



Interaction, Image et
Ingénierie de la Décision



Université des Sciences
et Technologies de Lille

Thèse

présentée par

Olivier LOSSON

pour l'obtention du titre de DOCTEUR de l'Université de Lille I
Spécialité : Productique, Automatique et Informatique Industrielle.

MODELISATION DU GESTE COMMUNICATIF ET REALISATION D'UN SIGNEUR VIRTUEL DE PHRASES EN LANGUE DES SIGNES FRANCAISE.

Soutenue le 17 janvier 2000 devant le jury composé de :

COIFFET P. – Président (LRP, Université de Versailles).

MILLOT P. – Rapporteur (LAMIH, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis).

PRUSKI A. – Rapporteur (LASC, Université de Metz).

GIBET S. – Examinatrice (LIMSI, Université de PARIS XI).

NEVE DE MEVERGNIES F.-X. – Examinateur (Université de Liège, Belgique).

TOULOTTE J.-M. – Directeur de recherche (I³D, Université de Lille I).

BAUDEL-CANTEGRIT B. – Co-directrice (I³D, Université de Lille I).

GIROD M. – Invité (Association I.V.T., Vincennes).

Laboratoire I³D - U.S.T.L. - UFR d'I.E.E.A. - Bâtiment P2
59655 Villeneuve d'Ascq Cedex (FRANCE)

Tél: (33) 03 20 43 48 76 - Fax: (33) 03 20 43 65 67 - <http://www-cal.univ-lille1.fr>

Remerciements et dédicace

Mes remerciements vont d'abord à Jean-Marc Toulotte pour m'avoir proposé ce passionnant sujet, m'avoir aiguillé dans ma recherche, et m'avoir permis – sur tous les plans – de mener à bien cette étude. Merci à lui, ainsi qu'à Brigitte Baudel-Cantegrit, pour leurs précieux conseils.

Je tiens aussi à exprimer toute ma gratitude envers Patrick Millot et Alain Pruski, qui ont accepté d'être rapporteurs de ce mémoire.

Je voudrais encore remercier Philippe Coiffet pour avoir présidé mon jury de soutenance, dont je n'oublie pas les autres membres, Sylvie Gibet, François-Xavier Nève de Mevergnies et Michel Girod.

Par leur gentillesse et leur disponibilité, les membres du laboratoire I³D, permanents ou doctorants, ont grandement contribué à rendre ce travail vraiment agréable. Je pense tout particulièrement à Christophe, Shahram, Daniel, Vincent, Jean-Marc, Sandra, Rong, Marie-Hélène et Michel.

Parmi toutes les personnes qu'il m'a été donné de rencontrer durant cette recherche, je remercie aussi celles des différentes structures avec lesquelles nous avons travaillé en partenariat. Un grand merci, donc, à Sandrine Trottin, Anne-Christine Legris et Catherine Coquet de S.I.E., à Nathalie Cruaud et Françoise Casas, ainsi qu'aux membres d'IVT Rachid Benelhocine, Michel Girod et Frédéric Harlez. Tout récemment, mesdames Rondelez, Leconte, Chesnaie et Fourni, ainsi que de jeunes déficients auditifs du CRESDA de Pont-à-Marcq, m'ont également apporté leur concours ; que tous en soient remerciés.

Pour finir (« *last but not least* »), merci à mes parents dont les encouragements et la générosité sont inestimables. Merci aussi à Benoît pour son soutien fraternel – d'autant que nous avons partagé simultanément la même expérience du doctorat –, et aux autres de mes proches. Je terminerais en remerciant tous mes amis, qui ont bien voulu me « supporter »...

A ma grand-mère

Note

Sauf mention contraire, tout dessin de ce document représentant un signe de la LSF est extrait des ouvrages de Bill Moody (La langue des signes française, tome 1 – Histoire et grammaire – et tome 2 – dictionnaire bilingue élémentaire, éditions Ellipses). Ces reproductions ont été gracieusement autorisées par l'association International Visual Theatre (IVT), sise au Centre Socio-culturel des Sourds, Tour du Village, Château de Vincennes, 94 300 VINCENNES, à laquelle appartiennent tous droits en la matière.

Conventions typographiques et abréviations

<i>signe</i>	Un signe cité dans le corps du texte est indiqué par une fonte de type script sans sérif. Dans certains tableaux de signes où aucune confusion n'est possible, la police courante est toutefois utilisée.
<i>dactylogogie</i>	Une entrée figurant dans le glossaire (à la fin de ce document) est repérée dans le texte en italique gras.
Fingers	Les termes correspondant à du code informatique sont écrits en police Courier.
a b	La juxtaposition de deux termes signifie leur concaténation.
a b	La barre verticale sépare deux termes disjonctifs.
(a b c)	Les parenthèses regroupent des sous-expressions.
[_{MCP}]	Les crochets entourent une expression optionnelle.
{ lettre }	Les accolades dénotent zéro, une ou plusieurs occurrences de l'expression qu'elles englobent.
“(”	Les chaînes littérales sont inscrites en gras et entourées de guillemets.
<nom>	Les symboles terminaux pouvant correspondre à plusieurs lexèmes sont notés de façon formelle entre chevrons.
¶	Le symbole de retour chariot indique une ligne qui ne peut tenir dans la largeur de page et qui se poursuit sur les lignes suivantes, justifiées à droite.
$\vec{n}_i \cdot \vec{n}_f < 0$	Les objets indicés <i>i</i> (resp. <i>f</i>) désignent un état ou une position initiale (resp. finale).
#Qplat	Le caractère “dièse” introduit un symbole provenant directement du code en Smalltalk.

Les abréviations ci-dessous, couramment admises pour les langues des signes, ont été utilisées :

LSF	Langue des Signes Française.
ASL	American Sign Language (langue des signes américaine).
ISL	Israeli Sign Language (langue des signes israélienne).
JSL	Japanese Sign Language (langue des signes japonaise).
LPC	Langage Parlé Complété.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. GESTE COMMUNICATIF ET SIGNE.....	5
1.1. GESTES ET LANGUES DES SIGNES.....	6
1.2. SYNTHÉTISER LE SIGNE : CADRE DE L'ÉTUDE ET ÉTAT DE L'ART.	21
1.3. DÉCRIRE LE SIGNE.....	29
CHAPITRE 2. DESCRIPTION FORMELLE DE LA LANGUE DES SIGNES.....	43
2.1. VUE GÉNÉRALE ET DÉFINITIONS.	44
2.2. CONFIGURATIONS MANUELLES.....	49
2.3. SPÉCIFICATIONS MANUELLES.....	59
2.4. LE MOUVEMENT.....	64
2.5. LA PHRASE SIGNÉE.	83
CHAPITRE 3. UN SYSTÈME DE SYNTHÈSE GRAPHIQUE ANIMÉE.....	101
3.1. GÉNÉRATION DE CONFIGURATIONS ET DE MOUVEMENTS NATURELS.	102
3.2. SPÉCIFICATION ET SYNTHÈSE INFORMATISÉE.	119
3.3. PRÉSENTATION, ÉVALUATION ET UTILISATION DU LOGICIEL.....	137
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	151
GLOSSAIRE.....	155
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	158
ANNEXES.....	167

INTRODUCTION

L'étude de la modalité gestuelle dans la communication humaine est plutôt récente. Ce canal s'est pourtant révélé des plus riches et des plus aptes à véhiculer un message. Les travaux ont d'abord porté sur les gestes accompagnant la parole pour être ensuite étendus à l'ensemble des mouvements porteurs d'information, et plusieurs classifications ont été proposées. La prise de conscience de l'énorme potentiel signifiant des gestes a naturellement incité à en tirer parti pour les appliquer dans les technologies de l'information, et particulièrement dans l'interaction entre l'homme et la machine. Cependant, faute de dispositif de capture adapté, l'utilisation de la modalité gestuelle dans ce cadre s'est longtemps borné à une interface très simple de commande, telle qu'avec une souris ou un stylo optique.

L'apparition de nouveaux outils permettant de recueillir une information tridimensionnelle aussi bien que des paramètres corporels inaccessibles jusque-là (angles articulaires, pressions ou autres efforts, ...) a réellement déclenché l'essor des techniques dites *de réalité virtuelle*. Le fait de pouvoir suivre par la mesure le mouvement de l'utilisateur rend envisageable la commande d'une machine par des gestes plus ou moins naturels, en ajoutant éventuellement toute autre modalité porteuse d'information (notamment la voix). Parallèlement, la montée en puissance des ordinateurs a permis, outre de traiter les données ainsi captées, de produire des images puis des animations synthétiques. Cependant, on commence seulement à voir apparaître, pilotés en temps réel, des personnages virtuels complets et réalistes.

En effet, le problème majeur, qui se pose encore à l'heure actuelle, est celui du temps nécessaire pour calculer de telles séquences. Une des solutions largement répandues en animation d'avatars est d'utiliser le geste à la fois en entrée et en sortie : on enregistre d'abord le mouvement pour pouvoir le rejouer ensuite, ce qui garantit un réalisme parfait et une rapidité de génération tout à fait acceptable. Malheureusement, cette technique est contraignante pour plusieurs raisons. En premier lieu, l'animation doit être créée de toutes pièces, ce qui impose la disponibilité des personnes et du matériel adéquat (constitué d'un appareillage qui reste important). Ceci entraîne également – comme d'ailleurs pour les séquences filmées – que le résultat est figé et que l'animation doit donc être régénérée à la demande, même en cas de modifications mineures. Un autre reproche que l'on peut adresser à ces techniques est le volume des données produites, qui nécessitent des moyens de stockage et de transmission hors de portée du grand public.

