvre désormais une grande partie des possibilités articulatoires de la main. Seulement, les marques diacritiques et variantes tendent à devenir plus nombreuses et porteuses d'information que les formes de base, et le vocabulaire de symboles devient aussi grand que la cohérence des formes graphiques se perd. La notation donnée figure 3.23 en est un exemple.

La forme de base est , et représente une configuration proche de 'V'. Les chiffres 4 et 5 sont

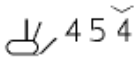


FIG. 3.23 – La configuration ‘Y’ en HamNoSys

ajoutés pour faire tendre l’annulaire et l’auriculaire au lieu de l’index et du majeur. Ensuite, le 4 est fermé (à droite) comme il le serait dans un poing fermé. Un dernier symbole diacritique est ajoutée à la forme de base pour tendre le pouce dans le plan de la paume. La notation ci-dessus est la plus simple pour la configuration ‘Y’ ! Celle-ci est bien la plus simple, car l’emploi d’une autre forme de base comme celle de l’index tendu (pour ne relever que l’auriculaire ensuite, avec le seul chiffre 5) ne donnerait non pas ‘Y’, mais la configuration de [CAFÉ], c’est-à-dire un auriculaire plus serré comme on le voit sur la figure 3.24.

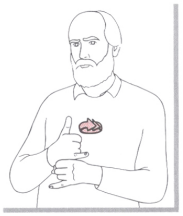


FIG. 3.24 – [CAFÉ]

C’est aussi graphiquement, et dans une plus forte mesure encore, que SignWriting représente les configurations manuelles. De même, il existe un nombre réduit de formes de base comme la main plate ou les doigts repliés, complétées ensuite pour relever des doigts ou en abaisser (cf. fig. 3.9 page 29). Il existe aussi un certain nombre de symboles ad hoc pour des configurations ne s’exprimant pas à partir de formes de base.

L’approche de Liddell et Johnson pour décrire une configuration est inverse. Au contraire, ce sont les caractéristiques — les traits — comme l’opposition du pouce pour la famille des becs, qui sont éléments de la description. La liste des possibles n’en est qu’une conséquence. Le trait de l’opposition du pouce et des doigts est notée TO pour *thumb opposed*. Voici d’autres exemples de traits de configuration dans ce modèle :

– contact entre le pouce et les doigts opposés, noté TC pour *thumb contact* ;
– écartement des doigts sélectionnés, noté SP pour *spread* ;
– index sélectionné, noté I pour index.

Ainsi, une configuration complète est spécifiée par la donnée de 19 traits différents ; une liste complète se trouve dans le tableau 3.3.

Avec un tel système, rassembler les configurations en familles possédant une même caractéris-

Trait/feature	Sens
I, M, R, P	Sélection du doigt correspondant
NSI	Doigts non sélectionnés fermés
FPX, FDX	Extension des phalanges proximales/distales
RND	Léger relâchement des muscles des doigts
RST, UST	Empilement des doigts (deux sens possibles)
CR	Croisement des doigts
SP	Écartement des doigts
TO	Opposition pouce–plan de la paume
ANT, LAT	Alignement antérieur/latéral du pouce
TPX, TDX	Comme FPX/FDX, pour le pouce
TC, UC	Contact avec le pouce (deux façons, cf. 'F'/'T')

TAB. 3.3 – Liste des traits de configuration pour Liddell et Johnson

tique est aisé car la caractéristique est ce qui fonde le modèle. L'ensemble des becs serait alors l'ensemble des configurations avec les traits +I, +NSI, -FPX, -SP, -CR, -RST, -UST, +TO, +ANT et -LAT. Ensuite, selon la famille du bec et son ouverture, on ajoutera des spécifications pour les traits des sélections et extensions manquantes. Par exemple, les becs d'oie sont ceux spécifiant +M, -R et -P. Les becs fermés sont ceux spécifiant +TC.

Le système permet de faire varier les traits mis en lumière. Par exemple, le signe [MERCI, BONJOUR] (fig. 3.25) est acceptable quelle que soit la position prise par le pouce. En revanche, 'B' ne peut se faire qu'avec le pouce replié sous la paume. Ce deuxième cas fait valoir des traits du pouce alors qu'il paraît artificiel d'en faire de même pour le premier.

FIG. 3.25 – [MERCI, BONJOUR]

La manière de décrire la position des doigts par sélection est intéressante. Dans une configuration, les doigts sélectionnés acquièrent les traits donnés, tandis que les autres sont seulement dégagés, vers le bas ou vers le haut, sans acquérir les traits. Ceci veut dire que tous les doigts sélectionnés agissent de la même manière ; on ne peut pas donner des traits différents aux différents doigts sélectionnés. Aussi, les doigts non sélectionnés ne sont pas nécessairement repliés ; ils peuvent être dégagés vers le haut (-NSI), en général plutôt tendus, ou vers le bas (+NSI). NSI, pour *non selected [fingers] in* en anglais, est le seul trait ayant une influence sur les doigts non sélectionnés. En conséquence, la sélection d'un doigt ne fait pas de celui-ci un doigt dressé plus

haut que les autres. Nous illustrons cette différence en comparant ‘H’ avec la configuration utilisée dans [LIT]. ‘H’ est une configuration avec index et auriculaire sélectionnés (+I, -M, -R, +P) pour être tendus vers le haut et les autres dégagés vers le bas (+NSI). Dans [LIT], les cinq traits ci-dessus sont inversés (-I, +M, +R, -P et -NSI). Ce sont en l’occurrence le majeur et l’annulaire qui sont sélectionnés pour être tendus à angle droit avec la paume, tandis que les autres sont dégagés vers le haut. Si la disposition relative résultante des doigts change peu d’un cas à l’autre, on matérialise ici une différence majeure d’intention, qui se matérialise pour preuve dans le fait que :

- pour ‘H’ : l’index et l’auriculaire doivent être tendus pour que le signe soit acceptable, et selon la vitesse de signation les doigts repliés sont plus ou moins rangés sous le pouce, voire celui-ci ne touche que le côté du majeur ;
- pour [LIT] : d’une part ce sont les doigts horizontaux qui participent au contact donc sont les éléments saillants de la main, et d’autre part, selon les capacités ou motivations articulatoires du signeur, les doigts vers le haut dans [LIT] seront plus ou moins tendus, mais les doigts horizontaux ne sont pas changeables.

Cet exemple montre un aspect du modèle que nous considérons plus proche de la description d’intention, au sens établi en 2.2.3.

Le système proposé par Liddell et Johnson est performant, mais possède néanmoins des limites. Nous en citerons deux.

D’abord, l’hypothèse selon laquelle tous les doigts sélectionnés comme pertinents agissent ensemble et d’une manière descriptible globalement est forte. Elle s’avère trop forte dans la mesure où il arrive que l’on « pense » chaque doigt saillant séparément. La figure 3.26 montre les lettres *dhaal* et *taa* de l’alphabet dactylologique arabe[3] et *beh* de l’alphabet russe, où sont sélectionnés plusieurs doigts ne pouvant être décrits de façon identique.

(a) *dhaal*

(b) *taa*

(c) *beh*

FIG. 3.26 – Configurations non descriptibles par *traits*

Ensuite, tous les comportements ne sont pas descriptibles dans ce modèle, notamment pour les contacts avec le pouce. Les chiffres 6 et 9 en Libras (langue des signes brésilienne) présentés figure 3.27 comportent un contact entre l’extrémité des doigts et l’articulation entre les deux phalanges du pouce. Les seuls traits TC et UC proposés pour les contacts avec le pouce ne permettent pas de

[3]Source : Interpreting for Arabic `http://www.theinterpretersfriend.com/terp4/Arabic.html`.

décrire ces configurations.

FIG. 3.27 – Les chiffres 6 et 9 en Libras

Enfin, le modèle évoque une solution partielle au problème soulevé en 3.2.2, où donner une forme à la main, la positionner et l'orienter ne suffit pas ([DOUANE]) ou est de trop ([PLAFOND]) pour une description du signe. On peut faire en sorte de considérer le bras comme partie de la configuration manuelle ou encore en exclure la partie métacarpienne de la main. Ceci dit, cette partie est peu traitée et les implications sur les descriptions concernées restent relativement floues. De plus, cette extension de la notion de configuration ne semble pas permettre la description de [BINIOU, ÉCOSSE].

3.2.4 Positionnement

La langue des signes s'articulant dans l'espace, nous analysons ici comment les modèles positionnent le corps dans l'espace de signation.

Nous avons déjà évoqué (cf. 3.2.1) le manque de précision du système SignWriting en la matière. Rapporter les positions relatives des symboles présents sur une vignette SignWriting à l'espace tridimensionnel de signation est à la discrétion du lecteur et reste nettement insuffisant dans une perspective de génération automatique. Il est néanmoins le système permettant le plus d'indications quant aux articulateurs autres que les mains (voir 3.2.5). SignWriting mis à part, nous soulignons le fait que les autres systèmes ne proposent en général de spécifications explicites de positionnement que pour celui des mains.

Pour les descriptions à paramètres, de même que pour les configurations manuelles (3.2.3), les positions possibles des mains sont inventoriées pour former une liste fermée de valeurs fixes. Les valeurs sont des emplacements pour les mains comme (cf. fig. 3.28) :

- *sur la bouche* pour [BONBON] ;
- *devant le front* pour [PROFESSIONNEL] ;
- *près de la tempe* pour [RÉFLÉCHIR]...

Selon les langues et les choix des auteurs pour les inventaires, la granularité de la discrétisation de l'espace peut varier. HamNoSys permet une plus grande précision que les listes établies par les dictionnaires papier en général. Comme les configurations, les emplacements peuvent aussi être

[BONBON] [PROFESSIONNEL] [RÉFLÉCHIR]

FIG. 3.28 – Exemples d'emplacements

groupés selon des critères a posteriori (une fois l'inventaire établi) : ceux mettant en jeu un contact avec le corps, ceux situés près de la tête...

On constate que positionner la main dans l'espace devant le signeur à hauteur du ventre par exemple contient une imprécision quant à l'emplacement exact de cette main. Pour ce qui est des emplacements éloignés du corps, cette précision semble toujours suffisante. En revanche, une position manuelle globale pour la main ne suffit plus lorsque la main se rapproche du corps et a fortiori lorsqu'il y a contact. Par exemple, une configuration 'U', un emplacement spécifié *sur le menton* et une orientation appropriée ne suffisent pas formellement à définir le signe [QUALITÉ]. Comment savoir quelle partie de la main est en contact avec le menton ?

Toujours plus formel, le système HamNoSys permet de spécifier la pulpe des doigts comme point de contact (symbole ▯ sur la figure 3.29). [Losson 00] dans son travail de description lexicale

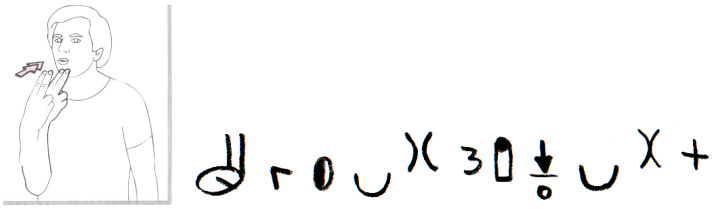


FIG. 3.29 – [QUALITÉ] en HamNoSys

à visée informatique a augmenté la notion d'emplacement avec un paramètre supplémentaire en cas de contact corporel de la main : le *point de contact*. Ainsi, il spécifie un emplacement dans l'espace par la donnée d'un simple emplacement visant en réalité le poignet, et un emplacement corporel par la donnée conjointe d'un point du corps (toujours pris dans une liste) et d'un point de contact (un point de la main).

Cette idée se retrouve et se généralise chez Liddell et Johnson également. L'emplacement d'une main est toujours la donnée de trois éléments :

– un site appelé *focal site* (FS) ;

– un point de la main appelé *active articulator* (AA) en référence à la phonétique articulatoire des langues vocales ;

– une relation spatiale, abrégée et baptisée *sprel* (pour *spatial relationship* = relation spatiale).

Le premier (FS) est l'emplacement ciblé. Il tient le même rôle que l'emplacement donné par les autres systèmes. Le deuxième (AA) représente le point de la main qui doit être positionné relativement au premier selon la relation spatiale donnée en troisième lieu par le sprel. L'intérêt du sprel est que lorsqu'un articulateur (AA) est positionné relativement à son FS en un emplacement éloigné de celui-ci, il reste néanmoins en relation avec lui. Par exemple, « PA » désigne le point central de la paume. On peut positionner l'articulateur « pulpe de l'index » au site PA de trois façons différentes : contact, proche, ou éloigné (dans un sens que l'on doit préciser : latéral dominant, côté paume...). Si l'emplacement effectif de l'articulateur peut être désigné directement sans recours à un décalage à partir d'un FS de départ et d'un sprel, nous retenons l'intérêt de cette méthode en ceci qu'une fois de plus, la motivation du signeur et l'origine cognitive de l'emplacement final restent apparentes dans la description.

3.2.5 Éléments non manuels

Balancements du buste et de la tête, changements du regard, mouvements d'épaule et mimiques sont prépondérants en langue des signes, et pourtant bien souvent délaissés au profit des seuls gestes manuels. Nous voulons analyser la part donnée aux gestes non manuels dans les modèles de description lexicale dans cette section.

Pour les modèles à cinq paramètres, le non manuel constitue un paramètre à lui seul et contient au mieux tous les éléments cités ci-dessus, sinon il se concentre d'habitude sur le visage. À la différence des autres paramètres, on ne trouve guère de liste des mimiques possibles dans laquelle on choisirait une valeur pour les signes spécifiant une mimique. On trouve en général une description de la mimique écrite dans une autre langue ou encore un dessin de celle-ci, ce qui ne constitue pas une description formelle. SigML a entrepris un tel inventaire et s'attache à proposer quelques mouvements des yeux, des épaules et des sourcils. Cependant, l'expression du visage humain est si riche que les listes de mimiques faciales restent finalement toujours aussi incomplètes.

SignWriting offre aussi un certain nombre de possibilités pour les gestes non manuels. L'avantage est que chaque partie du corps est décrite séparément. La mimique faciale n'est pas une notion globale ; elle est le résultat d'une combinaison d'un mouvement de la bouche, des yeux, des sourcils, etc. Les épaules, le buste et même les jambes peuvent faire l'objet de spécifications, chacun de manière indépendante.

Le regard en langue des signes joue un rôle important [Cuxac 00]. Il peut être dirigé soit suivant une certaine direction comme souvent vers le haut dans [PENSER] (fig. 3.30), soit vers un point particulier comme la main dominée dans [LIRE] (voir 2.2.3). HamNoSys et SignWriting permettent la spécification d'une direction pour le regard mais pas celle du deuxième cas, à savoir la visée d'un point en particulier.

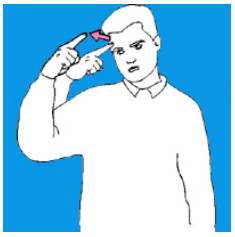


FIG. 3.30 – [PENSER]

Le modèle temporel de Liddell et Johnson ne couvre pas encore les aspects non manuels des signes mais prévoit[4] de les intégrer dans la même optique de temporisation. Ils seront vus comme un ensemble de traits, à l'instar de tous les aspects déjà présents. Les TU non transitoires feront apparaître des valeurs motivées entre lesquelles les transitions pourront se faire comme pour le reste des traits. Le temps reste la variable de plus grande portée.

3.2.6 Variation dans le temps et dynamique des signes

Nous nous intéressons ici à la manière de décrire l'évolution dans le temps du signe. La langue des signes étant spatio-temporelle, il va de soi que le dynamisme des signes fait partie des questions essentielles à se poser et constitue une propriété nécessaire à un système descriptif correct.

Nous divisons cette étude en trois parties. D'abord nous observons de quelle manière les modèles décrivent les mouvements manuels. Ensuite nous traitons de la synchronisation de ces différents mouvements. Enfin, nous abordons la question de leur dynamisme.

3.2.6.1 Description des mouvements manuels

Nous l'avons vu, les modèles purement paramétriques relèguent généralement toute forme de mouvement ou de variation paramétrique dans un unique paramètre, qu'il s'agisse de l'ouverture ou de la fermeture d'une configuration, d'un pianotement des doigts, d'un déplacement dans l'espace d'une main dans son ensemble, d'une rotation du poignet, voire d'un mouvement des épaules ou du buste...

[4]Les intentions que nous rapportons ici n'ont pas encore fait l'objet de publications. Nous faisons état d'un échange direct avec Robert E. Johnson lui-même.

Nous n'avons pas trouvé de système proposant de recensement complet des mouvements possibles. Pour ce qui est des dictionnaires ou des livres de linguistique, on trouve en général un paramètre plutôt ouvert à des descriptions libres et en langue écrite. La liste des symboles HamNoSys dédiés au mouvement (la dernière partie des notations dans ce système, cf. fig. 3.6 page 28) établit tout de même un ensemble fermé de mouvements de base. Par combinaison de ceux-ci, on peut décrire formellement des valeurs de mouvement plus complexes si nécessaire. Un mouvement de base est un mouvement rectiligne ou circulaire pris dans un ensemble fini de directions de l'espace discrétisé. On peut y ajouter des diacritiques comme des zigzags ou des arcs, ou encore ajouter un pianotement ou une ouverture progressive des doigts. Il existe également des opérateurs de répétition et de symétrie entre les mains.

Les linguistes distinguent en général les mouvements primaires des mouvements secondaires des mains. Sont primaires ceux qui déplacent la main entière dans l'espace ainsi que le bras, et secondaires ceux qui peuvent être opérés en même temps que les premiers, portant sur les doigts ou le poignet seulement. Effectués seuls, ces derniers ne nécessitent pas de déplacement du bras. Dans HamNoSys, ces mouvements combinables avec les déplacements sont d'habitude codés par un symbole diacritique apposé au symbole de déplacement.

L'approche temporelle est nettement différente. Les mouvements ne sont pas décrits en tant que tels. Un mouvement n'est que la conséquence d'une transition entre deux positions clé. Ainsi, si l'emplacement de la main change d'une position clé à la suivante, un mouvement a priori rectiligne (trajectoire la plus courte) de la main sera nécessaire pour atteindre la deuxième. Un mouvement semi-circulaire (en demi-cercle) est vu comme la même transition entre les positions de départ et d'arrivée, avec seulement une caractéristique supplémentaire (un *trait* d'arc) à la TU transitoire entre les deux. À ce sujet, on peut noter une proximité avec la notation HamNoSys des mouvements d'arc dont nous donnons un exemple figure 3.31. Un mouvement rectiligne est d'abord noté, suivi d'un symbole supplémentaire pour en faire un mouvement semi-circulaire. Enfin, les mouvements circulaires sont vus comme une suite de deux demi-cercles, avec une posture P (non transitoire et sans durée) entre les TU initiale et finale égales. On trouve là une proximité avec le système de contrôle d'avatar proposé par [Lebourque 98], utilisant des points cible pour décrire des trajectoires, comme illustré figure 3.32. Le tableau 3.4 montre que chaque cible pour Lebourque est déductible de la représentation avec les TU.

Ensuite, de même que pour les arcs, les mouvements dits secondaires ci-dessus sont pour ce système des traits ajoutés aux TU transitoires. Figure 3.33, la faible rotation répétée du poignet dans [HISTOIRE] est une caractéristique de la transition entre la posture initiale présentant le

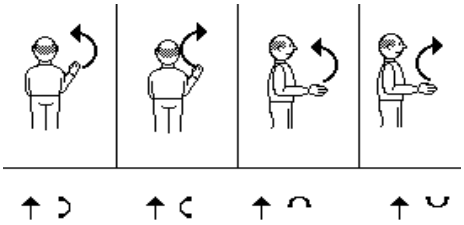


FIG. 3.31 – Mouvements semi-circulaires vers le haut en HamNoSys

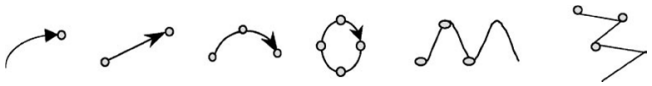
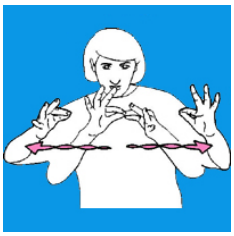


FIG. 3.32 – Cibles de Lebourque

contact et la posture finale. Une ouverture ou une fermeture des doigts comme dans [ATTRAPER] n'est pas un mouvement particulier mais une simple transition entre deux configurations, au même titre qu'une transition entre deux orientations ou emplacements.



[HISTOIRE]

[ATTRAPER]

FIG. 3.33 – Mouvements et TU transitoires

3.2.6.2 Synchronisation des variations temporelles

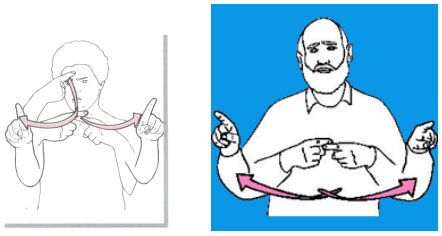
Dans un signe à deux mains dont les mouvements ne sont pas symétriques, il faut un moyen de synchronisation. Par exemple, le signe [PAS D'ACCORD] (fig. 3.34) nécessite que la main dominée du signe ne commence son mouvement qu'à son contact avec la main dominante. Spécifier parallèlement un mouvement pour la main dominée de la tête vers le bas puis vers le côté, et un autre pour la main dominée de devant le signeur vers l'autre côté peut, sans synchronisation, produire un signe anarchique, manquant le contact des index par exemple. On comprend le problème que pose le paramètre fourre-tout de mouvement.

Pour y remédier, HamNoSys propose un parenthésage des mouvements et une séparation des mains explicite avec le symbole $\nsucc$, dont la figure 3.35 montre un exemple de signe quelconque, tiré de la description de la version 4 de HamNoSys[5]. Les crochets [...] marquent la simultanéité de leur contenu. Sur cet exemple, on a un mouvement de la main dominante (flèche) vers le corps

[5]HamNoSys v4 `http://www.sign-lang.uni-hamburg.de/Projekte/HamNoSys/HNS4.0/englisch/HNS4.pdf`

Trajectoire	Lebourque	Liddell & Johnson
droite	pos. départ + 1 cible	Séquence TU = (NT_0, Tr, NT_f) posture NT_0 + 1 emplacement dans NT_f
demi-cercle	pos. départ + 2 cibles	Séquence TU = (NT_0, Tr, NT_f) NT_0 + 1 trait d'arc sur Tr + empl. NT_f
cercle	pos. départ + 4 cibles (dép. = fin)	Séquence TU = $(NT_0, Tr_1, NT_i, Tr_2, NT_f)$ NT_0 + arcs Tr_1 et Tr_2 + empl. NT_i et NT_f empl. de NT_f et de NT_0 identiques

TAB. 3.4 – Trajectoires selon deux approches comparables



[PAS D'ACCORD] [DIFFÉRENT]

FIG. 3.34 – Synchronisation

et une absence de mouvement (carré rayé) pour la main dominée. Ces crochets marquent un premier mouvement. Les chevrons <...> indiquent une « fusion », c'est-à-dire une séquence de mouvements sans pause entre eux. Ici, le premier mouvement est suivi immédiatement par un long (cf. tab. 3.5) mouvement vers le corps (des deux mains puisque pas d'indication contraire avec $\neq$), puis d'un arrêt net. Comme dans [PAS D'ACCORD], ce signe implique un départ de la main dominée pendant le trajet de la main dominante. La fusion sert à indiquer que la main dominante garde un mouvement continu même au départ de la main dominante. On peut trouver cette écriture quelque peu fastidieuse.

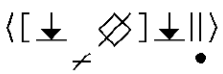


FIG. 3.35 – Synchronisation des mouvements en HamNoSys

L'approche temporelle n'a pas ce problème. En effet, on dégage pour [PAS D'ACCORD] trois TU non transitoires comme suit :

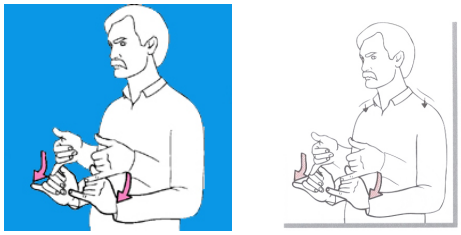
1. une avec l'index de la main dominante en contact sur la tempe ;
2. une où les index sont en contact, sans durée ;
3. la TU finale, semblable à celle de [DIFFÉRENT].

Anecdotiquement, on peut se demander si la main dominée doit être spécifiée en (1) avec la même position qu'en (2) pour une première transition sans mouvement, ou si la première partie du signe

est monomanuelle et que la deuxième main ne fait que se préparer à la transition suivante. Dans les deux cas nous avons ici tous les outils pour synchroniser l'évolution dans le temps des différents articulateurs, grâce à la notion d'alignement de ceux-ci sur des postures-clés qui rappellent la notion d'*image-clé* ou *keyframe* en animation. On ne décrit intégralement que ces TU non transitoires, points de rendez-vous dans le temps de tous les paramètres et entre lesquelles les mains font chacune leurs transitions.

3.2.6.3 Dynamisme des modèles et des signes décrits

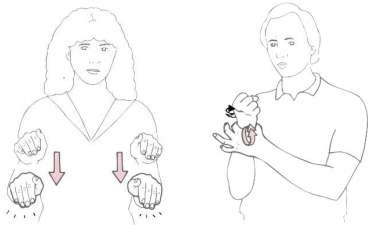
Nous faisons référence en premier lieu au dynamisme de la langue des signes elle-même, élément important qui, entre bien d'autres choses, permet la distinction entre [CHAISE] et [S'ASSEOIR], ou la variation de l'action du corps pour signer « s'asseoir calmement ». La tâche de description au cours du temps ne se réduit pas à exprimer une synchronisation mais doit également intégrer l'aspect dynamique de la langue. Une même trajectoire (départ, mouvement, arrivée) peut prendre de nombreuses formes différentes entre lesquelles les différences font sens.



[CHAISE] [S'ASSEOIR]

FIG. 3.36 – Dynamisme des signes

Sur les dessins épurés des dictionnaires, on trouve parfois comme le montre la figure 3.37 de petits traits à la pointe des flèches ou à l'extrémité des doigts comme pour [QUAND MÊME], qui indiquent un mouvement sec, s'arrêtant net. On peut trouver différentes formes de flèches selon qu'un mouvement soit saillant ou facultatif : les petites flèches noires dans [Moody 86b, Moody 89] signalent un mouvement secondaire, moins important, comme dans [POIGNET].



[QUAND MÊME] [POIGNET]

FIG. 3.37 – Précision des vignettes par symboles diacritiques

Les modèles à paramètres sont assez profondément statiques. La notion floue ou trop large de mouvement remet en question sa nature paramétrique. Toute valeur de mouvement est de même nature du point de vue du modèle, qu'il soit primaire ou secondaire, qu'il porte sur un changement de configuration ou d'emplacement. De plus, nous avons déjà démontré qu'une liste exhaustive était difficile à établir pour ce paramètre.

Plusieurs modèles paramétriques se sont éloignés de cette approche du mouvement. [Braffort 96b] propose les configurations dynamiques pour les signes comme [ATTRAPER], remarquant que la fermeture de la main avait une autre nature qu'un déplacement dans l'espace. [Kervajan 06b] applique ce recentrage paramétrique non seulement à la configuration mais aussi à l'emplacement, remarquant qu'un mouvement de déplacement dénaturait la valeur fixe d'emplacement. En quelque sorte, les modèles paramétriques formels ont tendance à revenir à trois paramètres manuels, avec une variation temporelle pour chacun. De même, le modèle phonétique temporel de Liddell et Johnson ne spécifie que les trois paramètres manuels de Stokoe pour une posture P ou D. La différence est que ce modèle est fondamentalement dynamique et non statique : le temps est le premier découpage du signe. Même un signe fixe est décrit en unités de temporisation. Comme nous avons déjà pu l'écrire, les approches paramétriques sont au contraire d'abord découpées en paramètres, chacun pouvant, au mieux, varier ensuite si besoin. HamNoSys offre, une fois l'ensemble des paramètres traditionnels spécifié, de nouveaux symboles diacritiques pour accélérer ou faire durer les mouvements, ou alors les allonger ou les raccourcir dans l'espace (tableau 3.5). Il n'existe pas de façon de spécifier la durée précise d'une tenue, d'un mouvement ou d'une accélération. On note que les définitions des opérateurs sont assez largement interprétables, notamment « mouvement tendu ».

→	normal
→ ●	long
→ ○	court

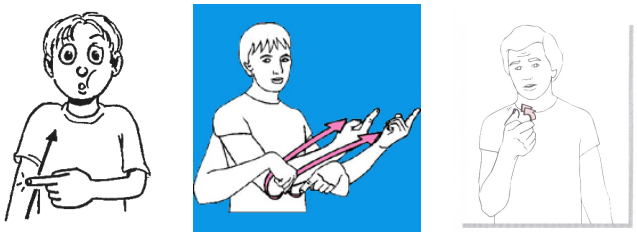
→ ✱	tendu
→ —	lent
→ ✳	rapide
→ ⁹/	départ net
→ ‖	arrêt net

TAB. 3.5 – Opérateurs de modification de mouvement en HamNoSys

Avec l'approche temporelle, nous savons que la séquence temporelle est la première chose lisible dans une description. En fait, les notions dynamiques et temporelles vont plus loin. Nous avons vu deux types de TU non transitoires : les P et les D, distinctes par leur présence ou leur absence de durée. De même, des traits distinguent plusieurs types de TU transitoires. Par exemple, une TU transitoire peut être *lexicale* ou non, c'est-à-dire faire partie intégrante de la séquence d'un

signe ou au contraire se trouver entre deux signes[6]. Si elle est lexicale, une transition peut être *antagoniste* ou induire un mouvement dit « balistique ». Plus précisément :

- **mouvement antagoniste** : la TU présente un mouvement retenu, à vitesse constante tout au long de la transition comme en général dans [LONGTEMPS], à gauche figure 3.38 ;
- **mouvement balistique** : le mouvement est au contraire accéléré pour atteindre un maximum sur la fin de la transition comme en général dans [ALLER], au centre sur la figure.



[LONGTEMPS] [ALLER] [BIENTÔT]

FIG. 3.38 – Différentes dynamiques de mouvement

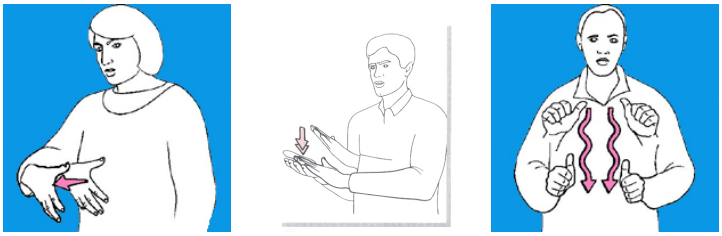
En résumé, la relative diversité des TU disponibles dans le modèle temporel permet une certaine description de la dynamique des signes et de leurs transitions. À ce stade, cette liste fermée des transitions possibles semble en revanche relativement limitée. À droite de la figure 3.38, la transition de [BIENTÔT] se fait de façon plus explosive, par une action de « pichenette » dont ne peut pas rendre compte le modèle.

3.2.7 Construction, dépendances et intentionnalité

Cette section situe les différents modèles quant à l'objectif de construction posé en 2.3.1. La question est de savoir dans quelle mesure l'origine des valeurs perceptibles à la signation est visible dans les descriptions elles-mêmes.

Un modèle purement paramétrique ne donne a priori aucune indication à ce sujet. La valeur *espace neutre* déjà introduite plus haut fait toutefois exception car si elle se traduit en général par un emplacement devant le corps, elle reste différente dans les descriptions de toute valeur explicite et met en évidence une différence d'intention. Par exemple, le signe non relocalisable [ENCEINTE] a pour valeur d'emplacement final *devant le ventre* alors que [ÂGE], n'exigeant pas véritablement d'emplacement, ne prend pas cette valeur explicite d'emplacement même s'il est la plupart du temps signé au même endroit. Pour ces modèles, [ÂGE] se signe « dans l'espace neutre ».

[6] À ce propos, Johnson suggère que de nombreux signes « composés » de plusieurs parties évoluent en se figeant et transforment une TU transitoire non lexicale en une transition lexicale, au même titre qu'une expression de plusieurs mots français devient mot composé puis lemme en perdant un trait d'union. Par exemple : « indiquer (quelque chose) contre (une autre) » puis « contre-indiquer » puis nouvellement « contrindiquer ».



[ENCEINTE] [ÂGE] [FORME]

FIG. 3.39 – Quelle origine aux réalisations des signes ?

HamNoSys permet cette notion d'espace neutre (symbole ∅). Il permet aussi plusieurs formes de symétrie des mains, répertoriées dans le tableau 3.6, où « gauche/droite » signifie qu'un mouvement de la main dominante vers la droite provoque ce mouvement vers la gauche pour la main dominée, et ainsi de suite. Ces opérateurs dits de symétrie incluent donc également ce qui géométriquement est plutôt une translation, à savoir les mouvements où les deux mains se suivent (ni gauche/droite, ni haut/bas, ni avant/arrière). Dans [FORME] sur la figure 3.39, la volonté du signeur est de produire un contour en conservant une symétrie entre les mains, et non de produire deux trajectoires différentes dans le même temps. Dans notre optique de construction, nous pensons que le modèle doit offrir une description distincte pour chaque intention. Le choix est laissé à l'auteur de la description.

gauche/droite	✓		✓		✓		✓
haut/bas		✓	✓			✓	✓
avant/arrière				✓	✓	✓	✓

TAB. 3.6 – Opérateurs de symétrie en HamNoSys

Liddell et Johnson ne proposent aucune notion de symétrie, ni d'espace neutre ou de paramètre non pertinent. Les descriptions sont selon eux phonétiques (articulatoires) et les spécifications d'emplacement de [ENCEINTE] et de [ÂGE] ne seront pas différentes en nature ; elles localiseront les mains devant le signeur. Nous perdons ainsi plusieurs aspects d'intentionnalité dans les descriptions, mais au niveau intra-paramétrique, le principe des traits pour spécifier une valeur se rapproche à l'inverse d'une description d'intention. Pour la configuration, la sélection de doigts et l'application de traits à ceux-là met en évidence les éléments motivés d'une configuration (voir 3.2.3). La comparaison suivante en apporte la preuve :

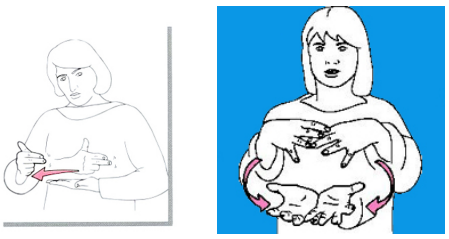
– extension du pouce (+TPX, +TDX), sélection des index, majeur et annulaire pour les replier (+I, +M, +R, -P, -FPX et -FDX), et dégagement des doigts non sélectionnés vers le haut (-NSI) ;

– extension du pouce (+TPX, +TDX), sélection et extension de l'auriculaire (-I, -M, -R, +P, +FPX et +FDX), et repli des doigts non sélectionnés contre la paume (+NSI) ;

En ce qui concerne les doigts sélectionnés et le trait NSI, on a deux spécifications rigoureusement contraires (donc représentent deux motivations différentes) et pourtant, elles donnent le même résultat visuel, à savoir une configuration proche de celle de 'Y' (fig. 3.40). Pour ce qui est des valeurs paramétriques fixes, cette approche par traits répond donc mieux au critère d'intentionnalité. Cette propriété ne s'étend pas au niveau inter-paramétrique.

FIG. 3.40 – Configuration pour 'Y'

Nous relevons d'autres formes de dépendance que la symétrie qui en général n'apparaissent pas dans la description des signes. Montré figure 3.41, [BUREAU] requiert que la main dominante suive l'orientation du bras ou de la main dominée. De même que pour l'emplacement dans [ÂGE], la direction que prennent les doigts de la main fixe dans [BUREAU] n'est pas pertinente et n'importe quelle valeur convient, pourvu que la trajectoire (ou variation de l'emplacement) de la main dominante se fasse en fonction de cette direction. Cette dépendance inter-paramétrique n'apparaît dans aucun modèle étudié. Cette trajectoire est en général figée et définie comme latérale. De même, le regard pour [LIRE] en SignWriting ne peut se spécifier au mieux que *latéralement vers le bas* comme sur la figure 3.42.