De telles méthodes sont donc inadaptées pour représenter un système gestuel fortement variable. *A fortiori*, elles ne conviennent pas pour le plus complexe d'entre eux, celui de la langue des signes utilisée par les sourds. Si notre intérêt s'est rapidement porté sur l'étude et la représentation de ce type de gestes, c'est non seulement en raison de leur richesse, mais encore parce que les sourds, dont la langue – car il s'agit bien d'une véritable langue – a été bannie depuis plus d'un siècle, souffrent encore aujourd'hui et dans de nombreux pays d'un échec scolaire important. Leur offrir la possibilité d'accéder à l'information dans leur langue naturelle laisse entrevoir des perspectives des plus intéressantes dans l'éducation ou la vie quotidienne.

L'objectif principal de cette étude est donc l'obtention de signes synthétiques, ainsi que de phrases signées complètes. Notre point de départ est constitué de signes (dans leur forme écrite) correctement choisis et ordonnés, formant une notation intermédiaire lisible aussi proche que possible de la langue naturelle. Partant de cette phrase à signer, nous souhaitons aboutir à une synthèse en trois dimensions de la phrase en langue des signes.

C'est précisément l'objet du premier chapitre que de préciser, dans le cadre global du geste de communication, où s'inscrit notre étude et quels en sont les tenants et aboutissants. Puis y est présenté un état de l'art où sont largement évoqués les travaux ayant trait à des sujets proches ; nous en examinons les méthodologies utilisées, les points faibles et ceux dont au contraire nous pouvons nous inspirer. Nous jetons également les bases linguistiques de la description des signes en termes de phonèmes gestuels. Cela nous a paru crucial pour conserver l'intégralité du message signifiant dans la synthèse.

Le second chapitre est premièrement consacré à la description du signe. Nous en proposons une décomposition hiérarchique basée sur ses traits pertinents en décrivant, pour chaque niveau de spécification, l'ensemble des valeurs possibles. Il en est ainsi de la forme de la main, du mouvement lui-même, ou encore des expressions du visage, pour ne citer que quelques composantes formationnelles.

Nous nous attachons ensuite à préciser la dynamique des différents types de trajectoires dans le but de les reproduire au plus près de la réalité. En particulier, nous tentons de modéliser les mouvements rectilignes et circulaires et avons pour cela développé un petit utilitaire de suivi de mouvement par caméra. Celui-ci est également mis à profit pour étudier des dynamiques particulières que l'on rencontre dans certains signes ou dans des modes spécifiques tels que l'impératif.

En dernier lieu sont présentés les mécanismes régissant l'interaction entre le niveau lexical et celui du discours. Comme il a déjà été suggéré, les signes sont susceptibles de varier fortement en fonction de divers paramètres : agent et patient pour certains verbes, spécification de la taille ou de la forme pour des objets, etc. Nous détaillons la façon dont de tels phénomènes de flexion ont été inclus dans le système de spécification.

Le dernier chapitre présente l'application sur laquelle l'ensemble de cette étude a débouché. En posant au préalable quelques jalons relatifs au positionnement des articulateurs et à la génération du mouvement, nous examinons comment le signe peut être textuellement décrit pour être ensuite analysé, évalué puis synthétisé. Ces différentes phases donnent lieu à des présentations séparées, tout comme les mécanismes de flexion des signes, avant que ne soit

proposé un schéma synoptique de l'ensemble logiciel ainsi construit. Diverses vues graphiques en sont alors reproduites, de façon à avoir un aperçu tant de l'interface d'édition du signe que de la sortie présentant l'animation synthétique.

Une bonne partie des signes, regroupés dans une structure de dictionnaire, a fait l'objet d'une évaluation par des personnes pratiquant couramment la langue des signes. Les résultats, exposés à la fin du chapitre 3, nous ont permis de valider le travail effectué, mais aussi de mettre le doigt sur certaines lacunes du système.

Pour conclure sur ces travaux, nous étudions justement les points à améliorer, ainsi que diverses pistes vers lesquelles peut désormais se diriger notre recherche. Egaleme nt, nous envisageons les différentes applications dans lesquelles intégrer le moteur de génération de signes synthétiques, en donnant un exemple concret et fonctionnel.

CHAPITRE 1.

GESTE COMMUNICATIF ET SIGNE.

Ce chapitre est destiné à présenter certaines définitions concernant la langue des signes dans le contexte du geste de communication, point d'intérêt de notre partie introductive, et aussi ce que nous enseignent les travaux menés dans le domaine de la synthèse et de la linguistique du signe.

Dans un premier temps, nous tentons d'exposer de façon aussi concise que possible le cadre du geste communicatif et d'y replacer les langues gestuelles, en insistant bien sur la spécificité de ces dernières. Les langues des signes constituent en effet aujourd'hui les formes les plus évoluées d'expression par le biais du canal gestuel, et leur statut de langue à part entière est désormais pleinement reconnu.

La partie suivante situe notre étude. Il y est question de l'utilité d'obtenir une synthèse informatisée du signe, ainsi que des tenants et aboutissants de notre recherche. Nous dressons ensuite un état de l'art en la matière, en passant notamment en revue les travaux de traduction bidirectionnelle.

Pour finir, il nous a paru nécessaire d'introduire les études linguistiques ayant conduit à différentes descriptions des signes, ainsi que les diverses représentations écrites ou applications informatisées auxquelles celles-ci ont donné lieu. En conclusion, nous examinons dans quelle mesure ces transcriptions sont adaptées à notre dessein de description formelle du signe, objet du deuxième chapitre.

1.1. Gestes et langues des signes.

Il n'est pas si loin le temps où les langues des signes étaient appelées « langages mimiques », ou encore « communication par gestes ». Nous nous attachons dans cette partie à montrer que les signes ne sont pas de simples gestes, et explicitons les différences fondamentales entre les concepts que sous-tendent ces termes.

1.1.1. Du geste au signe, la communication gestuelle.

Intuitivement, nous percevons tous aisément ce que peut recouvrir la notion de geste. Un salut de la main, la désignation d'un oiseau qui passe, l'agent qui fait signe aux automobilistes de s'arrêter, sont des exemples qui nous viennent immédiatement à l'esprit. Mais à partir de quel moment peut-on réellement parler de *gestes* et comment dès lors les catégoriser ?

Nous souhaitons dans cette partie répondre de façon concise à ces interrogations, en examinant tout particulièrement les gestes qui accompagnent le discours. Puis nous exposons dans quelle mesure le geste est utilisé en communication homme-homme et homme-machine, avant de voir pourquoi nous avons choisi de nous pencher sur l'étude des langues gestuelles.

1.1.1.1. Caractérisation du geste et définitions.

La notion de geste n'est pas définie avec précision. Elle varie en fonction du domaine d'étude, selon que l'on se place d'un point de vue sociologique, cognitif, biologique, ... Il en va de même pour un certain nombre de termes dont nous allons préciser dès maintenant l'acception retenue dans le cadre de ce texte.

En écartant le sens figuré, le geste – physiologique – peut être défini comme un *mouvement intentionnel et significatif du corps ou des membres*. Cette caractérisation minimale appelle trois remarques :

- elle attribue au geste une fonction *informative*, et ne recouvre donc pas l'ensemble des actions modifiant l'environnement physique ;
- le message véhiculé doit être admis et reconnu par son destinataire. Le geste doit donc se conformer à un code commun aux deux parties, ce qui suppose qu'il est *reproductible* (avec de légères variations possibles à condition que le contenu sémantique soit conservé), et partant *contrôlable* ;
- parce qu'il est un acte *volontaire*, le geste exclut les mouvements réflexes. Dans de très rares cas, il peut toutefois être instinctif.

En tant que moyen de transmission d'une information, le geste s'insère dans un schéma de communication de type :

Source → émetteur → canal → message → récepteur → destinataire

Le canal de ce processus est bidirectionnel, c'est-à-dire que le geste peut soit capter, soit émettre de l'information.

- Dans le premier cas, c'est souvent la main qui joue le rôle d'organe de la perception ; grâce au sens tactile, elle acquiert des données sur la nature spatiale et temporelle des objets (forme, taille, quantité, déplacement ...). Le balayage par le doigt de l'aveugle d'une ligne codée en braille en est un exemple.
- Dans le second cas, le schéma le plus communément rencontré est l'utilisation de la main comme émetteur, qui utilise l'air comme canal de transmission pour s'adresser à un système de vision humain ou artificiel.

Les gestes de perception ne sont pas développés davantage dans la suite de notre propos. Il y est en revanche largement fait référence à ceux qui émettent de l'information, notamment les gestes d'accompagnement de la parole, de désignation d'objets et, bien entendu, les signes.

Concernant ce dernier terme, remarquons que la sémiotique moderne lui attribue une plage d'acceptions très étendue [ECO 88]. Elle considère en effet le *signe* comme élément d'un processus quelconque de communication, dont le geste ne constitue qu'une des modalités. Nous allons, pour notre part, nous cantonner à son sens relatif à la langue des signes, à savoir un élément de son vocabulaire. Toutefois, les propriétés dégagées dans le cadre d'une plus large signification demeurent valables. En particulier, tout signe possède un **signifiant**, représentation artificielle – donc reposant sur un code – d'un concept (le **signifié**), et fait allusion à un *référént* concret ou abstrait, présent ou non lors de l'émission du message.

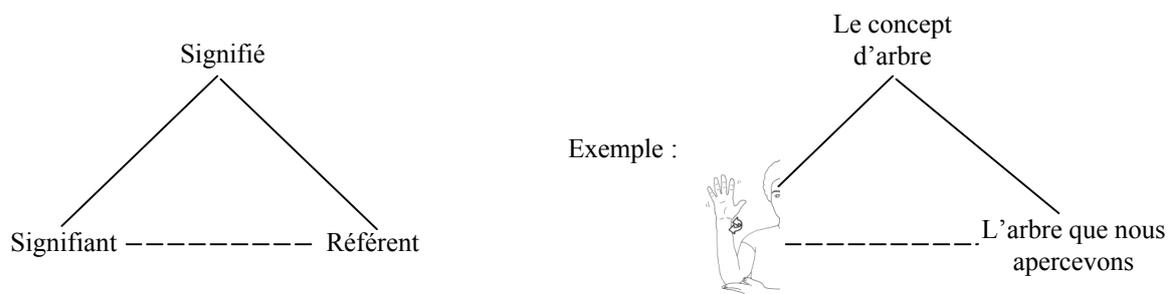


Figure 1.1 : les trois facettes du signe.

La figure 1.1 présente ces trois composantes du signe. Dans l'exemple proposé, le signifiant qui nous importe est de nature gestuelle. Ses équivalents pourraient être le mot /arbre/ ou /Baum/ (pour l'écrit), un dessin représentant un arbre, ou encore la définition de ce dernier. Ces différentes formes montrent bien que le signifiant est arbitraire.

Signalons pour clore ce paragraphe introductif qu'en communication homme-machine, le geste peut intervenir à la fois en entrée (une phase de reconnaissance est pour cela nécessaire), en sortie (il est alors synthétisé avant d'être présenté sur un dispositif adapté, tel un écran), ou en entrée-sortie. Ce type d'interaction est largement étudié un peu plus avant dans cette partie.

1.1.1.2. Catégorisation des gestes.

En raison de la richesse de la modalité gestuelle [MOR 97] et de la grande variété de formes qu'elle recouvre, il n'est pas aisé d'en établir une taxonomie, et il n'existe pas de consensus en la matière. En guise de première approche, on peut distinguer les gestes accompagnant la parole (désignés sous le terme *gesticulation*) et ceux qui en sont indépendants (gestes *autonomes*). D'autres dichotomies ont été proposées, notamment par Nespoulous (cité dans [COH 99]), telles celle opposant les actions pures aux symboles, ou celle basée sur le degré d'universalité – et d'intelligibilité – des gestes.

Même s'il ne peut refléter toutes les fonctions du geste, le système de classification donné par Kendon [KEN 88] est intéressant en ce qu'il synthétise, sous la forme d'un *continuum*, plusieurs autres réflexions portant sur le même sujet (figure 1.2).



Figure 1.2 : le continuum de Kendon.

Ce continuum reflète une évolution croissante (lorsqu'on le parcourt de gauche à droite) de la complexité et de la richesse du message gestuel :

- Par *gesticulation*, il faut entendre l'ensemble des gestes co-verbaux (accompagnant la parole), que nous étudions plus avant dans la prochaine partie.
- Le terme « gestes de para-langage » résulte de la traduction de l'anglais *language-like gestures*. En réalité, ils ne constituent nullement un langage car, à la différence des langues des signes, ils apparaissent plutôt comme un simple système de codage au vocabulaire très restreint et sans combinatoire. Ce sont par exemple les gestes utilisés pour l'arbitrage de certains sports.
- La pantomime vise à créer une image gestuelle d'un objet, d'un événement, d'un état d'esprit, ... Son but est de rendre évident au spectateur le *signifié* par sa seule forme ; elle est donc fortement *iconique*.
- Les emblèmes (encore appelés gestes symboliques) sont des gestes complétant les mots ou utilisés à leur place. Ils sont utilisés au sein d'une société, pour les membres de laquelle ils ont une signification fixe et communément acceptée. Le froncement des sourcils est ainsi largement répandu pour exprimer le doute, le désaccord ou une difficulté de compréhension. En revanche, la représentation des chiffres avec les doigts de la main diffère selon les cultures ; le système chinois n'a pas grand-chose à voir avec celui que nous trouvons en France.
- Les langues des signes sont les seules à pouvoir être considérées comme de véritables langues. Elles possèdent en effet certaines propriétés de décomposition, certaines règles de formation et d'ordonnancement, et une combinatoire permettant de générer de nouveaux items lexicaux selon les besoins.

Comme le souligne Mc Neill [MCN 92], lorsque l'on se déplace le long de cette échelle dans le sens des flèches, on observe que la nécessité d'accompagner le geste par la parole diminue¹, alors qu'apparaissent progressivement des caractéristiques propres aux langues. Parallèlement, les gestes co-verbaux sont fortement *idiosyncratiques*, alors qu'emblèmes et signes sont largement régulés par la société qui les utilise.

1.1.1.3. Le geste co-verbal.

Il est fort probable que, dans le développement de la communication entre les hommes, le geste ait précédé le langage. Le fait que certains gestes possèdent des référents externes pourrait en être une explication ; montrer un objet ou évoquer sa forme semble le plus naturel pour le désigner. En était-il déjà ainsi pour nos lointains ancêtres ? Toujours est-il que, selon Mc Neill, la communication gestuelle est plus intimement liée à la pensée que le langage. Pour étayer cette thèse, on peut remarquer que l'«erreur gestuelle» n'existe pas dans le geste co-verbal : si je désigne ma droite en parlant de la gauche, on aura compris que c'est ma langue qui a fourché.

Le canal gestuel est à même de transmettre une information riche, précise. Dans des situations où le message oral est trop dégradé (par exemple dans le cas d'un bruit environnant intense ou d'une isolation phonique par une vitre), ou lorsque l'on ne maîtrise pas suffisamment la langue de son interlocuteur, cette modalité constitue une alternative intuitive à la parole. La gesticulation est utilisée dans le monde entier pour compléter, préciser, nuancer, voire contredire le contenu du discours. La théorie moderne conçoit le geste et la parole comme parties d'un tout cohérent procédant de la pensée. Kendon définit même ce que l'on pourrait traduire en français par « articulation » (dont la polysémie est d'ailleurs aussi utile que révélatrice) comme une unité résultant d'une combinaison de deux composants, l'un verbal et l'autre gestuel.

Plusieurs constatations réalisées par les mêmes auteurs viennent étayer cette thèse :

- Le geste est non seulement un acte communicatif économique mais aussi efficace, et sa suppression ou sa non-perception entraînent une dégradation de la compréhension du message.
- L'utilisation de l'une ou l'autre modalité dépend fortement du type d'information à transmettre ; le degré d'*iconicité* du contenu et de sa représentation mentale commande le comportement gestuel.
- Les gestes sont synchronisés avec les unités linguistiques; en particulier, la phase dynamique signifiante (parfois précédée d'un mouvement de préparation et suivie d'une phase de rétraction) précède très légèrement ou correspond exactement à un pic sémantique du discours.
- Le développement et la sophistication des gestes co-verbaux chez l'enfant accompagnent ceux du langage; ils disparaissent au contraire avec les facultés langagières chez le sujet aphasique.

¹ La pantomime, au contraire des emblèmes, n'est jamais accompagnée de la parole (elle se rapproche en cela des langues des signes). Une permutation de ces deux entrées dans le continuum serait donc envisageable.

Outre les gestes emblématiques et pantomimiques cités précédemment, les illustrateurs peuvent accompagner le message oral; ils sont dépendants de ce canal. On ne trouve point en la matière de classification ou d'appellation communément acceptées dans la littérature mais le tableau 1.1, issu de la discussion de L. Messing sur la communication bimodale [MES 93], reprend les termes les plus fréquemment rencontrés. Il est à noter que ces différents types de gestes ne sont pas mutuellement exclusifs : il peut arriver qu'un même geste comporte plusieurs de ces aspects.

Type de gestes	Description	Exemples
1. Déictiques	Désignent par pointage un objet, une personne ou un groupe, un endroit ou une direction. Dans l'immense majorité des cas, ils sont exécutés grâce à l'index tendu et parfois un faible mouvement. Mais ce rôle peut être aussi pris en charge par le pouce tendu, ou un léger mouvement de tête.	« On va <i>PAR LA</i> ? » « Sur cette photo de famille, on te reconnaît <i>TOI, TES PARENTS, ...</i> »
2. Iconiques	Evoquent des objets, des personnes ou actions en en soulignant les caractéristiques marquantes (taille, forme, ...) et les relations. Parfois, les référents sont incarnés par les mains ou d'autres parties du corps. Les gestes iconiques peuvent aussi spécifier le point de vue selon lequel l'action est rapportée [CAS 95].	<i>Voir les exemples pour chacune des formes particularisées de gestes iconiques</i>
2.1. Spatiographiques	Montrent une relation spatiale entre les référents : position, distance ou orientation relative, relation topologique (contact, inclusion).	« Il m'a frôlé en voiture, en passant à ... combien ? <i>VINGT CENTIMETRES</i> »
2.2. Pictographiques	Evoquent la forme, la taille ou l'état de surface d'un objet, soit en dessinant celui-ci dans l'espace, soit grâce à la seule configuration de la main.	« Le Zeppelin, tu sais, ce dirigeable en forme de <i>BALLON DE RUGBY...</i> »
2.3. Kinégraphiques	Représentent le mouvement de quelque chose ou quelqu'un. Bien souvent, la main joue le rôle d'un référent.	« Les deux rames se sont <i>TELESCOPEES FRONTALEMENT</i> »
3. Marqueurs	Marquent le rythme dans le discours.	Voir ci-dessous
3.1. Bâtons	Utilisés pour insister sur un mot ou une phrase d'importance particulière, ils sont souvent caractérisés par un mouvement rapide de l'index tendu, parfois avec un contact sur un objet.	« Il n'est pas <i>QUESTION</i> que tu sortes ce soir » « Et c'est <i>LA</i> où je voulais en venir »
3.2. Rythmiques	Expriment la vitesse ou le rythme à laquelle s'effectue une action, ou la durée de celle-ci.	« Le coureur est passé <i>COMME UNE FLECHE</i> »
3.3. Idéographiques	Suivent le déroulement de la pensée, en marquant par exemple les étapes fondamentales d'un raisonnement, une alternance logique, ...	« <i>PREMIEREMENT</i> , vous voudrez bien rester poli, et <i>DEUXIEMEMENT</i> , ... »

Tableau 1.1: différents types de gestes illustrateurs.

D'autres gestes co-verbaux sont parfois décrits, notamment ceux révélant l'état mental du locuteur (nervosité, embarras, ...), qui se traduisent par des mouvements dont il a rarement conscience mais que peut interpréter son auditoire (rajustement des lunettes ou frottement de la tempe, par exemple).