[BUREAU] [BALLON]

FIG. 3.41 – Dépendances entre éléments descriptifs

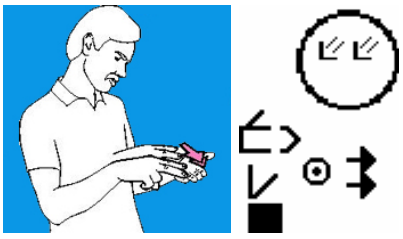


FIG. 3.42 – [LIRE] en SignWriting, avec indication du regard « vers le bas et sur la gauche »

L'intention de le diriger *vers la main dominée* n'apparaît pas. Du reste, l'emplacement de cette main n'est pas pertinent donc en cas de relocalisation de cette main, le regard ne suivrait pas, la position de la main dominante non plus. Nous estimons que cette dépendance de la main dominante et du regard sur la main dominée serait pertinente **au niveau de la description**.

L'unique élément de dépendance interne au signe (autre que les symétries entre les mains) que nous avons pu trouver se trouve chez HamNoSys avec la notion d'orientation relative. Un symbole diacritique « ˜ » apposé sous une spécification d'orientation rend celle-ci évolutive en la liant à la trajectoire de la main concernée. Par exemple, chaque main dans le signe [BALLON] (cf. fig. 3.41) a une trajectoire au cours de laquelle son orientation change. Le plan de la paume reste tangent au demi-cercle sur lequel s'effectue le déplacement. Cette dépendance entre valeurs spécifiées est toutefois la seule descriptible, et les dépendances issues d'intentions comme celles de [BUREAU] et de [LIRE] restent indescriptibles.

3.2.8 Réutilisabilité dans différents contextes

Un dernier point à discuter est celui de la faculté du modèle à entrer dans le cadre de la grande iconicité, récurrente en LS. Tout corpus autre que de signes isolés contient une alternance incessante entre les signes standard et les structures de grande iconicité (voir 2.1.3.2). Or, bon nombre de transferts jouent d'éléments iconiques des signes standard en en faisant varier la signation pour en adapter ou préciser le sens.

Reprenons les dessins de la section 2.1.3.2. Le premier TTF de la description illustrative de la fleur matérialise la tige et le deuxième la surface du disque central. Selon l'épaisseur de ces dernières, le placement des doigts peut varier. Dans le TS où la voiture s'arrête sur la ligne de feux, on peut noter une certaine distance entre les feux et la voiture. La main représentant la voiture et le discours étant illustratif, cette distance sera adaptée en fonction de la scène rapportée.

Tous ces transferts ont une place nulle dans les dictionnaires des signes car ceux-ci contiennent des signe standard isolés, sur lesquels ne pèse, par définition, aucun contexte. Mais en discours, même en phrase simple, ces transferts sont permanents. Leur place est tellement grande qu'on ne peut les ignorer dans une perspective de génération automatique d'énoncés complets. Or, nous constatons un manque significatif dans tous les systèmes, ceux-ci offrant habituellement comme perspective la réalisation de dictionnaires bilingues. On trouve néanmoins différents travaux sur la relocalisation de signes d'emplacement « neutre » ou de « verbes directionnels », mais qui ne traitent pas les signes avec contact corporel comme [CICATRICE], pourtant relocalisables sur le corps (fig. 3.43). Le projet VisiCast [Hanke 02b], architecture complète de traduction/génération permet

de remplacer la valeur « neutre » du paramètre d'emplacement par une direction parmi cinq pour repositionner les mains plus loin du corps du signeur, toutes dans le même plan horizontal. Dans [Kervajan 06a] également, on trouve une relocalisation possible de certains signes. Dans « Jean arrose la plante », « arrose » est signé au même emplacement que « la plante ».

FIG. 3.43 – [CICATRICE]

Le dernier apport trouvé dans la littérature est celui de [Huenerfauth 06], qui génère des *classifier predicates*, énoncés minimaux assimilables aux TS à locatif stable avec une entité se déplaçant relativement à ce locatif. L'intérêt de ces travaux est l'intégration des mouvements (déplacements) et non seulement de positions (emplacements).

Nous voyons qu'il existe quelques apports en matière de contextualisation des signes lexicaux mais ils restent très en-deçà de la richesse des langues des signes. Les signes iconiques par leur forme ou par leur taille sont régulièrement assujettis à une distorsion de ces aspects lors d'une signation à visée illustrative. Ces remotivations de signes standard restent impossibles aujourd'hui. Aussi, prenons les signes (difficiles à gloser) de la série suivante : [À TON TOUR (après moi)], [À MON TOUR (après lui)]... Sur la figure 3.44, on ne peut que remarquer un air de famille voire se demander s'il s'agit vraiment de plusieurs signes différents. De même pour la série plus simple [MOI], [TOI], [LUI/ELLE/ÇA] ou même [SE FÂCHER], [EN COLÈRE], tous donnés à voir en annexe A.1... Cette tendance à factoriser peut aller loin.

3.3 Réponses, cahier des charges

Nous reprenons maintenant point par point les problématiques dans l'ordre de la section précédente, soit pour trancher parmi les apports des modèles existants si une solution existe, soit au contraire pour proposer une piste palliant les manques. En quelque sorte, cette section établit le « cahier des charges » du modèle proposé par la suite.

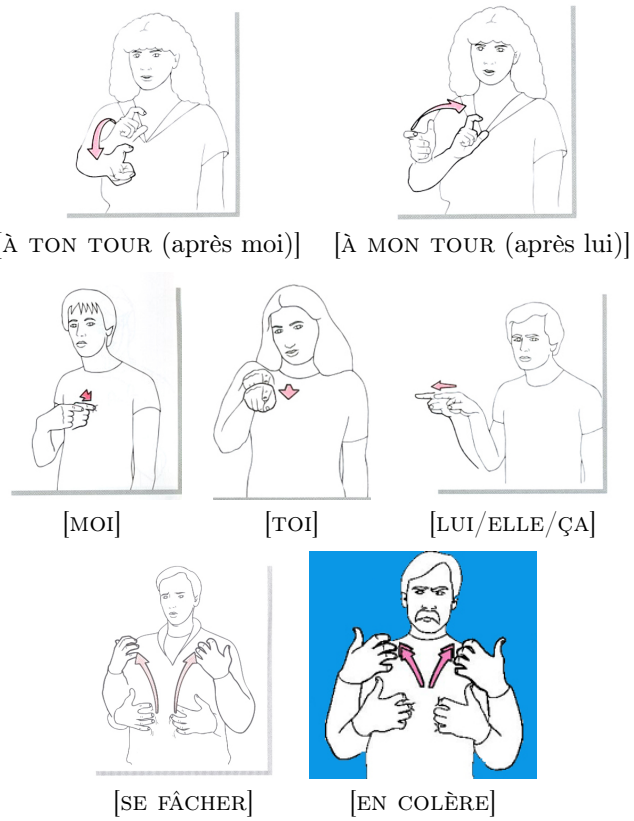


FIG. 3.44 – Factorisations possibles en un même signe lexical

3.3.1 Formel !

La réponse au premier point est pour ainsi dire déjà tranchée. Avec l'objectif fixé en 2.3.2 d'une description formelle et non ambiguë, nous ne pouvons faire usage de modèles laissant une part d'interprétation du lecteur. Nous rappelons la propriété fondamentale nécessaire pour satisfaire cet objectif :

Propriété Tout ce qui doit être produit lors de la signation doit être déductible de la représentation.

Autrement dit, si nous notons $D(p)$ le fait pour une description de spécifier une propriété p de signation, et $\Box S(p)$ celui pour p d'être obligatoire lors de la signation[7], nous avons l'implication logique suivante :

$$\Box S(p) \Rightarrow D(p)$$

La contraposée $\neg D(p) \Rightarrow \neg\Box S(p)$, soit $\neg D(p) \Rightarrow \Diamond\neg S(p)$, reformule cette propriété.

Conséquence Tout ce qui n'est pas déductible de la représentation peut ne pas être produit à la

[7] En logique modale, les opérateurs « $\Box$ » et « $\Diamond$ » se lisent respectivement « nécessaire » et « possible », et pour toute proposition p on a $\neg\Box p \Leftrightarrow \Diamond\neg p$ et $\neg\Diamond p \Leftrightarrow \Box\neg p$.

signation car ne spécifie pas le signe.

Ainsi, le modèle doit permettre de spécifier un signe autant que nécessaire, sans quoi certains signes risquent d'être sous-spécifiés. Par exemple, nous avons vu que pour le positionnement complet d'une main, le modèle de Stokoe à trois paramètres manuels n'était pas suffisant.

3.3.2 Souplesse de structure et liberté de (non-)spécification

Premièrement, nous avons déjà critiqué la fréquente sur-spécification de nombreux signes par les modèles actuels. Si comme nous venons de l'écrire le modèle se doit de permettre une description aussi contraignante que nécessaire, nous ne la voulons pas plus contraignante que nécessaire. Formellement, nous posons que le modèle vérifie la réciproque de la propriété précédente, à savoir :

$$D(p) \Rightarrow \Box S(p)$$

Propriété Tout ce qui est déductible d'une description est nécessaire à spécifier le signe.

Ainsi, le modèle doit permettre de ne décrire que ce qui est nécessaire et une description ne doit exprimer aucune contrainte superflue pour la signation. De même, nous pouvons en formuler la propriété contraposée : $\Diamond\neg S(p) \Rightarrow \neg D(p)$.

Conséquence Ce qui peut être signé différemment (sans dénaturer le signe) ne doit pas être dicté par la description.

Ceci garantit un modèle sans sur-spécification forcée, capable finalement de faire apparaître la plus ou moins grande flexibilité des signes décrits.

Deuxièmement, nous avons vu avec des exemples comme [BINIOU, ÉCOSSE], [DOUANE] ou [PLAFOND] que les descriptions ne visent pas toujours les mêmes éléments pour les spécifier. Le premier fixe la main mais anime le coude, le deuxième anime l'avant-bras et la main d'un seul bloc et le dernier ne fixe des propriétés que sur une partie de la main, le reste demeurant idéalement plutôt libre. Or les modèles existants donnent tous une place presque exclusive aux gestes manuels et sont incapables de décrire correctement les signes que nous citons ici.

Nous proposons de ne pas voir les mains comme articulateurs privilégiés. Leur place est certes fréquente, mais nullement prioritaire. Considérons d'abord le manque évident des modèles présentés pour décrire nos exemples ici, ou les signes comme [PIPE] (fig. 3.45) où la main est fixe et seule la mâchoire participe à un mouvement. Nous pensons ce mouvement difficilement assimilable à une expression faciale ; il s'agit d'un vrai mouvement répété comme celui du coude dans [BINIOU,

Écosse]. Le rôle dominant n'est pas attribué aux mains. Pour s'en convaincre ensuite, il n'y a qu'à observer les transferts personnels. Ces derniers font un usage intensif de toutes les parties du corps, et bien souvent au mépris des mains justement. Nous posons que tout élément mobile du corps situé au-dessus du bassin[8] et pouvant s'articuler ou s'animer seul est un potentiel articulateur de signe. Bras et avant-bras, os du dos pour le buste, de la tête ou encore des mâchoires sont vus comme des segments du squelette humain pouvant participer à une signation porteuse de sens. Au même titre, nous considérons comme articulateurs les parties non constituées d'os que sont le regard (yeux), les sourcils, les paupières, la langue, etc. Nous généralisons pour cela la notion de *squelette* et dans notre terminologie, le squelette comprend tous ces articulateurs, même non osseux.

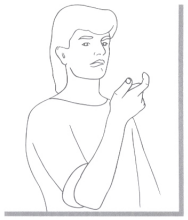


Fig. 3.45 – [pipe]

Propriété Aucun élément du corps pouvant être assujetti à une articulation motivée de la part du signeur n'est privilégié a priori. La considération des articulateurs des mains dans leur totalité n'est ni nécessaire ni suffisante pour tous les signes.

Par exemple, une description de « je réfléchis » pourra viser à la fois :

- les différents articulateurs de la main dominante pour lui donner la configuration de [réfléchir] (voir fig. 3.28 page 44) ;
- l'articulateur des yeux pour le haussement du regard ;
- ceux de la bouche pour former une « moue » adaptée à la réflexion.

Pour cet exemple, une manière plus condensée de signer peut être d'ignorer le premier point énuméré ci-dessus, rapprochant l'énoncé d'un transfert personnel tout en conservant le sens premier. Au contraire, ignorer les deux autres pour garder uniquement le premier sortirait le discours de toute visée illustrative. Lorsqu'elles suffisent, les approches paramétriques sont limitées à leur objectif : le lexique standard. Mais un discours en langue des signes n'est jamais constitué que de celui-ci (voir [Cuxac 00] et un résumé ici-même en 2.1.3.1), et notre modèle doit pouvoir rendre compte d'un discours complet. D'un point de vue général sur la langue des signes, il n'y a pas plus

[8] En principe, les parties inférieures du corps ne sont pas pertinentes en langue des signes.

de légitimité au premier point qu'aux deux suivants.

En résumé, contestant que les mains auraient un rôle plus important que le reste du corps, nous donnons une souplesse au modèle dans son approche du squelette à animer en ne favorisant aucun articulateur a priori.

3.3.3 Configurations ?

Avec l'argumentation ci-dessus, chaque main devient un ensemble d'articulateurs ne nécessitant a priori pas plus d'éléments de description que les autres articulateurs. Placer la main dans une configuration particulière comme l'exigent les descriptions paramétriques est possible mais seulement facultatif. Surtout, une configuration partielle comme dans [PLAFOND] ou étendue comme dans [DOUANE] ne pose pas de problème : seul l'ensemble des articulateurs visé change. Le premier signe ne vise que les articulateurs des doigts tandis que le second vise tous ceux de la main ainsi que celui de l'avant-bras.

La notion de configuration manuelle garde selon nous un sens dans de nombreux cas, tout particulièrement lors de la reprise d'une lettre de l'alphabet dactylologique (souvent la première d'un équivalent français) dans les signes comme [PÉDAGOGIE], [AVOIR RAISON] ou [OCTOBRE]. Ces signes « initialisés » (de l'anglais *initialized*), présentés figure 3.46, demandent une configuration complète de la main (pas comme [PLAFOND]) et seulement de la main (pas comme [DOUANE]). Cependant, ce n'est pas le cas général, et les spécifications partielles des articulateurs manuels sont légion. Souvent, comme dans [MERCI, BONJOUR], ce qui est habituellement nommé « main plate » est abusif car les signes ne demandent là que des doigts plats et serrés. Le pouce et l'angle des doigts avec la paume sont libres.

[PÉDAGOGIE] [AVOIR RAISON] [OCTOBRE]

FIG. 3.46 – Signes initialisés

3.3.4 Placement des articulateurs

Vu que nos descriptions portent sur des articulateurs librement choisis et non sur des mains, la notion d'emplacement manuel comme spécification obligée perd également son sens. Pour nous, le

positionnement des articulateurs du squelette ne dépend pas nécessairement de celui d'une main. Le signe [ENCORE] place essentiellement le bout des doigts d'une main contre la paume de l'autre (fig. 3.47) et non chacune des mains de manière globale. Pour cette raison, nous nous rapprochons de l'implantation de Losson qui ajoute un « point de contact » en cas de contact [Losson 00], mais proposons de l'élargir bien davantage encore. En effet, le signe [ARBRE] demande un contact entre le coude et la main dominée, ce qui devrait pour nous être décrit de la même manière que le contact dans [ENCORE].

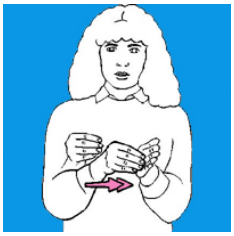


FIG. 3.47 – [ENCORE]

De plus, nous remarquons que le positionnement d'un point du squelette à un endroit donné de l'espace n'est pas suffisant. Par exemple lors d'un geste de pointage avec l'index, on n'a guère le besoin de spécifier la position dans l'espace de l'extrémité du doigt, de sa base, de la paume, du poignet ou même de quelque point du corps que ce soit. Ce qui importe est non pas la position d'un point d'un articulateur, mais l'orientation de celui-ci. C'est aussi le cas des articulateurs digitaux dans [QUOI ?] que nous mentionnions en 3.2.2. Ce qui importe est l'orientation des paumes vers le haut, non vraiment leur position dans l'espace de signation.

Proposition Ainsi nous proposons deux types de spécification pour un articulateur :

- les *spécifications de position* qui placent un point du corps en un point de l'espace ;
- les *spécifications d'orientation* qui orientent un articulateur dans un plan ou selon une direction.

Beaucoup de signes combinent les deux types de spécification. Le signe [ARBRE] spécifie entre autres :

- la position du coude et de la main dominée pour les mettre en contact ;
- l'orientation verticale de l'avant-bras dominant.

3.3.5 Le « non-manuel »

Nous formulons ici la même remarque qu'en 3.3.3 à propos des configurations. Le problème est réglé par la possibilité pour tout articulateur du corps d'être l'objet d'une spécification, plutôt que

par un paramètre figé en guise de réponse. Ici, les articulateurs non manuels ne sont guère différents des articulateurs manuels, et toute description peut aussi bien viser les uns ou les autres librement. Par exemple la description de [PIPE] fixe une main devant la bouche et anime les articulateurs de la mâchoire tandis qu'à l'inverse, le signe [BOUCHE BÉE] (fig. 3.48) fixe une ouverture pour la bouche et anime la main dominante devant celle-ci.

FIG. 3.48 – [BOUCHE BÉE]

Ainsi, de même que nous ne définissons pas de paramètre de configuration, nous n'avons pas de paramètre d'expression globale du visage dédié. L'avantage est double :

- la possibilité de ne viser que les articulateurs concernés par le signe : les signes comme [PIPE] ne comportent pas une expression du visage complète mais simplement une contrainte sur la bouche ;
- la possibilité de viser d'autres articulateurs non manuels inaccessibles jusqu'alors avec les paramètres, nécessaire au fameux signe [BINIOU, ÉCOSSE].

Pour autant, lorsque la notion d'expression globale du visage est pertinente comme pour [TRISTE], la description reste possible par conjonction de plusieurs spécifications d'articulateurs du visage, de même qu'une configuration manuelle globale peut être décrite sans être obligatoire.

3.3.6 Mouvement, synchronisation et dynamisme

Les approches paramétriques sont par essence statiques. Les valeurs des paramètres sont fixes ou, dans le meilleur des cas, le statut des « valeurs dynamiques » (ouverture/fermeture, changement d'orientation, mouvements...) n'est jamais formellement établi. L'idée de Liddell et Johnson de segmenter non pas en paramètres contenant éventuellement des variations mais d'abord dans le temps en repérant où les valeurs sont fixes nous semble excellente. Les animations assistées par ordinateur utilisent depuis toujours la technique de l'interpolation entre *images-clés*. Nous préférons donc de loin l'approche dite temporelle, telle que présentée en 3.1.4.

Cependant nous avons vu que la spécification des unités non transitoires spécifiant les positions du corps à la manière des images-clés en animation 3D étaient, dans ce modèle, largement influencée

par le découpage paramétrique des phénomènes à décrire. Nous gardons donc le principe d'une séquence temporelle d'unités de spécification, mais nous nous en tiendrons à ce que nous énonçons plus haut pour leur spécification, à savoir une description des postures visant des articulateurs du squelette, au sens élargi de la section 3.3.4. Chaque unité temporelle de spécification contiendra non pas des valeurs paramétriques ni des listes de traits, mais des spécifications de position ou d'orientation d'articulateurs.

Les mouvements et autres variations paramétriques sont alors, comme pour l'approche temporelle de Liddell et Johnson, le résultat d'étapes transitoires entre deux états différents du corps dans le temps. Ce système règle le problème de la synchronisation, celle-ci étant le résultat d'un passage simultané forcé de toutes les valeurs aux états donnés par les TU non transitoires. Le problème s'il en est un est que cette méthode ne permet pas la spécification d'instants clé différents pour chaque détail de la description. Les instants-clés choisis et les spécifications qu'ils contiennent agissent sur tout le corps de manière globale et contraignante.

Pour nous, ce problème est en réalité une force. Il est d'ailleurs le fondement de l'approche temporelle et s'il est pour nous un apport à lui attribuer avant tout autre, c'est précisément celui-ci. Une première approche de notre part [Filhol 06b] permettait la temporisation libre de chaque élément décrit, or ce genre de (non-)synchronisation des variations s'avère inexistant en langue des signes.

FIG. 3.49 – [CHICAGO]

Nous illustrons les variations paramétriques de [CHICAGO] sur la figure 3.50, où les gradients de couleur dans les flèches montrent les transitions entre valeurs. La TU non transitoire (posture instantanée) intermédiaire motive le squelette dans son ensemble. L'emplacement change de part et d'autre de la posture instantanée intermédiaire mais possède une valeur fixe en cette posture instantanée, dont le signeur est conscient. La figure 3.51 schématise les mêmes variations mais dont un élément (ici : l'orientation) demande une temporisation propre, non affectée par la posture instantanée intermédiaire. À vitesse normale et en gardant un geste naturel (du moins sans concentration démesurée), il est clairement impossible d'effectuer un changement progressif d'orientation sans aucune influence de la position intermédiaire.

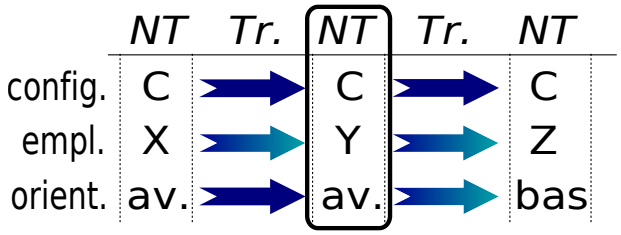


FIG. 3.50 – Éléments transitoires dans [CHICAGO]

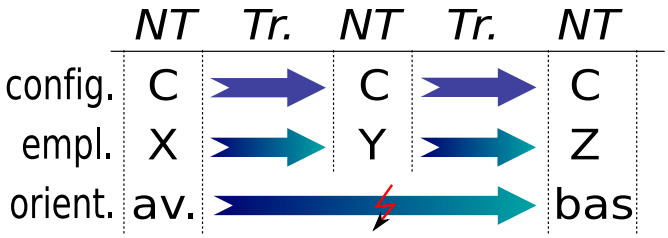


FIG. 3.51 – Phénomènes transitoires invalides en langue des signes

Notre première approche de temporisation « individuelle » des éléments permettait bien de décrire correctement les comportements valides, mais elle permettait également une infinité de descriptions supplémentaires inacceptables en langue des signes, du genre de la figure 3.51. Ceci rendait le modèle moins représentatif de la nature intrinsèque des signes.

Propriété Nous intégrons donc à notre modèle la notion d'unité temporelle de description sans partition possible des articulateurs du corps.

Par ailleurs, nous regrettons que seule la trajectoire en demi-cercle soit possible dans ce qu'offre le modèle temporel. Un cercle est défini par deux demi-cercles, ce qui du point de vue intentionnel est pour nous discutable. L'index dans [FILM] ne parcourt pas un simple demi-cercle ; il parcourt presque un cercle complet.

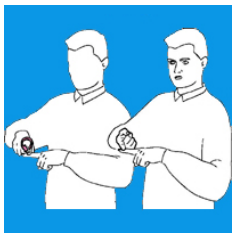


FIG. 3.52 – [FILM]

Du reste, la question du dynamisme ne nous semble pas complètement résolue par les seules propositions du modèle temporel. Ce dernier définit un nombre très limité de types de TU, seuls indices pour le dynamisme du mouvement des signes. Les TU transitoires lexicales sont au nombre de 2 : balistique (mouvement accéléré) ou antagoniste (mouvement linéaire). Ces mouvements

peuvent être rendus plus lents ou plus rapides avec des traits appropriés. Toutefois, un signe tel [BIENTÔT] ne nous semble entrer dans aucune catégorie ci-dessus. Comme le montre la figure 3.53, on trouve des TU qui impliquent un mouvement bloqué augmentant la tension des muscles dans un premier temps, jusqu'à leur libération ensuite qui permet le positionnement des articulateurs libérés quasi-instantanément — une sorte de transition « occlusive » si l'on rapproche ce caractère articulatoire de la terminologie phonétique. Quand bien même la vitesse des articulateurs et ses variations sont difficiles à mesurer, il nous paraît clair que cette forme de transition dynamique est différente des deux précédentes dans sa motivation car aucune accumulation de tension n'est réalisée dans celles-ci. Elle manque à l'appel comme d'autres formes de mouvement pourraient encore être dégagées.

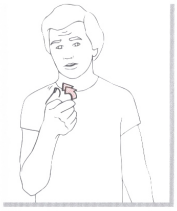


FIG. 3.53 – TU transitoire particulière dans [BIENTÔT]

Propriété Notre modèle doit permettre de rendre compte de tout dynamisme possible dans une transition en matière de durée, de vitesse et d'accélération.

Il doit non seulement couvrir les possibilités des différents types de TU répertoriées par Liddell et Johnson, transitoires et non transitoires, mais également en permettre toutes les variations plutôt qu'une liste limitée de certaines[9]. Notons en revanche qu'à l'instar des spécifications contenues dans les TU non transitoires, ces informations relatives au dynamisme contenues dans les TU transitoires s'appliquent de manière globale à tous les articulateurs du squelette. Intuitivement, il n'est effectivement guère naturel voire difficile d'utiliser un dynamisme de transition différent pour différents articulateurs.

3.3.7 Construction et dépendances

Nous avons déjà opté pour un système de description des motivations plutôt que du résultat visible.

Nous ne nions pas le caractère plus flou et plus discutable de l'origine cognitive des signes. Plusieurs descriptions fondamentalement différentes peuvent mener à la même réalisation, et il

[9] On trouvera quelques mesures et analyses intéressantes dans [Losson 00], annexes 2.3 et 2.4.

faut en choisir une. En arithmétique, une question équivalente serait celle de savoir si la valeur 4 est issue de la somme de 1 et de 3, du produit de 2 par 2, de la plus petite solution entière de l'inéquation $\pi < x$ ou de toute autre origine possible encore. Comment savoir en effet ce qui est à l'origine des configurations identiques des mains dans [TABLE], visibles sur la figure 3.54 ? On peut décider aussi bien de décrire l'une comme égale à l'autre que de donner l'une et l'autre de manière indépendante en utilisant deux fois la même valeur, et le résultat visible sera le même. Comment alors trancher ?

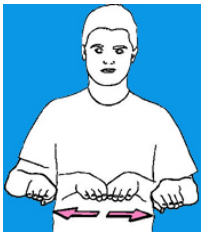


FIG. 3.54 – [TABLE]

En réalité, cette discussion d'ordre psycho-linguistique sort du cadre de notre thèse. Nous laissons à l'auteur des descriptions le soin de décider de celle à adopter parmi les différentes possibilités pour un signe et sans doute conviendra-t-il d'ailleurs pour cela d'établir un protocole plus systématique qui saura guider les linguistes dans cette démarche. La description spontanée et l'intuition des locuteurs (surtout natifs) joueront certainement un rôle important dans ce protocole mais pas uniquement. Nous pensons par exemple qu'une confrontation méthodique du signe à différents contextes sémantiques et syntaxiques peut aussi révéler des propriétés intrinsèques ou justement invalider une propriété attribuée spontanément au signe de manière abusive. On pourra également avoir recours à des études étylmologiques comme en présente [Bonnal 06] dans sa thèse.

Nous nous limiterons à répondre qu'un tel modèle, offrant de multiples possibilités de construction pour chaque signe, ne fera justement que favoriser ces discussions sur la nature des signes en apportant le formalisme nécessaire à l'appréciation des différentes origines possibles de celui-ci. Ceci étant, le résultat reste bien entendu toujours déductible de sa description quelle que soit celle choisie pour le décrire. À l'inverse, les modèles purement paramétriques évitent la question précédente mais n'apportent rien par rapport à l'approche que nous proposons.

Propriétés Pour ce faire, nous voulons donner deux propriétés supplémentaires au modèle, que nous justifions ensuite :

1. toute spécification d'une description lexicale doit pouvoir faire référence à d'autres valeurs contenues dans cette description ;

2. une description peut contenir des objets annexes n'apparaissant pas dans la réalisation finale du signe.

3.3.7.1 Dépendances entre éléments

La première propriété ci-dessus permet à toute spécification apparaissant dans une description de faire référence dans son expression à d'autres éléments de la description. Par exemple, comme indiqué en section 3.2.7, la trajectoire que prend la main mobile dans [BUREAU] doit avoir la direction du bras opposé. Pour nous, ceci est une dépendance de la spécification des articulateurs de la main dominante (au moment de les positionner) sur la valeur d'orientation que prend l'avant-bras opposé, autre articulateur du squelette.

Ceci rend compte de la motivation du phénomène et semble conforme à la description spontanée et naturelle venant à l'esprit pour décrire le signe : il ne s'agit pas de déplacer la main dominée « vers la droite » ni même « vers le côté du membre dominant », mais « le long du bras dominé ». Quand bien même ce dernier devait être placé de telle sorte que les deux spécifications précédentes reviendraient au même, nous ne montrerions pas l'intention du signeur en décrivant la main dominante de manière indépendante. Le déplacement n'aurait aucun lien apparent avec le bras opposé, et pourtant il en est le guide.

3.3.7.2 Objets annexes

Cette propriété est résolument nouvelle. Jamais un modèle ne s'étant véritablement attaché à faire apparaître la motivation d'une signation plutôt que la signation elle-même, cette proposition est sans doute parmi les plus novatrices de notre travail. Il s'agit de permettre la spécification d'objets autres que des articulateurs du squelette, c'est-à-dire d'objets n'apparaissant pas lors de la réalisation finale du signe.

Typiquement, beaucoup de signes fortement iconiques d'une entité concrète utilisent des aspects de la forme globale de l'objet qu'ils dénotent, imaginée dans l'espace. Nous avons déjà donné l'exemple de la symétrie entre deux mains. En géométrie, une symétrie se définit par rapport à un point, une droite ou un plan de l'espace. Par conséquent, nous considérons nécessaire de construire ce centre, cet axe ou ce plan de symétrie dans l'espace de signation car il fait partie de la démarche de construction du signe, et c'est précisément ce qu'il nous intéresse de décrire. Pour autant, il reste invisible à la signation.

Parfois, un articulateur doit se placer relativement à un autre, à une certaine distance et dans une certaine direction. Par exemple dans [SOCIÉTÉ], on veut placer la main dominante à une

certaine distance (faible) du pouce ou de l'index opposé (cf. fig. 3.55), et on dirige les doigts vers celui-ci. D'autres fois, plusieurs articulateurs sont placés relativement à un objet construit. Le signe [BALLON] implique clairement une position et une orientation des mains en fonction d'un point représentant son centre. Pour nous, ce centre est fondamental et, pour ainsi dire, le signe entier gravite autour de lui. Nous soutenons que celui-ci doit faire partie visible de la description, quand bien même il n'est pas matérialisé à la signation.

FIG. 3.55 – [SOCIÉTÉ]

3.3.8 Réutilisabilité, déformations en contexte

Nous revenons ici sur la nécessité pour une même description d'être réutilisable dans plusieurs contextes, même si la signation diffère d'une fois sur l'autre. La déformation possible des signes grâce aux jeux de l'iconicité et leur adaptabilité à l'environnement sémantique dans lequel ils sont utilisés font l'essence et la richesse des langues des signes et nous voulons notre modèle représentatif de cette richesse.

Figer les descriptions comme le font les modèles actuels, et agir éventuellement sur elles mais une fois en contexte uniquement, pose le problème extrêmement compliqué de savoir sur quel élément de la description agir et de quelle manière le modifier. Comment savoir également si la modification d'un emplacement (par exemple, dans le cas d'un signe « relocalisé ») est non seulement pertinente, mais également permise ? On ne peut le faire sans une analyse fine du contexte et du signe, au cas par cas. On remarque que le problème réside dans la sur-spécification des signes. Le signe est dans un premier temps décrit complètement, du point de vue de la production, pour ensuite être modifié selon son utilisation, et toute la difficulté est de savoir en quoi il est modifiable et dans quelle mesure.

Nous proposons une autre approche, tirant profit à la fois de la description suffisante (voir 3.3.2) et des dépendances de construction (voir 3.3.7). La première propriété nous indique que tout ce qui n'est pas explicitement spécifié dans une description est librement adaptable à la signation. Nous n'avons donc pas à nous poser la question de savoir ce qui est modifiable dans un signe car la

réponse est donnée par la présence ou l'absence de spécification sur un articulateur. La deuxième propriété nous permet de faire dépendre n'importe quel élément d'une description sur un autre. Il suffit alors d'étendre les dépendances possibles à des valeurs dont on indique qu'elles sont à trouver dans le contexte de l'énoncé. Ainsi, une description peut faire état d'une dépendance à des valeurs a priori inconnues ou incertaines, qui ne pourront être précisées qu'à la signation effective.

Reprenons l'exemple [BUREAU], cité plus haut. Nous avons dit que la main dominante suivait l'orientation « que prenait l'avant-bras opposé ». Cette formule laisse entendre à juste titre que celle-ci n'est pas figée. En effet, celle-ci peut tout à fait varier pour s'aligner avec le bureau dénoté tel qu'il est disposé dans l'espace de signation, en termes d'iconicité de situation (voir 2.1.3.2). Nous avons là une dépendance de l'orientation du segment de l'avant-bras sur la disposition du bureau dans la scène de signation. Cette dépendance est pour nous quasiment de même nature que celle de la trajectoire de la main dominante sur ce même avant-bras.

3.4 Philosophie du modèle proposé

Avant de proposer notre modèle, nous en rappelons ici brièvement le cahier des charges en faisant la synthèse des **neuf** propriétés requises, dégagées jusqu'ici — pour chacune, nous renvoyons le lecteur à la page où il trouvera l'argumentation qui lui correspond :

1. un signe est, au plus haut niveau de description, une séquence d'unités temporelles alternant entre des phases-clés et des phases de transitions — cf. 3.3.6 page 63 ;
2. les unités temporelles doivent pouvoir faire état de tout type de durée des unités, et de diverses accélérations et vitesses des variations sur les transitions — cf. 3.3.6 page 65 ;
3. pas de sous-spécification, décrire autant que nécessaire — cf. 3.3.1 page 57 ;
4. pas de sur-spécification, ne décrire que suffisamment — cf. 3.3.2 page 58 ;
5. la spécification d'une unité temporelle affecte le squelette dans son ensemble et aucun articulateur n'échappe a priori à cette unité — cf. 3.3.6 page 64 ;
6. tout segment du corps est potentiel articulateur et aucun n'est (théoriquement) privilégié par le modèle — cf. 3.3.2 page 59 ;
7. rendre possible toute dépendance entre les éléments des descriptions — cf. 3.3.7.1 page 67 ;
8. permettre l'emploi d'objets géométriques annexes, non corporels et non nécessairement visibles ou matérialisés à la signation — cf. 3.3.7.2 page 67 ;

9. donner accès à des objets ou valeurs provenant du contexte de signation, non instanciés a priori — cf. 3.3.8 page 68.

Chapitre 4

Zebedee : un modèle de représentation des signes

À ce stade, nous disposons des éléments nécessaires à la compréhension du nouveau modèle, baptisé *Zebedee* (Zébulon), et que nous présentons en détail dans ce chapitre. Ce dernier se veut indépendant des argumentations précédentes car l'objectif est d'en rendre l'utilisation autonome et ainsi constituer une première référence du modèle. Seuls des renvois entre crochets y sont présents ; ils indiquent au lecteur une section où pourra être trouvée une justification ou une introduction de notion.

D'abord, une partie (4.1) présente les propriétés spatio-temporelles du modèle descriptif et la manière dont celles-ci s'articulent avec la langue des signes, elle-même fondamentalement spatio-temporelle. La suivante (4.2) est consacrée à l'objet qui sera la cible de toutes les spécifications qui suivront : le squelette. Éminemment complexe, c'est lui qui une fois animé portera tous les mouvements visibles et il est nécessaire par conséquent d'en définir formellement le comportement. Nous voyons ensuite (4.3) comment écrire les différentes spécifications nécessaires à l'élaboration d'une description, puis présentons les dépendances entre les divers objets qui composent une description (4.4), ce que nous soulignerons comme étant une propriété essentielle du modèle ouvrant entre autres voies celle de la grande iconicité. Après avoir présenté les dernières notions propres au modèle (4.5), notamment alias et macros, nous concluons en discutant d'abord un exemple complet (4.6) et en proposant un résumé (4.7) des principales propriétés exposées dans le chapitre.

4.1 Un modèle spatio-temporel

Toute production signée évolue dans l'espace et au cours du temps. La spatio-temporalité est une propriété essentielle aux langues des signes qui doit se traduire dans les descriptions des signes. Cette première section s'attache justement à expliquer la spatio-temporalité du modèle, en présentant d'abord la manière dont nous modélisons l'espace de signation et l'usage que nous en ferons dans la suite. Dans un deuxième temps nous montrons comment effectuer un découpage temporel du signe et soulignons son caractère essentiel.