Le rôle joué par les expressions du visage dans l'accompagnement de la parole est indéniablement important. Il est donc regrettable que soient si rares les travaux relatifs à ce mode de communication. On trouve néanmoins quelques repères dans les travaux menés à l'Université de Pennsylvanie au sein du Laboratoire HMS (Human Modeling and Simulation). En particulier, Pelachaud et ses collaborateurs [PEL 94] décrivent un système d'animation du visage, détaillant l'intervention de chacune des composantes faciales. Cette étude s'inscrit dans un projet plus global d'animation de personnages virtuels en conversation multi-agents [CAS 94]. Les chercheurs du MIT Media Lab, dont J. Cassell, ont à cette fin implémenté un planificateur à base d'automates prenant en charge la synchronisation des mouvements des bras et des expressions faciales (notamment la direction du regard) avec le texte énoncé.

1.1.2. Le geste en interaction homme-machine.

L'exploitation du geste en communication homme-machine a été rendue possible dès lors que les ordinateurs ont acquis une puissance de traitement de l'information suffisante. L'apparition de dispositifs nouveaux, notamment la souris, a permis le remplacement partiel et progressif des langages de commande et des systèmes d'exploitation textuels (tels DOS et UNIX) par des interfaces graphiques. Des dispositifs d'entrée plus perfectionnés permettent dorénavant d'entrevoir l'utilisation du geste naturel comme moyen de commande, en particulier dans le domaine du handicap.

1.1.2.1. Les gestes de manipulation.

Afin que le message dont il est porteur soit effectivement transmis, le geste doit être perçu – ou, plus généralement, capté – car il est évanescent par nature. Les périphériques exploitant le geste fonctionnent pour la grande majorité en mode continu, c'est-à-dire que les informations sont captées de façon permanente. Des événements discrets (tel le clic de souris) peuvent y être adjoints pour des opérations spécifiques ponctuelles (notamment la validation d'une commande).

Dans les interfaces gestuelles récentes, les objets réels sont représentés par des équivalents virtuels, comme ceux apparaissant sur le « bureau » de Windows[™]. Afin de rendre intuitive l'utilisation de la machine, les éditeurs de logiciels tentent de généraliser les fonctionnalités tirant profit du « glisser-déplacer », que ce soit pour la sélection préalable à toute action (par exemple en dessinant un rectangle élastique autour des objets) ou pour spécifier cette commande même (tel le déplacement de blocs de texte ou d'objets graphiques). Ces gestes, permettant d'agir par contrôle direct sur des objets virtuels par l'intermédiaire de leur représentation graphique, sont dénommés *gestes de manipulation*. Il s'agit typiquement de désigner les objets par sélection (c'est pourquoi on parle aussi de *gestes de désignation*), puis de leur appliquer une *action* (ou *commande*).

L'utilisation de la souris a peu évolué durant les deux dernières décennies. Les efforts se portent actuellement sur l'analyse structurelle du geste de désignation par ce moyen [BEL 95].

D'autres types de dispositifs de dialogue (dits encore *de vis-à-vis*) peuvent être mis à profit en fonction des besoins de la situation :

- l'écran tactile trouve surtout son application dans les bornes interactives. Il offre une précision assez faible, et parce qu'il engendre une importante fatigabilité du bras, l'interactivité se limite souvent à une arborescence de choix présentés sous forme de boutons à l'écran. Il est donc bien adapté à une mobilité réduite de la main ou pour présenter des choix restreints.
- le crayon et la tablette graphiques sont d'usage courant en Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Ils constituent en effet un moyen commode de sélection d'une commande parmi un grand nombre pour générer et manipuler des composantes graphiques.

1.1.2.2. Capturer et reconnaître le geste naturel.

Les dispositifs cités précédemment ne reconnaissent qu'un nombre très restreint de gestes, et leur utilisation est contraignante. Ils sont particulièrement mal adaptés aux personnes dont la mobilité du bras est réduite. L'engouement actuel pour les interfaces utilisant les gestes naturels a débouché sur de nouvelles solutions. Il va de pair avec le développement de systèmes de capture de plus en plus sophistiqués permettant d'acquérir jusqu'à des informations spatiales :

- Dispositifs externes, les caméras numériques possèdent l'avantage d'offrir à l'utilisateur toute liberté de mouvement, même si une instrumentation restreinte est parfois employée (telle que des gants colorés [NOL 98], des marqueurs luminescents [LOO 83, POI 86] ou réfléchissants), afin de faciliter les traitements informatiques. Ces derniers sont en effet fort complexes, et c'est l'inconvénient de ces systèmes, surtout dans le cas où deux caméras au moins sont utilisées pour reconstruire une information tridimensionnelle.
- Les gants numériques permettent d'obtenir, selon leur réalisation technologique (et donc leur prix !) une précision allant d'une simple courbure globale de chaque doigt à la valeur angulaire en chacune des articulations. Fibres optiques ou jauges de contraintes sont les systèmes les plus utilisés pour mesurer les flexions. Ces dispositifs ont d'abord permis la reconnaissance de gestes de pointage (*déictiques*) [LAT 98].
- Aux gants numériques peuvent être associés des capteurs de position et orientation spatiales, moyennant quoi il est possible d'obtenir l'ensemble du mouvement par les configurations successives du système bras-main. Le capteur Polhemus monté sur le DataGlove a ainsi permis à J. Sparrell [SPA 93] de développer un analyseur de gestes *iconiques* co-verbaux au sein d'une interface multimodale. A. Wexelblat [WEX 94] a, lui, utilisé deux CyberGloves en association avec des capteurs situés sur ces gants, le haut du tronc ainsi que le front, dans l'optique d'une reconnaissance d'une plus grande variété de gestes.
- Divers systèmes ont aussi été proposés pour piloter une machine grâce aux mouvements de l'œil. Le projet baptisé Cyclope [COU 96], développé au sein du Laboratoire d'Automatique Industrielle et Humaine de Valenciennes, est basé sur l'électro-oculographie. Cette méthode permet, outre le suivi des yeux dans quatre directions, de détecter les mouvements musculaires correspondants. Mais elle est contraignante pour le

sujet, et des techniques sans contact par vision lui sont généralement préférées [CHR 96, VAR 98]. La commande de validation, correspondant au « clic » sur ce type de souris oculaire virtuelle, est réalisée au moyen d'un clignement de paupière.

- Les dispositifs à immersion (par exemple, les harnais, ou l'association d'un gant et d'un casque en réalité virtuelle) sont utilisés pour capter des déplacements globaux tels que la marche. Ils requièrent souvent une instrumentation importante et risquent de ce fait d'entraver les mouvements naturels, même si la transmission infrarouge des données a permis de s'affranchir des fils reliant les capteurs à la centrale de mesure.

Quelle que soit la technologie de reconnaissance adoptée (modèles de Markov cachés [STA 95], réseaux de neurones, ...), tout système doit surmonter certaines difficultés inhérentes à la complexité des gestes humains :

- *La détection des limites des gestes (problème de segmentation).*
Lorsque ceux-ci sont émis en séquence, les phases d'approche, de rétraction ainsi que les tenues en début et fin de mouvement sont souvent supprimées.
- *L'influence mutuelle entre gestes (phénomène de coarticulation).*
La production peut être modifiée en fonction des gestes précédents et suivants [PEN 98].
- *La variabilité d'exécution intra-personnelle ou inter-personnelle.*
Un même geste est produit différemment selon son contexte, et son image mentale ne saurait être rigoureusement identique d'un sujet à l'autre.

D'autre part, sur le plan technique, la façon de traiter et d'encoder les données est déterminante dans le succès de l'opération.

Le développement d'interfaces multimodales est désormais la prochaine étape (voir [BEL 96] pour un état de l'art). En particulier, des études ont porté sur l'utilisation parallèle de dispositifs de capture 2D (souris/trackball, stylo optique, écran tactile), de la parole et/ou du geste dans l'interaction homme-machine.

1.1.2.3. Les interfaces gestuelles en communication palliative.

Les applications de capture et reconnaissance de gestes sont particulièrement utiles pour fournir des interfaces dédiées aux personnes souffrant d'un handicap sensoriel ou moteur. Dans ce cadre, il faut définir avec soin les différentes primitives gestuelles, pour ensuite être capable de les détecter dans le signal d'entrée. Cela est d'autant plus difficile que l'information utile peut être très réduite ou fortement variable.

En collaboration avec une équipe spécialisée en psychomotricité, D. Toffin [TOF 98] a ainsi évalué le contrôle moteur d'enfants infirmes moteurs cérébraux. Les gestes ont été enregistrés au moyen de capteurs de type Flock of Birds pour reconnaître des primitives de mouvement (droite, demi-cercle) formant plusieurs figures à reproduire (*morphocinèses*).

Parallèlement aux systèmes de reconnaissance de la parole, des études portent actuellement sur l'usage de la langue naturelle des personnes sourdes pour leur permettre de dialoguer via une machine. H. Sawada [SAW 98] décrit ainsi un système de reconnaissance de la

langue des signes basé sur un ensemble de primitives gestuelles et des accéléromètres. L'étude réalisée au sein du LIMSI par A. Braffort [BRA 96] constitue une étape importante qui prend en compte les particularités grammaticales de cette langue.

Les oculomètres, évoqués plus haut, trouvent tout particulièrement leur application dans le domaine du handicap. La détection de la direction du regard par système de vision permet désormais aux personnes tétraplégiques de piloter un ordinateur et de retrouver ainsi un moyen d'expression [REC 96].

Mais la richesse de la recherche concernant la reconnaissance des gestes ne doit pas faire oublier, dans l'optique d'une communication homme-machine bidirectionnelle, de disposer également de gestes en sortie. Il s'agit de les présenter à l'écran, en respectant leur contenu sémantique.

La première solution consiste à utiliser des séquences vidéo enregistrées, dont les inconvénients sont présentés plus loin. Une autre solution qui nous intéresse très directement est l'élaboration de gestes synthétiques.