4.1.1 De l'espace...

Nous verrons au fil du chapitre que les signes ont de nombreuses propriétés géométriques proches de la géométrie euclidienne classique. Le signe est en fait vu comme une figure géométrique dynamique dont les éléments sont synchronisés dans le temps. C'est pourquoi nous considérons l'espace de signation comme un espace euclidien, dans lequel sont possibles les constructions standard d'objets géométriques tels que des points, des vecteurs, des droites, des plans...

Avant toute description, cet espace ne contient que le *squelette* à animer (voir à ce propos la section 4.2). Celui-ci fournit déjà quelques objets géométriques, appelés **objets géométriques corporels** :

- des vecteurs, provenant de l'orientation d'os du corps et dépendant de l'articulation de ceux-ci (e.g. la direction d'un avant-bras) ;
- des points, provenant par exemple de la liste des contacts possibles, repérés comme linguistiquement pertinents (e.g. l'extérieur du coude).

Les points de contact pertinents mentionnés ci-dessus sont appelés **sites corporels** [3.3.4]. La liste des sites corporels peut dépendre de la langue des signes considérée. En effet, toutes les langues ne font pas une utilisation nécessairement identique des différents points ou zones du corps.

Une description peut ensuite contenir des définitions d'objets géométriques non corporels et articuler le squelette en fonctions de ceux-ci [3.3.7.2]. Par exemple, le signe [CHICAGO] impliquera trois points essentiels de l'espace, à savoir les trois emplacements successifs de la main mise en mouvement, auxquels elle devra être reliée.

La figure 4.1 illustre l'espace muni d'un repère et présente le « squelette » susmentionné sous la forme d'un personnage virtuel, ainsi que quelques objets géométriques, corporels ou non. Un point (comme M sur le dessin) peut être défini de manière absolue par ses coordonnées cartésiennes, comme étant le milieu d'un segment défini par ses extrémités, le symétrique d'un autre par rapport

à un troisième point, ou à une droite, un plan... Une droite peut être définie par deux points, ou un élément et un vecteur directeur, ou un élément et un plan normal, etc. Le modèle définit une grammaire des expressions donnée en annexe D.1.2.3 pour construire ce type d'objets. Si celle-ci recense un nombre fini de définitions possibles pour chaque type d'objet géométrique proposé, un système implantant ce modèle pourra l'étendre à tout outil de la géométrie euclidienne classique.

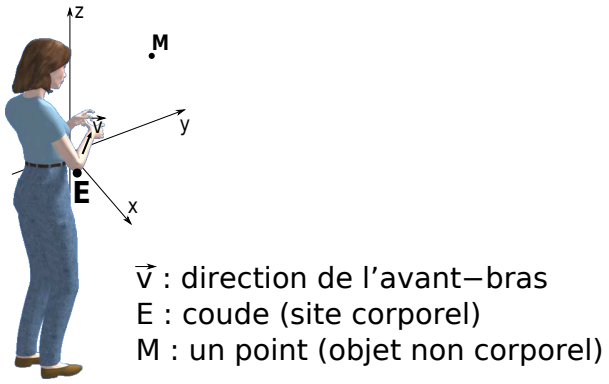


FIG. 4.1 – Espace de signation et objets

Notons ensuite que les objets peuvent varier au cours du temps. C'est le cas notamment des éléments corporels car le squelette étant animé, les diverses orientations et positions en jeu ne sont pas fixes. Tout objet construit à partir de tels objets sont du coup également mobiles, toutefois nous réservons cette discussion sur les dépendances entre objets à la section 4.4.

4.1.2 ...et du temps

La première observation que nous portons sur un signe à décrire, de quelque langue des signes qu'il soit, est son évolution dans le temps. Nous déterminons d'abord un découpage temporel du signe, puis faisons évoluer les articulateurs du squelette dans l'espace de signation suivant ce découpage. Cette section montre comment découper la durée d'un signe en unités distinctes, que nous appelons *unités temporelles de description.*

4.1.2.1 Séquence temporelle et unités de description

Il existe deux types d'unités temporelles de description, correspondant à deux motivations à la signation, opposées par nature [3.1.4]. À tout moment, le signeur est :

- soit dans une posture complète du corps, motivée et consciente, qu'il voulait atteindre et veut éventuellement maintenir ;
- soit dans l'optique d'atteindre une posture future, et reste guidé par celle-ci jusqu'à l'obtenir.

Dans le deuxième cas, sa posture n'est pas consciente et motivée à chaque instant. Elle est le résultat, pris à cet instant, des différents changements corporels effectués pour atteindre la posture motivée suivante lui servant de guide, de cible. Le signeur alterne constamment entre les deux types de motivation, c'est-à-dire qu'il a constamment conscience (au moins) de la posture dans laquelle il est placé ou de celle qu'il compte atteindre.

À peu de choses près, ceci se rapproche de la technique des images-clés en animation assistée par ordinateur. Celle-ci spécifie seulement un sous-ensemble d'images dites « clés » (*keyframes*), judicieusement choisies pour qu'une interpolation entre chaque couple d'images-clés consécutives suffise à donner une illusion satisfaisante de l'animation escomptée. Aussi, nous appelons le premier type de motivation donnant lieu aux postures motivées les **postures-clés**. Les périodes entre celles-ci sont les **transitions**.

Notons néanmoins déjà trois différences avec les images clé en animation. La première, est leur choix. En animation, on procède par approximations successives du mouvement, augmentant la granularité (donc le nombre d'images-clés) à chaque itération, alors que notre modèle définit comme postures-clés toutes les postures motivées par le signeur et uniquement celles-ci. Aucune posture-clé n'est insérée entre deux postures motivées pour améliorer le rendu d'un mouvement si celle-ci ne correspond pas à une posture présente à l'esprit comme cible ou guide lors de la signation. Deuxièmement, en termes de durée, une image-clé est une image identifiée et dont la durée est connue (l'unité minimale de temps). Comme nous le voyons dans la sous-section suivante, le modèle proposé dans cette thèse n'oblige au contraire aucune durée particulière pour une posture-clé. Enfin, une image clé en animation spécifie entièrement l'image donnée à voir. Nous verrons de même que cela n'est pas le cas pour le modèle présenté ici.

Ainsi, les signes se découpent en une **alternance de postures-clés et de transitions**, où les premières correspondent aux postures motivées de la signation, et les autres aux passages de chacune à la suivante. La figure 4.2 montre un axe temporel sur lequel on a aligné trois unités temporelles, représentées par des cadres : une posture-clé, une transition, une posture-clé.

Quelques exemples

– [BILAN, RÉSULTAT]

  Ce signe a une séquence temporelle similaire à celle de l'exemple [CHICAGO] mentionné plus haut. Sa séquence temporelle est donc constituée de trois posture-clés, et de deux transitions intercalées.

– [ÉNERGIE, LITRE]

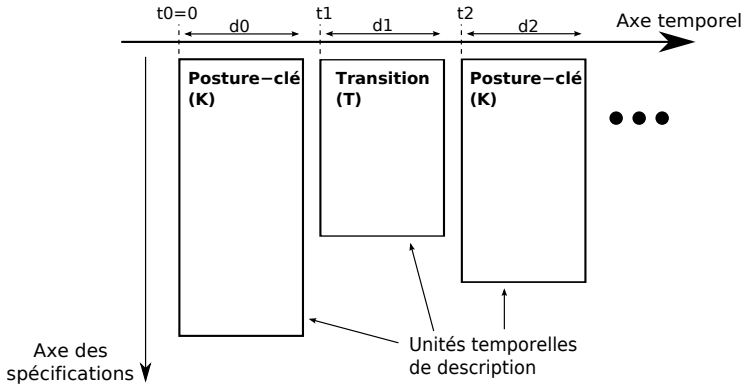
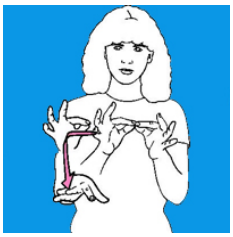


FIG. 4.2 – Séquence temporelle et unités de spécification


[BILAN, RÉSULTAT]

[ÉNERGIE, LITRE]

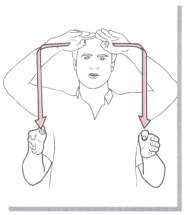

[ARMOIRE]

FIG. 4.3 – Séquences temporelles, exemples

Les seules postures motivées et conscientes ici sont celles de départ et d'arrivée. Ce signe a donc une séquence temporelle formée de deux postures-clés, et d'une transition intermédiaire.

– [ARMOIRE]

Ici, la trajectoire du poignet est la même que dans [CHICAGO] (deux déplacements), et nous serions donc tentés de voir trois postures-clés. En réalité, il faut remarquer que l'orientation de la paume reste constante sur chacun des déplacements du poignet car elle a été préparée avant. Chaque déplacement est donc précédé et suivi d'une posture-clé, ce qui forme une séquence temporelle de quatre postures-clés encadrant trois transitions. La transition centrale semble certes de nature différente des deux autres qui accompagnent les déplacements), à juste titre. Nous verrons cela dans les spécifications des transitions plus loin dans l'exposé, et nous nous en tenons pour l'instant à la séquence des unités temporelles du signe.

4.1.2.2 Répartition dans le temps

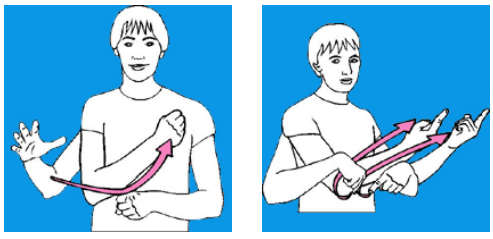
Tout instant d'une signation, pris en photo par exemple, donne lieu à une posture complète du corps. Avec une approche linéaire et continue du temps, on dit que la durée du signe est l'enchaînement d'une infinité de ces postures (instants). En animation, on discrétise ce temps en une suite d'intervalles de durées égales, pendant lesquels on considère le corps comme fixe. On appelle

chacun de ces intervalles une *image* (ou *frame* en anglais, sans doute plus répandu). Le signe n'est alors plus une suite infinie de postures instantanées mais une concaténation finie d'images/frames ayant chacune une durée. La discontinuité entre les frames peut être rendue imperceptible en faisant passer la durée des frames en deçà de celle de la persistance rétinienne.

Le modèle en tant que tel ne fait pas d'hypothèse sur la modélisation du temps. Il suppose seulement une unité de temps proportionnelle à la seconde. Dans une optique de synthèse informatique mettant en jeu des montages vidéo, la frame de 1/24 ou 1/25 seconde peut convenir. On peut aussi abstraire le temps réel en rapportant la durée totale de la description à une valeur fixe comme 1 pour naviguer dans l'intervalle réel unitaire $[0, 1]$ ou 100 pour utiliser des notations de pourcentages.

Avec l'unité de temps choisie, on délimite les unités temporelles de la description. Un premier élément de dynamisme fait là son entrée dans le modèle : chaque posture-clé et chaque transition étant affectée d'une durée, les unités temporelles deviennent parfaitement délimitées dans le temps et leurs dates de début et de fin connues. Sur la figure 4.2, les durées des trois unités illustrées sont notées *d0*, *d1* et *d2* ; *t0*, *t1* et *t2*, déductibles de ces durées, sont leurs dates de début respectives.

On peut à ce stade remarquer la nature particulière d'une unité temporelle de durée minimale ou tendant vers zéro. Une transition sans durée ne peut que donner le résultat étonnant d'un passage instantané d'une posture à l'autre et nous semble donc improbable. Une posture-clé sans durée représente en revanche une posture intermédiaire, par laquelle il faut passer mais ne devant pas être tenue. Par exemple, le signe [GAGNER] (fig. 4.4) contient une telle posture intermédiaire. En effet, l'instant où le poing se ferme du côté dominant en faisant contact avec l'autre poing fermé montre une posture motivée, mais celle-ci n'est assurément pas maintenue, le mouvement n'est même pas ralenti. Aussi, les signes qui « se fondent » dans le signe suivant, comme [ALLER] dont la posture finale semble floue ou moins facilement identifiable, sont de bons candidats à l'utilisation d'une posture-clé sans durée comme unité temporelle finale de description.



[GAGNER] [ALLER]

FIG. 4.4 – Postures-clés de durée zéro

Observons maintenant l'élément central du modèle : le squelette, en quelque sorte patient des

descriptions et agent de leur signation.

4.2 Un squelette

Cette section décrit l'objet, géométriquement complexe, qui reçoit in fine toutes les spécifications et contraintes des descriptions : le squelette à animer [3.3.2]. Nous donnons ici dans un premier temps une approche formelle générique de squelette, applicable à toute structure composée de segments rigides attachés les uns aux autres et articulés, comme les êtres vertébrés ou les bras en robotique. Nous appliquons ensuite ce modèle au squelette humain, définissant ainsi la structure que nous animons pour produire des signes.

4.2.1 Définition formelle

Après une présentation du modèle de squelette utilisé dans le modèle de description des signes, nous complétons la section en introduisant les notions de « sites corporels » et de « points liés », dont nous nous servirons par la suite.

4.2.1.1 Modélisation

Un squelette est un ensemble de **segments** (ou os) attachés les uns aux autres permettant, par un jeu d'articulations, l'animation de l'être ou de l'objet qu'il incarne. Chaque segment peut s'articuler avec un autre auquel il est attaché, c'est-à-dire changer l'angle formé par les deux segments et/ou la torsion de l'un par rapport à l'autre, dans la limite éventuelle des contraintes articulatoires locales à ce point. Par exemple, dans le squelette humain, le bras s'articule avec la clavicule. La figure 4.5 représente une telle structure, inspirée de la partie supérieure d'un squelette humain.

On modélise cette structure par un graphe dont les sommets représentent les segments et une arête entre deux segments signifie l'articulation possible entre ces segments [Ménardais 03]. Le graphe est :

- connexe : on considère tous les segments reliés entre eux pour ne former qu'une seule structure ;
- sans cycle : on considère que deux segments articulés avec un troisième ne sont reliés entre eux que par celui-ci.

Il s'agit donc d'un arbre, dont on peut choisir une **racine**, notée *root*. On définit la fonction de parenté directe sur l'ensemble S des sommets du graphe :

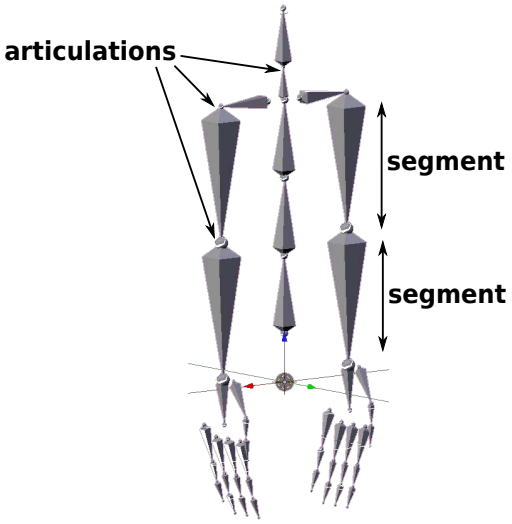


FIG. 4.5 – Visualisation de la structure d'un squelette

Définition Le parent d'un segment $b \neq root$ est le segment voisin noté $parent(b)$ dont la distance à $root$ (en nombre d'arêtes) est la plus courte.

Remarque Le segment $root$ n'a pas de parent, et tout autre segment a un unique parent.

On représente chaque segment par un repère orthonormé dans l'espace dont :

- l'origine coïncide avec le point fixe de l'articulation du segment avec son parent ;
- l'orientation reste fixe par rapport au segment.

On abstrait donc le squelette en ne s'intéressant plus désormais qu'aux positions et orientations relatives des différents repères, chacun représentant la position et l'orientation d'un segment dans l'espace réel. La figure 4.6 illustre cette modélisation. Assimilant le repère d'un segment au segment lui-même, on parlera désormais indifféremment d'un segment et du repère qui lui correspond.

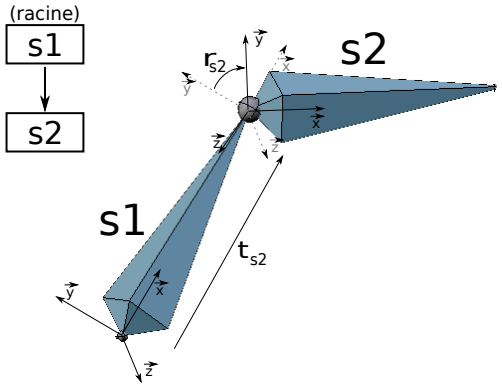


FIG. 4.6 – Segments et repères

Pour chaque repère b autre que $root$, on donne :

– l'origine par des coordonnées dans le repère du segment parent, c'est-à-dire, dans $parent(b)$, la translation t_b à appliquer à l'origine pour obtenir celle de b ;
– l'orientation par la rotation r_b à appliquer au repère parent pour que les deux repères b et $r_b(parent(b))$ aient la même base vectorielle[1].

Enfin, on munit l'espace d'un repère orthonormé que l'on considère comme repère parent de *root* pour définir t_{root} et r_{root} comme ci-dessus.

Ainsi, la donnée d'une arborescence de segments et, pour chacun, d'une translation et d'une rotation exprimées toutes deux dans le repère du segment parent définit un squelette complet, à la fois sa structure et sa posture en termes d'articulations.

Pour l'animation d'un squelette, on remarque que seules les valeurs de rotation ci-dessus sont amenées à changer — et éventuellement t_{root}(déplacement). En effet, à moins de permettre une homothétie globale du squelette (croissance) ou des variations dans les translations données (écartèlement), l'origine de chaque segment ne varie pas dans le repère de son parent. C'est d'ailleurs un des intérêts de rapporter les données d'un segment au repère parent et non à celui de l'espace. Dans le repère de l'espace, la position des segments animés est bien entendu amenée à changer constamment. La position globale $T(b)$, donnée par le vecteur à l'origine dans le repère de l'espace, d'un segment b est donnée par la formule récursive :

$$\begin{cases} T(root) = t_{root} \\ \forall b \in S, b \neq root : T(b) = T(parent(b)) \circ r_{parent(b)} \circ t_b \end{cases}$$

En extension, pour le segment b_n, cette formule devient :

$$t_{root} \circ r_{root} \circ t_{b_1} \circ \ldots \circ r_{b_{n-2}} \circ t_{b_{n-1}} \circ r_{b_{n-1}} \circ t_{b_n}$$

où pour tout i, b_i est le parent de b_{i+1} et *root* le parent de b_1. On compose alternativement une translation avec une rotation, ces transformations étant appliquées à des vecteurs. Le vecteur résultat donne la position de l'origine de b_n dans l'espace.

Ainsi, à part éventuellement t_{root}, les valeurs t_i pour $i \in S$ sont fixes et la donnée des r_i fixe l'articulation de tous les segments du squelette.

Définition On appelle *posture articulatoire* l'association à chaque segment d'une valeur de rotation autour de son origine, exprimée dans la base du repère de son parent. Une posture articulatoire s'exprime sous la forme d'un ensemble $\{(b, r_b), b \in S\}$.

[1] Rappel : un repère est formée d'une base vectorielle et d'une origine.

De même que pour la fonction T définie plus haut sur S, on obtient, en composant seulement les rotations successives autour des origines, l'orientation globale $R(b)$ d'un segment b exprimée dans le repère de l'espace :

$$\begin{cases} R(root) = r_{root} \\ \forall b \in S, b \neq root : R(b) = R(parent(b)) \circ r_b \end{cases}$$

Récursivement, on élargit aussi la relation de parenté par la relation de contrôle définie ci-après.

Définition Soient b_1 et b_2 des segments de S. On a $b_1 \lhd b_2$ si et seulement si $b_1 = b_2$ ou $b_1 \lhd parent(b_2)$. On dit alors que « b_1 contrôle b_2 ».

Intuitivement, on comprend que si un segment en contrôle un autre, on a que tout changement d'orientation du premier implique un changement d'orientation globale du second. Typiquement, sur le bras à trois segments de la figure 4.7 dont la racine est *s1*, changer la valeur de r_{s2} (l'orientation locale de *s2*) ne fera pas changer l'orientation globale (dans le repère de l'espace) de *s1* (i.e. la valeur $R(s1)$), mais fera bien changer celle de *s3*. Le segment *s2* contrôle *s3*, mais pas *s1*. La

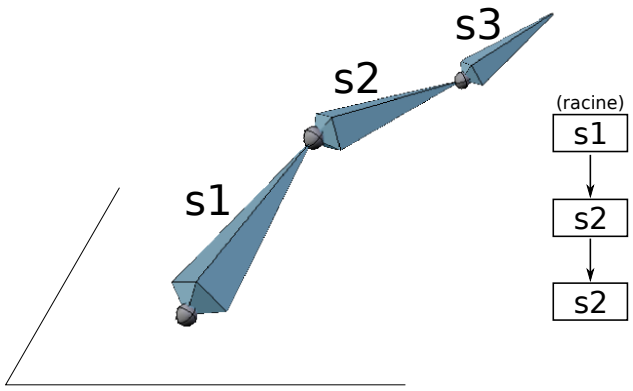


FIG. 4.7 – Squelette en forme de chaîne à trois segments

relation de contrôle est un ordre total sur S.

Remarque Le segment *root* contrôle tous les segments du squelette.

Nous terminons cette section en signalant qu'éventuellement, un certain nombre de contraintes peuvent être placées sur les degrés de liberté du squelette[2] pour refléter des contraintes morphologiques. Par exemple, le coude se bloquant dans l'alignement de la partie supérieure du bras, on peut envisager une limitation de ce degré de liberté à un intervalle d'amplitude π.

[2]Degré de liberté = articulation autour d'un axe de rotation.

4.2.1.2 Objets liés

Jusqu'ici, le squelette a été présenté comme un ensemble de repères géométriques sans matière s'apparentant au mieux à un ensemble complexe de bras articulés comme en robotique. Mais bien entendu, l'objet à animer ne se réduit pas à une telle ossature virtuelle. Il convient en fait d'imaginer celle-ci incarnée dans la peau de l'entité à animer, autrement dit habillée d'une couche plus ou moins épaisse représentant le corps du personnage modélisé ou sa carcasse si c'est un objet. S'il s'agit bien du squelette que nous animerons, l'utilisateur final d'un programme de visualisation voudra voir apparaître cette peau[3] et non les segments du squelette utilisés pour l'animer. En figure 4.8, nous illustrons un squelette d'humanoïde vierge, recouvert de la surface de sa peau, texturée pour donner l'illusion d'une personne.

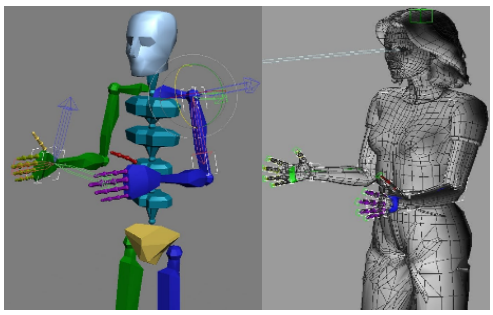


FIG. 4.8 – Construction de la peau d'un squelette humanoïde

Remarquons alors que les points de la surface de l'objet, visibles au final et accessibles au contact — comme les sites corporels de la section 4.1.1 pour un humanoïde — ne se retrouvent pas à partir des simples données du squelette. Pour désigner le milieu de la paume de la main, il faut une donnée supplémentaire qui dépend de l'épaisseur de la peau donnée au squelette autour de la main. De même, les points possibles de contact avec le visage dépendent de son contour, qui n'est pas déductible du simple segment représentant la tête. Notons que ces points sont tous rattachés à un segment, en cela qu'il existe un unique segment dans le repère duquel le point considéré ne change pas de position quelle que soit la posture articulatoire du squelette[4]. On dit que ce point est **lié au segment** en question. Par exemple, le site corporel que désigne le milieu de la paume d'un humanoïde est lié à l'os de la main.

On généralise cette notion de lien avec les segments à tout objet géométrique fixe dans un repère donné :

[3]Nous appelons « peau » tout ce qui recouvre le squelette et qui en suit les articulations pour finalement être visualisé. Elle désigne en réalité la surface de l'objet tridimensionnel animé, par exemple un humanoïde et généralement dans ce cas couvert d'une texture représentant des vêtements et de la peau aux mains et au visage.

[4]On néglige ici l'éventuelle élasticité de la peau.

Définition Un objet géométrique (point, vecteur, etc.) est dit *lié* au segment b si, exprimé dans le repère de b, il reste fixe dans ce repère quelle que soit la posture articulatoire du squelette.

4.2.2 Notre squelette

Pour des raisons évidentes en vue d'une représentation de la langue des signes, le squelette qu'utilise le modèle reprend en partie le squelette humain. En réalité, il modélise la partie supérieure au bassin — la partie inférieure n'est pas pertinente linguistiquement — avec néanmoins un certain nombre de simplifications, ainsi que quelques ajouts.

Les simplifications concernent le nombre d'os pris en compte. Le squelette humain est extrêmement complexe et nos animations n'ont guère besoin de ce niveau de complexité dans la structure du squelette virtuel utilisé. Par exemple, les deux paires radius-cubitus des avant-bras n'ont pas besoin d'être modélisées telles quelles. Au niveau visible, une seule partie du corps est articulée et un segment pour chaque avant-bras est suffisant. De même :

- aucun des os carpiens (situés au niveau du poignet) ne peut être articulé seul, aussi ceux-ci sont-ils écartés de notre modélisation ;
- les quatre derniers os métacarpiens (formant la paume, entre le poignet et la base des doigts de l'index à l'auriculaire) peuvent s'articuler avec l'avant-bras mais d'un bloc uniquement, aussi ce groupe est-il considéré comme un unique segment ayant comme parent l'avant-bras ;
- les vertèbres du dos sont également bien plus nombreuses qu'on ne peut les articuler, aussi proposons-nous de réduire leur nombre à seulement trois[5].

À ce squelette simplifié, nous procédons par ailleurs à l'ajout d'éléments corporels non osseux mais pouvant effectuer des mouvements, que nous considérons comme des segments du squelette afin de pouvoir les spécifier de manière identique au reste du squelette. Il s'agit des points mobiles du visage et nous attirons l'attention sur le caractère encore provisoire de la méthode et des points choisis. Il s'agit d'une approximation, comptant notamment sur les travaux en cours de Chételat-Pelé [Chételat 08] qui s'intéressent à la formalisation des gestes non manuels. En effet, si les yeux ont bien un mouvement de rotation autour d'un point fixe dans le repère de la tête, il n'en est sans doute pas de même pour les sourcils ou le nez, même si une telle approximation peut s'avérer suffisante vu les faibles déplacements en question. La figure 4.10 montre l'arbre des segments que nous utilisons, représentés en partie sur la figure 4.9. Les segments prévisionnels présentés dans ce paragraphe n'apparaissent pas sur ces figures.

[5] Ce compromis acceptable de souplesse et de simplicité nous a été donné par un infographiste sourd spécialiste en animation de signeurs virtuels.

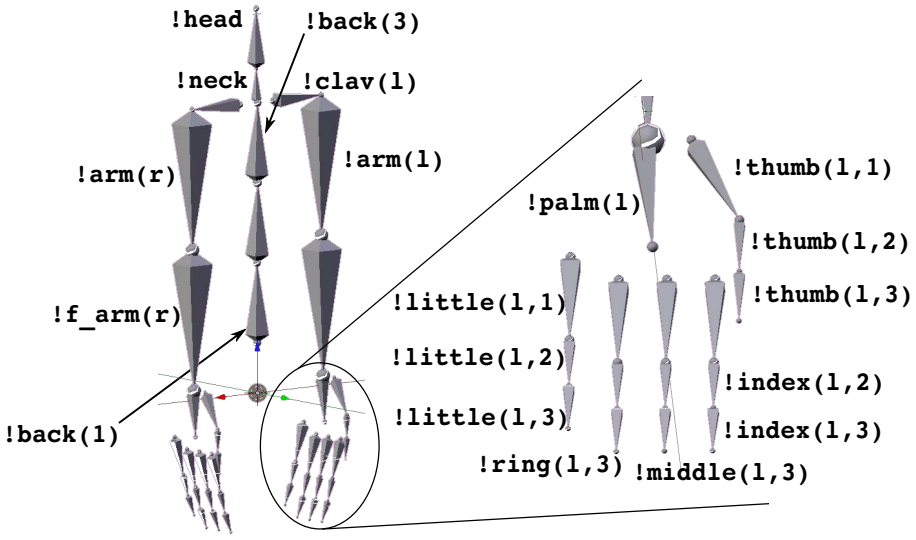


FIG. 4.9 – Squelette et quelques noms de segments

Note Sur la figure et partout dans la suite, les notations de la forme `!...` dénotent un segment du squelette, dont le nom suit le caractère « ! ». Ils peuvent être paramétrés par un côté et/ou un entier comme le montre le dessin.

Un coté se note `l`, `r`, `s` ou `w`. Les valeurs `l` et `r`, utilisées sur la figure 4.9, désignent respectivement le côté gauche (*left*) et le côté droit (*right*) ; `s` et `w` sont respectivement le côté dominant (*strong side*) et le côté dominé (*weak side*). Ceci permet de désigner un côté relativement à la latéralisation en cours du squelette ou de manière absolue, selon ce qui est linguistiquement pertinent à tout moment.

Nous donnons également une place dans la définition de chaque segment à la donnée d'un certain nombre de points liés (voir définition page 81), à savoir des sites corporels (points à la surface de la peau) avec lesquels un contact peut être linguistiquement pertinent. Chacun est nommé de manière unique pour spécifications ultérieures. Des exemples sont donnés dans le tableau 4.1 page 85. Les noms choisis, e.g. `@ST` pour « sternum » qui désigne un point du thorax au niveau de la poitrine, reposent sur les choix de Liddell et Johnson, mais ne sont ici qu'indicatifs. En outre leur inventaire peut dépendre de la langue des signes décrite. À l'instar des sites corporels nommés, les segments peuvent éventuellement être paramétrés.

Note Dans le tableau et partout dans le texte, les notations de la forme `@...` dénotent un site corporel nommé, dont le nom suit le caractère « @ ».

De même, en vue des spécifications que nous décrivons en section 4.3.1, nous définissons pour chaque segment deux vecteurs liés :

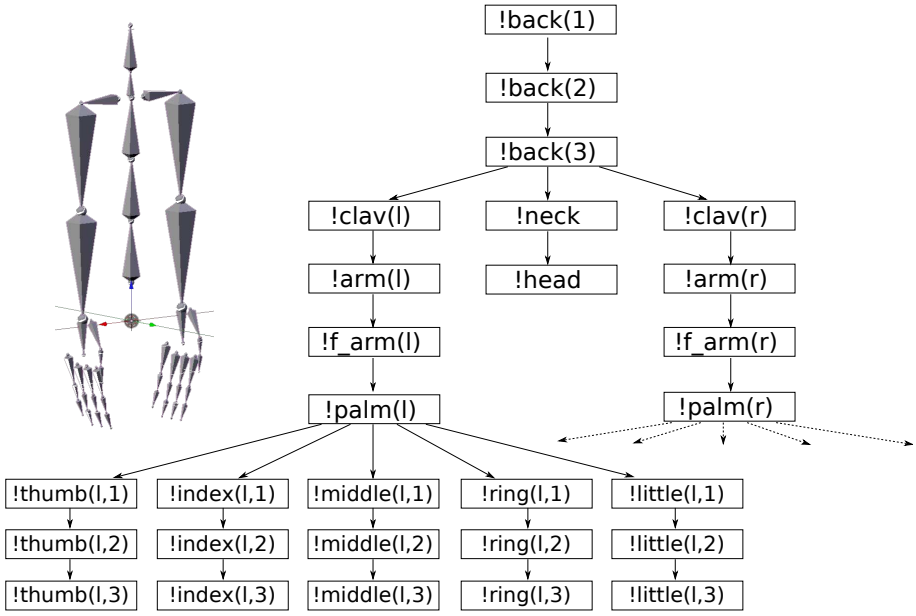


FIG. 4.10 – Arborescence des segments du squelette du modèle

– son *axe directeur*, qui matérialise le mieux la direction et le sens de l'os depuis son origine ;
– son *axe normal*, choisi parmi les vecteurs orthogonaux à l'axe directeur pour définir, en tant que vecteur normal, le plan de l'os.

Pour donner une homogénéité et une plus grande simplicité au modèle, nous fixons le repère de chaque segment de telle sorte que ces deux vecteurs coïncident avec deux des axes de son repère :

– l'axe $\vec{X}$ des abscisses est l'axe directeur[6] ;
– l'axe $\vec{Y}$ des ordonnées est l'axe normal.

En général, le choix de l'axe directeur est trivial. Le seul cas un peu particulier est celui de la main, dont on a dit qu'elle était représentée par un unique os plat, ce qui remet en question son « élongation ». On choisit néanmoins logiquement comme axe directeur celui partant du poignet vers la base des doigts, dans l'alignement de l'avant-bras en position de repos. Le choix des axes normaux pour notre squelette est expliqué dans le tableau 4.1. On y trouve aussi le nom de quelques sites corporels liés à chaque segment, notamment ceux utilisés dans la suite de cette présentation. La définition complète (valeurs r_i, t_i...) du squelette est donnée au format BVH en annexe B.

Ceci définit le squelette avec lequel nous travaillons dans la suite. Intéressons-nous à présent au modèle et son langage, pour spécifier l'articulation de ce squelette dans l'espace.

[6] Pour illustrer, la figure 4.6 page 78 suit cette convention sur les segments représentés.

Segment	Axe normal ($\vec{Y}$)	Sites corporels liés
`!back(1)`	vers l'avant	`@AB` : abdomen
`!back(2)`	vers l'avant	
`!back(3)`	vers l'avant	`@ST` : sternum
`!neck`	vers l'avant	
`!head`	vers l'avant	`@FH` : centre du front `@FH(l/r)` : côté gauche/droit du front
`!clav(l/r)`	vers le bas	`@SH(l/r)` : épaule
`!arm(l/r)`	vers le corps	
`!f_arm(l/r)`	vers le corps	`@EL(l/r)` : extérieur du coude
`!palm(l/r)`	vers le corps	`@PA(l/r)` : point central de la paume
`!thumb(l/r,1)`	idem `!palm`	`@T_KN(l/r,1)` : artic. 1re phalange du pouce
`!thumb(l/r,2)`	idem `!palm`	
`!thumb(l/r,3)`	idem `!palm`	`@T_TIP(l/r)` : extrémité du pouce `@T_PAD(l/r)` : pulpe du pouce
`!index(l/r,1)`	idem `!palm`	`@I_KN(l/r,1)` : artic. 1re phalange de l'index
...	...	...

TAB. 4.1 – Choix des axes normaux des segments, squelette au repos, et quelques sites corporels liés

4.3 Spécification des unités temporelles

La séquence temporelle telle qu'établie en début de ce chapitre balise l'évolution du signe dans le temps mais ne précise rien quant à la signation à proprement parler. Le but de la section est d'expliquer la manière dont on spécifie les mouvements du squelette dans l'espace suivant ce découpage temporel.

Nous y traitons de primitives articulatoires, de modes de spécification et de différents types d'option pour la description des unités temporelles. Cette section introduit également les premiers éléments du langage de description du modèle dont la référence complète est donnée en annexe D.1.

4.3.1 Primitives articulatoires aux postures-clés

Intéressons-nous d'abord aux postures-clés. Une posture-clé donne lieu à une posture articulatoire, mais ne la spécifie pas de façon nécessairement exhaustive. Une spécification complète de posture articulatoire définirait une rotation pour chaque articulation (voir définition page 79), ce qui n'est pas le cas habituel. La plupart du temps, ceci constitue une sur-spécification du signe [3.3.2], ce que le modèle permet d'éviter.

Pour spécifier une posture-clé, on dispose de trois *primitives articulatoires* [3.3.4] :

1. une primitive de positionnement de site corporel ;
2. une primitive d'orientation directrice ;

3. une primitive d'orientation normale (dans un plan).

Une primitive établit une contrainte articulatoire pour la posture-clé. Par la conjonction de plusieurs de ces contraintes, on forme un ensemble de contraintes nécessaires et suffisantes pour spécifier la posture-clé complète. Chaque primitive est maintenant expliquée dans une sous-partie dédiée.

4.3.1.1 Positionnement d'un site corporel

Cette primitive articulatoire permet le positionnement d'un site corporel en un point de l'espace. Soient :

- `@P` un site corporel ;
- K un point de l'espace.

Dans la description d'une posture-clé, on peut poser que :

> Pour que la posture-clé soit considérée atteinte, le squelette doit prendre une posture articulatoire telle que le site `@P` coïncide avec K.