1.1.3. Les langues gestuelles.

Nous souhaitons d'abord expliquer en quelques mots pourquoi nous avons choisi, dans ce contexte, de focaliser notre intérêt sur les langues gestuelles. Après une brève description du processus de leur genèse, nous exposons pourquoi c'est bien au pluriel dont il faudrait systématiquement parler de la langue des signes. Car il en existe une multitude de par le monde, aux réalités fort différentes, avec des variations régionales et sociales parmi bien d'autres.

Dès lors, ce que nous entendons par « langue des signes » correspond à celle d'un pays donné – précisé ou non –, ou bien désigne, dans leur globalité, l'ensemble des caractéristiques communes aux différentes langues gestuelles du monde.

1.1.3.1. Pourquoi étudier les langues gestuelles ?

Selon L. Messing [MES 93], « lorsque l'usage de la parole est rendu impossible pour quelque raison que ce soit, les gestes naturels peuvent s'organiser en un système gestuel qui peut à son tour évoluer en une véritable langue signée ». Celle-ci se distingue des gestes exposés jusqu'ici en ce qu'elle ne se résume pas à un simple lexique figé, mais possède une *phonologie*, une grammaire et une syntaxe propres. Les signes peuvent être ainsi décomposés en primitives formationnelles, fusionner pour former de nouveaux signes, et se succéder dans un discours cohérent auto-suffisant. Nulle règle générative ou combinatoire n'existe en revanche dans la gesticulation.

Nous avons précédemment souligné l'unité du message qui s'exprime simultanément via la parole et le canal gestuel. M. Brennan [BRE 97] fait à ce propos une observation des plus intéressantes : seules les langues des signes associent le mot et l'image en un seul et même système. « Le signe est à la fois un ensemble de composants formationnels conventionnels et le véhicule d'expression d'une image ». Pour illustrer cette assertion, l'auteur relate la genèse du

signe *diglossie* : dans un premier temps, les étudiants ont inventé un signe dans lequel les mains étaient situées en des points de niveaux décalés, évoquant la différence entre la forme linguistique « haute » (formelle) et « basse » (parlée)². Puis le signe a évolué pour aboutir à une forme communément acceptée dans laquelle les doigts viennent en contact avec le milieu de l'avant-bras gauche. En respectant la structure phonologique de la langue, ce signe en exploite alors simultanément les capacités iconiques et métaphoriques.

C'est précisément cette richesse et ce potentiel expressif remarquables qui nous ont portés à étudier la langue des signes et en proposer un outil de synthèse. Mais avant de détailler le cadre de notre étude, posons quelques jalons sur les langues gestuelles.

1.1.3.2. Genèse [MOO 83].

Jusqu'au XVI^{ème} siècle, les sourds ne disposent pour communiquer que de quelques gestes mimiques et pantomimiques. Souvent isolés, certains se regroupent toutefois en communauté; mais l'éducation, réservée à quelques sourds issus de riches familles, consiste jusqu'au milieu du XVIII^{ème} siècle, à tenter de leur apprendre la langue orale. C'est ainsi que naît, grâce à Juan Pablo Bonet vers 1620, l'ancêtre de l'alphabet *dactylologique* que nous connaissons aujourd'hui.

Avec l'avènement des Lumières, c'est l'Abbé de l'Epée (1712-1789) qui, le premier, commence à s'intéresser au langage naturel préexistant des sourds comme instrument de leur instruction, de communication, et d'expression de la pensée humaine au même titre que la langue orale. A la même époque, Desloges, un sourd-muet parvenu à un haut niveau d'éducation, est le premier à évoquer dans son livre une structure de la langue des signes.

Les « signes méthodiques » de l'Abbé de l'Epée, visant à l'apprentissage du français, empruntent au langage naturel des sourds certains signes représentant les choses et les idées, mais incluent aussi des signes bâtis de toutes pièces pour exprimer les différentes fonctions grammaticales (temps, genres, articles, ...) du français. Malheureusement, s'ils permettent effectivement de transcrire le français écrit, les « signes méthodiques » ne constituent nullement une véritable langue, car leur caractère abstrait et artificiel les rend fort peu évocateurs de leurs *signifiés*. De plus, leur syntaxe respecte scrupuleusement celle de la langue orale. Ils étaient ainsi le plus souvent inintelligibles pour les sourds mêmes qui les utilisaient. Ce problème subsiste avec le successeur direct de Charles Michel de l'Epée, l'Abbé Sicard, à la tête de l'école devenue l'Institution Nationale des Sourds-Muets.

Bébian (1794-1834) est véritablement l'homme qui, grâce à un profond respect pour les sourds et leur culture, donne à la langue des signes un élan de premier ordre. Il préconise en effet, et met en œuvre avec succès, une éducation bilingue avec, comme outil primordial dans le développement intellectuel, la langue utilisée par les sourds eux-mêmes. Les signes naturels ne se réfèrent plus aux mots, mais bien aux idées qu'ils sous-tendent. En outre, Bébian entreprend d'analyser avec précision les formes de la main, les mouvements et les expressions du visage, afin d'élaborer un premier système d'écriture des signes. Ce travail débouche sur la première

² La coexistence de l'arabe littéral et de l'arabe dialectal est un exemple de *diglossie*.

grammaire de la langue des signes, publiée en 1854 par Rémy-Valade, « *Etudes sur la lexicologie et la grammaire du Langage Naturel des Signes* ».

Aussi, la langue des signes va rapidement s'imposer comme une langue d'enseignement. La création d'écoles un peu partout en France et l'acquisition d'une véritable reconnaissance de son statut social, sont les témoins de la santé florissante de la culture des sourds. Ferdinand Berthier, doyen des professeurs sourds à l'Institut de Paris, dont l'intelligence et la finesse d'esprit sont reconnues, est peut-être l'exemple le plus brillant, parmi de nombreux autres intellectuels et artistes, de l'épanouissement, la créativité, et de la fierté militante des sourds de cette époque.

La vivacité de la culture sourde en France ne tarde pas à rayonner dans les autres pays. Dès 1816, Laurent Clerc et Thomas H. Gallaudet fondent la première école américaine d'instruction des sourds avec un apport important de signes français pour enrichir le vocabulaire local préexistant. Les langues des signes irlandaise et russe trouvent également leurs racines dans la langue des signes française (LSF) de cette époque [STO 72 : 121,130].

1.1.3.3. Les langues des signes aujourd'hui.

Comme nous l'avons signalé au début de cette partie, de nombreuses langues des signes différentes cohabitent aujourd'hui au niveau mondial, et même au niveau de chaque pays. Si le rêve des premiers auteurs sur la langue des signes est que celle-ci unisse les sourds du monde entier, voire constitue une langue universelle, force est de constater qu'actuellement, les langues des signes diffèrent autant l'une de l'autre que les langues orales [MAR 79]. Certes, il existe entre certaines, du fait de leurs racines communes, de nombreuses similitudes que nous ne manquons pas de souligner tout au long de ce mémoire. Les sourds des divers pays en tirent profit et communiquent beaucoup plus aisément que les entendants, en complétant leurs systèmes de signes propres par des gestes mimiques. Mais cela se fait au détriment de l'efficacité et de la rapidité, car la pantomime est moins économique que le signe, et bien souvent, la présence d'un interprète est néanmoins nécessaire [MOT 78].

De même que la communication est difficile entre deux interlocuteurs monolingues maîtrisant chacun une langue orale différente, le degré d'intelligibilité d'un signeur en langue des signes britannique (BSL) est très faible pour un utilisateur de la langue des signes américaine (ASL), alors qu'il est élevé entre signeurs français et américains, ainsi qu'à travers une grande partie de l'Amérique du Nord (U.S.A, Canada, Mexique géographiquement ou culturellement proche des Etats-Unis).

En outre, il existe au sein d'un même pays de nombreuses disparités entre langues des signes, selon des critères multiples [WOO 79] : variations régionales, sociales, ethniques, en fonction de l'âge ou du sexe, et ceci à tous les niveaux de la langue (phonologique, lexical ou grammatical). On trouve, dans les langues orales, des items lexicaux propres à telle ou telle région, des accents locaux; il en va de même pour les langues des signes, où les signeurs arrivent à deviner la région et souvent l'école d'origine de leurs interlocuteurs.

1.1.3.4. Langues des signes et langues orales.

Les sourds d'un pays appartiennent à un environnement physique et culturel dont ils sont imprégnés, une société de l'oral et de l'écrit à laquelle il a bien fallu s'adapter puisque leur statut de minorité ne leur laisse guère d'autre choix. Afin de communiquer de façon satisfaisante avec les entendants qui les entourent, et qui ne maîtrisent pas leur langue, les sourds utilisent une sorte d'intermédiaire entre celle-ci et la langue orale.

En France, ce système gestuel est dénommé « Français Signé »; chaque mot de la phrase française y est signé par son équivalent en LSF, en respectant la syntaxe et l'ordre des mots. Les articles, prépositions, **monèmes** grammaticaux marquant le genre, le nombre ou les temps, ... sont introduits de façon artificielle, ainsi qu'une part plus ou moins importante d'épellation **dactylogique**, lorsque le signeur respecte scrupuleusement la phrase française. En effet, LSF et Français Signé se situent aux extrémités d'un **continuum** linguistique probablement non-linéaire mais multidimensionnel, incluant toutes les variantes possibles entre les deux modes de communication. Ainsi, selon le degré de maîtrise de la LSF des interlocuteurs, ceux-ci peuvent choisir d'en respecter plus ou moins fidèlement la syntaxe et les spécificités grammaticales, ou de se rapprocher davantage d'une traduction « mot à signe » du français, en abandonnant diverses caractéristiques propres à la langue des signes telles que l'utilisation de l'espace et les expressions faciales.

Le même système existe pour l'anglais américain, s'étendant de l'ASL à l'Anglais Signé Exact (SEE - *Signed Exact English*), en passant par de nombreuses variations incluant l'Anglais Signé Pidginisé et un *Signed English* plus ou moins strict.

A ce propos, signalons pour mémoire l'existence des méthodes d'aide à la lecture labiale que sont le LPC (Langage Parlé Complété, *Cued Speech* en anglais) et l'AKA (Alphabet des Kinèmes Assistés) [RON 86]. En LPC, différentes configurations manuelles sont utilisées pour distinguer les **phonèmes** pour lesquels la forme des lèvres est identique. Lors de la prononciation du mot « *main* » par exemple (figure 1.3), pour différencier le 'M' de ses sosies labiaux 'B' et 'P', la configuration plate de la main désigne le groupe auquel appartient cette consonne. Les voyelles sont elles aussi regroupées et quatre positions différentes leur correspondent (sur la gorge, le menton, à côté de la bouche et de la joue).



Figure 1.3 : Caractérisation du *m* de *main* en LPC.

Ces systèmes s'inscrivent dans une perspective oraliste et favorisent notamment l'apprentissage de la lecture chez les enfants sourds [TEL 98]. Mais ils ne constituent absolument pas une langue par eux-mêmes.

1.1.4. Une langue à part entière.

Les preuves apportées par la linguistique moderne montrent au contraire que la langue des signes est plus que le simple « système de gestes » auquel on l'a longtemps réduit, et mérite bien le statut de langue. Avant d'en exposer les raisons en quelques points, signalons l'intéressante réflexion sur ce sujet qui nous est donnée par A.L. Petitto [PET 94]. Outre les arguments développés ci-dessous d'ordres linguistique et sociolinguistique, cet auteur présente un faisceau de preuves d'ordre physiologique. L'analyse biologique du statut des langues signées naturelles dans le cerveau humain permet de réfuter une meilleure adéquation ontogénétique ou phylogénétique de ce dernier pour la parole. En d'autres termes, ni l'évolution de l'individu, ni celle de son espèce, ne montre que l'homme est « fait » pour s'exprimer oralement.

1.1.4.1. Iconicité et capacité de communication.

Un des principaux reproches qu'adressent à la langue des signes ses détracteurs est son caractère purement figuratif et, de fait, son incapacité à représenter l'abstraction. Nous allons de suite voir qu'il n'en n'est rien [MAR 79].

Il reste exact que de nombreux items lexicaux possèdent un caractère *iconique*, le *signifiant* évoquant le *signifié* de façon imagée, et que cela demeure le cas aux niveaux syntaxique et morphologique. En LSF, le signe *ascenseur* évoque clairement le mouvement ascendant d'une cabine d'ascenseur; de nombreux verbes (tels *faire_la_vaisselle*, *peindre*, ...) figurent directement l'action correspondante.

Mais les expériences menées par Klima et Bellugi [KLI 79] sur l'ASL prouvent que la plupart des signes sont, au contraire, opaques (c'est-à-dire que le signifié ne transparait pas à travers le signifiant). En effet, les sujets entendants interrogés n'ont pas pu transcrire correctement plus de 10% des signes présentés, résultat n'excédant pas 20% lors d'un questionnaire à cinq choix possibles. Les auteurs en concluent que la plupart des signes sont « translucides », à savoir que les observateurs extérieurs s'accordent sur l'existence d'une relation entre le signe et sa signification apparente, sans que celle-ci soit nécessairement correcte.

Klima et Bellugi soulignent également que les processus grammaticaux intervenant sur les signes (dont nous reparlons dans la deuxième partie) opèrent uniquement sur leurs paramètres de formation, et non sur leurs propriétés iconiques. Au contraire, on note au cours de ces processus une perte d'iconicité. Il en va de même des changements *diachroniques* des signes [BEL 78, RAD 90] : si leur origine est souvent pantomimique, les évolutions historiques consistent en une centralisation spatiale, une symétrie accrue, une concentration du contenu lexical au niveau des mains et, plus généralement, une simplification du mouvement et un glissement vers l'abstraction. Ces phénomènes, résultant en une perte certaine de transparence, sont aussi observables pour les signes créés – par composition notamment – à partir d'unités lexicales préexistantes.

1.1.4.2. Capacité de communication.

Un autre critère fondamental pour l'accès au statut de langue à part entière réside dans la faculté à transmettre l'information signifiante sans ambiguïté. Concernant les langues des signes, les études menées au début des années 70 tendaient à assigner une moindre qualité dans cette transmission. C'est la conclusion d'Oléron [OLE 78], dont les expériences consistent en l'émission d'un message (de type Sujet-Verbe-Complément d'objet direct ou indirect) descriptif d'une image représentant une scène. L'efficacité de la transmission est évaluée en fonction de la capacité du récepteur à décrire fidèlement l'image de départ.

Des recherches aboutissant à des conclusions similaires, menées par Schlesinger sur la langue des signes israélienne (ISL) et Hoeman sur l'ASL, sont rapportées par Grosjean [GRO 79] qui en réfute la validité des résultats. Il affirme qu'une meilleure prise en compte du niveau de connaissance de la langue des signes par les sujets permet, au contraire, de conclure que celle-ci est à même de transmettre l'information tout aussi efficacement que les langues orales.

Concernant le débit de l'information, Grosjean note un intervalle de temps comparable pour la transmission du message, même si le rapport des débits en termes de signes et de mots est d'un pour deux environ (de nombreux items lexicaux du français oral ne sont en effet pas traduits en langue des signes). Les modifications des débits sont également semblables, bien que mettant en œuvre des stratégies différentes (le locuteur modifie la durée de l'articulation, le signeur celle des pauses).

Pour ce qui est enfin de l'étendue du vocabulaire, elle peut paraître limitée de prime abord : le dictionnaire de Moody [MOO 83] pour la LSF, et celui de Stokoe, Casterline et Croneberg [STO 78] pour l'ASL, contiennent tous deux environ 2500 signes. Sallagoity [SAL 75] décrit une langue signée utilisée dans le sud de la France en incluant 1200. Même si les langues des signes en comportent probablement deux à trois fois plus, ce nombre pourrait paraître modeste au regard des dizaines de milliers d'items lexicaux des langues verbales. Mais la grande polysémie des signes et l'immense variété de modulations portées par les processus grammaticaux, les expressions non-manuelles, font que les signeurs disposent d'une langue leur permettant de transmettre des nuances aussi fines, des idées aussi abstraites que les langues orales. De nouveaux signes sont constamment créés pour représenter les objets récemment inventés, les termes scientifiques, ...

1.1.4.3. La double articulation des langues.

Les langues des signes, comme les langues orales, sont en effet doublement articulées ; c'est-à-dire qu'elles permettent, à partir d'un petit nombre de *phonèmes* de base, de générer, en respectant certaines règles combinatoires, un nombre quasi-illimité de phrases. Les phonèmes se combinent en effet en *morphèmes*, unités minimales porteuses de signification, eux-mêmes se combinant pour former les lexèmes (mots ou signes) qui à leur tour constituent, en accord avec la syntaxe, les phrases et les *syntagmes*. Ce puissant mécanisme est, de par l'économie qu'il représente pour exprimer toute la plage des signifiés, un des critères majeurs de l'attribution de « vraie » langue par la linguistique moderne.

Or, nous y reviendrons plus en détails, Stokoe a démontré que la langue des signes pouvait elle aussi être décomposée en phonèmes gestuels. Il les a dénommés *chérèmes* (du grec *kheir*, la main) et leur étude, *chérologie*. Citons d'ores et déjà les trois chérèmes identifiés : l'endroit d'exécution ou *tabulateur* (TAB), la configuration manuelle ou *désignateur* (DEZ), et le mouvement (SIG).

Leur combinatoire est précisément définie par des règles structurelles telles que la contrainte de symétrie, la contrainte de dominance [KLI 79, WIL 79], déductibles à partir de statistiques [TEU 80], et dont la violation génère des signes incorrectement formés; c'est aussi ce qui fait que les signes ne se réduisent pas à de simples gestes. Les lexèmes suivent alors à leur tour une syntaxe propre pour former les phrases du discours.

1.1.4.4. Les subtilités d'une langue.

Précisément, l'humour et la poésie en langue des signes naissent du non-respect de ces règles combinatoires. Klima et Bellugi ont étudié avec précision ce type de mécanismes [KLI 79] et en ont identifié plusieurs catégories : production simultanée de deux signes par chacune des mains, recouvrement partiel par juxtaposition de deux signes, fusion séquentielle de signes par suppression des temps de latence entre eux, ou encore substitution d'une partie (par exemple, un paramètre formationnel) d'un signe par celle d'un autre.

D'autre part, comme dans la modalité verbale, une partie de l'information en langue des signes est transmise via des mécanismes *paralinguistiques* accompagnant le flot du discours et permettant de nuancer, compléter, voire contredire ce dernier. Ainsi en est-il des expressions faciales, et plus généralement non-manuelles, qui jouent par ailleurs un rôle prépondérant dans certains processus grammaticaux. Outre ces éléments de signification produits au niveau de la face parallèlement à l'émission du message, on peut encore citer la *prosodie* du signe (*kinésie* notamment), ainsi que les attitudes et postures corporelles.

1.2. Synthétiser le signe : cadre de l'étude et état de l'art.

Si la langue des signes est aujourd'hui pleinement reconnue comme telle, elle a souffert d'un bannissement de près d'un siècle auquel les sourds paient encore un lourd tribut. Les problèmes d'éducation qu'ils rencontrent en sont une conséquence directe. Afin d'y proposer une solution, nous montrons dans cette partie pourquoi nous avons opté pour une synthèse graphique des signes et quelles en sont les principales contraintes. Nous précisons en outre les tenants et aboutissants de cette étude, avant de passer en revue les travaux majeurs dont ce sujet a fait l'objet.