Dans le langage défini en D.1, on écrit :

`Place @P at` K

où K peut être exprimé de n'importe quelle manière offerte par la section 4.1.1, traitant de la représentation de l'espace de signation.

Supposons `@P` lié[7] au segment b. Cette contrainte dite de *positionnement* n'avance rien quant aux articulations locales du squelette, ni r_b ni aucune autre rotation en particulier. À la signation, tout segment ou ensemble de segments contrôlant b peut être mis à contribution ; il ne s'agit pas d'une contrainte sur un segment en particulier. Le squelette doit seulement, dans son ensemble, contribuer à ce que `@P` atteigne K. Ceci est un problème de cinématique inverse[8] que nous nous gardons de développer ici mais dont nous faisons une présentation en annexe C. On peut dire que les segments ne contrôlant pas b ne contribuent en rien à satisfaire la contrainte car leur articulation ne déplacera pas le point `@P`, lié à b, dans le repère de l'espace. Ceci ne signifie pas qu'ils ne doivent pas être touchés ; leurs articulations sont libres car non visées par la contrainte.

Une contrainte de positionnement de site corporel est représentée graphiquement sur la figure 4.11.

[7] Une définition d'objet lié se trouve en 4.2.1.2 page 81.

[8] En animation de squelette, donner une valeur de rotation à chaque segment pour en définir la posture articulatoire est la méthode appelée *cinématique directe*. On peut, une fois la posture donnée, déterminer la position dans l'espace de n'importe quel point lié du corps. Inversement, la donnée de la position globale de points du corps pour définir la posture articulatoire désirée constitue un problème de *cinématique inverse*. Il s'agit alors de déterminer les rotations à appliquer aux segments pour atteindre les points cibles donnés. Voir aussi l'annexe C.

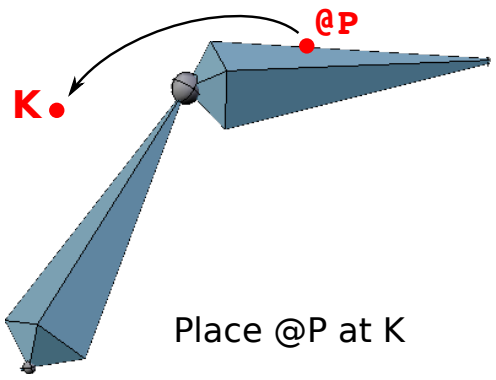


FIG. 4.11 – Primitive de positionnement

Exemples de positionnement de site

Voici quelques exemples de signes comportant un positionnements de sites corporels, accompagnés de l'expression de leurs contraintes respectives.

[ENCORE] [ARBRE] [NUMÉRO]

FIG. 4.12 – Contraintes de positionnement, exemples

– [ENCORE]

Aux moments de contact, l'extrémité des doigts de la main dominante doivent être mis en contact avec la paume de la main opposée. Dans ce cas, il n'est pas possible de considérer que c'est la main dominée qui vient placer sa paume en contact avec les doigts de la main dominante car la main dominée reste le plus souvent fixe et la main dominante effectue le mouvement de positionnement. La contrainte est la suivante :

```
Place @M_TIP(s) at @PA(w)
```

`M_TIP` (*middle finger*, *tip*) désigne l'extrémité du majeur ; `PA` (*palm*) désigne le centre de la paume[9].

– [ARBRE]

La main dominée est placée dans l'espace, mettons en K pour l'instant, et le coude du côté dominant repose sur la main dominée. Entre autres spécifications, on trouvera donc les

[9] Voir tableau 4.1 page 85.

contraintes de positionnement suivantes (`EL`, pour *elbow*, désigne le sommet du coude) :

`Place @PA(w) at` K

`Place @EL(s) at @PA(w)`

Les deux points restant fixes, on peut considérer au contraire que c'est la main dominée qui vient se placer sous le coude, placé lui en K.

`Place @EL(s) at` K

`Place @PA(w) at @EL(s)`

Ces deux descriptions donnent le même résultat, mais ne rendent pas compte de la même démarche de construction, donc ne donnent pas lieu à la même reconstruction de la part d'un utilisateur de la description [3.3.7].

– [NUMÉRO]
Une seule possibilité cette fois pour décrire le contact : porter l'index à l'épaule (le point `SH`, pour *shoulder*) et non l'inverse.

`Place @I_PAD(s) at @SH(s)`

4.3.1.2 Orientation directrice

La deuxième primitive articulatoire permet d'orienter un segment selon une direction donnée par un vecteur. Soient :

– `!b` un segment du squelette ;
– $\vec{v}$ un vecteur de l'espace.

Dans la description d'une posture-clé, on peut maintenant poser que :

> Pour que la posture-clé soit considérée atteinte, le squelette doit prendre une posture articulatoire telle que $\vec{v}$ et l'axe directeur (cf. 4.2.2) du segment `!b` soient colinéaires et de même direction.

Cette contrainte se formule comme suit :

`Orient DIR !b along` $\vec{v}$

Le vecteur $\vec{v}$ peut être exprimé de n'importe quelle manière donnée en 4.1.1. De même que les contraintes de positionnement, cette contrainte dite d'*orientation directrice* est globale et ne cible pas la rotation r_b en particulier. Ceci dit, elle concerne particulièrement les segments contrôlant `!b`, les autres n'ayant pas d'incidence sur $R(b)$.

La figure 4.13 illustre une contrainte d'orientation directrice dans le cas général.

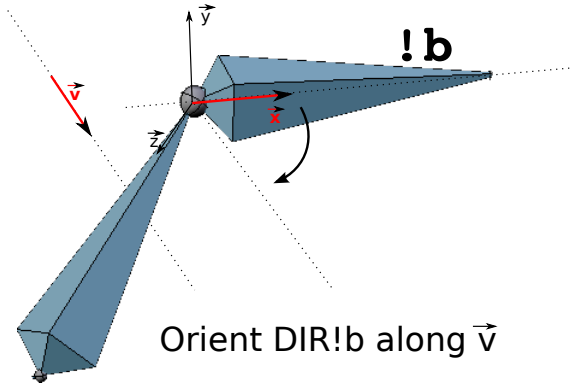


FIG. 4.13 – Primitive d'orientation directrice

Exemples d'orientation directrice

– Redressement de la tête

Pour indiquer que la tête doit être redressée, son axe directeur doit être dirigé vers le haut, c'est-à-dire selon le vecteur `UP`. La contrainte est :

```
Orient DIR !head along UP
```

– Pointage de l'index

Le pointage avec l'index est sans doute le plus typique des cas d'orientation directrice. Pour pointer vers l'avant, il faut aligner le vecteur directeur du bout de l'index de la main dominante (`!index(s,3)`) avec le vecteur `FWD`, vecteur unitaire dirigé vers l'avant (*forward* en anglais). On pourrait choisir de contraindre plus fortement l'index, à savoir aligne les trois phalanges (`!index(s,1)`, `!index(s,2)`, `!index(s,3)`) le long de ce même vecteur.

```
Orient DIR !index(s,3) along FWD
```

Si on s'en tient aux orientations directrices, on remarque que la main (le plan de la paume) peut prendre n'importe quelle orientation autour de l'axe directeur spécifié. La position la plus naturelle sera en principe utilisée, et si on impose de tourner la paume vers le bas ou vers le haut, cela dénote une intention particulière.

4.3.1.3 Orientation dans un plan

La dernière primitive articulatoire sert également à orienter un segment, mais cette fois de manière orthogonale (et non colinéaire) à une direction donnée. Elle installe l'axe directeur d'un segment donné dans le plan défini par un vecteur normal. Soient :

– `!b` un segment du squelette ;

– $\vec{n}$ un vecteur de l'espace.

Dans la description d'une posture-clé, on peut maintenant poser que :

> Pour que la posture-clé soit considérée atteinte, le squelette doit prendre une posture articulatoire telle que $\vec{n}$ et l'axe normal (cf. 4.2.2) choisi pour `!b` soient colinéaires et de même direction.

Cette contrainte, dite d'*orientation de plan*, s'écrit comme suit :

> `Orient NRM !b along` $\vec{n}$

Le vecteur $\vec{n}$ peut là encore être exprimé de n'importe quelle manière, et aucun segment n'est ciblé en particulier.

Remarque La conjonction d'une contrainte d'orientation de direction sur un segment `!b` et d'une contrainte d'orientation de plan appliquée au même segment `!b` spécifie complètement $R(b)$, l'orientation globale de `!b` dans l'espace. Dans ce cas, les vecteurs utilisés devront être normaux.

La figure 4.14 représente graphiquement ce type de contrainte articulatoire primitive.

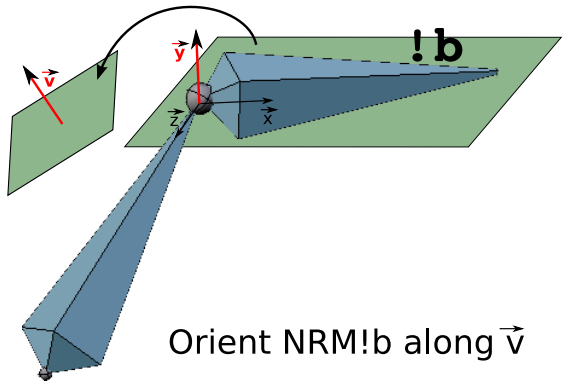


FIG. 4.14 – Primitive d'orientation normale

Exemples d'orientation de plan

– [QUOI ?]

Dans ce signe, on doit placer les mains dans un plan horizontal, paumes tournées vers le haut (vecteur `UP`). Cette contrainte simple, par exemple pour la main droite (côté `r`), s'écrit :

```
Orient NRM !palm(r) along UP
```

– [BALLON]

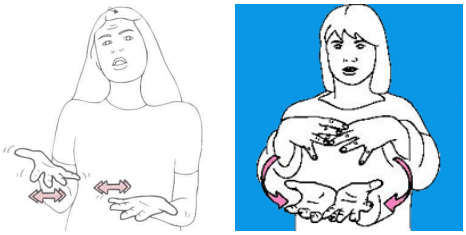
À la première posture-clé au départ du signe[10], chacune des mains est orientée de telle sorte que l'intérieur de la paume (le site `@PA` de cette main) soit dirigé vers le centre que nous

[10] Nous verrons d'ailleurs que cette propriété est vraie tout au long du signe.

notons C pour l'instant. Dans l'expression suivante, l'axe normal de la main dominante est dirigé selon le vecteur défini par ces deux points :

`Orient NRM !palm(s) along <@PA(s),` C`>`

Note L'expression <A, B> dénote le vecteur $\overrightarrow{AB}$ de l'espace.



[QUOI ?] [BALLON]

FIG. 4.15 – Contraintes d'orientation de plan, exemples

4.3.2 Transitions et contraintes maintenues

Dans la section précédente, nous avons vu comment formuler une contrainte articulatoire élémentaire pour une posture-clé, soit sur un segment à orienter, soit sur un site corporel à un segment pour le positionner. Mises ensemble, plusieurs de ces primitives définissent une posture-clé isolée. Dans cette nouvelle section, nous replaçons ces spécifications dans leur contexte descriptif : une séquence d'unités temporelles de description telle qu'indiquée en 4.1.2 et illustrée fig. 4.2.

Rappelons à ce propos que chaque unité temporelle d'une description, qu'il s'agisse d'une transition ou d'une posture-clé, correspond à une motivation globale du signeur [3.3.6]. En d'autres termes, on pose :

- l'**indivisibilité des unités dans le temps**, c'est-à-dire que le comportement décrit vise l'unité sur toute sa durée ;
- l'**indivisibilité du squelette dans la séquence temporelle**, à savoir que l'ensemble des contraintes établies par la description d'une unité concerne le corps dans son ensemble.

Les postures-clés sont par définition statiques, qu'elles aient une durée ou non. Le cas échéant, une fois la posture atteinte, celle-ci n'a qu'à être maintenue[11]. Les transitions au contraire sont dynamiques. C'est pendant les transitions que les variations ont lieu. Lorsqu'une posture-clé s'est écoulée, le signeur passe à la transition, c'est-à-dire une période utilisée pour se placer dans la posture-clé suivante. Si l'on ne spécifie rien quant à cette transition, la seule chose utile à l'esprit du signeur est alors la posture à atteindre et il choisira en principe la manière la plus économique

[11] Les options faibles, traitées plus tard, sont toutefois une exception.

possible. Nous appelons ce type de transition une **transition neutre**. Par exemple, en discours hors visée iconicisatrice, les transitions entre deux signes standard sont neutres. Les postures articulatoires empruntées entre la posture-clé finale du premier signe et la posture-clé initiale du deuxième sont dénuées d'intention particulière ; les mouvements effectués ne sont pas significatifs.

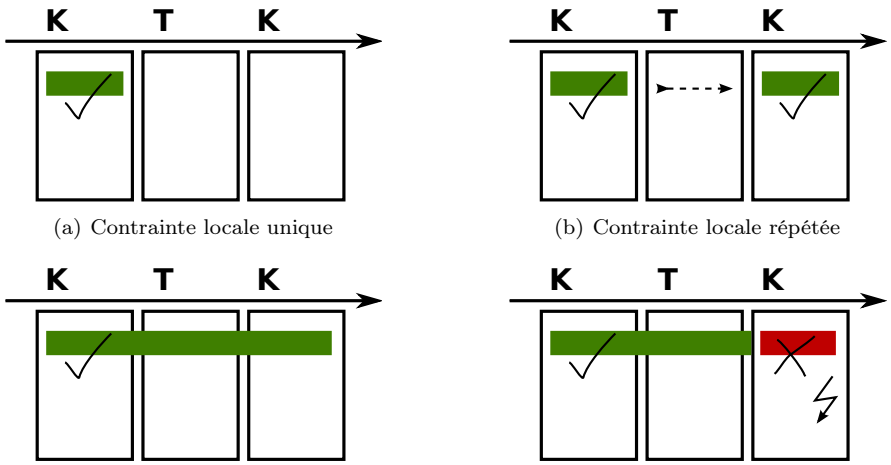
Cependant, toutes les transitions ne sont pas neutres. Souvent, des contraintes doivent également être satisfaites au cours d'une transition. Observons l'exemple [BALLON] déjà rencontré plus haut, et plus particulièrement la commande de contrainte sur l'axe normal de la main donnée en section 4.3.1.3, page précédente. L'exemple est donné en guise de spécification de la posture-clé initiale, mais si l'orientation du plan de la main reste libre en dehors de celle-ci, rien ne l'oblige à changer dans la suite du signe, or une signation de [BALLON] se terminant les mains dans la même orientation qu'en leur départ serait erronée. De même, tourner les paumes vers le même point au départ qu'à l'arrivée en dupliquant la contrainte dans la posture-clé suivante leur garantit bien une orientation correcte de part et d'autre de la transition, mais pas à tout instant de cette transition. En effet, la rotation au poignet amenant la paume de l'orientation initiale vers l'orientation finale n'est pas contrôlée entre les postures-clés ; celle-ci est libre pourvu qu'elle se plie aux contraintes données par les postures-clés. Pourtant, le signe [BALLON] exige que cette contrainte d'orientation reste vérifiée à tout instant, quelle que soit, mettons, la vitesse de déplacement des mains de leur position initiale à leur position finale[12]. On ne peut compter uniquement sur des primitives aux postures-clés pour garantir une orientation convenable durant les trois unités temporelles que comporte ce signe, à savoir les deux postures-clés initiale et finale, séparées par une transition.

Nous appelons une telle transition (du coup, non neutre) une **transition à contrainte maintenue**. Une contrainte maintenue sur une transition est une contrainte qui, en plus d'être nécessaire à la posture-clé où elle apparaît (celle précédent la transition observée), doit le rester à chaque instant de la transition ainsi, finalement, qu'à la posture-clé suivante. Si la motivation première d'une transition à contrainte maintenue reste d'atteindre la posture-clé qui la suit et non de définir les postures articulatoires intermédiaires, les contraintes posées comme « maintenues » restent cette fois actives au cours de la transition, postures-clés incluses. Elles couvrent alors non plus une mais trois unités temporelles complètes. La discontinuité qui consisterait à valider une contrainte tout au long d'une transition mais seulement jusqu'à l'instant précédent la posture-clé suivante sans inclure celle-ci est impossible.

La figure 4.16 illustre la différence entre les portées des contraintes locales et des contraintes maintenues, ainsi que l'impossibilité pour une contrainte maintenue de courir sur deux unités

[12]Le fait que leur trajectoire suive un arc de cercle n'est pas l'objet de cette section ; il est traité en section suivante.

seulement. Il est toutefois possible que la posture-clé suivante ait une durée nulle mais dans ce cas, par indivisibilité du squelette, toutes les contraintes qu'elle spécifie seront affectées par cette durée.



(a) Contrainte locale unique (b) Contrainte locale répétée

(c) Contrainte maintenue (d) Spécification impossible

FIG. 4.16 – Modes de spécification local (*here*) et maintenu (*keep*)

Ainsi, le modèle offre la possibilité à chaque contrainte (donnée sous forme de primitive articulatoire) énoncée en une posture-clé d'être :

- soit *locale*, c'est-à-dire dont la portée ne dépasse pas la posture-clé où elle apparaît ;
- soit *maintenue*, c'est-à-dire valable jusqu'à la posture-clé suivante, incluse.

On parle de deux **modes de spécification** possibles pour les primitives articulatoires aux postures-clés, et selon ce mode, on attribue à chaque spécification :

- l'étiquette « *here* » si elle ne s'applique qu'à la posture-clé qu'elle définit (mode local) ;
- l'étiquette « *keep* » si, en plus de s'appliquer à la posture-clé où elle apparaît, elle reste vraie à tout instant de la transition suivante ainsi qu'à la posture-clé suivant cette transition (mode maintenu).

4.3.3 Options sur les transitions

Dans la section précédente, nous avons présenté une première manière d'influer sur les transitions, en spécifiant des contraintes « débordant » de la posture-clé où elles apparaissent. Les contraintes maintenues dont il a été question sont des propriétés non plus locales à une posture-clé, mais dont la portée est de trois unités dont une transition. Toutefois, il ne s'agit pas de propriétés locales à la transition affectée. Le modèle offre une seconde manière d'influer sur les transitions, et cette fois de façon locale.

Précisons premièrement qu'une transition n'existe qu'entre deux postures-clés, et qu'elle dépend

en grande partie de celles-ci. Un déplacement d'un point à un autre se définit d'abord comme un passage entre deux positions plutôt qu'en termes de trajectoire. Quelques contraintes peuvent néanmoins être appliquées à la transition seule, en plus de celles provenant des postures de départ et d'arrivée et des éventuelles contraintes maintenues. Nous les présentons en deux temps : celles concernant les trajectoires puis celles ayant trait au dynamisme des transitions.

4.3.3.1 Option d'arc

Cette option permet de préciser le chemin pris par un point lié se déplaçant au cours d'une transition [3.2.6.1]. Un tel point se déplace vraisemblablement si le segment auquel il est lié est mis en jeu dans la transition. Pour l'instant, sauf contraintes maintenues, le passage d'une posture-clé à une autre est libre et les points peuvent prendre un chemin quelconque.

Supposons deux postures-clés K_A et K_B séparées par une transition T. Considérons un site corporel P_b, se trouvant au point A de l'espace en K_A et au point B en K_B. La trajectoire prise par P_b de A à B est a priori imprévisible, à moins d'être fixe et définie par une contrainte maintenue en K_A. Avec l'option d'arc, on peut la spécifier et faire que P_b suive l'arc de cercle de A à B contenant l'image du milieu du segment $[AB]$ par la translation de vecteur $\vec{u}$ (appelé le **vecteur d'arc** ou encore le **vecteur de déformation** de P_b), donné. La figure 4.17 en donne une illustration. Le point P_b est dit **suivi** sur T.

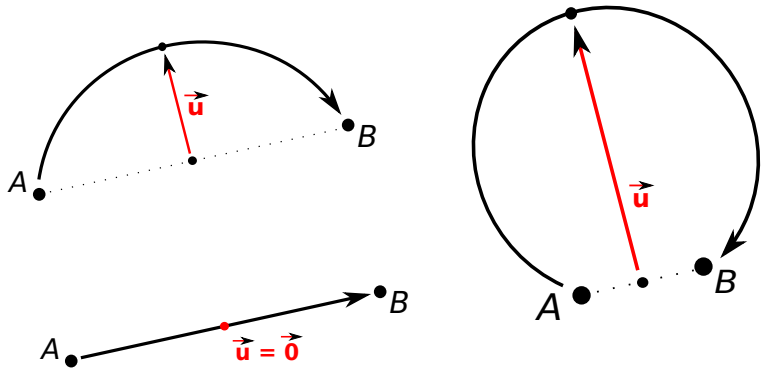


FIG. 4.17 – Vecteurs d'arc sur une trajectoire entre deux points

On note cette contrainte comme suit :

`Arc` P_b `:` $\vec{u}$

La plupart du temps, on veut spécifier des trajectoires semi-circulaires et on pose $\vec{u} \perp (AB)$ et $\|\vec{u}\| = \frac{AB}{2}$. Un cas particulier est celui où $A = B$, et alors $\vec{u}$ non nul donne le point diamétralement opposé d'un cercle complet[13] à parcourir pour P_b. Le cas particulier, différent, où $\vec{u} = \vec{0}$ donne

[13]En réalité, il manque ici la donnée d'un troisième point pour définir le plan dans lequel s'inscrit ce cercle. Le

une trajectoire rectiligne pour P_b : le segment $[AB]$ lui-même, portion d'un cercle de périmètre infini. Nous insistons en revanche sur la différence entre une trajectoire rectiligne et une absence de donnée sur la trajectoire comme dans une transition neutre. La présence d'une option d'arc traduit comme toute contrainte un comportement motivé, pas une indication selon laquelle P_b parcourrait (plus ou moins exactement) un segment de droite. Elle établit clairement une trajectoire rectiligne, de laquelle tout écart est interdit.

Le site corporel suivi sur la transition ne fait pas nécessairement l'objet d'une contrainte de positionnement dans les postures-clés adjacentes. À la signation de la transition, les positions effectives du point en ces postures-clés seront utilisées comme points de départ et d'arrivée, qu'elles aient explicitement été données ou non dans la description. Autrement dit, on ne suit pas forcément sur une transition les points positionnés aux postures-clés qui l'entourent.

Nous terminons cette sous-section par une remarque supplémentaire : on peut trouver plusieurs options d'arc dans une même transition, et plusieurs points seront alors suivis sur cette transition. C'est le cas pour [BALLON], les deux points au centre de chaque paume suivront un arc chacun.

4.3.3.2 Option de dynamisme

En section 4.1.2.2, un premier élément de description relatif à la répartition temporelle des unités a fait son apparition dans le modèle. Il s'agit alors d'indiquer pour chaque unité temporelle de la description sa durée, au moins relative aux autres durées en jeu. Nous avons vu notamment la possibilité de tenir une posture ou au contraire d'en faire un point de passage sans durée.

Les transitions font également l'objet d'une durée. Cependant elles mettent aussi en jeu une variation dans la posture articulatoire du corps, et au sein même de l'unité temporelle ces postures articulatoires peuvent donc être réparties de plusieurs manières pour donner aux mouvements du squelette et à la transition des dynamiques différentes. Ceci dit, nous restons dans le cadre d'indivisibilité du squelette imposé en 4.3.2 page 91, et postulons donc que tous les mouvements subissent la même variation dynamique à chaque instant. Le modèle fait l'hypothèse (intuitive et peut-être simplificatrice pour l'instant) que toute transition possède un facteur d'accélération constant, car trop de variations complexes violerait selon nous le cadre d'indivisibilité des transitions[14].

langage n'étant pas encore tout à fait stable quant à la forme de ces spécifications, nous préconisons l'emploi non pas de deux fois le même point comme départ et arrivée, mais de deux points très proches dans le plan qui convient (voir troisième dessin sur la figure 4.17). Plus qu'une astuce, cette technique concorde avec l'observation selon laquelle les cercles sont souvent incomplets à la signation.

Pour une trajectoire circulaire dans un plan frontal, dans le sens des aiguilles d'une montre, de point de départ M et de diamètre d, on utilisera comme point d'arrivée non pas M de nouveau mais son image par la translation de vecteur $\varepsilon \cdot \vec{g}$, ou ε est un réel positif proche de 0 et $\vec{g}$ un vecteur de direction horizontale et de sens vers la gauche (`LFT` dans le langage de spécification).

[14] Cette hypothèse reste bien entendu à vérifier mais l'invalider ne demandera qu'une révision mineure de cette option de dynamisme.

Pour changer ce facteur global d'accélération, le modèle met à disposition une contrainte supplémentaire pour spécifier le dynamisme d'une transition :

`Accel` *acc*

La valeur de *acc* peut être :

- strictement positive pour un mouvement de plus en plus rapide ;
- nulle pour un effet linéaire (vitesse constante) ;
- strictement négative pour un mouvement décéléré.

Le premier effet de cette spécification sur le squelette est l'accélération que subissent les points suivis sur toute la longueur de leur trajectoire, au sens issu de la cinématique classique du point. Les segments contrôlant ceux auxquels sont liés ces points doivent bien entendu être articulés en fonction, ainsi que le reste des segments comme dit plus haut.

Si aucun point n'est suivi sur la transition, il reste que le facteur d'accélération traduit l'investissement global du corps, posant que $acc = 0$ correspond à un passage naturel et détendu du corps d'une posture-clé à l'autre. Sans notion de trajectoire en particulier dans ce cas, seule la répartition temporelle sur la transition des différentes postures articulatoires intermédiaires est alors concernée.

Dans la suite, on appelle t_{max} la durée de la transition, et on choisit 0 comme date de départ. Chaque point suivi P_b s'il en existe a une trajectoire de longueur d fixée donc on déduit pour P_b une vitesse initiale v_0 et une vitesse finale v_f également fixées. La trajectoire de P_b dont dépend d est le résultat d'un ensemble de spécifications contenant entre autres celles des postures qui entourent la transition et des options d'arc sur celle-ci.

Le modèle décline l'option en deux nouvelles versions, pour peu que le besoin (par exemple en transfert situationnel [2.1.3.2]) soit de décrire l'une de ces vitesses limites pour un des points suivis :

`Accel @P from` v_0

`Accel @P to` v_f

La première assigne au point `@P` la vitesse initiale v_0 et la seconde la vitesse finale v_f. Ceci permet de définir une accélération en se focalisant sur une vitesse initiale comme on le ferait notamment en grande iconicité pour illustrer la vitesse initiale d'un objet (avion, etc.).

Le facteur global d'accélération est ensuite déductible de chacune de ces lignes sachant que *acc*,

v_0 et v_f sont liées par les formules :

$$acc = \frac{2}{t_{max}} \left(\frac{d}{t_{max}} - v_0 \right)$$

$$acc = \frac{2}{t_{max}} \left(v_f - \frac{d}{t_{max}} \right)$$

On remarque que l'accélération est nulle si et seulement si les vitesses initiale et finale du point sont égales à sa vitesse moyenne $\frac{d}{t_{max}}$. Notons également que la spécification d'une vitesse initiale ou finale sur un point non suivi n'a pas de sens.

Note Le facteur d'accélération traduit l'investissement du corps dans la transition ; c'est une valeur globale. Quelle que soit la version choisie, une seule option `Accel` peut être utilisée sur une transition.

Nous avons désormais les outils nécessaires à la spécification de différents mouvements de sites corporels perçus comme accélérés pour un site corporel, mais aussi à celle des mouvements linéaires pour lesquels il suffit de donner une accélération nulle.

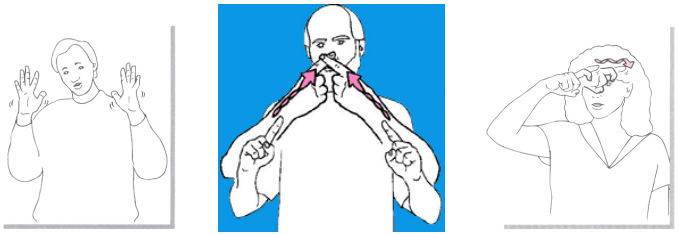
4.3.4 Options « faibles » sur les unités

Nous présentons ici d'autres options que nous appelons *options faibles*. La raison de cette appellation est donnée en 4.4.3 plus loin. Nous en recensons deux : les trills et les options de précédence, qui s'appliquent cette fois aux deux types d'unités temporelles, c'est-à-dire non seulement aux transitions, mais également aux postures-clés.

4.3.4.1 Les trills

Un *trill* sur un segment est une sorte de vibration de celui-ci, produit par une rotation alternative périodique et répétée autour d'un de ses axes. Par exemple dans [BRAVO], les poignets sont agités par une légère rotation des avant-bras autour de leur axe directeur, alors que le signe ne motive qu'une unique posture-clé maintenue. Il ne s'agit pas d'une alternance entre postures-clés et transitions car le nombre de rotations n'est pas déterminé ; rien n'indique même que les deux doivent être synchronisés. Ce caractère non dénombrable des rotations est essentiel pour déterminer un trill. Un trill autour des mêmes axes se trouve dans [GÉOGRAPHIE], cette fois sur la transition et non sur une posture-clé.

Dans [DIFFICILE], les deuxième et troisième phalanges de l'index tendu répètent une légère rotation autour de leur troisième axe (le produit vectoriel de l'axe directeur avec l'axe normal)



[BRAVO] [GÉOGRAPHIE] [DIFFICILE]

FIG. 4.18 – Signes avec trills

pendant la transition entre les deux postures-clés du signe, et le nombre de ces pianotements n'est pas linguistiquement pertinent. Si [DIFFICILE] demandait un nombre précis de rotations, il faudrait alors au moins autant de transitions et de postures-clés pour le décrire.

Un trill est en quelque sorte une « décoration » de l'unité temporelle où il est appliqué. On l'écrit :

– pour des rotations autour de l'axe directeur d'un segment `!b` :

```
Trill DIR !b
```

– pour des rotations autour de son axe normal :

```
Trill NRM !b
```

– pour des rotations autour du troisième axe :

```
Trill DxN !b
```

Les trills de [BRAVO] et de [GÉOGRAPHIE] s'écrivent :

```
Trill DIR !f_arm(l)
Trill DIR !f_arm(r)
```

Ceux de [DIFFICILE] s'écrivent :

```
Trill DxN !index(s,2)
Trill DxN !index(s,3)
```

On trouve des trills dans tous les pianotements, les agitations du poignet, etc. Toute forme non dénombrable de léger mouvement répété est un trill, et peut apparaître sur des transitions ou des postures-clés.

4.3.4.2 Options de précédence

La deuxième option faible que nous proposons sert à spécifier, lorsqu'un certain nombre de segments s'articulent sur une unité, un ordre chronologique de précédence entre ces articulations.

Par exemple, [FAMILLE] comporte d'habitude une fermeture progressive des doigts, commençant par l'auriculaire et terminant par l'index, sur la transition qu'elle contient. Au contraire, la version de [COMBIEN ?] de la figure 4.19 requiert une ouverture dans l'ordre inverse des doigts des deux mains.

[FAMILLE] [COMBIEN ?] [BLEU] [FOURMI]

FIG. 4.19 – Comparaison de précédences

Le modèle considère ces transitions comme si tous les doigts pouvaient s'ouvrir ou se fermer en même temps, c'est-à-dire comme un passage d'une certaine posture-clé à l'autre, avec seulement une contrainte supplémentaire définissant un ordre entre certains segments. Si un segment A « précède » un segment B, les variations sur r_A et r_B doivent être relativement décalées dans le temps de telle sorte que la rotation de A soit perçue comme précédent celle de B à la signation.

On peut en réalité définir une précédence entre groupes de segments, chacun contenant un ensemble de segments s'articulant en même temps. La ligne suivante :

`Precedence` A_1`,` A_2`, ... <` B_1`,` B_2`, ... < ...`

définit une précédence entre les groupes de segments A_i, B_i, etc.

On peut utiliser cette option en combinaison avec une option de trill, sur une posture-clé aussi bien que sur une transition. Notamment, cette combinaison fait la distinction entre un trill comme sur [BLEU], où toutes les premières phalanges tournent en même temps, et celui de [FOURMI], où les doigts pianotent de manière séquentielle (cf. fig. 4.19).

4.4 Dépendances de construction

Cette section traite d'une propriété essentielle au modèle, à savoir qu'il rend apparentes toutes les dépendances de la construction des signes. Nous exposons d'abord ce que nous appelons des *dépendances internes*, puis généralisons la notion aux *dépendances contextuelles*, visant à rendre le signe utilisable en contexte.

4.4.1 Dépendances internes

On remarque que toutes les contraintes présentées font appel à l'expression d'une valeur typée : un vecteur pour les primitives `Orient` et `Arc`, un point pour `Place`, une valeur numérique pour `Accel`... Chacune de ces valeurs peut être donnée sous forme constante comme :

- `0` ou `1.53` pour une valeur numérique ;
- `UP` ou `FWD` pour un vecteur, qui désignent respectivement les vecteurs unitaires vers le haut et l'avant...

Mais ce n'est pas tout. À la manière d'une formule mathématique, ces valeurs peuvent être données en fonction d'autres valeurs grâce à différents opérateurs pouvant constituer des formules arbitrairement complexes dont on trouvera une grammaire annexe D.1.2.3, ainsi qu'une section sur le typage en D.2. Nous avons vu des exemples où les points étaient donnés par des références à des sites corporels comme `@PA(s)`. Aussi, un point pourra être défini comme l'image d'un point K par la translation de vecteur $\vec{v}$ grâce à l'expression :

K `+` $\vec{v}$

Par exemple, on peut placer l'extrémité de l'index de la main gauche (côté `l`) en un point au-dessus du milieu de la paume de la main droite (côté `r`) en écrivant :

```
Place @I_TIP(l) at @PA(r) + UP
```

De cette manière, on voit apparaître une dépendance dite **interne** de `@I_TIP(l)` sur `@PA(r)`, ce dernier faisant partie de l'expression contraignant le premier. Si ceci paraît naturel notamment au programmeur, nous insistons sur l'intérêt linguistique de formuler l'expression de telle sorte que la description du signe rende compte de cette construction [3.3.7.1].

4.4.2 Dépendances contextuelles

Tout objet d'une description peut non seulement dépendre d'éléments du squelette ou de données internes présentes dans les expressions qu'elle contient (dépendances internes), mais aussi reposer sur des éléments émanant du contexte au moment de la signation [3.3.8]. Typiquement, un signe de pointage de l'index dépend de la position de ce que l'on veut montrer dans l'espace de signation, et cette donnée ne peut exister au niveau de la description car elle n'existe qu'en discours. À l'instar de cette description verbale, le modèle permet de faire référence à un objet dont la valeur effective n'est disponible qu'en contexte. Un tel objet se déclare par un identificateur dont on précise le type :

nom `:` *type*

Il s'utilise ensuite partout où nécessaire comme objet du type indiqué, en écrivant son nom entre crochets :

`[`*nom*`]`

Si on appelle `cible` le point visé par le pointage, on en fait la déclaration préliminaire suivante :

```
cible : Point
```

On pourra utiliser ce point dans la construction du signe en écrivant :

```
[cible]
```

Notamment, on aura la contrainte suivante (cf. exemple page 89) :

```
Orient DIR !index(r,3) along <ORIG !index(r,3), [cible]>
```

Note L'expression `ORIG !b` désigne le point fixe de l'articulation de `!b`, c'est-à-dire l'origine de son repère associé. Attention, ce point n'est pas un site corporel. Il n'est même pas accessible comme cible d'un positionnement puisqu'il se trouve « sous » la peau. Il n'a qu'un sens géométrique.

En termes de dépendances, on remarque celle du segment `!index(r,3)` à gauche, visé par la contrainte, et :

- l'origine du repère de ce même segment ;
- le point `[cible]`.

Ceci veut logiquement dire que l'axe directeur du segment visé dépend respectivement de sa position et du point à désigner. La première dépendance est une dépendance interne (cf. 4.4.1), mais la seconde repose sur un élément contextuel. On parle alors de **dépendance contextuelle**.

Plus précisément dans le cas du pointage, on ne peut vraiment donner de valeur à `[cible]` sans qu'il y ait de contexte du tout. Aucune valeur ne serait plus pertinente qu'une autre et il est nécessaire de puiser l'information dans le contexte pour pouvoir le signer. Sans rien à désigner, un tel signe déictique n'a ni intérêt ni sens ! Pour cette raison, on appelle `cible` un **argument** de la description. Les arguments sont des dépendances contextuelles particulières, en cela que leur valeur effective en contexte doit être déterminée, sans quoi le signe ne peut être produit.