1.2.1. Pourquoi synthétiser ?

1.2.1.1. Répression de la langue des signes et problèmes liés.

Malgré l'épanouissement que connut la langue des signes au début du XIX^{ème} siècle, les querelles ne cessèrent pas entre enseignants partisans de l'éducation par la langue naturelle des sourds et les défenseurs de la méthode oraliste, concentrée sur le seul enseignement de la parole. La position d'Itard (1774-1838) est en ce sens assez révélatrice, puisqu'après avoir consacré de nombreuses années à apprendre à ses élèves la prononciation du français, il devait constater l'échec de sa méthode et reconnaître la langue des signes comme indispensable à l'éducation des sourds, mais devait rester néanmoins fidèle à une instruction oraliste.

La seconde moitié du siècle vit le triomphe de l'oralisme. La prédominance des enseignants entendants, l'uniformisation des méthodes d'éducation avec l'instruction obligatoire, ainsi que les progrès importants de la science laissant entrevoir une prochaine guérison de la surdité, ont contribué au bannissement progressif de la langue des signes en France, mais aussi dans les autres pays. En 1880, le congrès international de Milan, sous la mainmise des oralistes, prohibe toute utilisation des signes dans l'instruction des sourds. De fait, cette ligne de conduite guide l'éducation dans sa quasi-totalité et ce, pendant encore une bonne partie de notre siècle, avec pour conséquence un isolement dramatique de la communauté sourde.

Dans les années soixante et soixante-dix, il a bien fallu admettre l'échec de la méthode oraliste pure dans l'instruction des sourds profonds, méthode dont l'utilisation exclusive depuis presque un siècle a conduit à une grave sous-éducation. Suivant les Etats-Unis et les pays scandinaves, avec toutefois une bonne décennie de retard, la LSF a progressivement reconquis en partie ses lettres de noblesse aux yeux du grand public, à défaut de tout le terrain perdu. Symbole de cette nouvelle jeunesse, 1975 voit la traduction en signes du journal télévisé hebdomadaire sur Antenne2. Parmi les instigateurs de ce renouveau en France, citons Bernard Mottez et Harry Marckowicz, Bill Moody et plus généralement l'International Visual Theatre (I.V.T.) de Vincennes. Comme les diverses associations ayant vu le jour, tous contribuent à rapprocher sourds et entendants.

Néanmoins les problèmes d'éducation persistent [LEL 85]. On estime aujourd'hui que près de la moitié à deux tiers des sourds ont des difficultés plus ou moins prononcées à lire l'écrit.

De ces constatations est apparue la nécessité de disposer d'une représentation visuelle de la langue des signes. Deux possibilités s'offrent dès lors : utiliser la vidéo ou bâtir de toutes pièces des signes synthétiques.

1.2.1.2. Signes synthétiques et vidéo : quels avantages ?

Il est indéniable que la vidéo a joué, joue et continuera à jouer un rôle important dans l'apprentissage de la langue des signes et dans la diffusion de la culture dont celle-ci relève. Malgré sa démocratisation et son accès par le plus grand nombre, la vidéo doit cependant reconnaître à la synthèse de multiples avantages.

D'abord – c'est l'évidence même – la vidéo doit être créée, ce qui implique l'utilisation du matériel adéquat (caméra, camescope, ...), mais aussi la disponibilité des signeurs et un environnement (fond, éclairage, ...) satisfaisant, ce dont la synthèse n'est pas tributaire. Le signe peut être généré sur demande, même dans une situation d'urgence, à partir d'un nombre restreint de primitives graphiques. Il semble impossible au contraire, dans l'état actuel des connaissances en traitement d'images, de fusionner ou retoucher des vidéos de façon à obtenir un signe voulu ou une phrase signée à partir de constituants primitifs animés; de même, modifier l'angle de vision n'est pas envisageable avec une vidéo préenregistrée.

Ce problème est apparu aux membres de notre équipe lorsqu'ils furent confrontés à la difficulté de fournir un contenu étayé, notamment vidéo, aux outils informatiques génériques qui avaient été développés. Ce fut le cas pour le logiciel LAC [VAN 96], destiné à faciliter l'accès à une information thématique, principalement pour les personnes sourdes. De plus, pour le jeune sourd qui apprend à lire, un mot écrit n'est autre qu'une suite de formes graphiques auxquelles il ne peut associer de son. Il est donc important de favoriser l'acquisition de ce mot par l'évocation de sa signification sous d'autres formes. A cette fin, LAC fournit une structure d'accueil pour des corpus hiérarchisés de mots avec, pour chacun, une définition hypertexte, des exemples d'utilisation dans différents contextes, ainsi qu'une image illustrative. A ces informations s'ajoutent trois vidéos, l'une illustrant le concept (au moyen de ses applications, de son utilisation, ...), les deux autres en donnant les équivalents en LSF et en LPC (figure 1.4). Toutes les associations avec lesquelles nous travaillons ont souligné l'intérêt qu'elles portaient à un tel produit. L'une d'elle était ainsi fortement demandeuse d'un corpus relatif au code de la route, tant il est vrai que son acquisition par les sourds est délicate. Mais la charge de travail que représente l'élaboration des vidéos numériques, en particulier pour de petites structures associatives, s'est rapidement révélée prohibitive.

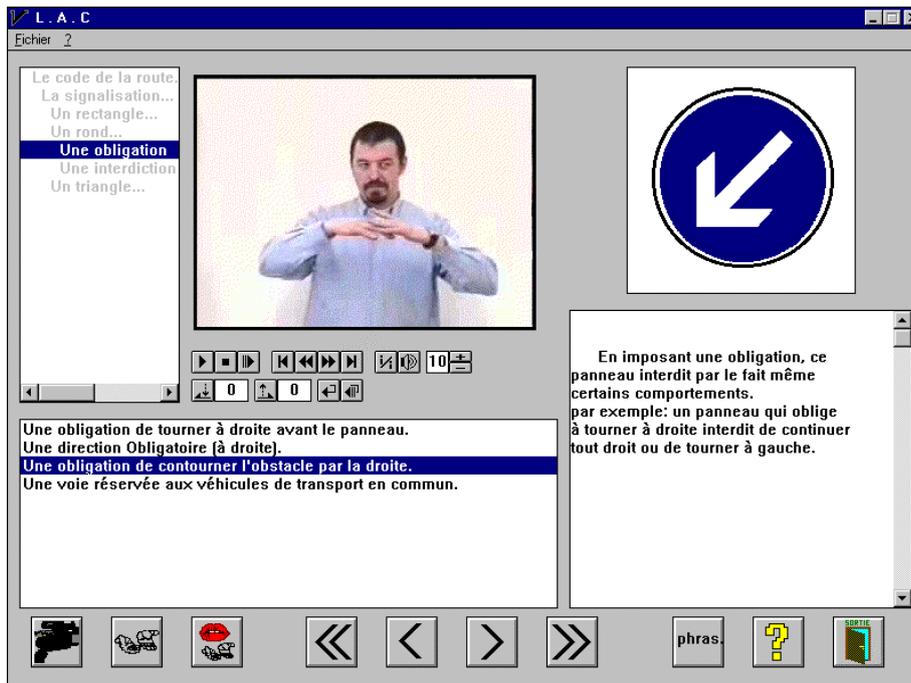


Figure 1.4 : l'interface du logiciel LAC.

Ensuite, dans la simple diffusion, l'écran de télévision associé au magnétoscope, est omniprésent. Mais l'ordinateur, dont l'apparition en tant que moyen d'information du grand public s'est faite dans les expositions et les administrations, est promis à un grand avenir dans cette utilisation. Il constitue en effet, bien plus qu'un simple moyen de diffusion, un réel outil de communication bidirectionnelle, capable de « dialoguer » avec l'utilisateur, voire de s'y adapter. L'équipement des ménages en ordinateurs personnels a connu parallèlement un essor formidable ces derniers mois. Or le stockage numérique des vidéos reste un problème, malgré l'avènement des disques durs, CD-ROM et DVD de grande capacité.

Enfin, la transmission du signe sur une longue distance, telle qu'avec les autoroutes de l'information et Internet, n'est pas aujourd'hui envisageable à grande échelle pour les vidéos. Même compressés, les fichiers correspondants demeurent trop volumineux face à la relative faiblesse des débits sur les lignes. Pour la synthèse en revanche, très peu d'information est nécessaire, surtout si le récepteur possède un module de génération graphique.

Un autre besoin a justement décidé l'équipe à choisir comme axe de recherche le développement de signes synthétiques : celle émanant de la télévision numérique, désireuse de doter ses émissions de sous-titres signés systématiques.

1.2.2. Cadre de l'étude.

1.2.2.1. Vue globale des objectifs.

L'analyse des besoins dont nous avons donné ci-dessus un aperçu nous a permis de définir un certain nombre d'objectifs qui doivent guider notre étude :

- Nous souhaitons développer un système de synthèse produisant des signes suffisamment simples (sur le plan graphique) pour s'approcher de la génération en temps réel, mais remplissant bien évidemment toute leur fonction signifiante.
- A cette fin, les études linguistiques constituent la base de notre proposition de décomposition des signes en primitives formationnelles et fonctionnelles orientées vers la synthèse.
- La description adoptée doit satisfaire à des critères de facilité de lecture, d'écriture et de modification, le niveau de spécification du signe doit être aussi élevé que possible.
- Elle doit également prendre en compte les divers processus grammaticaux propres à la langue des signes, tant au niveau lexical que du discours, ainsi que les expressions non-manuelles en général – notamment celles du visage.
- Nous allons enfin nous efforcer de développer une transcription suffisamment générique et « ouverte » pour être adaptée à la plus grande variété possible de langues des signes. Ceci implique principalement de fournir à l'utilisateur des moyens d'édition étendus à tous niveaux, et des primitives dont l'affinage doit constituer un compromis entre cette dernière contrainte et la facilité d'édition.

1.2.2.2. Tenants et aboutissants.

Notre étude s'inscrit dans un projet plus global visant à la traduction automatique d'un texte français en langue des signes, dont la figure 1.5 illustre les différentes étapes. On le voit, la synthèse n'est que le maillon final intervenant après de délicates phases d'analyse qui mettent en jeu des techniques de traitement du langage naturel. Face à la complexité et la diversité des problèmes soulevés, la plupart des chercheurs ont choisi de focaliser leurs efforts sur une partie spécifique.