D'autres signes, en revanche, possèdent des dépendances contextuelles facultatives au sens où, à défaut de contexte, une valeur leur est donnée pour produire le signe « hors contexte ». On trouve de nombreux exemples parmi les signes iconiques de la forme d'un objet et dont la taille peut varier. En TTF (voir 2.1.3.2), le signe [IMMEUBLE] présenté en fig. 4.20 peut selon le contexte varier en surface au sol (écartement des mains) en hauteur (position verticale d'arrivée des mains

relative à celle de départ), et pourquoi pas dans son sens d'élévation (direction du déplacement des mains). Aussi, il est localisable n'importe où dans l'espace de signation. Ceci dit, le contexte impose rarement une valeur à chacune de ces quatre dépendances contextuelles. Hors de tout contexte notamment, on peut signer [IMMEUBLE] car il existe pour chaque dépendance une valeur type. Par exemple, la direction de l'élévation — appelons-la `elev` — est a priori verticale, à moins d'un contexte particulier comme celui de la tour de Pise pour lequel on utilisera la même description mais en précisant la valeur de `elev`.

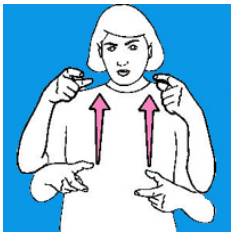


FIG. 4.20 – [IMMEUBLE]

Ce type de dépendance contextuelle dont la valeur peut ne pas être imposée par le contexte au moment de la signation est appelé **influence contextuelle**. Dans une description, on fait référence aux influences contextuelles de la même manière qu'aux arguments, à savoir en plaçant leur nom entre crochets, mais leur déclaration diffère. Au lieu de donner le type de l'objet, on en donne la valeur à utiliser (et éventuellement son type, mais celui-ci reste déductible de l'expression donnée) à défaut d'être imposée par le contexte, comme suit :

nom `=` *expression*

Pour l'exemple de `elev` dans [IMMEUBLE] on déclare :

```
elev = UP
```

Puis, toute référence à cette direction, a priori verticale mais altérable par l'influence du contexte, s'écrira :

```
[elev]
```

4.4.3 Options faibles et dépendances

Nous revenons dans cette section sur une propriété importante des options faibles présentées en 4.3.4, à l'origine de cette appellation.

Les options faibles sont en réalité celles dont les effets sont secondaires, et ignorés lors des références aux axes ou aux points qui en dépendent. Par exemple dans [DIFFICILE], la direction des

axe directeurs de `!index(s,2)` et de `!index(s,3)` est a priori celle de `!index(s,1)` car le doigt est tendu vers le côté `w`. Tout au long de la transition, les références au vecteur `DIR !index(s,2)` dans les expressions gardent une valeur constante car le modèle considère les unités sans trill pour évaluer les expressions géométriques, et l'orientation directrice des segments de l'index ne varie pas au cours de la transition de `@FH(s)` vers `@FH(w)` dans [DIFFICILE]. L'effet du trill que subissent `!index(s,2)` et `!index(s,3)` n'est ajouté qu'à la signation, sans conséquence sur les calculs qui dépendraient de leurs axes ou autres éléments géométriques qu'ils contrôlent. La figure 4.21 illustre le caractère secondaire des effets d'un trill.

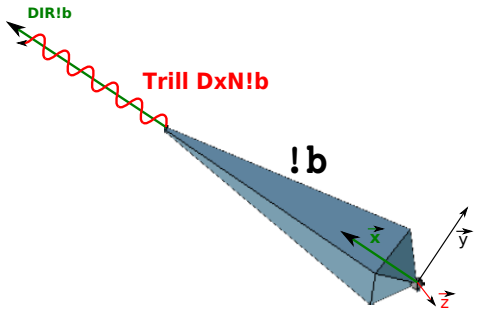


FIG. 4.21 – Le trill est une contrainte faible

Ce choix évite l'utilisation fautive d'orientations instantanées des doigts. Pour cause, si un autre élément de spécification (mettons l'objet A) dépend de l'orientation d'un segment soumis à un trill, et que la variation rapide de l'orientation de ce segment est considérée comme une variation en tout point pertinente, A subira aussi ce trill et risque de donner à l'objet et à la signation une agitation indésirée.

Le caractère faible ou non d'une spécification est donné par la nature de la spécification et non par les descriptions.

Avant de procéder à la construction d'un exemple complet, nous traitons des dernières spécifications possibles, à savoir les entités nommées et raccourcis d'écriture.

4.5 Alias, macros et sucres de syntaxe

Cette section termine de présenter les possibilités de description offertes par le modèle. Elle couvre les alias, les macros et les boucles.

4.5.1 Alias d'objet

Nous avons vu que divers objets pouvaient être construits comme des points ou des vecteurs pour aligner un segment ou en positionner un point lié. Ensuite, nous avons précisé que des objets (pour l'instant du squelette) pouvaient comporter des dépendances entre eux. Notamment, deux objets peuvent dépendre d'un troisième objet. Ce qu'il nous manque encore est la possibilité de matérialiser la construction d'un objet comme un signeur l'aurait à l'esprit à la signation.

Par exemple, l'axe de symétrie de l'immeuble, porté par le vecteur `[elev]` défini en 4.4.2 semble suffisamment présent pour être matérialisé et non construit à la volée à chaque fois qu'il sera nécessaire. De plus, la construction répétitive d'un même objet (en en répétant la formule) montre au mieux l'égalité des valeurs et des dépendances mais pas la *réutilisation* de l'objet en tant que telle. En créant un **alias** pour un objet, on peut faire apparaître les double-références [3.3.7.2].

Un alias est un identificateur auquel on affecte un objet que l'on définit. Voici le schéma d'une définition d'alias, dont la syntaxe ressemble à celle d'une influence contextuelle :

nom `:=` *expression*

Par exemple pour l'axe de symétrie dans [IMMEUBLE] et en reprenant les dépendances contextuelles données plus haut, on définirait :

```
axe := Line // [elev] thru [loc]
```

où le point `[loc]` serait lui-même une influence contextuelle désignant l'emplacement du bâtiment référent dans l'espace de signation.

Ensuite, à l'interprétation de la description, n'importe quelle utilisation de *nom* dans une expression est évaluée comme *expression*. Par conséquent, si *expression* ne dépend que d'objets fixes dans le temps, *nom* peut être considéré lui-même comme un objet fixe, et réciproquement. Considérons la définition suivante d'un alias `mil_mains` pour le milieu du segment dont les extrémités coïncident avec les points d'articulation au poignets :

```
mil_mains := MID [ORIG!palm(l), ORIG!palm(r)]
```

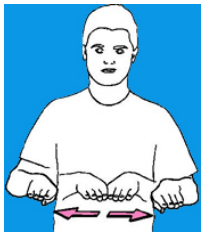
Cette définition dépend de deux points non fixes. Toute référence à `mil_mains` sera évaluée à l'instant de cette référence et ne peut être connu a priori. En revanche, la définition de `axe` ci-dessus dépend de deux objets fixes. En effet, si `[elev]` et `[loc]` sont bien des influences contextuelles donc des objets dont les valeurs ne sont pas certaines a priori, ils n'en sont pas moins des objets fixes dans le temps que couvre la description.

4.5.2 Macro-contraintes

Une macro-contrainte (ou macro) est une contrainte symbolique d'un ensemble de contraintes primitives correspondant à une unique motivation, pensée globalement. Lorsqu'un tel ensemble de primitives de spécification est représentatif d'un comportement motivé, on peut définir une macro-contrainte équivalente, à la signation, à la conjonction des contraintes qui décrivent cette motivation. Un nom de macro débute par le caractère « # » et se définit comme suit (voir aussi l'annexe D.1.2.1), hors de toute description gestuelle :

```
Macro nom {
  contrainte
  contrainte
   ...
}
```

Par exemple, on peut définir une macro-contrainte pour orienter tous les doigts d'une main dans le plan de la paume comme dans [TABLE], [QUOI ?], etc. Sans spécifier de serrement ou d'écartement des doigts ni même aucune orientation directrice pour ceux-ci, ni orienter la main dans l'espace, on peut orienter tous les doigts d'une main dans le même plan que la paume en alignant leurs vecteurs normaux avec celui du segment de la main qui les contrôle.



[TABLE]

[QUOI ?]

FIG. 4.22 – Utilisation de la macro `#main_plane` sur les deux mains

On écrit :

```
Macro #main_plane(Side $h) {
  Orient NRM!index($h,1) along NRM!palm($h)
  Orient NRM!index($h,2) along NRM!palm($h)
  Orient NRM!index($h,3) along NRM!palm($h)
  Orient NRM!middle($h,1) along NRM!palm($h)
   ...
}
```

Cette macro est paramétrée par un côté (une valeur parmi `s`, `w`, `l`, `r`) comme c'est le cas des sites corporels `@PA` par exemple. Ce paramètre étant formel, on emploie un nom de variable, c'est-à-dire commençant par un « $ ».

Nous insistons pour que les macros représentent des motivations de signation. Il ne s'agit pas de définir une macro à usage unique pour seulement alléger une description ni de factoriser des groupes de contraintes présents dans plusieurs descriptions s'ils ne correspondent pas à des motivations ressenties comme groupées. Par exemple, une contrainte d'orientation directrice sur la tête et une autre sur l'index ne sauraient constituer une macro-contrainte même si elles sont souvent utilisées conjointement. L'utilisation d'une macro n'est pas une simple réécriture équivalente. Leur liste peut en revanche dépendre des langues des signes, et de même que celle des sites corporels, celle des macros n'est pas supposée identique d'une langue à l'autre.

Une fois définie, une macro peut être utilisée en lieu et place des primitives articulatoires, c'est-à-dire dans les spécifications des unités temporelles de description, voire dans de nouvelles définitions de macros. Et, comme toute primitive spécifiant une unité temporelle, une macro-contrainte sera donnée dans un des modes *here* ou *keep*. Pour utiliser la macro-contrainte définie ci-dessus sur la main droite, on écrit tout simplement :

```
#main_plane(r)
```

4.5.3 Boucles

La définition de `#main_plane` ci-dessus s'est montrée fastidieuse car elle répète une même contrainte sur différents segments. Cela montre l'intérêt d'apporter à l'écriture des descriptions une forme d'automatisation des répétitions, ce qui est possible avec les boucles `For` qui rappellent leurs homologues de nombreux langages de programmation. Elles s'écrivent :

`For` *variable* `=` $valeur_1$`,` $valeur_2$`, ...`
  primitive
  primitive
  ...
`End`

où *variable* représente un objet sur lequel seront distribués les éléments $valeur_i$ à son utilisation dans les primitives de la boucle. On peut alors raccourcir les trois lignes nécessaires à chaque doigt en une boucle distribuant la contrainte sur les phalanges. Les trois premières lignes de la macro `#main_plane` deviennent :

```
For $phal = 1, 2, 3
    Orient NRM!index($h,$phal) along NRM!palm($h)
End
```

Ceci achève la présentation du modèle. Nous avons vu ses propriétés spatio-temporelles, ses outils de spécification et son articulation avec les différents aspects linguistiques importants. Nous en proposons maintenant un exemple complet et commenté.

4.6 Exemple commenté

Nous reprenons ici l'exemple du signe [BALLON], déjà cité dans ce chapitre et qui concentre un bon nombre de propriétés présentées. Nous en donnons la description complète sur la figure 4.25 page 110. Les renvois A. . . Y dans le texte ici désignent les lignes de la description sur cette figure. Nous donnons quelques exemples supplémentaires en annexe E.

D'abord, le signe ne comporte que deux postures motivées (une initiale, une finale) donc la séquence temporelle de sa description sera de la forme K-T-K, c'est-à-dire composée de deux postures-clés séparées par une transition. Ces trois unités temporelles ainsi que les postures initiale et finale sont illustrées figure 4.23. Aucune des postures-clés n'est de durée nulle car elles ne sont pas de simples points de passage. Cependant, aucune n'est à maintenir de manière significative ou réellement perceptible et on remarque que la durée de la deuxième semble plus longue que la première. À défaut de mesure, nous proposons une répartition temporelle 10-70-20, sans grande incidence pour cette partie. Sur la description, on trouve les unités temporelles dans le bon ordre

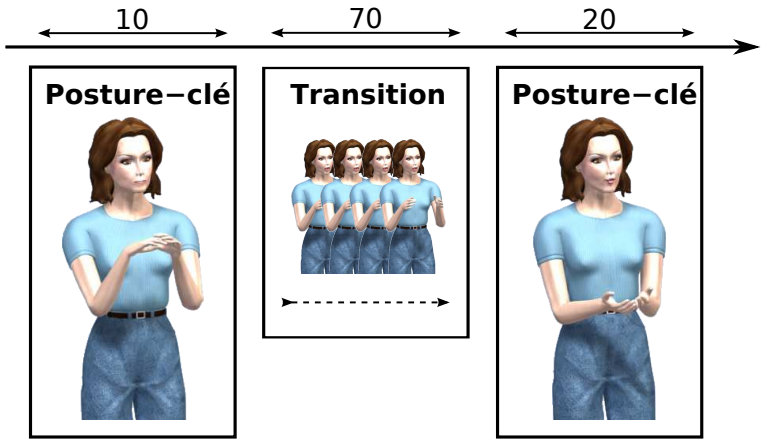


FIG. 4.23 – Séquence temporelle de [BALLON]

introduites aux lignes E, O et T, chacune recevant la durée correspondante entre parenthèses.

Prenons la première posture-clé. La motivation est de :

- positionner les mains l'une sur l'autre au-dessus du centre du ballon (objet non matérialisé), vers lequel les paumes seront dirigées à tout instant du signe ;
- figer chaque main dans une configuration aux doigts écartés et arrondis.

Le centre ainsi que la position relative des mains et du centre peuvent être déplacés selon le contexte de signation. La position du centre dépend de son emplacement dans la scène de signation et sa distance au point de départ des mains dépend de sa taille en transfert de taille (voir TTF en 2.1.3.2). Ceci dit, un ballon générique peut tout à fait être signé hors de tout contexte. Il s'agit d'influences contextuelles, respectivement `loc` et `size` déclarées lignes B et C. Les valeurs du ballon génériques sont fixées ici à :

- la valeur 2 pour `size`, sachant que celle-ci dépend du système de coordonnées choisi lors de la définition du squelette ;
- un point à une distance de 10 devant le nombril pour `loc`, selon la formule de la ligne B.

À partir de celles-ci, on construit le point de départ des mains pour construire l'alias `p0` (D). Nous plaçons la contrainte de configuration globale dans une macro `#round` paramétrée par un côté (celui de la main désignée) et la taille du ballon (pour un écartement adapté des doigts), supposée définie et que nous appliquerons à chaque main. On voit cette macro-contrainte ligne H dans le corps d'une boucle itérant sur les deux mains (G).

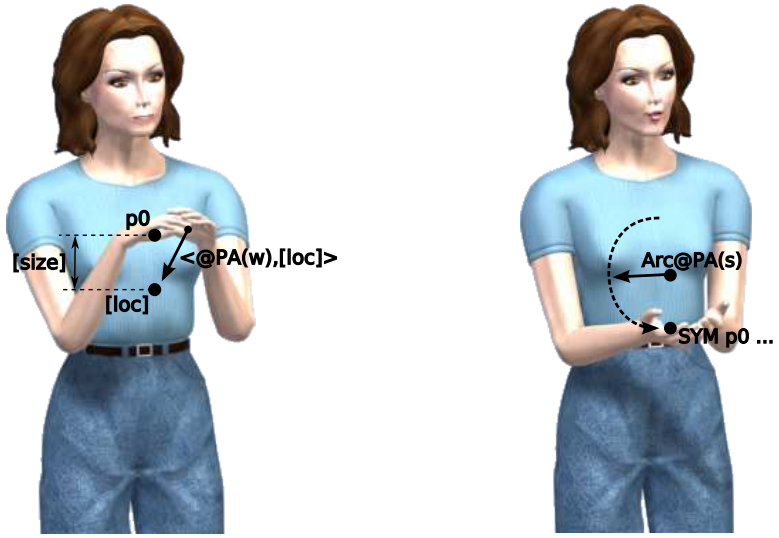
Le positionnement des mains dans la première posture-clé est spécifié aux lignes L et M. Le point central de la paume de la main dominante `@PA(s)` est placé en `p0`. Le recouvrement par la main dominée est spécifié par un placement du point central de la paume en contact avec le site corporel `@I_KN(s,1)`, à savoir l'articulation à la base de la première phalange de l'index de la main dominante, les deux mains étant dirigées dans le plan tangent au rayon de la portion de cercle qu'elles parcourent. À la ligne I, on indique cela en orientant leur vecteur normal dans le sens de leur point `@PA` vers le même centre `[loc]`.

Les contraintes de positionnement sont des contraintes initiales non maintenues. Elles ne sont à vérifier qu'à la première posture-clé. Il s'agit donc de contraintes locales comme l'indique le mot-clé `HERE` (K). En revanche les autres contraintes sont à maintenir jusqu'à la posture-clé suivante, d'où le mot-clé `KEEP` (F). Les positions non maintenues des points sont remplacées dans la seconde posture-clé aux lignes V et W. On remarque l'emploi d'un opérateur de symétrie pour définir le point d'arrivée de `@PA(s)`.

Pour ce qui est de la transition, nous donnons un facteur empirique d'accélération (P) car il s'agit d'un mouvement motivé, engageant les muscles du bras et sans retenue. On précise également

les trajectoires des mains, celles-ci n'étant pas libres. Chaque point `@PA` est soumis à une option d'arc (Q et R) dont les vecteurs, tous deux de norme `[size]`, sont opposés. Le vecteur `LAT` à la ligne Q représente un vecteur unitaire vers le côté dominant, c'est-à-dire `LFT` ou `RGT` selon la latéralisation en cours du squelette.

Les principaux éléments utilisés pour la description ici sont reportés sur la figure 4.24.



(a) posture initiale (b) posture finale

FIG. 4.24 – Localisation des objets dans [BALLON] (description donnée page suivante)

```
(A)  SEQUENCE "ballon"
(B)    loc = @AB + 10*FWD
(C)    size = 2
(D)    p0 := [loc] + [size]*UP

(E)    KEY_POSTURE (10) {
(F)      KEEP :
(G)        For $h = s, w
(H)          #round($h, [size])
(I)          Orient NRM !palm($h) along <@PA($h), [loc]>
(J)        End

(K)      HERE :
(L)        Place @PA(s) at p0
(M)        Place @PA(w) at @I_KN(s, 1)
(N)    }

(O)    TRANSITION (70) {
(P)      Accel 1
(Q)      Arc @PA(s) : [size]*LAT
(R)      Arc @PA(w) : -Arc@PA(s)
(S)    }

(T)    KEY_POSTURE (20) {
(U)      HERE :
(V)        Place @PA(s) at SYM p0 WRT [loc]
(W)        Place @PA(w) at @L_KN(s, 1)
(X)    }

(Y)  End "ballon"
```

FIG. 4.25 – Description complète de [BALLON]

4.7 Résumé

Nous concluons ce chapitre en résumant dans cette section les principales propriétés du modèle proposé.

Une séquence gestuelle de langue des signes dans l'espace de signation est considérée comme un ensemble de propriétés géométriques sur un squelette dans un espace euclidien. Le squelette à animer est contraint dans l'espace en reliant ses composants à des objets de cet espace.

Une description est une séquence d'unités temporelles alternant postures-clés et transitions entre celles-ci. Chaque unité décrit un comportement global du squelette sur sa durée. Les postures-clés font usage de contraintes articulatoires pour définir l'ensemble des postures articulatoires linguistiquement valides. Les transitions utilisent diverses options pour préciser le passage (a priori libre) d'une posture à la suivante. Dans tous les cas, n'est spécifié que l'ensemble des contraintes nécessaires et suffisantes d'un point de vue linguistique.

Les trois primitives articulatoires sont :

- le positionnement d'un point lié à un segment, pour l'amener en un point de l'espace ;
- l'orientation directrice, pour fixer la direction et le sens de l'axe directeur d'un segment ;
- l'orientation normale, pour fixer la direction et le sens de l'axe normal d'un segment.

Aux postures-clés, chaque contrainte est donnée selon un des deux modes :

- *here* : qui fait de la contrainte une contrainte locale à la posture-clé ;
- *keep* : qui fait porter la contrainte jusque sur la posture-clé suivante incluse.

Le modèle recense deux primitives optionnelles pour les transitions :

- une option de dynamisme qui fixe le facteur d'accélération de la transition, a priori nul ;
- une option d'arc qui fait suivre des points tout au long de la transition pour en préciser la trajectoire entre les deux postures.

Chaque valeur ou objet est typé et peut s'exprimer avec des références à d'autres objets, ce qui fait ressortir des dépendances devant elles aussi être linguistiquement pertinentes. De même, il est possible de nommer des objets construits pour y faire référence dans la description ou de grouper des contraintes en définissant des macros, mais leur emploi doit également être révélateur d'un caractère globalement motivé.

À cela s'ajoutent éventuellement des options faibles, aux postures-clés ou aux transitions. Il s'agit d'options ignorées lors de la résolution des contraintes posées précédemment, dont les conséquences ne sont appliquées qu'après avoir obtenu la posture de base désirée. Elles regroupent les tremblements et autres variations non dénombrées (ni dénombrables), internes à une unité.

De plus, le modèle rend possibles les références à des éléments contextuels nommés, dont les

valeurs restent inconnues jusqu'à la signation en contexte. Chacune peut être soit une valeur nécessaire, sans laquelle le geste n'a pas de sens (argument), soit une valeur adaptative au contexte mais sans laquelle il reste possible de produire le geste en utilisant une valeur-type, contenue dans la description (influence contextuelle).

Ceci achève la présentation de notre modèle descriptif. Le but du chapitre suivant est d'en vérifier les propriétés posées préalablement comme essentielles, de le critiquer et de l'évaluer.

Chapitre 5

Évaluation du modèle

Ce chapitre s'intéresse à évaluer la pertinence de Zebedee, modèle temporel à contraintes géométriques présenté ci-avant. Nous en dressons d'abord un court bilan au regard de ses différents objectifs (section 5.1), puis en proposons un protocole complet pour l'évaluer. Son élaboration a engagé des considérations d'ordre à la fois informatique et linguistique. Pour cette raison, nous insistons pour qu'il soit évalué de ces deux points de vue, et donnons pour chacun une démarche détaillée (sections 5.2 et 5.3), divisée en une phase de mise en place et une phase pratique d'évaluation. Nous verrons au cours de l'exposé que plusieurs activités sont engagées au Limsi-CNRS, laboratoire accueillant cette thèse, en vue de cette évaluation.

5.1 Bilan

Nous établissons le bilan du modèle en deux temps. Dans une première section, il est confronté aux objectifs fixés dans les chapitres précédents, où nous nous étions posés un cadre pour construire le modèle ainsi qu'un cahier des charges qu'il devait vérifier. Ensuite, nous en faisons une analyse critique et en repérons certaines limites.

5.1.1 Vérification du cahier des charges

Nous disons ici en quoi notre modèle vérifie le cahier des charges résumé en 3.4 page 69. La numérotation ci-dessous correspond à celle des tâches fixées dans ce résumé.

1. Alternance posture-clé–transition

   Le premier niveau de découpage est porté sur l'axe temporel et fait apparaître une alternance entre des phases de postures motivées (les postures-clés) et de transitions entre celles-ci. Ceci

rythme la description dans le temps avant de spécifier les articulations.

2. Dynamisme

   Chaque unité de cette alternance peut avoir une durée propre, et on note le cas particulier de l'unité sans durée. Les transitions peuvent spécifier un facteur d'accélération, éventuellement nul pour spécifier des vitesses constantes.

3. Pas de sous-spécification

   Une description fait peser sur chaque instant un ensemble de contraintes suffisant...

4. Pas de sur-spécification

   ... dont chacune est nécessaire.

5. Pas d'articulateur isolé

   Le critère d'indivisibilité du squelette force une unité temporelle à agir (ou ne pas agir) selon les contraintes sur tous ses segments simultanément. On ne peut déconnecter certaines parties du corps pour leur donner un comportement séparé du reste de l'unité décrite.

6. Pas d'articulateur privilégié

   Les primitives s'appliquent à des points ou des segments sans obligation qu'un segment particulier soit visé plutôt qu'un autre. Il existe une totale liberté dans le choix des segments visés par les contraintes. Ceci permet par exemple la description d'un geste non manuel sans en faire un cas exceptionnel ou particulier. Le modèle place ces gestes au même plan que les signes manuels.

7. Dépendances apparentes

   Les étapes de la construction du signe sont intégrées dans la description, et tout objet peut dépendre de n'importe quel autre[1].

8. Objets annexes

   Parmi les objets participant à la description, on trouve ceux fournis par le squelette réalisant les signes, mais également des objets invisibles à la réalisation, utiles pour définir certaines propriétés géométriques de la « figure » que constitue la séquence à décrire.

9. Valeurs contextuelles accessibles

   Les dépendances contextuelles (simples influences ou arguments obligatoires) permettent à une description de reposer sur des éléments non connus a priori, fournis au moment de signer la séquence et dépendant de son contexte.

[1] Nous voyons toutefois en 5.3.1.4 page 128 ce qu'il en est de dépendances croisées ou circulaires.

Le modèle vérifie donc tous les objectifs fixés par le chapitre 3, qui faisaient suite à l'appréciation des manques relevés à l'étude des modèles actuels. Cependant selon nous, quelques aspects des langues des signes ne demeurent que partiellement traités, et nous consacrons la section suivante à décrire les cas problématiques possibles.

5.1.2 Questionnements et limites

Dans cette section, nous retenons deux critiques du modèle proposé, chacune nous menant à formuler une interrogation quant à nos hypothèses de départ.

5.1.2.1 La question des frottements

Aux postures-clés, il est possible de spécifier un contact en plaçant un site corporel « at » un autre avec une contrainte de la forme :

```
Place @... at @...
```

Cette contrainte peut bien entendu être locale ou maintenue. Dans ce deuxième cas, on spécifie une transition pendant laquelle le signeur doit maintenir le contact (fixe) sur toute la transition. Lorsque se suivent deux contraintes de positionnement pour un même site P, la transition prend le soin d'amener P du premier point cible au deuxième, tout en vérifiant les éventuelles contraintes qui la spécifient. Ainsi dans le signe [ÉNERGIE, LITRE], l'index passe d'un point proche de l'épaule à un point proche du coude sur le bras, tout en suivant un arc pour son extrémité. Sans la contrainte d'arc, la seule obligation est de passer d'un contact à l'autre, et l'index restera alors vraisemblablement très proche du corps.

Ceci dit, observons le signe [LONGTEMPS] qui justement fait passer l'index d'une posture-clé avec contact à une autre, sans contrainte d'arc sur la transition. Le fait que l'index reste « vraisemblablement » très proche du contact avec le bras sur la transition semble ne pas suffire. Rien n'interdit que l'index s'éloigne du bras car sa trajectoire est libre, or d'un point de vue descriptif, l'intention à la réalisation de [LONGTEMPS] est bel et bien de rester en contact pour générer ce qu'on pourrait appeler un frottement.

Formellement, les contacts avec la peau et les sites corporels sont modélisés par des points liés à des segments, c'est-à-dire des points fixes dans le repère du segment. La note 4 page 81 mentionnait déjà que nous négligions l'élasticité de la peau et pour cause, aucune représentation de celle-ci n'existe dans ce modèle. Seuls les segments sont modélisés, et encore, leur forme physique est négligée. Nous pensons (et une réelle visualisation lors de l'évaluation tranchera) que cette

approximation est acceptable car les sites corporels ne se déplacent pas significativement dans le repère de leur segment. En revanche, si nous ajoutions une option de transition pour manifester les frottements comme dans [LONGTEMPS], la question d'une représentation de la peau devra peut-être être reposée.

Pour l'instant, nous proposons qu'un passage de :

`Place` P_b `at` P_1

à :

`Place` P_b `at` P_2

avec P_1 et P_2 deux sites corporels différents liés au même segment (et sans contrainte d'arc contradictoire) implique nécessairement un frottement. En effet, il semble difficile d'imaginer autrement la transition. Toutefois, nous sommes conscients que cette « règle » contraste avec l'effort de faire apparaître les motivations des réalisations signées. Aussi, la question reste pour l'instant sans réponse si l'on accepte ces spécifications sans imposer que P_1 et P_2 soient liés au même segment.

5.1.2.2 La question des trajectoires

Le modèle se démarque de la plupart des approches existantes notamment par le fait qu'il ne décrit pas de trajectoire, mais construit les signes autour de ses postures-clés, c'est-à-dire plutôt entre les trajectoires s'il y en a. Éventuellement, on peut suivre un point sur une transition pour lui faire suivre une portion de cercle ou de droite, mais les descriptions laissent toutes à penser que, même dans le cas d'un tracé motivé dans l'espace pour un site corporel, la posture d'arrivée est elle aussi motivée. Voire, c'est cette posture qui définit l'arrivée et pas les indications de trajectoire. La question que soulève cette section est non pas celle de la pertinence de ce choix mais plutôt celle de savoir si le cercle et la droite sont les seuls supports de trajectoires nécessaires à la description de tout énoncé signé.

Il semble bien d'après [Liddell 89] que pour ce qui est des signes standard, les formes se stabilisent ainsi. En parcourant les dictionnaires, on s'aperçoit que les seules représentations de trajectoires (flèches) n'étant ni rectilignes ni circulaires sont sinusoïdales. Celles de petite amplitude sont en général pour nous l'effet d'un trill et sont donc couvertes par le modèle. Quant à celles de plus grande amplitude, Liddell et Johnson les traitent comme des zigzags, les sommets arrondis étant attribués à la vitesse de signation. Une suite de déplacements rectilignes consécutifs, lorsque les points de passage sont des postures-clés sans durée, provoque en effet un virage arrondi dans la mesure où pour avoir un angle précis il faut immobiliser le point un instant. Cette trajectoire lissée

est illustrée sur la figure 5.1. On confirme cela en observant dans les dictionnaires que les deux contacts consécutifs de [SANTÉ] (fig. 5.2) donnent généralement lieu au dessin d'une trajectoire ressemblant à celle du bondissement d'une balle en deux points (de chaque côté du torse).

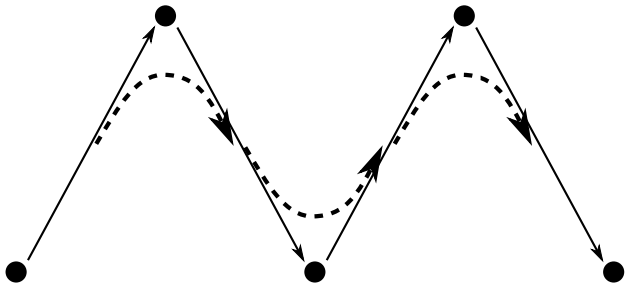


FIG. 5.1 – Les sinusoïdes cachent des zigzags

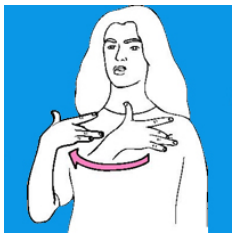


FIG. 5.2 – [SANTÉ]

En revanche, la transposition de cette stabilisation des formes complexes en lignes et en courbes n'est qu'hypothétique en ce qui concerne les structures non standard de grande iconicité. Typiquement, un transfert de situation donne à voir la trajectoire d'un actant relativement à un locatif. Cette trajectoire est une reproduction de la trajectoire réelle qui est illustrée. Certes elle est souvent réduite, simplifiée et/ou déformée, mais rien n'indique a priori qu'elle soit réduite à une suite de cercles et de lignes. Dans sa thèse [Huenerfauth 06], Huenerfauth explique d'ailleurs que pour décomposer convenablement le mouvement réel d'une entité, il faut des connaissances épistémologiques sur l'entité. Il s'intéresse donc aux trajectoires réelles à illustrer plutôt qu'à une composition de mouvements plus simples.

Le modèle pourrait alors bénéficier de nouvelles contraintes de suivi de point sur les transitions, plus génériques que les seuls arcs et droites. Nous pensons néanmoins que la posture-clé finale reste motivée, et qu'une extension du modèle à ces cas de trajectoires moins triviales ne remet pas en cause la spécification d'une posture-clé complète de part et d'autre de la transition concernée.

Il s'agit maintenant de procéder à une évaluation complète de Zebedee. Les sections suivantes s'attachent à le faire, en linguistique d'abord, puis en informatique.

5.2 Évaluation en linguistique

Pour évaluer la pertinence et l'utilité linguistiques du modèle, nous considérons la tâche qui consiste à rapprocher les signes (leurs descriptions) selon des propriétés communes ou établir des statistiques mesurant le taux d'apparition d'un phénomène particulier, à partir d'un corpus de plusieurs milliers de signes par exemple.

5.2.1 Utilité du modèle et mise en œuvre

Lorsque l'on observe un nombre suffisamment grand de descriptions, il devient naturel de les compiler dans un dictionnaire, sous une forme papier ou électronique via une interface utilisateur de consultation. Mais comment organiser le dictionnaire, en particulier l'ordre ou l'indexation des descriptions qu'il contient, pour réduire le temps de consultation, et quels moyens se donner pour sa consultation ?

Les bases de données informatisées deviennent en général incontournables pour mener ce type de recherche car :

- leur capacité de stockage est quasi-infinie ;
- leur temps de consultation est quasi-nul.

Avec des données paramétriques, une base de données ne peut offrir que des requêtes sur des valeurs ou des listes de valeurs spécifiques pour chaque paramètre. Les requêtes typiques ont pour but de connaître la liste des signes utilisant une certaine configuration ou un certain emplacement parmi une liste, etc. Avec Zebedee et son fonctionnement par contraintes et dépendances, les requêtes deviennent plus riches. On peut désormais s'intéresser non seulement aux valeurs utilisées dans les descriptions, mais aussi à la structure même de ces descriptions, en d'autres termes consulter la topologie des dépendances et des objets contenus, pas seulement leur présence ou leur valeur.

Par exemple, il peut être intéressant de connaître la liste ou le nombre de signes définis avec un segment du côté dominant qui dépend (éventuellement par transitivité, voir note 7 page 128) d'un segment du côté dominé. C'est le cas de [BUREAU], où la tranche de la main dominante sera positionnée en des sites corporels liés à l'avant-bras opposé. En revanche, [BALLON] ne vérifiera pas ce critère. La description de la fig. 4.25 définit le vecteur d'arc d'un point lié à la main dominée comme l'opposé de son homologue côté dominant, c'est-à-dire fait apparaître la dépendance inverse.

Depuis près d'un an, le LIMSI élabore une plate-forme complète de dictionnaire de signes ainsi qu'une interface de consultation, montrée sur la figure 5.3. Chaque entrée de ce dictionnaire admet déjà plusieurs visualisations : dessin tiré de [Moody 86b, Moody 89], vidéo d'un informateur LSF,

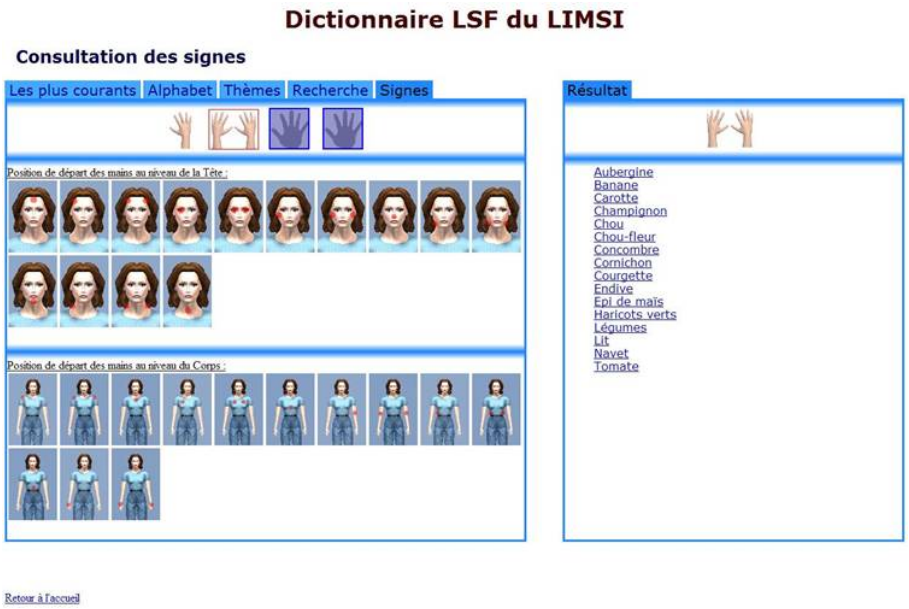


FIG. 5.3 – Interface de consultation du dictionnaire du LIMSI

animation 3D rotoscopée[2]... La recherche de signes se fait pour l'instant en des termes paramétriques classiques de configuration et d'emplacement. Les configurations sont cependant groupées selon leur ressemblance pour permettre une marge d'erreur dans les requêtes et éviter l'inconfort d'une longue liste de valeurs trop précises. L'emplacement est celui du début du mouvement de la main dominante, mais nous avons déjà démontré combien cette solution provisoire était limitée.

La section qui suit formule un bon nombre de pistes quant à de nouvelles possibilités de requêtes et d'études qu'ouvre notre modèle. En vue de tester ces propositions, nous entamons présentement, pour chaque entrée de notre base, la saisie de sa description selon le modèle donné dans cette thèse, reformulé dans le standard Merise. Nous agrémenterons ensuite notre dictionnaire d'un système de requêtes permettant l'extraction de signes sur la base de ces descriptions.

5.2.2 Propositions pour une évaluation

Une possibilité est de grouper les signes en fonction de leurs dépendances contextuelles, ou plus particulièrement de leurs arguments. Sur un dictionnaire entier de signes, si les groupes obtenus coïncident avec des critères sémantiques au lieu de présenter une répartition homogène, on peut supposer une raison sémantique (« étymologique » ?) aux groupes obtenus. Cette méthode est efficace pour confronter à des résultats statistiques plusieurs intuitions et hypothèses formulées par [Cuxac 00, Cuxac 04].

Nous donnons ci-dessous d'autres questions qu'il serait possible de traduire en requêtes pour

[2]Cette technique est décrite en section 3.1.1.

une base de données, ainsi que quelques signes qui les vérifient :

- Quels signes contraignent un segment du bras dominé ?

  Autrement dit, dans quels signes trouve-t-on une contrainte visant `!f_arm(w)`, `!arm(w)`, ou éventuellement `!clav(w)` ?

  Par exemple, [BUREAU] convient ici.

- Quelle est la proportion de signes présentant une dépendance des deux mains sur un même troisième objet ?

  P. ex. la contrainte maintenue dans [BALLON] :

  ```
  For $h = s, w
    Orient NRM !palm($h) along <@PA($h), [loc]>
  End
  ```

  Les deux mains (segments `!palm(s)` et `!palm(w)`) dépendent ici de `[loc]`.

- Quels signes ont une orientation, un emplacement ou une configuration indéterminée ou sous-déterminée pour une des mains à un instant du signe ?

  En d'autres termes, quand bien même les trois paramètres historiques manuels suffiraient, quels signes ne sont pas descriptibles de manière paramétrique sans créer de sur-spécification ?

  P. ex. dans [GARÇON], donné figure 5.4, l'orientation absolue du segment `!palm(s)` n'est pas contraint.

- Quels signes n'ont aucune dépendance contextuelle ?

  Ici, [GARÇON] semble être un bon candidat.

- Plus de signes dépendent-ils (en contexte) d'une taille ou d'une distance que d'un objet géométrique ou l'inverse ?

- Quels signes n'ont pas d'influence contextuelle de type `Point` ?

- Parmi les signes ayant au moins un argument, combien font appel à la macro `#m` ?

- ... et ainsi de suite.

FIG. 5.4 – [GARÇON]

En poussant encore l'exploitation de la relation de dépendance, on peut définir de nouvelles

notions et observer les dépendances non plus individuellement mais de manière globale. À titre d'exemple, nous proposons les propriétés d'**inclusion** et d'**égalité de structure**. La définition exacte reste encore à établir, mais on peut penser à une inclusion structurelle de [GARÇON] dans [CICATRICE] en LSF — nous rappelons ces signes figure 5.5. Leurs descriptions sont en effet quasiment identiques ; le positionnement de l'extrémité du pouce est fixe aux deux postures-clés pour [GARÇON] tandis qu'il fait apparaître des dépendances contextuelles pour [CICATRICE]. Avec le langage de spécification, on a pour les postures-clés de [GARÇON] les lignes :

```
(A)  Place @T_TIP(s) at @FH(w)
(B)  Place @T_TIP(s) at @FH(s)
```

La ligne A spécifie la première posture-clé et la B la deuxième. Pour [CICATRICE], les lignes homologues sont :

```
(C)  Place @T_TIP(s) at [loc1]
(D)  Place @T_TIP(s) at [loc2]
```

où `[loc1]` est le point (influencé par le contexte) de la première extrémité de la balafre, et `[loc2]` la deuxième. On peut voir la ligne A de garçon comme « incluse » dans la ligne C de [CICATRICE]. Cette ligne est plus générique car `[loc1]` peut être fixé à `@FH(w)`, mais pas nécessairement. De même, on définit une inclusion de B dans D.

Plus généralement, soient deux descriptions dont les séquences temporelles sont de même forme, c'est-à-dire composées du même nombre d'unités temporelles de description. Si toute contrainte à la n-ième unité temporelle de l'une est présente ou « incluse » à la n-ième unité de l'autre, la première sera dite **structurellement incluse** dans la seconde. Si la seconde est également structurellement incluse dans la première, elles sont alors **structurellement égales**. La paire [CICATRICE]/[SE FAIRE OPÉRER] serait un exemple de signes structurellement égaux. Aussi aurait-on des signes structurellement similaires entre [CICATRICE] et [CHIRURGIE] : la seule différence pour le positionnement de `@T_TIP(s)` entre ces deux signes au niveau descriptif est la définition des influences contextuelles `[loc1]` et `[loc2]`. La première est un point de contact corporel (sur le front), l'autre est dans l'espace. Dans les unités temporelles, `@T_TIP(s)` subit les mêmes contraintes.

D'autres définitions peuvent encore faire un usage puissant des descriptions. Toute propriété observée sur les valeurs contenues dans les descriptions, les relations de dépendances, la topologie de ces dépendances dans les unités temporelles voire la répartition de celles-ci sur l'axe temporel pourra le cas échéant se révéler une propriété intéressante et mettre au jour de nouveaux critères en typologie des signes. Grouper ensuite les descriptions au regard des résultats ouvre de nouvelles

[CICATRICE] [SE FAIRE OPÉRER] (appendicite) [CHIRURGIE]

FIG. 5.5 – Inclusion et comparabilité des structures descriptives

perspectives en typologie des signes, voire des langues des signes si l'on compare les résultats en considérant plusieurs langues des signes à requêtes égales.

À ce stade, on comprend déjà que les possibilités de requêtes et d'études sont nettement plus nombreuses qu'une simple consultation de valeurs paramétriques. Elles deviennent plus modulables et plus spécifiques, ce qui précise les recherches et l'extraction de signes, et par conséquent affine les analyses. Pour autant, seule une utilisation à grande échelle par des linguistes ayant apprivoisé le modèle et l'ayant confronté à un corpus significatif de signes formera les bases d'une évaluation sur ce plan. Leur retour sur la productivité et la représentativité du modèle définira son utilité en recherche linguistique.

Nous nous intéressons maintenant au volet de l'évaluation en informatique.

5.3 Évaluation en informatique

L'objectif est de vérifier la faculté du modèle de décrire les signes de manière non ambiguë et exploitable par un système informatique, but fixé dès la section 3.3.1. L'application « fil rouge » de ce travail de thèse a été la génération automatique (ou synthèse) d'énoncés en langue des signes par un signeur virtuel. Un système de synthèse consiste en un programme recevant à son entrée la description d'une unité signée, et fournissant à sa sortie l'animation correspondante. Cette animation est incarnée par un humanoïde ou autre personnage virtuel permettant une visualisation correcte d'énoncés signés. Le principe général est schématisé sur la figure 5.6.

C'est ce type d'application que nous utilisons pour l'évaluation ici, en utilisant Zebedee comme format d'entrée.

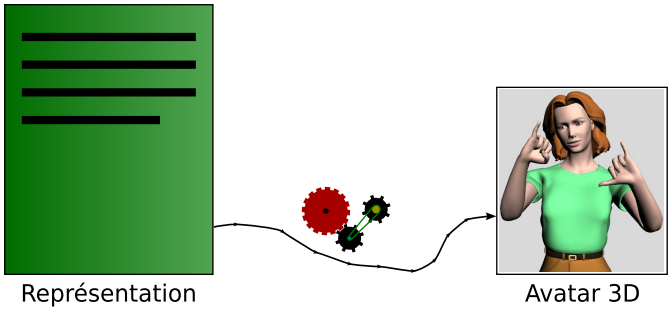


FIG. 5.6 – Génération automatique, contexte

5.3.1 Implantation d'un système de synthèse

Dans un premier temps, nous devons implémenter le passage des zebe-descriptions aux séquences d'articulations qui leur correspond. En vue d'une visualisation au moyen d'un signeur virtuel, nous nous limitons dans un premir temps à une visualisation minimale du signe généré, à savoir seulement le squelette, laissant pour l'instant la peau[3]. Au LIMSI, une application de ce type (interpréteur de descriptions en Zebedee) est en cours de développement au sein de l'équipe Geste. Elle se divise en plusieurs modules :

- un module de géométrie pour la représentation de l'espace euclidien, des objets et des transformations géométriques ;
- un module pour le squelette, sa représentation en arborescence de segments, les sites corporels, les formules qui les relient ainsi qu'une composante gérant les animations par suite de frames ;
- un module d'interprétation des descriptions, composé d'une implémentation de Zebedee et des fonctions d'interprétation des représentations Zebedee à des postures articulatoires pour le squelette ;
- un module de cinématique inverse auquel le précédent fait appel pour résoudre certaines contraintes.

Ces modules sont prêts, à l'exception du dernier en cours de développement. Un aperçu de celui-ci est donné figure 5.7. Cette section d'implémentation explique le principe algorithmique de l'interpréteur Zebedee, qui sera ensuite encapsulé dans la plate-forme d'animation OCTOPUS du LIMSI, également en développement mais d'ores et déjà prête à l'accueillir, ce dont nous parlerons dans la section suivante.

[3]Rappelons (cf. note 3 page 81) qu'un signeur virtuel représente un humanoïde tridimensionnel et est constitué d'un squelette et d'une peau qui le recouvre. L'animation vise le squelette ; la peau le suit.

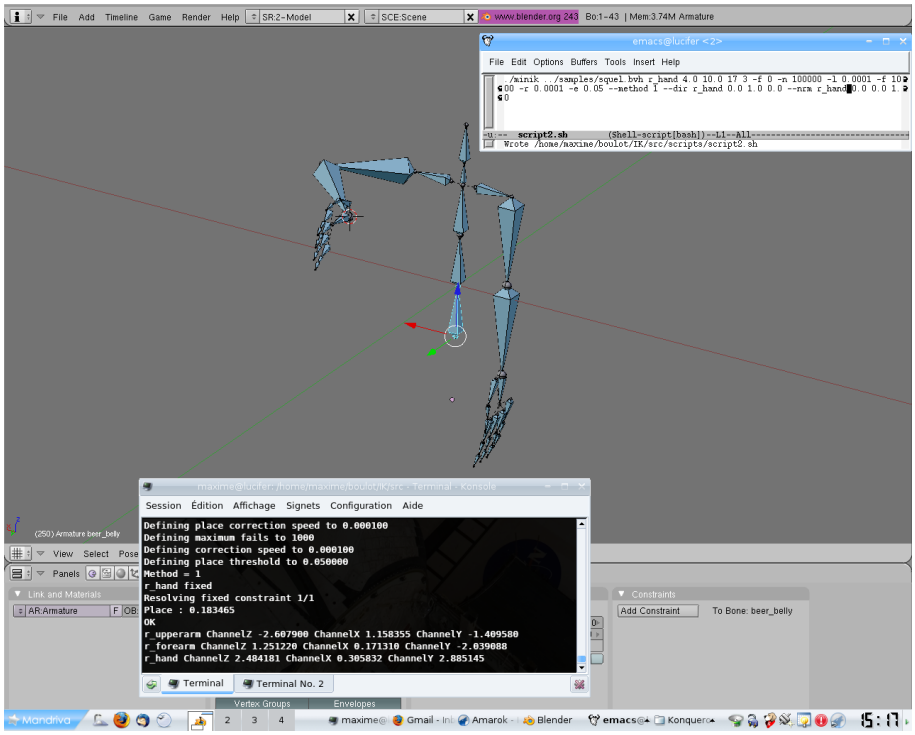


FIG. 5.7 – Programme de résolution de postures et visualisation minimale

5.3.1.1 À chaque instant son « CSP »

De nombreuses fois dans l'exposé du modèle apparaît le terme de « contrainte » pour nommer une ligne de spécification, qu'il s'agisse d'une primitive articulatoire ou d'une option de transition. Nous rappelons que c'est la conjonction de telles lignes de spécification qui constituent une unité complète, sachant que certaines d'entre elles peuvent avoir une portée supérieure à leur seule unité temporelle. Tout ceci établit pour chaque instant du signe un ensemble de contraintes qui relient les différentes variables définissant le squelette et les objets géométriques en jeu. Chacune de ces contraintes est nécessaire et leur ensemble est suffisant. Le but est alors, à partir de cet ensemble de contraintes à un instant donné du signe, de trouver une posture articulatoire telle que le squelette les vérifient toutes, c'est-à-dire une valeur pour chaque variable de rotation sur les segments.

Ceci constitue une sorte de **problème de résolution de contraintes**, ou CSP (*constraint solving problem*) dans le jargon informatique[4]. Rappelons seulement que les options faibles (trills, etc.) ne sont pas à prendre en compte dans les calculs de dépendances et qu'elles ne sont appliquées qu'ensuite au squelette. Ainsi, à partir d'une description, on construit pour chaque instant du signe un ensemble de contraintes (que nous appellerons CSP), à résoudre pour obtenir une première posture articulatoire à laquelle on pourra ensuite ajouter les effets, secondaires, des options faibles

[4]Nous faisons ici référence au paradigme de la programmation par contraintes.

à l'instant considéré.

Les sous-sections suivantes définissent les CSP et la méthode de résolution selon l'unité temporelle de l'instant.

5.3.1.2 Aux postures-clés

Pendant la durée d'une posture-clé, la posture articulatoire ne doit pas changer (toujours à l'exception des effets d'éventuelles options faibles sur l'unité). Si plusieurs postures articulatoires satisfont les contraintes imposées par la posture-clé, une seule doit être choisie et maintenue durant toute la durée de l'unité. On a donc un unique CSP à résoudre par posture-clé, dont la posture articulatoire résultante sera fixe, aux options faibles près.

Les variables de ce CSP sont a priori :

- les rotations r_i, articulations des segments ;
- les positions des objets et des sites impliqués dans les spécifications.

Les contraintes sont :

- toutes les contraintes de la posture-clé, quel que soit leur mode de spécification ;
- les contraintes *keep* de la posture-clé précédente, celles-ci portant jusqu'à la présente.

S'ajoutent ensuite les contraintes, toujours présentes, relatives à la géométrie du squelette (voir 4.2). Elles relient les positions des sites corporels aux r_i.

Résolution

En réalité, intégrer toutes les variables r_i au CSP rend celui-ci inutilement complexe. On réduit cet ensemble à celles participant à vérifier les primitives de la description, à savoir les variables r_i des segments contrôlant ceux visés par les primitives. Les variables libres comme la rotation au coude du côté non dominant d'un signe monomanuel sont écartées du CSP. Ceci ne résout pas le problème des variables mises de côté lors de la définition du CSP. On propose pour l'instant d'appliquer les articulations trouvées à la résolution du CSP sur un squelette au repos[5], c'est-à-dire la posture articulatoire prise lorsque tous les segments sont relâchés (cf. fig. 4.5 page 78). Une fois les variables du CSP instanciées, on lui applique les rotations correspondantes.

En pratique, pour résoudre le CSP, nous faisons appel à un algorithme de résolution de cinématique inverse (cf. annexe C page 175) pour chaque contrainte `Place`[6]. Le site corporel contraint

[5] Il conviendra sans doute de conduire une réelle étude sur l'activité des segments libres pendant les postures-clés. En effet on remarque vite sur corpus, par exemple, que le bras dominé n'est pas relâché systématiquement le long du corps pendant les signes standard monomanuels.

[6] Bien entendu, les dépendances présentes dans le signe imposent un ordre partiel dans ces résolutions.

est lié à un segment considéré comme l'effecteur de la chaîne cinématique. Dans ce contexte, deux difficultés apparaissent.

La première difficulté est de choisir la racine de la chaîne cinématique, à savoir l'extrémité opposée à l'effecteur [Boulic 01]. Choisir systématiquement la racine du squelette (chez nous, `!back(1)`) pose le problème du possible partage d'une sous-partie de la chaîne entre plusieurs CSP, en cas de multiples contraintes `Place`. Typiquement, un signe bimanuel partagera la chaîne de `!back(1)` à `!back(3)` entre les CSP des côtés dominant et non dominant. Une fois fixée par la première résolution, les articulations de cette sous-chaîne seront modifiées par la suivante, or ces segments contrôlent aussi le premier effecteur donc celui-ci quittera sa cible. Pour éviter ce problème, nous choisissons pour l'instant de remonter l'arbre de parenté des segments, de parent en parent, de l'effecteur jusqu'au premier segment contraint ou ayant d'autres fils, exclu. Dans le cas d'un signe bimanuel classique, on utilisera une chaîne partant de `!clav(r)` et une autre de `!clav(l)`, chaînes maximales ne partageant aucun segment. La partie commune de `!back(1)` à `!back(3)` devra aussi être traitée, par exemple avec pour cible de l'extrémité de `!back(3)` un barycentre pondéré entre sa position au même instant et les cibles respectives des deux chaînes partant des segments `!clav`.

La deuxième difficulté est au niveau des résolutions, les chaînes cinématiques pouvant inclure des segments visés par des contraintes d'orientation. La figure 5.8 illustre un cas de contraintes mutiples. On doit donc entre autres limiter les degrés de liberté de la chaîne et veiller à ce que les contraintes d'orientation données soient respectées.

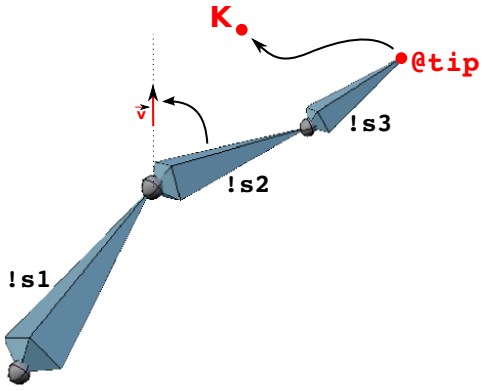


FIG. 5.8 – Contraintes multiples sur une chaîne cinématique

Ce travail est en cours et nos choix d'implantation quant à ces deux problèmes feront l'objet de publications dans un futur proche, confrontés à des résultats.

5.3.1.3 En transition

Une transition met en général en jeu plusieurs postures articulatoires, une pour chaque instant de l'unité. Elle donne donc lieu à un CSP pour chacun. Elle peut comporter un facteur d'accélération (cf. 4.3.3.2), des points suivis, etc. Nous simplifions le problème en supposant un facteur d'accélération nul dans un premier temps ; nous montrons plus loin comment ce facteur est pris en compte.

À chaque instant t d'une transition, les contraintes pesant sur le squelette sont :

- les contraintes maintenues (*keep*) de la posture-clé précédente, dont la formulation est à reprendre telle quelle à cet instant ;
- pour chaque point suivi P_i d'une option d'arc, la contrainte supplémentaire :

  $$\texttt{Place } P_i \texttt{ at } \gamma_i\left(\frac{d_i \cdot t}{t_{max}}\right)$$

  où $\gamma_i(x)$ est le point d'abscisse curviligne x sur la trajectoire de P_i et d_i la longueur de cette trajectoire. Notamment, $\gamma_i(0)$ est la position de P_i à l'instant final de la posture-clé précédente, et $\gamma_i(d_i)$ celle à l'instant initial de la suivante.

On voit dans l'expression des contraintes `Place` supplémentaires que la transition dépend de d_i donc indirectement des résolutions des postures-clés adjacentes. En d'autres termes, on ne peut résoudre aucun instant d'une transition sans avoir résolu d'abord les postures-clés qui l'entourent.

Résolution, étape 1/2

Toujours dans notre optique linéaire (accélération supposée nulle), un CSP est désormais associé à chaque instant de la même manière que les postures-clés. De même que pour ceux des postures-clés, ils n'ont pour variables que les r_i du squelette contrôlant un point ou un segment contraint. En revanche, les autres variables ne sont pas supposées prendre une position « de repos » comme aux postures-clés. Par exemple, le cas extrême de la transition neutre (pas de variable dans les CSP) montre bien que malgré l'absence de contrainte, aucune des postures articulatoires prises par le signeur n'est une posture de repos — à moins que la transition se fasse entre deux postures de repos !

À la place, on définit la fonction de passage ϕ sur $[0, t_{max}]$, propre à la transition, comme associant à tout instant la posture articulatoire qu'aurait le squelette à cet instant dans une transition neutre entre les mêmes postures, décontractée (pas de tension ajoutée aux muscles, pour un effet sans accélération), naturelle et spontanée (pas de détours inutiles, pour une transition crédible). Une expression formelle de cette fonction pourra aussi être le fruit d'analyses plus approfondies ;

nous proposons pour l'instant une simple interpolation des rotations entre $\phi(0)$ et $\phi(t_{max})$ qui sont connues [Bolot 06].

Ainsi, la posture articulatoire à l'instant t est le résultat de l'application des rotations issues du CSP à la posture $\phi(t)$.

Résolution, étape 2/2

Il ne reste plus qu'à traiter l'accélération dans les transitions, donnée par un facteur que nous laissions jusqu'à présent de côté. En principe cette accélération ne change rien à la suite des postures articulatoires prises durant la transition, seule leur répartition dans le temps varie, selon une fonction polynômiale quadratique dont le coefficient de plus haut degré est le facteur d'accélération *acc*. En cinématique en effet, l'accélération correspond au coefficient du terme de second degré d'un polynôme dont la variable est la position du point étudié.

On définit donc une simple fonction d'ajustement temporel τ_{acc} de la forme $x \mapsto acc \cdot x^2 + b \cdot x + c$ telle que pour tout instant t de la transition accéléré, $\tau_{acc}(t)$ soit l'instant où l'on retrouve la même posture articulatoire dans la transition équivalente d'accélération nulle. Or les postures de départ et d'arrivée sont les mêmes quelle que soit l'accélération donnée à la transition, à savoir $\tau_{acc}(0) = 0$ et $\tau_{acc}(t_{max}) = t_{max}$. On en déduit que pour tout $t \in [0, t_{max}]$:

$$\tau_{acc}(t) = acc \cdot t^2 + (1 - acc \cdot t_{max}) \cdot t$$

On vérifie en particulier que $\tau_0(t) = t$ pour tout t.

Avec cette fonction, on trouve maintenant la posture articulatoire de tout instant t d'une transition accélérée à partir du CSP associé à l'instant $\tau_{acc}(t)$ de la transition linéaire correspondante, à la première étape.

5.3.1.4 Résolutions impossibles

Comme tout CSP, l'ensemble des contraintes données par une description peut former un problème non résoluble. Nous donnons deux exemples ici.

Le premier cas problématique est celui des **dépendances circulaires**. Les variables du CSP sont liées par ses contraintes, et si un objet A dépend d'un objet B (on note $A \leftarrow B$), on ne peut instancier A avant d'avoir instancié B. Si dans le même CSP, B dépend aussi de A, on a la chaîne $A \leftarrow B \leftarrow A$ et on parle de dépendances circulaires. La relation de dépendance étant transitive[7],

[7] Transitivité de « $\leftarrow$ » : si $A \leftarrow B$ et $B \leftarrow C$, alors $A \leftarrow C$.

on a finalement que $A \leftarrow A$, à savoir qu'on doit instancier A avant d'avoir instancié A lui-même. De manière générale, on peut définir un graphe orienté des dépendances du CSP et la résolution est alors impossible si ce graphe est cyclique.

Par exemple, l'extrait de description suivant définit une chaîne de dépendances circulaires. Le coude du côté dominant est placé contre la paume du côté opposé, celle-ci étant elle-même positionnée contre le coude dominant. Par transitivité, les points dépendent d'eux-mêmes !

```
Place @EL(s) at @PA(w)
Place @PA(w) at @EL(s)
```

Pour qu'une description ait un sens et que les variables du CSP puissent être instanciées, il faut éviter de telles récursivités croisées et autres sources de cycles dans les relations de dépendance qu'elle contient, par exemple en s'appuyant sur les graphes des dépendances à chaque instant (qui peuvent être générés automatiquement), et en rejetant les graphes cycliques.

Le deuxième cas problématique est celui des **contraintes contradictoires**. De manière évidente, un site corporel ne peut pas être positionné en deux points différents. Cependant, des contraintes contradictoires peuvent se glisser de façon moins évidente dans un CSP. Par exemple, observons l'extrait suivant :

```
Orient DIR !head along UP+FWD
Orient NRM !head along FWD
```

La première ligne penche la tête à 45 degrés vers l'avant. La deuxième place le segment de la tête dans le plan formé par la ligne des épaules et du buste. Un tel CSP n'a aucune solution car :

- l'axe directeur du segment `!head` est colinéaire à `UP` (vers le haut) ;
- son axe normal est colinéaire à `UP+FWD` ;
- les axes directeur et normal d'un segment sont orthogonaux ;
- `UP` n'est pas orthogonal à `UP+FWD`.

Un dernier problème, d'une autre nature, est posé lorsqu'au contraire, la description linguistique offre trop de solutions au CSP. Nous mettons alors simplement en garde contre la tentation de surcontraindre d'un point de vue linguistique pour exclure une signation possible mais moins probable d'une description. En effet, nous insistons pour que ce qui est décrit reste pertinent d'un point de vue linguistique et que la description reste représentative du signe (voir la section 3.2.2) et non des contraintes articulatoires de squelette humain. Notamment, on ne décrit pas le relâchement d'un bras inutilisé car celui-ci n'est, justement, pas pertinent linguistiquement. Bien entendu, ces contraintes ne sont pas à ignorer tout au long du processus, mais c'est au système interprétant les

descriptions de les intégrer, pas aux descriptions de les faire apparaître.

Il reste ensuite à tester un système complet, à savoir consulter ses utilisateurs potentiels sur l'acceptabilité des productions, en leur soumettant une visualisation complète et non minimale d'un signeur. Ceci signifie encapsuler le programme défini ici, qui n'articule qu'un squelette, dans un programme d'animation d'avatar implémentant une peau et générant des animations dans un format vidéo. Au LIMSI, le programme OCTOPUS (fig. 5.9) en développement depuis quatre ans répond à ce cahier des charges [Bolot 06, Braffort 07a]. Il gère automatiquement le *skinning*, c'est-à-dire la tâche dont nous avons parlé qui consiste à reconstituer la surface et la texture d'une peau à partir de l'animation d'un squelette seul, ainsi que la coarticulation entre séquences, c'est-à-dire l'interpolation entre deux postures articulatoires.

FIG. 5.9 – Aperçu d'Elsi, le signeur virtuel d'OCTOPUS

Voyons maintenant comment nous envisageons d'utiliser le système complet dans le processus d'évaluation.

5.3.2 Évaluation

Pour conduire l'évaluation, nous proposons d'intégrer le processus de valorisation WEBSOURD-SNCF, qui consiste en la diffusion à l'écran d'annonces par un signeur virtuel dans plusieurs gares de France. Pour l'heure, des séquences d'animation fixes comme l'interdiction de fumer dans l'enceinte de la gare sont affichées. Nous montrons sa mise en place gare de l'est à Paris sur la figure 5.10. Créées par rotoscopie, elles ne sont pas le fruit d'une génération automatique quelconque. Mais d'autres annonces concernant des événements variables comme celles informant d'un numéro de train ou de voie sont prévues. Ces annonces, de type « phrases à trous », ont une structure-type et adaptent leur contenu en fonction de l'information du moment. Il faut alors une banque de signes correspondant par exemple aux noms des villes pour renseigner les provenances et les destinations

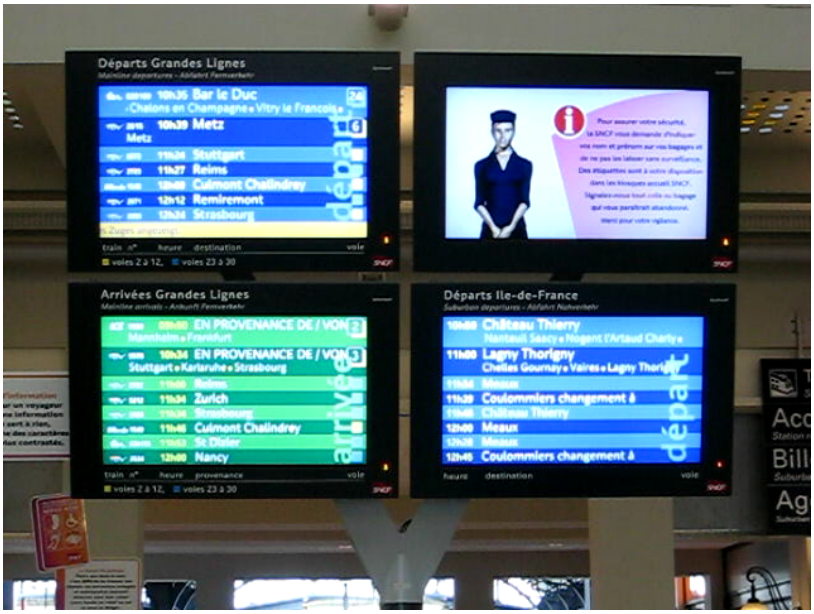


FIG. 5.10 – Système de diffusion d'annonces en gare SNCF par un signeur virtuel (Paris, gare de l'est)

dans les annonces.

Prenons les phrases à trous suivantes :

> Le train à destination de ville ne s'arrêtera pas en gare de ville.
>
> Le train numéro num s'arrêtera en gares de ville, ville, ... et ville.

En langue des signes, toutes les villes ci-dessus doivent être spatialisées et, qui plus est, de manière cohérente en cela qu'elle doivent se trouver dans un ordre en accord avec la direction prise par le train (ici, sans doute vers l'avant). Pour cette raison, un simple recours à une animation 3D prédéfinie ne peut convenir.

Une utilisation du modèle pour décrire les villes (avec toutes leurs dépendances contextuelles) peut résoudre ce problème, et c'est cette application que nous proposons pour évaluer notre modèle. Un programme simple peut répartir les villes sur un segment de droite pour en modéliser la spatialisation, et faire appel au logiciel OCTOPUS pour présenter la visualisation de l'animation générée par le programme mis en place à la section 5.3.

Les utilisateurs seront ensuite sondés sur la compréhensibilité de l'énoncé. Celui-ci pourra ne pas encore tout à fait « sonner signe », car nous n'avons pas discuté des problèmes de coarticulation entre les animations, et nous anticipons un certain aspect robotique à la signation. Dans le chapitre 6, nous proposons une perspective d'amélioration à ce propos.

Chapitre 6

Perspectives et conclusions

Ce dernier chapitre commence par ouvrir le modèle à des perspectives plus larges que la simple description ou génération lexicale qui a été le cœur de ce travail. Il résume ensuite l'exposé avant d'en formuler les dernières conclusions.

6.1 Perspectives

De même qu'à l'étape d'évaluation, nous nous intéressons aux deux racines du modèle : l'informatique et la linguistique. Nous verrons ses multiples perspectives et implications dans ces deux disciplines, et appuierons ainsi son caractère transversal et pluridisciplinaire.

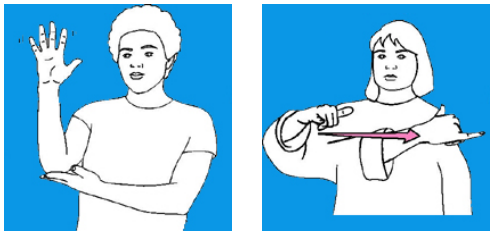
6.1.1 En linguistique

Nous nous sommes attachés à construire un modèle sur des bases linguistiques et non seulement des considérations informatiques. Par conséquent, ce modèle offre un point de vue propre sur les signes qui ouvre des perspectives de discussions d'ordre linguistique. Cette section en indique quelques unes, notamment quant à la complémentarité des visées et à la non-trivialité du niveau phonologique en langue des signes (française). Nous revenons aussi sur la place des langues des signes sur l'échelle linguistique représentée figure 2.6 page 19, et voyons en quoi Zebedee peut servir.

6.1.1.1 Recouvrement des visées

Le cœur de la théorie cuxaquienne est l'existence de deux visées pour les discours signés (illustrative et non illustrative, voir 2.1.3.1), propriété longtemps appelée « bifurcation des visées ».

Mais, s'il s'agit bien de deux visées opposées, elles sont complémentaires et on assiste en général à un recouvrement des visées illustratives et non-illustratives, à tous les niveaux : cognitif, fonctionnel et formel. Par exemple, les signes standard à fort taux d'iconicité tels que [ARBRE] ou [AVION] (fig. 6.1) s'intègrent tels quels dans une visée illustrative ; ils n'ont qu'à être regardés pour passer du concept générique à l'entité individuelle. Plus encore, Cuxac définit les *semi-TP*[1] qui utilisent un signe standard tout en engageant le corps à la manière d'un TP. Inversement, les *pseudo-TP* utilisent la gestuelle d'un TP sans investir le corps ni le regard pour abstraire un concept et le rendre générique. Toutes ces structures mélangent des aspects standard et des éléments de transfert. La liberté avec laquelle le signeur expérimenté remodèle les signes montre une grande souplesse de la langue, absente des modèles descriptifs précédents.



[ARBRE] [AVION]

FIG. 6.1 – Signes iconiques, utilisables tels quels en transfert

Zebedee ouvre la voie à ces réutilisations et créations de signes standard. En 3.3.8, nous évoquions que tout ce qui n'est pas explicitement spécifié dans une description est libre à la signation et réciproquement[2]. Ceci constitue une voie idéale vers la formalisation de ce type de recouvrement. Les semi-TP investissent tous les articulateurs du corps à l'exception de ceux nécessaires à l'identification du signe standard produit en même temps, dont la modification ferait perdre le sens du signe. Certains éléments de ce signe standard peuvent par contre disparaître au profit du TP si celui-ci se fait plus présent. On voit là trois niveaux de spécification, disponibles dans le modèle à contraintes :

- les éléments essentiels, insensibles au TP, à spécifier avec des contraintes nécessaires ordinaires ;
- les éléments facultatifs, éventuellement écrasés par le TP, spécifiables avec des influences contextuelles ;
- les autres, complètement disponibles pour une utilisation en TP, repérables dans les descriptions à l'absence de contrainte pesant sur eux.

Ces trois niveaux sont en réalité une conséquence du continuum existant à tous les niveaux entre la

[1] TP = transfert personnel, voir 2.1.3.2.
[2] Voir le début de la section 3.3 et l'équivalence $\Box S(p) \Leftrightarrow D(p)$.

grande iconicité, illustrative, et le générique, visée non-iconicisatrice. Nous avons maintenant des outils pour rendre compte de cette propriété fondamentale.

6.1.1.2 Origine cognitive des signes

Le modèle peut, comme le font majoritairement les autres approches commentées lors de l'état de l'art, décrire uniquement la réalisation signée. Cependant, il est clair à ce stade que sont encouragées les descriptions de l'intention, incluant un maximum de la démarche de construction des signes décrits. La première raison est de faire apparaître les dépendances de construction. Grâce à ces dépendances, tout changement du signe, dû à un contexte d'utilisation particulier ou une liberté prise par le signeur de déformer un élément de la description, ne requiert plus la révision du reste de la description. Les éléments dépendant de l'élément modifié verront leur valeurs modifiées en fonction.

Par exemple, avec une description de [BALLON] dans laquelle un vecteur d'arc est donné comme l'opposé ou le symétrique de l'autre[3], changer le premier vecteur aura pour effet naturel de changer le second. En revanche, cette dépendance est absente si chaque arc est défini séparément, et on traduit alors le fait que le signeur pense deux arcs séparés pour définir le signe. Il pourra alors jouer sur deux arcs pour déformer le ballon, mais il est possible que cela ne soit pas linguistiquement pertinent.

Dans cette optique, chaque primitive et chaque valeur peut, à l'écriture d'une description, être discutable. Les choix reposent sur des arguments à caractère cognitif et ne sont, en général, pas anodins. Selon (entre autres choix) les dépendances mises en jeu, les influences contextuelles et autres déformations que pourra subir le signe auront des effets variables. Justement, c'est en envisageant la plus grande diversité de contextes d'utilisation que l'on pourra faire les bons choix à la description d'un signe. Certains poseront sans doute des problèmes loin d'être triviaux et mériteront d'être discutés longuement par les linguistes. L'apport majeur du modèle est justement, selon nous, de fournir les outils pour discuter.

Cuxac postule qu'un signe émerge par périphrase et grande iconicité qui se lexicalisent en lissant la forme et en désactivant (cognitivement) les éléments morphémiques d'origine. Il continue : « ces valeurs devenues sémantiquement dormantes peuvent toujours être réactivables » [Cuxac 04]. Ceci valide en partie l'approche du modèle qui consiste à garder trace de toute démarche de construction (dépendances, influences contextuelles...). Figer la réalisation d'un signe en valeurs paramétriques ne lui permet plus de réactiver ces « valeurs dormantes ». Dans la mesure où ils

[3] C'est ce que nous proposons page 110, aux lignes Q et R de la description.

font partie intégrante de l'utilisation du signe en discours, ces éléments sont pour nous légitimes au niveau de leur description, quand bien même ils seraient d'un niveau cognitif supérieur.

Nous terminons cette série de remarques en revenant sur la possible « égalité structurelle » de [CICATRICE] et de [CHIRURGIE] mentionnée page 121, contrastant avec la simple « inclusion structurelle » de [GARÇON] dans [CICATRICE]. Idem pour [CICATRICE] et [SE FAIRE OPÉRER]. Nous voulons souligner que par ces observations, les descriptions de [CICATRICE], [CHIRURGIE] et [SE FAIRE OPÉRER] montrent une similitude plus grande que celle entre [CICATRICE] et [GARÇON]. En rapportant cette comparaison à la sémantique de ces signes, on s'aperçoit que le modèle rejoint tout à fait la fascinante conjecture déjà formulée par Cuxac à plusieurs reprises et qui s'impose ici encore : « les langues des signes sont des langues moins marquées, en position d'analyseurs privilégiés de la faculté de langage » [Cuxac 03]. Les modèles paramétriques ou à traits montrent une différence plus grande entre [CICATRICE] et [CHIRURGIE] car le contact corporel est un élément plus fort que sa motivation.

6.1.1.3 Nature des signes et nivellement linguistique

La section 2.2.2 introduisait les notions de niveaux linguistiques phonologique, morphologique et lexical. Nous avons dit que la langue des signes ne présentait pas de découpage clair de la sorte. Nous nous étions même posés le défi de ne pas prendre parti quant à l'existence d'un palier phonologique à partir duquel on aurait ensuite construit un niveau morphologique en décrivant par exemple les morphèmes paramétriques recensés dans [Cuxac 00]. Nous montrons ici comme ce cadre plutôt large nous a conduits à élaborer un modèle difficile à situer sur cette grille de paliers.

D'abord, le modèle permet à l'intérieur même d'une description de signe de faire référence à des éléments contextuels du discours. Dans le cas d'arguments (cf. 4.4.2), un contexte est même absolument nécessaire sans quoi le signe ne peut même pas être produit, seulement décrit en fonction de lui. Cette pénétration de ce qui relève traditionnellement d'une couche sémantique dans ce qui se voudrait de l'infra-lexical remet clairement en cause la possibilité d'appliquer le modèle à couches à notre système descriptif. De plus, nous avons discuté plus haut des considérations cognitives nécessaires à l'élaboration de descriptions pertinentes et réactives aux déformations intentionnelles. Ceci est également nouveau en comparaison avec les langues vocales. La description de leurs unités lexicales ne font nullement appel à ce genre de considération.

Ceci dit, peut-on trouver un parallèle aux niveaux phonologique et morphémique, notamment dans l'optique de constituer un « signaire[4] » d'unités lexicales ?

[4] Un dictionnaire de signes, en somme.

On pourrait se poser la question d'un palier morphémique avec les macros-contraintes (4.5.2), regroupant des primitives au regard de motivations d'un plus haut niveau de construction des signes. Les primitives articulatoires (4.3.1) seraient alors les phonèmes qui les composent. Ces deux parallèles sont faux. D'abord, rien ne prouve que les macros correspondent nécessairement à des morphèmes linguistiques. En effet, un morphème n'est pas un simple regroupement d'unités d'un plus bas niveau, mais un regroupement porteur d'un sens. Si les macros représentent bien un groupe de contraintes venant d'une même motivation articulatoire, il ne va pas de soi que cette motivation soit porteuse d'une sémantique pour les locuteurs de la langue. Par exemple, « tendre le petit doigt » peut faire l'objet d'une macro car il s'agit d'une motivation articulatoire pertinente ; cela n'en fait pas un morphème. Ensuite, voir les primitives comme des phonèmes ne permet pas le juste parallèle avec les phonèmes traditionnels, loin s'en faut. Ici, plusieurs primitives sont données simultanément et concourent à la description d'un même instant de la production finale. Au contraire en linguistique, les phonèmes se succèdent dans le temps. Si l'on reprend le dessin de la figure 4.2, les primitives dans une macro se déroulent sur l'axe des spécifications, tandis que les phonèmes d'une langue vocale se déroulent sur l'axe temporel.

À plus juste titre, on peut alors faire le rapprochement entre nos unités temporelles formant les séquences temporelles de description et la juxtaposition sur l'axe temporel de phonèmes en langue vocale pour décrire les productions orales. Seulement, les postures-clés et les transitions ne sont pas en nombre limité comme le sont les symboles de l'IPA[5] de la phonologie des langues vocales. Chaque unité est une conjonction libre de contraintes aussi nombreuses que nécessaire, et il n'existe donc pas de liste fermée de ces unités, ce qui contraste avec le point de vue phonologique classique. On peut pourtant difficilement les classer au niveau phonétique (articulatoire) car elles ne sont pas des descriptions brutes : les segments non pertinents n'étant pas contraints, on regroupe en quelque sorte déjà des ensembles d'allophones (voir 2.2.2 page 18) en une même unité.

En résumé, les contraintes primitives et les macros-contraintes sont toutes d'un niveau articulatoire et ne se situent sur un palier ni phonémique ni morphémique. De plus, nous ne voyons pas de parallèle concluant au niveau du phonème à première vue. A-t-on là, si l'on adhère au modèle, un argument en faveur de l'absence d'un niveau phonologique dans les langues des signes ? Cette question, importante d'un point de vue linguistique, reste ouverte et ne fait toujours pas consensus. Boutora par exemple, dans ses travaux en cours, s'intéresse à cette question pour le cas des configurations [Boutora 06].

[5] *International phonetic alphabet* = alphabet phonétique international

6.1.1.4 Naissance de « constructeurs » morphémiques ?

La suite s'intéresse de plus près au niveau morphémique. Cuxac fait une observation majeure sur la question d'une morpho-phonétique des signes dans [Cuxac 04]. Il explique (§3.6) :

> « Contrairement à ce qui se passe dans les langues vocales, en LSF, les éléments sémantiques minimaux contribuant à la construction générale du sens s'organisent à un niveau inférieur à la forme minimale de réalisation, c'est-à-dire au niveau où se règlent l'essentiel des problèmes posés par la forme. Il s'agit, si l'on veut, d'une phonétique entièrement dépendante d'une organisation morphosémantique qui lui préexiste en ce sens qu'elle intervient nécessairement (substantiellement) en aval dans le processus de stabilisation des formes minimales. »

Cuxac inverse le lien entre unités de sens et unités de réalisations. Pour lui, le sens précède la réalisation du signe et toute unité minimale de réalisation du signe est porteuse d'un sens. Avec le modèle, peut-on définir des « unités minimales de réalisation » et tenter de statuer sur cette hypothèse cuxaquienne d'une composition strictement morphémique des signes en LSF ?

Nous avons vu que les macro-contraintes ne sont pas au bon niveau et pas suffisantes pour ce faire : il s'agit seulement de la représentation de motivations groupées de primitives articulatoires ne pouvant s'étaler sur plusieurs unités temporelles à la fois. Par exemple, le morphème (s'il en est) « fermeture de la main dominante », faisant passer celle-ci d'une configuration manuelle de départ proche du « 5 » à une autre en 's', s'étale sur trois unités temporelles dont une transition intermédiaire. La dernière perspective que nous proposons dans cette section est la définition d'une nouvelle notion : le **constructeur**.

Un constructeur serait un groupement de spécifications dont chacune serait positionnée librement sur une unité temporelle. À la manière d'une macro, on définirait un constructeur au préalable pour y faire appel dans les descriptions. Ceci dit, l'appel à un constructeur se ferait hors des spécifications d'unités temporelles car leur niveau de description leur est supérieur. Si l'on se réfère à la description donnée en exemple ([BALLON] page 110), on placerait l'appel entre les lignes D et E ou en fin de description, en tout cas hors de tout bloc `KEY_POSTURE` ou `TRANSITION`.

Pour illustrer cette notion, nous présentons un constructeur comme un calque sur lequel on écrit des fragments de description en utilisant potentiellement les deux axes (axe des spécifications et axe temporel[6]). Ensuite, l'utilisation d'un constructeur pour une description place ce calque sur le reste des spécifications, ce qui a pour effet de compléter le dessin « par transparence ». Sur la figure 6.2, nous montrons un constructeur pour le mouvement d'une foule (main `$m` en « 5 »,

[6] Voir aussi fig. 4.2.

passant la transition en pianotant des doigts), et un autre pour le transfert d'une personne debout (index tendu vers le haut). Ces deux constructeurs seraient deux morphèmes de [SOCIÉTÉ][7]. Pour en construire la description, on peut utiliser le constructeur « foule » du côté `s` et le constructeur « personne » du côté `w` comme le montre le troisième dessin de la figure. Il reste néanmoins à placer les mains et indiquer le mouvement circulaire de la foule.

L'intérêt serait de pouvoir empiler plusieurs de ces calques pour composer des descriptions structurées non plus au niveau articulatoire mais à un niveau supérieur : celui des constructeurs. Outre la répartition possible sur plusieurs unités temporelles, nous soulignons la différence de nature entre constructeur et macro en précisant qu'un constructeur peut aussi inclure des modes de spécification (avec `HERE` ou `KEEP`) ou encore imposer un certain nombre d'unités temporelles, pourquoi pas leur durée... Ces éléments de spécifications sortent du rôle purement articulatoire et instantané des macro-contraintes ou des primitives.

Revenons à l'hypothèse de la composition morphémique. Pour la vérifier, on devra définir dans un premier temps un constructeur pour chaque morphème recensé de la langue[8]. À partir de cette liste :

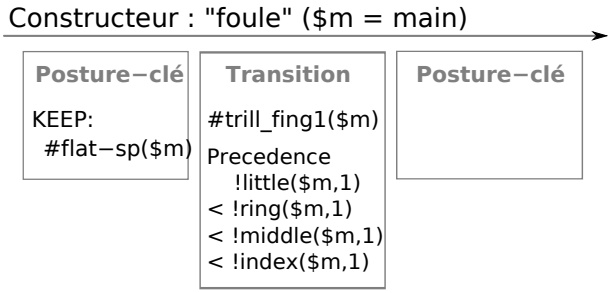
- si tout signe est le fruit d'une description ne faisant appel qu'à des constructeurs (i.e. d'un empilement de calques sans dessin supplémentaire), l'hypothèse sera validée[9] ;
- si au contraire le recours à des primitives de spécification reste nécessaire pour certains signes, l'hypothèse sera réfutée, ou le lien entre constructeur et morphème remis en question.

Quoi qu'il en soit, si on attribue une qualité morphémique aux constructeurs, notons que celle-ci permet la spécification sur les deux axes. Non seulement la juxtaposition dans le temps comme pour les morphèmes traditionnels, mais également la composition de morphèmes simultanés seraient possibles.

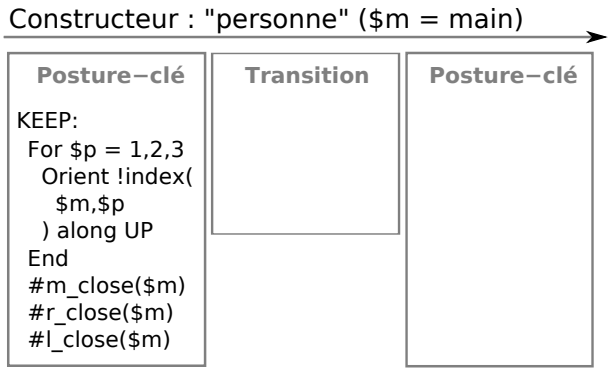
Si la linguistique se saisit de toutes ces questions et valide les tendances formulées dans cette section, nous aurons montré un grand potentiel d'adéquation du modèle avec la théorie de l'iconicité, ce qui pour nous constitue un élément positif d'appréciation. Le caractère non limité de ces réflexions donne au modèle de passionnantes perspectives comme base de futures recherches en linguistique.

Dans la section suivante, nous en proposons de nouvelles, relevant cette fois du domaine informatique.

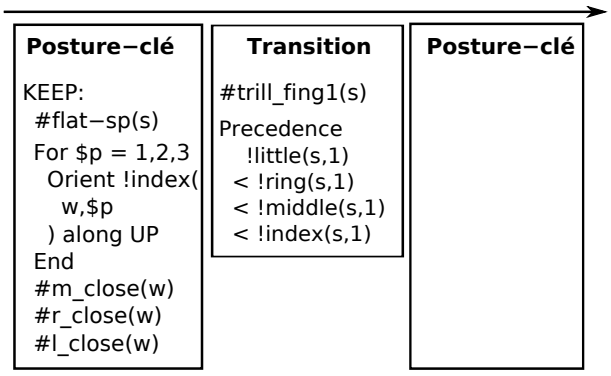
[7] Voir page 68.
[8] Cuxac en a fourni une première liste dans [Cuxac 00], mais toujours sur une grille paramétrique.
[9] Étude à préciser sans doute : qu'en est-il des alias, des dépendances contextuelles, des durées des unités... ?



(a) mouvement d'une foule



(b) une personne debout



(c) superposition des deux calques

FIG. 6.2 – Les constructeurs vus comme des calques

6.1.2 En informatique

Avant de conclure, nous citons quelques perspectives d'amélioration de Zebedee et d'utilisation en informatique, puis terminons sur une perspective à plus long terme mais d'importance majeure sur un plan socio-linguistique.

D'abord, nous proposons une application, à portée de main vu ce qui a déjà été étudié dans la section d'évaluation plus haut : un dictionnaire collaboratif de signes présentant des vidéos d'animation générées à partir de descriptions issues du modèle. Il s'agirait d'un serveur stockant des descriptions et muni d'une interface wiki par laquelle au lieu de fournir, d'éditer ou de remplacer des vidéos, on éditerait seulement les descriptions et les animations seraient regénérées côté serveur pour actualiser la vidéo du signe concerné.

Ensuite, nous trouverions intéressant d'exploiter davantage l'aspect temporel du modèle et notamment d'engager des études sur le dynamisme des signes. L'hypothèse empirique formulée au chapitre 4 selon laquelle les transitions seraient paramétrées par un unique coefficient d'accélération mérite d'être étudiée. Elle est pour l'instant uniquement basée sur l'observation de Liddell et Johnson d'une distinction entre les mouvements « retenus » et les mouvements « balistiques », regroupés sur un continuum en utilisant des fonctions polynômiales quadratiques d'ajustement temporel sur les transitions. On pourrait, par une analyse plus fine de corpus issus de procédés de capture de mouvement par exemple, faire émerger de nouvelles fonctions de dynamisme ou trouver des indices quant aux durées à donner aux postures-clés.

À propos du dynamisme, le modèle devrait également être utile à l'étude de Segouat sur la coarticulation entre les signes démarrée au LIMSI. Il n'est pas limité aux séquences spécifiant des signes lexicaux ou de transfert (sur lesquelles nous avons surtout insisté), mais peut spécifier des productions signées de n'importe quelle durée, comprenant éventuellement plusieurs signes du lexique ou structures de transfert. La fin et le début d'un signe sont représentés par des postures-clés ; la coarticulation se fait dans une transition pour l'instant supposée neutre. Quel dynamisme précis lui donner ? Nous proposons que les types de dynamisme qui seront relevés sur corpus soient confrontés aux natures des postures-clés qui entourent la transition : durée, facteur d'accélération ou autre spécification de dynamisme, etc. On pourra alors démontrer une réutilisation des outils existants du modèle ou au contraire mettre en évidence un nouveau type distinct de transition de coarticulation.

Des résultats utiles existent dans le domaine du geste coverbal [Pelachaud 04], où l'on trouve des corpus de mouvement en fonction des émotions, des relâchements, des profils expressifs des sujets... Dans [Heloir 06, Heloir 08], on trouve des mesures sur la gestuelle des langues des signes. La

qualité expressive et le style d'une signation déforment son profil temporel en modifiant les durées de ses phases de mouvement et de retenue. Heloir met également en évidence un phénomène de « proximalisation/distalisation », désignant la modification de l'amplitude des mouvements lorsqu'ils subissent un changement de qualité expressive. Ce type de déformation n'a pas été traité ici, mais son intégration ne peut que contribuer à un aspect naturel des mouvements générés.

Une fois la production de signes décrits avec le modèle jugée acceptable, la prochaine étape de modélisation est celle d'une représentation du contexte et de son interaction avec les signes utilisés. L'objectif à terme est la construction d'un module capable de déclencher la production d'un signe tout en mettant à disposition le contexte de signation, indispensable à l'évaluation des influences et des arguments du signe (voir 4.4) [Braffort 07c]. Il comprend non seulement l'espace du signeur dans lequel sont placés les différents actants du discours, mais également des propriétés de ceux-ci, et des indications sur leur rôle sémantique. L'objectif de double-conformité linguistique et informatique doit bien entendu rester posé.

Cette thèse s'est donné comme support applicatif la synthèse, ou génération automatique, de signes. À une entrée représentant un signe est associée une séquence d'animation vidéo. On veut aussi s'intéresser au schéma inverse, c'est-à-dire un système informatique dont l'entrée serait une vidéo et la sortie le signe réalisé sur cette vidéo. Ce problème de reconnaissance automatique de signes se décompose en plusieurs niveaux. À la différence de la capture de mouvement, les variations observées à l'image ne sont pas a priori liées à un articulateur du corps en particulier ; seuls les changements de couleur des pixels peuvent être mesurés dans un premier temps. Le repérage des différents contrastes de chaque image et la connaissance d'indices sur l'emplacement relatif du visage et des mains ou sur les probabilités de mouvement des articulateurs permettent de repérer en partie l'activité des mains, du visage, du corps, etc.

Nous soumettons l'idée que notre modèle peut également contribuer à accomplir la reconnaissance de signes. Après avoir découpé l'animation en une séquence d'unités temporelles en observant ses variations, certaines spécifications peuvent être reformulées à partir des positions articulatoires mesurées. Toutefois, aussi bien en capture de mouvement qu'en analyse d'image, un certain nombre de contraintes ne pourront être trouvées, en raison d'un manque de capteurs ou d'une propriété non décelable à l'image comme l'orientation d'un articulateur caché (occultation du visage, mains l'une devant l'autre). Un certain nombre de spécifications superflues pourront aussi être formulées alors qu'elles n'apparaissent pas dans la description du signe à reconnaître, comme l'emplacement d'une main non pertinente. On gagne tout de même à confronter les mesures observées aux descriptions connues car toute observation non permise par une description connue rend impossible la recon-

naissance de ce signe. Si ces éliminations ne suffisent vraisemblablement pas à une reconnaissance automatique dans tous les cas, elle peuvent au moins aider à la tâche fastidieuse qu'est l'annotation de corpus en proposant la liste des signes d'une base candidats aux séquences à annoter.

Enfin, nous voudrions mentionner une dernière perspective de notre modèle, à plus long terme cette fois. Le projet LS-Script [Garcia 06, Garcia 07] a pour objectif l'élaboration d'une forme graphique pour une écriture de la LSF. Premièrement, il s'intéresse aux aspects géométriques des signes comme les symétries comprises dans les signes. Or, la géométrie a une place primordiale dans le modèle et fait apparaître en tant que telles les symétries, les plans, les directions, etc. Deuxièmement, il s'attache à déterminer ce qui est « essentiel » à un signe plutôt que ce qui pourrait être qualifié de « périphérique ». Pour cause, il faut un système performant, que l'écriture permette la prise de notes rapide et concise, par exemple en situation pédagogique d'apprentissage en langue des signes. Or, le modèle faisant apparaître toute une structure de dépendances et de constructions et non une simple liste de valeurs, la finesse des observations qu'il permet donne un moyen privilégié de conduire ces investigations. Une forme graphique ouvrirait alors également la voie à des logiciels d'édition pour une numérisation de l'écriture des signes, à des logiciels pédagogiques... Pour plusieurs raisons, ce modèle se montre donc un candidat idéal pour nourrir les réflexions sur les possibles formes écrites des langue des signes, et c'est avec beaucoup d'enthousiasme que nous projetons des collaborations en ce sens.

6.2 Résumé et conclusion

Cette thèse s'est attachée à fournir un nouveau modèle de représentation des signes des langues des signes, respectueux et représentatif de celles-ci.

Elle a d'abord présenté le contexte du travail. Après avoir présenté les langues des signes, comparé leurs propriétés avec celles des langues en général et donné leur situation en société ainsi que des éléments linguistiques théoriques, nous avons annoncé sa transversalité sur les deux domaines que sont l'informatique et la linguistique. Nous avons ensuite posé les défis que lance l'élaboration d'un modèle de représentation des signes, guidés par la volonté d'un cadre le moins limité possible par des hypothèses trop fortes ou trop restrictives.

Un chapitre complet est dédié ensuite à l'analyse des systèmes descriptifs existants. Nous les avons d'abord présentés classés en fonction de leur approche pour en dresser un bref état des lieux, puis en fonction des problématiques dégagées pour détailler leurs caractéristiques. Dans le même ordre, nous avons repris la série des problématiques étudiées pour analyser les moyens existants et

en repérer les lacunes. Cette démarche originale d'analyse nous a permis de proposer une réponse par problématique, ce qui a constitué un cahier des charges pour le modèle.

Nous avons pu entamer la construction d'un modèle neuf, basé sur des propriétés spatio-temporelles et offrant toutes les propriétés requises par le cahier des charges. Il fait usage de contraintes géométriques, liées à un squelette et réparties sur un axe temporel en unités de description. Les spécifications font apparaître des réalités cognitives et ne sont ni trop contraignantes, ni trop peu. La souplesse qu'il offre aux signes décrits lui donne en particulier la faculté nouvelle de décrire le comportement des signes dans différents contextes de signation.

Le modèle repose sur deux domaines scientifiques, et un chapitre propose pour chacun un protocole d'évaluation. La plupart des implémentations nécessaires à ce protocole sont d'ores et déjà en cours de réalisation, notamment l'intégration du modèle à la plate-forme d'animation d'avatar et à la base logicielle de signes du laboratoire.

Enfin, le dernier chapitre donne un certain nombre de perspectives et de pistes pour une utilisation plus large de ce modèle. Il met en évidence la généricité de son emploi, comme support d'argumentation linguistique aussi bien que comme format de donnée dans plusieurs applications informatiques.

Les deux disciplines qui fondent ce travail nous ont conduits à mener de front des réflexions particulièrement diverses tout au long de cet ouvrage et donnent au modèle une double assise scientifique que nous tenons à souligner.

Tout au long de nos travaux, nous nous sommes efforcés de mettre un grand nombre de concepts et d'arguments linguistiques en avant afin de ne procéder à aucune simplification abusive. La linguistique a ainsi été mise au service de l'informatique, et nous pensons que le modèle proposé, pourtant d'abord motivé par des applications informatiques, peut à présent nourrir les réflexions linguistiques sur les signes et leur nature en retour. En cela, nous avons évité l'approche du compromis pour poser et relever le défi de la convergence des modèles.

Un recul sur ce travail et sur ce point de rencontre entre perspectives scientifiques permet d'envisager de multiples applications informatiques pour une technologie au service de la langue sourde dans tous les domaines du quotidien. Avec les moyens de se déployer, cette langue riche et vivante se sentira peut-être plus libre de se diffuser, de se pratiquer et de cohabiter.

...

Remerciements

Maintenant que nous avons conclu la conclusion, cette section... non, ouf. Lisez les annexes si vous voulez, moi j'arrête. Les *créditses* sont les seules pages où on écrit ce qu'on veut, alors je compte bien saisir la perche.

Premièrement, je veux dire une évidence...

Cet ouvrage n'est pas le fruit de mon seul travail, et surtout pas d'un travail seul. J'ai bénéficié d'appuis et d'encouragements généreux auxquels je veux rendre un modeste hommage ici.

Le premier s'adresse au Limsi et à l'équipe Geste qui m'a accueilli, et tout particulièrement ma directrice. En plus de la bonne humeur qu'elle inspire à tous même absente, je lui dois une disponibilité sans faille et des conditions de travail idéales. Elle a favorisé de nombreux échanges dont certains se sont révélés essentiels à mon travail, sans jamais abandonner humour et convivialité. Dès le début de mon chemin, je me suis senti aussi soutenu que libre de me tromper, et assurément, je dois à ce début de parcours mon envie de le poursuivre. Linguistes, informaticiens, sourds, étudiants, conférenciers, on y croise bien du monde et les contacts sont tous enrichissants.

Ce fut une équipe de choc, que je ne saurai oublier. Amitié, tolérance, pots, rires, chouilles et projets s'y mêlent, et c'est dans une atmosphère trop inoubliable de sa race que j'ai fait la rencontre de personnes de qualité. Je refaisais le monde avec Cyril et ses fusées quand « il m'empêchait » de travailler (à ton tour Max ?) ; j'observais l'humanisme d'Annick dont le conseil est aussi précieux que ses confitures... Personne n'a su mettre à mal la chaleur des relations qui y sont entretenues — en réalité, personne n'ose même essayer. Finalement, c'est tout le « couloir 502 » qui fera partie du souvenir : Laurence et ses gâteaux, meilleurs encore quand ils sont prétendus râtés, Nicofo, Nicofé, Antoine, Guillaume, Flavien, Jérémie, Patrick, J.M. Vee, les Pilou et autres départs d'avant, et puis toutes les arrivées plus récentes.

Merci aussi à ceux sans qui personne ne pourrait lire ce baratin. Merci à Anne qui, après avoir accompagné mon entrée en thèse, en accompagne aujourd'hui la sortie en présidant mon jury, et à Sylvie qui a accepté de la seconder. Merci à Patrice qui a accepté la tâche un peu périlleuse de relire mon tapuscrit. Sa rencontre a été chaleureuse et c'est avec plaisir que je l'ai recroisé au fil de ces trois ans. Merci à Bob (REJ) de m'avoir riviouvé par dessus l'Atlantique, et avec qui j'espère que ma collaboration commence plus qu'elle ne se termine.

Je dois une assez fière chandelle à la technologie, qui a presque épargné mon travail alors qu'elle frappe celui d'autres doctorants après cent pages au seul motif d'un oubli de sauvegardes multiples. Aussi j'exprime ma compassion à leur égard. Les logiciels libres que sont entre autres Linux, Lyx, LaTeX et Inkscape peuvent se réjouir : je referai immanquablement appel à leurs bons et loyaux services. De même, les disques et divers fichiers audio ont apporté comme à toute thèse une contribution plus ou moins directe à l'ouvrage et méritent certainement un mot d'affection ici.

À présent quelques remerciements à adresse unique, sans ordre particulier : Myriam pour sa chambre et donc sa contribution, Paris pour son cadre, Sandrine et Jérémie pour leurs mains-mais-pas-que (voir 3.2.5 page 45), Annelies encore, Prisca, Talie, Vee, Jan et Dicoll pour la stabilité rassurante de leur amitié même à l'épreuve du temps et de la distance, Myriam pour la stabilité rassurante de son amitié même à l'épreuve de la cohabitation et de la proximité, Julien pour la confiance respectueuse exceptionnelle qu'on a échangée et de qui j'ai aussi appris, et *Hark Who's Talking!* née pendant cette rédaction, dont Mrs. C, Sarah, Charles, Edward, Madge, Angela, the nurse, et mon complice Rupert. Bloody amateurs. Je n'oublie pas mes amis en mousse, singes, ours et autres créatures, les bisous qui m'ont réchauffé, ni bien sûr mes amis et ma famille qui en dépit de tout restent mes amis et ma famille. Bravo.

Enfin, je remercie la langue des signes pour le point de vue unique qu'elle donne sur le monde. Culture et langue sourdes ne sont pas une infirmité et son demi-remède. Elles sont de ces différences qui ne font pas moins que la richesse des échanges humains.

Bien à vous tous,

...and thank you and good night.

Bibliographie

[Badler 96] N. I. Badler, D. Tolani (1996). *Real-time inverse kinematics of the human arm*. Presence vol. 5, issue 4. Pages 393–401.

[Battison 78] R. Battison (1978). *Lexical borrowings in American Sign Language*. Silver Spring.

[Bébian 25] A. Bébian (1825). *Mimographie, ou essai d'écriture mimique, propre à régulariser le langage des sourds-muets*. L. Colas.

[Bolot 06] L. Bolot, A. Braffort, M. Filhol (2006). *ELSI balbutie ! Vers une plateforme d'animation d'avatar signant*. Workshop sur les Agents Conversationnels Animés (WACA) 2006. Toulouse, France.

[Bonnal 06] F. Bonnal-Vergès (2006). *Étymologie et langue des signes francaise (LSF)*. Bulletin de linguistique appliquée et générale 31, pages 149–164. ISSN 0758-6787. Presses universitaires franc-comtoises, Besançon.

[Boulic 01] R. Boulic, P. Baerlocher (2001). *Cinématique inverse pour personnages 3D, solutions analytiques et variationnelles*. Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique, pages 83–98. ISSN 1266-0175.

[Boutet 01] D. Boutet (2001). *Approche morpho-dynamique du sens dans la gestuelle conversationnelle*. Thèse de doctorat, Université Paris 8.

[Boutora 03] L. Boutora (2003). *Étude des systèmes d'écriture des langues vocales et des langues signées*. Mémoire de DEA, Université Paris 8.

[Boutora 06] L. Boutora (2006). *Une perception catégorielle des configurations manuelles de la LSF ? Définition et caractérisation des unités de l'inventaire des configurations*. Syntaxe, interprétation, lexique des langues signées. Lille.

[Bouvet 97] D. Bouvet. *Le corps et la métaphore dans les langues gestuelles — À la recherche des modes de production des signes*. Sémantiques. L'Harmattan.

[Braffort 96a] A. Braffort (1996). *ARGo : an architecture for Sign Language recognition and interpretation.* Proceedings of Gesture Workshop on progress in gestural interaction, pages 17–30. ISBN 3-540-76094-6.

[Braffort 96b] A. Braffort (1996). *Reconnaissance et compréhension de gestes — Application à la langue des signes.* Thèse de doctorat, Université Paris 11.

[Braffort 06] A. Braffort, F. Lejeune (2006). *Spatialised semantic relations in French Sign Language : toward a computational modelling.* Gesture in human-computer interaction and simulation, LNCS/LNAI vol. 3881. Selected Revised Papers of GW 2005.

[Braffort 07a] A. Braffort, M. Filhol (2007). *The first steps of a signing avatar project.* International Society for Gesture Studies conference 2007 : Integrating Gestures. Chicago, USA.

[Braffort 07b] A. Braffort, L. Bolot, M. Filhol, C. Verrecchia (2007). *Démonstrations d'Elsi, la signeuse virtuelle du Limsi.* TALN 2007, TALS, Toulouse, France.

[Braffort 07c] A. Braffort, P. Dalle (2007). *Sign Language applications : preliminary modeling.* Universal access in the information society vol. 6, no. 4, Feb. 2008. Springer.

[Brugeille 01] J.-L. Brugeille (2001). *Grille d'évaluation de la LSF en milieu scolaire.* Journée d'études « Recherches sur les langues des signes », Toulouse.

[Brugeille 06] J.-L. Brugeille, J. Dalle, M.-P. Kellerhals (2006). *Une expérience d'utilisation de forme graphique dans la scolarité des enfants sourds : méthodes de travail et premières observations.* Syntaxe, interprétation, lexique des langues signées. Lille.

[Chételat 08] É. Chetelat-Pelé (2008). *Annotation des gestes non manuels : description des mouvements des sourcils.* TALN. À paraître.

[Companys 98] M. Companys, F. Tourmez (1998). *Dictionnaire 1200 signes français–LSF.* Éd. Monica Companys.

[Crombie 04] K. Crombie-Smith, W. Edmondson (2004). *Computational synthesis of sign.* TISLR, Barcelona.

[Cuxac 00] C. Cuxac (2000). *Langue des signes française — les voies de l'iconicité.* Faits de langue, vol. 15-16. Ophrys.

[Cuxac 01] C. Cuxac, A. Braffort, A. Choisier, C. Choisier, C. Collet, P. Dalle, I. Fusellier, R. Gherbi, G. Jausions, G. Jirou, F. Lejeune, B. Len-

seigne, N. Monteilliard, A. Risler, M.-A. Sallandre (2001). *Projet LS-Colin : quel outil de notation pour quelle analyse de la langue des signes ?*. Journée d'études « Recherches sur les langues des signes », Toulouse.

[Cuxac 02] C. Cuxac, A. Braffort, A. Choisier, C. Choisier, C. Collet, P. Dalle, I. Fusellier, R. Gherbi, G. Jausions, G. Jirou, F. Lejeune, B. Lenseigne, N. Monteilliard, A. Risler, M.-A. Sallandre (2002). *Projet LS-Colin : rapport de fin de recherche*. Programme cognitique « Langage et cognition ». Projet LACO 39.

[Cuxac 03] C. Cuxac (2003). *Une langue moins marquée comme analyseur langagier : l'exemple de la LSF*. La nouvelle revue de l'AIS 23, pages 19–30.

[Cuxac 04] C. Cuxac (2004). *Phonétique de la LSF : une formalisation problématique*. La linguistique de la LSF : recherche actuelles. Silexicales, vol. 4, France.

[Dalle 01] P. Dalle, B. Lenseigne, C. Hudelot (2001). Apports d'un système d'analyse d'images pour l'étude de la LSF. Journée d'études « Recherches sur les langues des signes », Toulouse.

[Dalle 06] P. Dalle (2006). *High level models for sign language analysis by a vision system*. Proceedings of LREC 2006, Workshop on the representation and processing of Sign Language : lexicographic matters and didactic scenarios, pages 17–20. Gênes, Italie. Evaluations and Language resources Distribution Agency (ELDA).

[Da Rocha 03] A. Da Rocha Costa, G. Pereira Dimuro (2003). *SignWriting and SWML — Paving the way to Sign Language processing*. TALN 2003, France.

[Dubuisson 96] C. Dubuisson, S. Leclerc, S. de Maisonneuve (1996). *Les graphes conceptuels : un outil de représentation des langues signées*. Actes de l'association canadienne de linguistique ACL-1995. Montréal, pages 121–129.

[Elliott 04] R. Elliott, J. R. W. Glauert, V. Jennings, J.R. Kennaway (2004). *SiGML notation and SiGML Signing software system*. Proceedings of LREC 2004, Workshop on the representation and processing of Sign Languages. Portugal.

[Filhol 06] M. Filhol (2006). *Une approche géométrique pour une modélisation des lexiques en langues signées*. In proceedings of TALN-Recital 2006. Belgium.

[Filhol 06b] M. Filhol, A. Braffort (2006). *A sequential approach to lexical sign description.* Second Workshop on the Representation and Processing of Sign Languages : Lexicographic matters and didactic scenarios. LREC 2006, Italy.

[Filhol 06c] M. Filhol, A. Braffort (2006). *Sign Description – How geometry and graphing serve linguistic issues.* Theoretical issues on Sign Language research, TISLR 9. Brasil.

[Filhol 07] M. Filhol, A. Braffort, L. Bolot (2007). *Signing avatar : say hello to Elsi !.* Gesture Workshop 2007, Lisbon.

[Fusellier 04] I. Fusellier-Souza (2004). *Sémiogenèse des langues des signes — Étude de langues des signes primaires pratiquées par des sourds brésiliens.* Thèse de doctorat.

[Garcia 98] B. Garcia (1998). *Paul Jouison — Écrits sur la langue des signes française.* « Sémantiques ». L'Harmattan.

[Garcia 05] B. Garcia, D. Boutet, A. Braffort, P. Dalle (2005). *Sign language in graphical form : methodology, modeling and representations for gestural communication.* Interacting Bodies. ISGS 2005, France.

[Garcia 06] B. Garcia (2006). *The methodological, linguistic and semiological bases for the elaboration of a written form of LSF.* Workshop on the representation and processing of Sign Languages. LREC 2006, Italy.

[Garcia 07] B. Garcia, G. Aznar, L. Bolot, A. Braffort, J.-L. Brugeille, A. Choisier, C. Collet, P. Dalle, M. Filhol, F. Gianni, B. Lenseigne, H. Mercier, J. Segouat, C. Verrecchia (2007). *LS-Script — Rapport final.* Projet ANR/Riam LS-Script, 2005-2007.

[Gibet 97] S. Gibet, J. Richardson, T. Lebourque, A. Braffort (1997). *Corpus of 3d natural movements and Sign Language primitives of movement.* Lecture notes in artificial intelligence, LNAI 1371. Gesture and Sign Language in human-computer interaction. Ipke Wachsmuth and Martin Fröhlich Eds., Springer-Verlag. Bielefeld, Allemagne.

[Goudenove 04] F. Goudenove (2004). *WebSourd ou les nouvelles technologies au service des sourds : lutter contre l'illettrisme.* Langues et cité 4, la langue des signes française, nov. 2004.

[Grochow 04] K. Grochow, S. L. Martin, A. Hertzmann, Z. Popovic (2004). *Style-Based Inverse Kinematics*. Proceedings of SigGraph 2004. ACM press.

[Hanke 02a] T. Hanke (2002). *iLex – A tool for Sign Language lexicography and corpus analysis*. ICLRE, Las Palmas.

[Hanke 02b] T. Hanke et al (2002). *ViSiCAST deliverable D5-1 : interface definitions*. ViSiCAST project report.

[Hanke 04] T. Hanke (2004). *Towards Sign Language resources — Extending an HPSG lexicon for German Sign Language from empirical data*. TISLR 8, Barcelona.

[Heloir 06] A. Heloir, S. Gibet, F. Multon, N. Courty (2006). *Captured motion data processing for real time synthesis of Sign Language*. Gesture in human-computer interaction and Simulation, GW 2005. Revised selected papers (short paper), LNAI 3881. Éd. Gibet et al. Springer-Verlag, pages 168–171. Berder Island, France.

[Heloir 08] A. Heloir (2008). *Système de communication par agent virtuel — Aide à la communication des personnes sourdes*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne-sud.

[Huenerfauth 06] M. Huenerfauth (2006). *Generating American Sign Language classifier predicates for English-to-ASL machine translation*. Thèse de doctorat, University of Pennsylvania.

[Humphries 94] T. Humphries, C. Padden, T. J. O'Rourke (1994). *A basic course in American Sign Language*. T.J. publishers, Silver Spring.

[Iris 01] Iris (2001). Scolarité en langue des signes : impact sur l'évolution de la langue des signes. Journée d'études « Recherches sur les langues des signes », Toulouse.

[IVT] IVT, Abaque-micro, Je.tu.il.... *Les signes de Mano*. Logiciel éducatif, sur CD-rom.

[Kennaway 01] R. Kennaway (2001). *Synthetic Animation of Deaf Signing Gestures*. Gesture and Sign Language in Human-Computer Interaction, LNCS/LNAI vol. 2298. Springer.

[Kennaway 04] R. Kennaway (2004). *Experience with and requirements for a gesture description language for synthetic animation*. Gesture-Based Communication in Human-Computer Interaction, LNCS/LNAI vol. 2915. Springer.

[Kervajan 06a] L. Kervajan (2006). *Problèmes de représentation de la langue des signes française en vue du traitement automatique.* TALN-Recital 2006, Belgique.

[Kervajan 06b] L. Kervajan, E. Guimier De Neef, J. Véronis (2006). *French Sign Language processing : verb agreement.* Gesture in Human-Computer Interaction and simulation, LNCS/LNAI vol. 3881. Springer.

[Kirk 05] A. G. Kirk, J. F. O'Brien, D. A. Forsyth (2005). *Skeletal parameter estimation from optical motion capture data.* Proceedings of CVPR 2005, the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pages 782–788. San Deigo, California.

[Lebourque 98] T. Lebourque (1998). *Spécification et génération de gestes naturels — Application à la Langue des Signes Française.* Thèse de doctorat, Université Paris 11.

[Lebourque 00] T. Lebourque, S. Gibet (2000). *A complete system for the specification and the generation of sign language gestures.* Gesture-based communication in human-computer Interaction, GW 1999. Revised Selected Papers, LNAI 1739. Éd. A. Braffort et al. Springer-Verlag, Gif-sur-Yvette, France.

[Lenseigne 04] B. Lenseigne, *Intégration de connaissances linguistiques dans un système de vision — Application à l'étude de la langue des signes.* Thèse de doctorat, Université Toulouse 3.

[Liddell 89] S. K. Liddell, R. E. Johnson (1989). *American Sign Language : the phonological base.* Sign Language Studies, vol. 64. Gallaudet University Press.

[Liddell 03] S. Liddell (2003). *Grammar, gesture and meaning in American Sign Language.* Cambridge University Press, Cambridge.

[Losson 00] O. Losson (2000). *Modélisation du geste communicatif et réalisation d'un signeur virtuel de phrases en Langue des Signes Française.* Thèse de doctorat, Université Lille 1.

[Mathet 00] Y. Mathet (2000). *Étude de l'expression en langue de l'espace et du déplacement : analyse linguistique, modélisation cognitive et leur expérimentation informatique.* Thèse de doctorat, Université de Caen.

[Ménardais 03] S. Ménardais (2003). *Fusion et adaptation temps réel de mouvements acquis pour l'animation d'humanoïdes synthétiques.* Thèse de doctorat, Université de Rennes 1.

[Miller 00] C. R. Miller. *La phonologie dynamique du mouvement en langue des signes québécoise*, Champs Linguistiques, Fides.

[Moody 86a] B. Moody, D. Hof, S. Dumartin (1986, réédition 1997). *La Langue des Signes (tome I) — Histoire et grammaire.* IVT, Paris.

[Moody 86b] B. Moody, D. Hof, S. Dumartin (1986, réédition 1997). *La Langue des Signes (tome II) — Dictionnaire bilingue élémentaire 1.* IVT, Paris.

[Moody 89] B. Moody, D. Hof, S. Dumartin (1989, réédition 1997). *La Langue des Signes (tome III) — Dictionnaire bilingue élémentaire 2.* IVT, Paris.

[Pelachaud 04] C. Pelachaud, V. Maya, M. Lamolle (2004). *Representation of expressivity for embodied conversational agents.* Workshop for balanced perception and action, third international joint conference on autonomous agents and multi-agent systems. New York, USA.

[Prillwitz 89] S. Prillwitz et al (1989). *HamNoSys version 2.0 – Hamburg Notation System for Sign Languages, an introductory guide.* International studies on Sign Language and communication of the Deaf, vol. 5. Signum press, Hamburg.

[Risler 05] A. Risler, *Construction/déconstruction de l'espace de signation.* Atelier TALS 2005, actes. Dourdan, France.

[Sallandre 03] M.-A. Sallandre (2003). *Les unités du discours en langue des signes française — Tentative de catégorisation dans le cadre d'une grammaire de l'iconicité.* Thèse de doctorat, Université Paris 8.

[Segouat 08] J. Segouat, A. Braffort, L. Bolot, A. Choisier, M. Filhol, C. Verrecchia (2008). *Building 3d French Sign Language lexicon.* LREC 2008. À paraître.

[Shankel 00] J. Shankel (2000). *Interpolating quaternions*, Game programming gems, vol. 1. Éd. Mark DeLoura, Charles River Media.

[Slobin 00] D. I. Slobin, N. Hoiting (2000). *Sign language transcription at the morphological level.* On Berkeley transcription system `http://www.sign-lang.uni-hamburg.de/Intersign/Workshop4/Slobin_Hoiting.html`

[Speers 01] D'A. L. Speers (2001). *Representation of American Sign Language for machine translation.* Thèse de doctorat, Georgetown University.

[Stokoe 60] W. Stokoe (1960). *Sign Language Structure : an outline of the visual communication system of the American Deaf.* Studies in linguistics, occasional papers, vol. 8. Buffalo, University of Buffalo.

[Stokoe 76] W. Stokoe, C. Casterline, C. Croneberg (1976). *A dictionary of American Sign Language on linguistic principles*. Linstok Press, Silver Spring, MD.

[Sutton 95] V. Sutton (1995). *Lessons in SignWriting : textbook and workbook*. The Deaf Action Committee for SignWriting and the Center for Sutton Movement Writing, Inc. La Jolla, CA.

[Tolani 00] D. Tolani, A. Goswami, N. I. Badler (2000). *Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs*. Graphical models vol. 62, pages 353–388.

[Verlaine] L. Verlaine, P. Guitteny, P. Legouis. *La langue des signes*. Manuel du centre d'information sur la surdité d'Aquitaine, voir aussi CIS `http://www.cis.gouv.fr`.

[Zhao 94] J. Zhao, N. I. Badler (1994). *Inverse kinematics positionning using nonlinear programming for highly articulated figures*. ACM Transactions on Graphics vol. 13, pages 313–336.

Annexe A

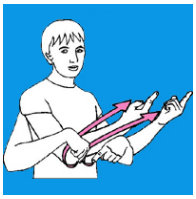
Langue des signes

A.1 Vignettes des exemples

A.1.1 Signes lexicaux

On trouvera ici les vignettes représentant les signes cités dans le texte, classés par ordre alphabétique de la première glose entre crochets. Sauf mention contraire, les images sont tirées de [Moody 86b, Moody 89, IVT, Companys 98].

[ÂGE]



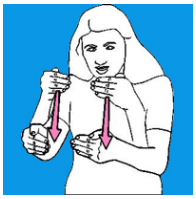
[ALLER]

[À MON TOUR (après lui)]

[ARBRE]

[ARCHITECTE]

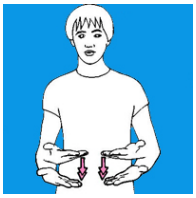
[ARMOIRE]



[ARRÊTER]

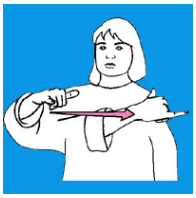
[À TON TOUR (après moi)]

[ATTRAPER]



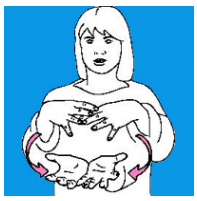
[AUJOURD'HUI]

sourcils levés : [MAINTENANT]



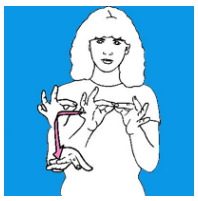
[AVION]

[AVOIR RAISON]



[BALLON]

[BIENTÔT]



[BILAN, RÉSULTAT]

[BINIOU, ÉCOSSE]

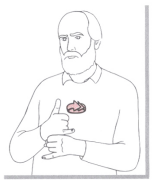
[BLEU]

[BONBON]

[BOUCHE BÉE]

[BRAVO]

[BUREAU]



[CAFÉ]

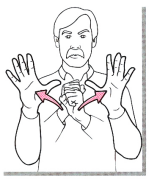
[CHAISE]

[CHICAGO]

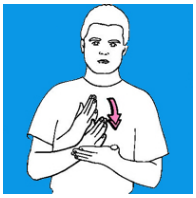
source : [Humphries 94]

[CHIRURGIE/OPÉRATION]

[CICATRICE]

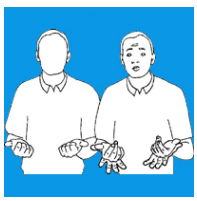


[CLAIR]

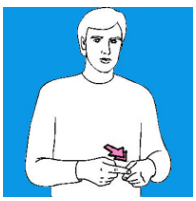


[CLASSE]

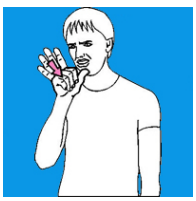
[COLORIER]



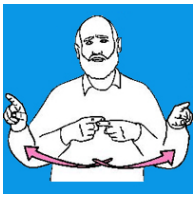
[COMBIEN ?]



[COUTEAU]



[DÉTESTER/HAÏR]

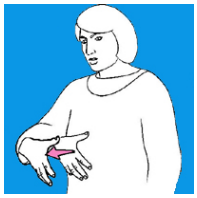


[DIFFÉRENT]

[DIFFICILE]

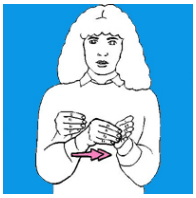
[DOUANE]

[ÉCRIRE]



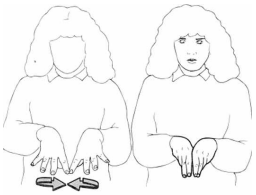
[ENCEINTE]

[EN COLÈRE]

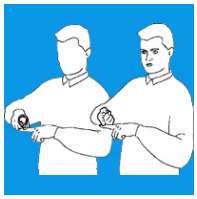


[ENCORE]

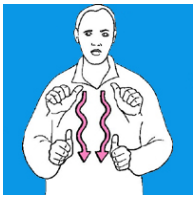
[ÉNERGIE, LITRE]



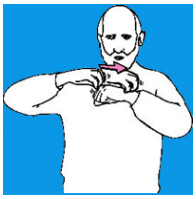
[FAMILLE]



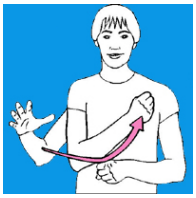
[FILM]



[FORME]

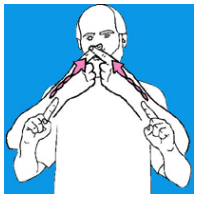


[FOURMI]

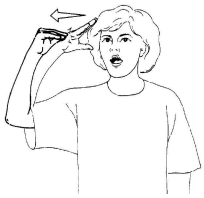


[GAGNER]

[GARÇON]

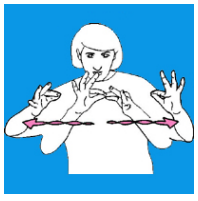


[GÉOGRAPHIE]



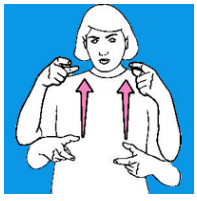
[HAMBOURG]

source : [Hanke 02a]

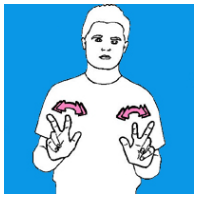


[HISTOIRE]

e.g. pour enfants



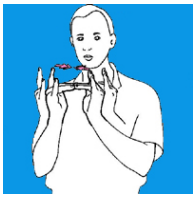
[IMMEUBLE]



[INFORMATIQUE]

[JAMBE]

[LIRE]



[LIT]

[LONGTEMPS]

[LUI/ELLE/ÇA]

[MARS]

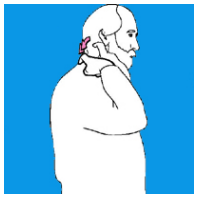
[MÉCHANT]

[MERCI, BONJOUR]

[MÉTAL]

[MOCHE/LAID]

[MOI]



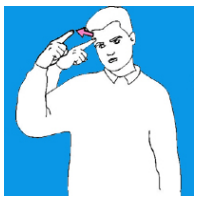
[NUMÉRO]

[OCTOBRE]

[PAS D'ACCORD]

[PEAU]

[PÉDAGOGIE]

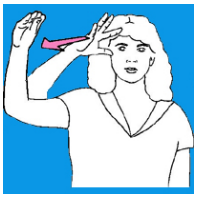


[PENSER]

[PIPE]

[PLAFOND]

[POIGNET]



[PROFESSIONNEL]

[QUALITÉ]

[QUAND MÊME]

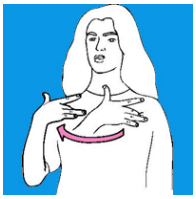
[QUOI ?]

[RACISTE]

[RÉFLÉCHIR]

[ROUGE]

[SALON]



[SANTÉ]

[s'asseoir]

[se fâcher]

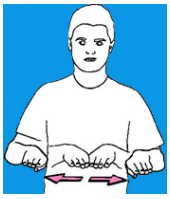
[se faire opérer]

(appendicite)

[société]

main fixe : pouce ou index

[sourd]



[table]

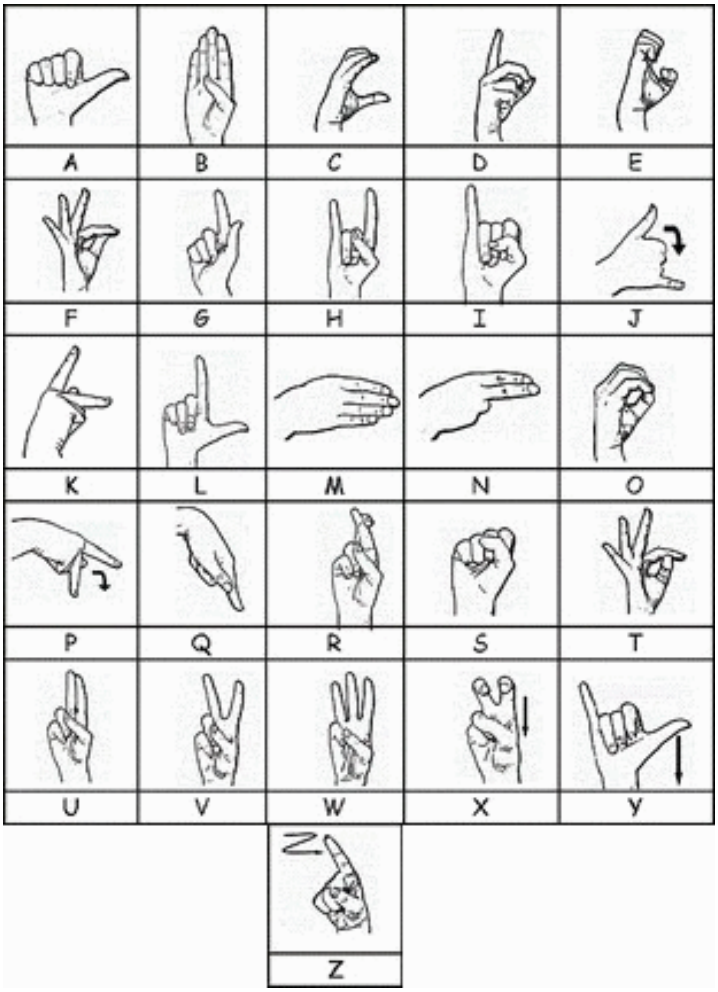
[toi]

[triste]

[yeux en amande]

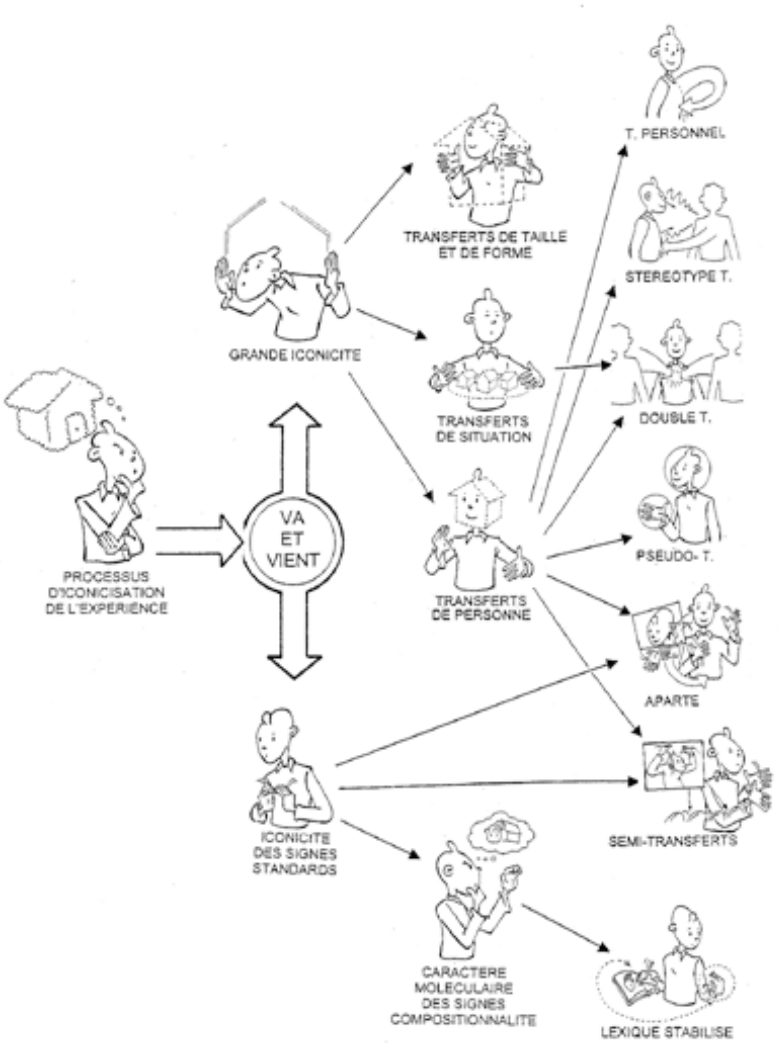
A.1.2 Dactylologie

Le texte fait aussi référence à l'alphabet dactylologique de la LSF (lettres entre guillemets simples). Le voici présenté ci-dessous.



A.2 La grande iconicité

L'illustration ci-dessous [Verlaine] résume et classe les principales structures de grande iconicité en langue des signes.



Annexe B

Définition du squelette

Cette annexe donne l'en-tête BVH de spécification du squelette que nous utilisons pour notre implantation minimale actuelle. Les valeurs des *offsets* (t_i) sont pour l'instant empiriques et fixées dans un premier but de faciliter la visualisation. Notamment, les mains sont exagérément grandes, pour mieux en distinguer les doigts (voir figure 4.10 page 84).

```
HIERARCHY
ROOT back_1
{
  OFFSET 0 0 2.5
  CHANNELS 6 Xposition Yposition Zposition Zrotation Xrotation Yrotation
  JOINT back_2
  {
    OFFSET 4 0 0
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT back_3
    {
      OFFSET 4 0 0
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      JOINT neck
      {
        OFFSET 4 0 0
        CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
        JOINT head
```

```
  {
    OFFSET 1.7 0 0
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    End Site
    {
      OFFSET 3 0 0
    }
  }
}
JOINT clav_lft
{
  OFFSET 4 0 1
  CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
  JOINT arm_lft
  {
    OFFSET 3 0 0
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT f_arm_lft
    {
      OFFSET 7 0 0
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      JOINT palm_lft
      {
        OFFSET 7 0 0
        CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
        JOINT thumb_lft_1
        {
          OFFSET 0 0 -1
          CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
          JOINT thumb_lft_2
          {
            OFFSET 2 0 0
            CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
```

```
    JOINT thumb_lft_3
    {
      OFFSET 1.1 0 0
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      End Site
      {
        OFFSET 1.1 0 0
      }
    }
  }
}
JOINT index_lft_1
{
  OFFSET 3 0 -1.5
  CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
  JOINT index_lft_2
  {
    OFFSET 2 0 0
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT index_lft_3
    {
      OFFSET 1.1 0 0
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      End Site
      {
        OFFSET 1.1 0 0
      }
    }
  }
}
JOINT middle_lft_1
{
  OFFSET 3 0 -0.5
```

```
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT middle_lft_2
    {
      OFFSET 2 0 0
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      JOINT middle_lft_3
      {
        OFFSET 1.1 0 0
        CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
        End Site
        {
          OFFSET 1.1 0 0
        }
      }
    }
  }
  JOINT ring_lft_1
  {
    OFFSET 3 0 0.5
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT ring_lft_2
    {
      OFFSET 2 0 0
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      JOINT ring_lft_3
      {
        OFFSET 1.1 0 0
        CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
        End Site
        {
          OFFSET 1.1 0 0
        }
      }
```

```
          }
        }
        JOINT little_lft_1
        {
          OFFSET 2.5 0 1.5
          CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
          JOINT little_lft_2
          {
            OFFSET 2 0 0
            CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
            JOINT little_lft_3
            {
              OFFSET 1.1 0 0
              CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
              End Site
              {
                OFFSET 1.1 0 0
              }
            }
          }
        }
      }
    }
  }
}
JOINT clav_rgt
{
  OFFSET 4 0 -1
  CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
  JOINT arm_rgt
  {
    OFFSET 3 0 0
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
```

```
JOINT f_arm_rgt
{
  OFFSET 7 0 0
  CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
  JOINT palm_rgt
  {
    OFFSET 7 0 0
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT thumb_rgt_1
    {
      OFFSET 0 0 1
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      JOINT thumb_rgt_2
      {
        OFFSET 2 0 0
        CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
        JOINT thumb_rgt_3
        {
          OFFSET 1.1 0 0
          CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
          End Site
          {
            OFFSET 1.1 0 0
          }
        }
      }
    }
    JOINT index_rgt_1
    {
      OFFSET 3 0 1.5
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      JOINT index_rgt_2
      {
```

```
    OFFSET 2 0 0
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT index_rgt_3
    {
      OFFSET 1.1 0 0
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      End Site
      {
        OFFSET 1.1 0 0
      }
    }
  }
}
JOINT middle_rgt_1
{
  OFFSET 3 0 0.5
  CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
  JOINT middle_rgt_2
  {
    OFFSET 2 0 0
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT middle_rgt_3
    {
      OFFSET 1.1 0 0
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      End Site
      {
        OFFSET 1.1 0 0
      }
    }
  }
}
JOINT ring_rgt_1
```

```
{
  OFFSET 3 0 -0.5
  CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
  JOINT ring_rgt_2
  {
    OFFSET 2 0 0
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT ring_rgt_3
    {
      OFFSET 1.1 0 0
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      End Site
      {
        OFFSET 1.1 0 0
      }
    }
  }
}
JOINT little_rgt_1
{
  OFFSET 2.5 0 -1.5
  CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
  JOINT little_rgt_2
  {
    OFFSET 2 0 0
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT little_rgt_3
    {
      OFFSET 1.1 0 0
      CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
      End Site
      {
        OFFSET 1.1 0 0
```

```
                    }
                  }
                }
              }
            }
          }
        }
      }
    }
  }
}
```

Annexe C

Cinématique inverse

Cette annexe est une présentation formelle résumée du problème de cinématique inverse. Nous présentons aussi rapidement l'approche que nous utilisons. Pour les curieux, la littérature ne manque pas sur le sujet [Tolani 00, Boulic 01, Ménardais 03, ...].

Soit une chaîne cinématique de n segments $b_1, b_2, \ldots, b_n$, et $r = (r_1, r_2, \ldots, r_n) \in \mathbb{H}^n$ le n-uplet des rotations associées. On s'intéresse à la position d'un point lié à b_n (effecteur) en fonction de r. La fonction de cinématique directe $f : \mathbb{H}^n \to \mathbb{R}^3$ donne cette position $T(X, Y, Z)$ dans l'espace. La cinématique inverse consiste à résoudre l'équation :

$$f(r) = T$$

d'inconnues r_1, r_2, ..., r_n pour X, Y et Z donnés. En général dès que $n \geq 2$, les solutions sont en nombre infini si elles existent.

On distingue deux grands types de techniques : analytiques et itératives. Les premières résolvent l'équation formellement pour obtenir une expression littérale de l'ensemble des solutions. Pour ainsi dire, nous n'avons rien trouvé pour $n > 2$, vu la complexité des formules. La littérature sur ces techniques ne s'intéresse en général qu'au bras ou à la jambe du bipède mais considèrent le poignet ou la cheville comme effecteur de la chaîne (e.g. IKAN), or notre modèle considère fréquemment des chaînes qui s'étendent jusqu'au bout des doigts.

Nous préférons dans notre contexte une approche itérative. On recherche alors non plus une résultat littéral, mais des valeurs numériques approchées, par itérations successives guidées par une descente de gradient. L'algorithme général est le suivant :

(A) `Tant que` $T = f(r)$ `est trop loin de` T_{cible}

(B) J := $J_f(T)$

(C) Δt := $pas \cdot (T_{cible} - T)$

(D) Δr := $J^{-1} \cdot \Delta t$

(E) r += Δr

(F) FTQ

La ligne C détermine Δt, le pas de l'itération, et $pas \in [0, 1]$. Les changements à effectuer sur les r_i sont déterminés en D, puis appliqués en E par incrémentation terme à terme de r avec le n-uplet Δr. La condition A peut être améliorée pour garantir une terminaison au cas où aucune réponse n'est trouvée ou trouvable en un temps fini, par exemple en limitant le nombre d'itérations. À la ligne B, on calcule la matrice jacobienne (dérivées partielles du premier ordre) de f en T définie par :

$$J_f(T) = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial r_1} & \frac{\partial X}{\partial r_2} & \cdots & \frac{\partial X}{\partial r_n} \\ \frac{\partial Y}{\partial r_1} & & \cdots & \frac{\partial Y}{\partial r_n} \\ \frac{\partial Z}{\partial r_1} & \frac{\partial Z}{\partial r_2} & \cdots & \frac{\partial Z}{\partial r_n} \end{bmatrix}$$

Ceci ne présente que le problème minimal de cinématique inverse : placer l'effecteur en un point de l'espace. Le choix de l'itération à effectuer n'est ici basé que sur T et T_{cible}, c'est-à-dire les positions actuelle et voulue de l'effecteur. Nous rappelons que nous observons d'autres contraintes sur la chaîne cinématique que celle-ci.

Annexe D

Référence du langage de spécification

D.1 Langage de spécification

Encore du provisoire ici. Un *data type document* (DTD) pour une version XML sera aussi fourni après stabilisation.

D.1.1 Éléments lexicaux

Caractères spéciaux des expressions régulières ci-dessous : `[^-]`, `*`, `+`, `|`. En italique : référence à une autre exrpession régulière.

string : `"[^"]*"`

identifier : `[a-zA-Z][a-zA-Z_0-9]*`

pint : `[0-9]+`

pfloat : *pint*`.`*pint*`*|.`*pint*

macro_name : `#`*identifier*

bone_name : `!`*identifier*

site_name : `@`*identifier*

variable : `$`*identifier*

D.1.2 Syntaxe

Grammaire donnée en syntaxe EBNF. Les mots-clés sont entre guillemets et en gras, les autres éléments terminaux sont en italique (cf. expressions régulières en D.1.1). Les choix de majuscules et minuscules ne sont pas significatifs.

D.1.2.1 Définition de macro

```
macro_def :
  "MACRO" macro_name ["(" param_list ")"] "{"
    { spec }
  "}"
param_list : type variable { "," type variable }
type : "Side" | "Num" | "Vector"
     | "Point" | "Line" | "Plane"
```

D.1.2.2 Définition d'une séquence

```
sequence :
  "SEQUENCE" string
    { ctxt_dep | alias | timing_unit }
  "End" string

ctxt_dep : ctxt_influence | argument
ctxt_influence : identifier [" :" type] "=" expr
argument : identifier " :" type
alias : identifier " :=" expr

timing_unit : key_posture | transition
key_posture :
  "KEY_POSTURE" "(" num ")" "{"
    { alias | ("HERE" | "KEEP") " :" { spec } }
  "}"
transition :
  "TRANSITION" "(" num ")" "{"
    { alias | spec }
  "}"

spec : key_prim | trans_option | option | macro_call | for_loop
macro_call : macro_name ["(" expr_list ")"]
for_loop : "For" variable "=" expr_list { spec } "End"
```

```
key_prim : "Place" site "at" expression
         | "Orient" "DIR" bone "along" expr
         | "Orient" "NRM" bone "along" expr
trans_option : "Arc" site " :" expr
             | "Accel" numerical
             | "Accel" site ("from" | "to") numerical
option : "Trill" ("DIR" | "NRM" | "DxN") bone
       | "Precedence" bone { ("," | "<") bone }
```

D.1.2.3 Expressions

```
expr : "(" expr ")"
     | side | num | site
     | variable | identifier | "[" identifier "]"
     | "up" | "dwn" | "lft" | "rgt" | "fwd" | "bwd" | "lat"
     | "DIR" bone | "NRM" bone | "DxN" bone
     | "ORIG" bone | "ARC" site
     | "MID" "[" expr "," expr "]"
     | "-" expr
     | "<" expr "," expr ">"
     | "<" expr "," expr "," expr ">"
     | "SYM" expr "WRT" expr
     | expr "-" expr
     | expr "+" expr
     | expr "*" expr
     | expr "/" expr
     | expr "~" expr
     | "(" expr "," expr ")"
     | "(" expr "," expr "," expr ")"
     | "Line" "//" expr "through" expr
     | "Plane" "//" expr "through" expr

side : "l" | "r" | "s" | "w"
num : pint | pfloat
```

D.1.2.4 Divers

```
expr_list : expr { "," expr }
site : site_name ["(" arg ["," arg] ")"]
bone : bone_name ["(" arg ["," arg] ")"]
arg : side | pint | variable
```

D.2 Expressions et typage

D.2.1 Priorité et associativité des opérateurs

Classés selon leur priorité, de la plus forte à la plus faible :

Opérateur	Priorité	Associativité
- (unaire)	5	droite
~	4	gauche
*, /	3	gauche
+, - (binaire)	2	gauche
SYM...WRT, Line/Plane...through	1	droite

Les opérateurs ne provoquant pas d'ambiguïté sont exclus de ce tableau.

D.2.2 Typage des expressions

D.2.2.1 Unaire

Opérateur	Type arg.	Sens	Type ret.
-	num	opposé	num
	vector	vecteur opposé	vector
	side	côté opposé	side
DIR, NRM, DxN	bone	axe directeur, axe normal, troisième axe	vector
ARC	site	vecteur d'arc	vector
ORIG	bone	point fixe du repère associé	point

D.2.2.2 Binaires

Opérateur	arg. 1	arg. 2	Sens	Type ret.
`<...>`	point	point	vecteur point à point	vecteur
`MID [...]`	point	point	milieu de segment	point
`+`	num	num	addition	num
	point	vecteur	translation	point
`-`	num	num	soustraction	num
`*`	num	num	multiplication	num
	num	vector	scalaire	vector
	vector	vector	produit vectoriel	vector
`/`	num	num	division	num
`~`	num	num	intervalle (valeur aléatoire entre deux bornes)	num
	vector	vector	$v_1 \tilde{} v_2 =$ si $cos(v_1, v_2) \geq 0$ alors v_1 sinon $-v_1$	vector
`(...)`	point	point	droite contenant...	line
	line	point	plan contenant...	plane
`Line // ...`	vector	point	droite support contenant...	line
`Line _|_ ...`	plane	point	droite normale contenant...	line
`Plane // ...`	plane	point	plan parallèle contenant...	plane
`Plane _|_ ...`	line	point	plan normal contenant...	plane
`SYM ...`			symétrie (combinaisons géométriques diverses)	

D.2.2.3 Ternaires

Opérateur	args	Sens	Type ret.
`(...)`	point	plan contenant points	plane
`<...>`	num	coordonnées de point	vector

Annexe E

Exemples supplémentaires de description

E.1 [arbre]

```
SEQUENCE "arbre"
  loc = @AB + 5*LAT

  KEY_POSTURE (100) {
    HERE :
      Place @EL(s) at [loc]
      Place @PA(w) at @EL(s)
      #main_plane(s)
      #ecarter_doigts(s)
      For $b =!f_arm(s),!palm(s)
        Orient DIR$b along UP
      End
      Trill DIR!f_arm(s)
  }
End "arbre"
```

E.2 [SANTÉ]

```
SEQUENCE "santé"
  KEY_POSTURE (0) {
    KEEP : #oriente_majeur_selon(s, NRM !palm(s))
    HERE : Place M_TIP(s) at @CH(w) + FWD
  }
  TRANSITION (20) {
    Accel 2
  }
  KEY_POSTURE (10) {
    HERE : Place M_TIP(s) at @CH(w)
  }

  TRANSITION (40) {  }

  KEY_POSTURE (0) {
    KEEP : #oriente_majeur_selon(s, NRM !palm(s))
    HERE : Place M_TIP(s) at @CH(s) + FWD
  }
  TRANSITION (20) {
    Accel 2
  }
  KEY_POSTURE (10) {
    HERE : Place M_TIP(s) at @CH(s)
  }
End "santé"
```

E.3 [FILM]

Sites corporels utilisés :

`@I_KN(`m`,`p`)` Base de la phalange p de l'index de la main m, coté dos de la main.

`@I_KNp(`m`,`p`)` Idem coté paume.

`@I_KNt(`m`,`p`)` Idem côté pouce.

```
SEQUENCE "film"
  KEY_POSTURE (0) {
    KEEP :
      #tendre_index(w)
      Orient DIR!index(w,2) along FWD
      #tendre_index(s)
    HERE :
      Place @I_KNp(s,3) at I_KNt(w,2)
      Orient NRM!index(s,3) along DWN
  }

  TRANSITION (70) {
    Accel 2
    Arc @I_TIP(s) : UP
  }

  KEY_POSTURE (30) {
    HERE :
      Place @I_KN(s,3) at I_KNt(w,3)
      Orient NRM!index(s,3) along UP
  }
End "film"
```