Au sein de l'équipe, le travail de V. Vanneste s'est concentré sur l'analyse grammaticale informatisée du français. Après une vérification orthographique basée sur les *phonèmes* constituant les mots, les principaux constituants syntaxiques de la phrase sont extraits en parcourant un arbre d'analyse. Cette phase se base sur un ensemble de règles définissant une grammaire (éventuellement ambiguë) dont la finesse de définition est laissée à l'initiative de l'utilisateur. Grâce aux propriétés définies pour chaque type de *monème* grammatical, il est en outre possible d'éliminer de l'ensemble des solutions celles qui ne correspondent pas à la phrase d'origine.

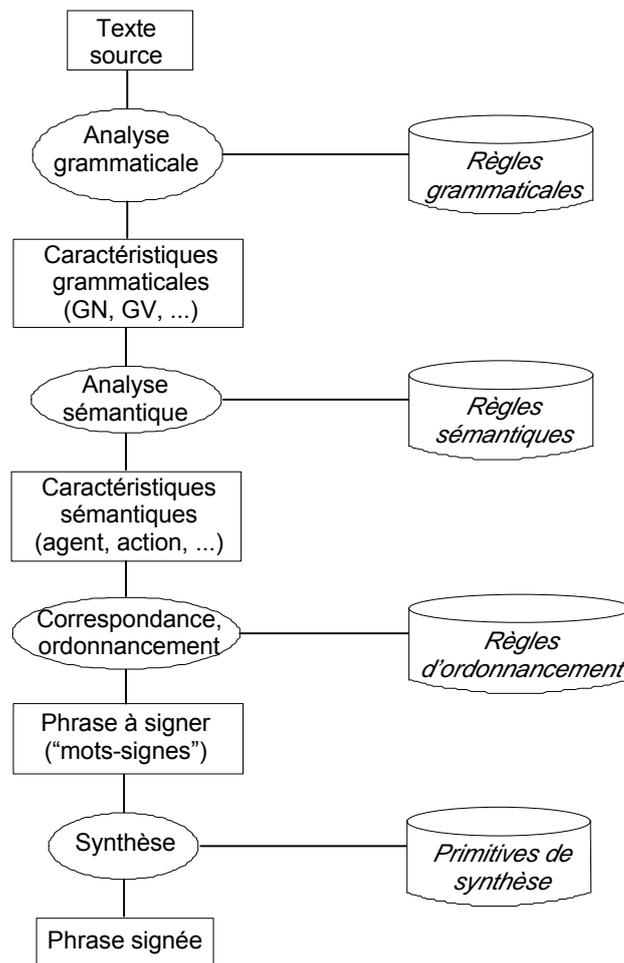


Figure 1.5 : Etapes de la traduction.

Les phases d'analyse sémantique et de séquençage des termes restent à développer pour une large part. Elles constituent un chaînon manquant dans le processus de traduction. Pour des phrases simples néanmoins, la jonction peut être réalisée. La synthèse s'appuie alors sur les informations fournies, telles que :

- les signes à produire, correctement ordonnés;
- les « intervenants » du discours et leur fonction (agent, patient);
- les différentes clauses de la phrase, avec leur type (condition, interrogation, ...) et les signes concernés;
- si possible, des informations plus précises concernant les pauses à observer et les ruptures dans le discours.

Ces données constituent le flux d'entrée de notre système, dont la fonction est d'en produire l'animation signée par un personnage virtuel dont les caractéristiques et les potentialités se rapprochent au maximum d'un signeur humain.

De façon plus détaillée :

- ① chaque signe doit être préalablement décrit
- ① la phrase à signer est lue; chaque « mot-signe » est alors évalué (à la condition qu'il fasse effectivement partie du dictionnaire constitué en ①), en tenant compte d'éventuelles flexions
- ② les différentes animations signées sont calculées
- ③ l'ensemble de la phrase signée est affiché en respectant les temps de production et les pauses

Précisons encore d'ores et déjà que cette étude vise davantage à démontrer la faisabilité d'une telle synthèse, et à en proposer un prototype validé, qu'à en réaliser un produit fini et hautement sophistiqué.

1.2.3. Signes synthétiques : état de l'art

Afin de mieux appréhender la problématique liée à une telle synthèse, nous nous proposons d'examiner ici différents travaux proches de ce domaine. De nombreuses études concernent spécifiquement la reconnaissance des signes; seules sont mentionnées dans cette partie celles dont les bases apparaissent fondamentalement importantes dans notre optique.

1.2.3.1. Premiers travaux d'animation.

Les images et, qui plus est, les animations de synthèse ne sont apparues que récemment dans l'histoire de l'informatique, en raison de la masse de données à traiter. Les premières tentatives concernant la langue des signes remontent au début des années 80.

Kawai et Tamura [KAW 85] proposent un système à base d'images informatiques fixes auxquelles sont ajoutées des flèches pour symboliser le mouvement. Ils réalisent ainsi la traduction d'une phrase en langue des signes japonaise, en utilisant une table de correspondance mot-signe, et la *dactylologie* en cas d'absence du mot à traduire. Les dessins numériques utilisés n'ont pas vocation à être une écriture; ils sont simplement utilisés pour présenter une phrase complète à l'écran. Dans le même esprit, Harrison [HAR 82] décrit un système dans lequel les signes sont schématisés par le déplacement d'un motif 2D pré-dessiné sur un fond fixe représentant le corps. Les marqueurs syntaxiques et diverses expressions faciales sont codés par des symboles apparaissant en marge du signe. Mais là encore, les représentations des signes ne sont pas modulables.

Le projet H.A.N.D.S. (*Hamburg Animated Dictionary of Sign Language*) vise, en partant de la notation HamNoSys, à générer des signes animés par succession d'images fixes. Dans son état d'avancement décrit dans [PRI 90b], le programme choisit, dans une base d'images bidimensionnelles, les primitives graphiques nécessaires et reconstruit une à une les images de la

séquence. Le module d'animation est également capable de gérer les priorités de plans, de moduler la vitesse d'émission, et d'effectuer des transitions fluides entre signes. Mais, pas plus que dans les travaux examinés ci-dessus, n'est ici proposée de synthèse des signes, synthèse dont l'auteur reconnaît du reste la nécessité.

1.2.3.2. Synthèses tridimensionnelles des signes.

La première synthèse tridimensionnelle des signes (de l'ASL) a été réalisée par Michael Shantz et Howard Poizner [SHA 82]. Leur programme, écrit en BASIC, trace le squelette des bras sous forme filaire, à partir de la description exhaustive des angles articulaires correspondant à une posture initiale donnée d'un signe. Le mouvement est alors généré en faisant évoluer les valeurs angulaires selon une courbe de variation.

Ces dernières années, c'est au Japon que la synthèse des signes a probablement connu son essor le plus remarquable. Xu, Aoki et Zheng [XU 91] décrivent un système d'obtention et de transmission d'images synthétiques entre ce pays et la Chine. L'animation se fait, là aussi, en propageant les variations angulaires le long des chaînes articulaires auxquelles sont attachés des systèmes locaux de coordonnées. Les travaux de T. Kurokawa [KUR 92] visent à constituer un dictionnaire gestuel. Il a pour cela développé un système de codage des configurations manuelles, sur lequel nous reviendrons, ainsi qu'un codage des formes corporelles basé sur une description en segments dont les extrémités peuvent occuper des positions discrètes dans l'espace. La vitesse du mouvement a également été prise en considération. L'ensemble de la structure est stocké dans une liste chaînée de pointeurs; l'auteur donne un exemple d'application à la traduction du japonais en langue des signes fournissant des images synthétiques filaires.



Figure 1.6 : Dessin au trait animé (*tree* [arbre]) [GOD 98b].

La langue des signes a servi d'exemple applicatif à des travaux de recherche sur la représentation du corps humain sous forme de dessins au trait [GOD 98a]. Enchaînés, ils forment une animation tout à fait séduisante (figure 1.6), d'autant que le personnage virtuel est doté de mimiques faciales remarquablement expressives [GOD 98b]. Mais, de même que dans les études précédentes, la description des différentes postures se fait à bas niveau (angles articulaires).

L'étude de T. Lebourque au sein du LIMSI a abouti à un système de commande gestuelle pour l'animation du bras et de la main [LEB 99a]. A partir des mouvements élémentaires est élaborée la synthèse de gestes naturels, en s'appuyant essentiellement sur leur forme et leur cinématique. Là encore, la langue des signes a constitué une application idéale et donné lieu au développement d'un langage formel des constituants formationnels des lexèmes. Néanmoins, ce système n'a pas été spécifiquement développé pour le signe lui-même ; en particulier, il ne prend pas en compte les processus grammaticaux qui s'y rapportent.

Les travaux les plus récents ont, semble-t-il, aboutit à de véritables synthèses de haut niveau. Citons le projet Sister Mary of the Internet, dont le signeur virtuel, développé par G. Stern, est aujourd'hui capable de reproduire des données provenant de capteurs montés sur des gants de type CyberGlove; il devrait à terme pouvoir effectuer une réelle synthèse du signe à partir de sa description phonétique inspirée de celle de Liddell et Johnson (voir 1.3.3). Cette description, nommée vasl/ine, est encodée sous forme d'une grammaire semblable à celle utilisée dans le compilateur de compilateurs Yacc. Ces derniers mois est apparue une solution commerciale, proposée par Seamless Solutions Inc. (<http://www.seamless-solutions.com>), dont les avatars sont modélisés en VRML et sont très expressifs au niveau du visage. Nous ne connaissons malheureusement pas le degré de finesse de ces projets, ni leurs tenants et aboutissants, car on n'en trouve pour l'instant trace que sur quelques pages Web.

1.2.3.3. Vers une communication bidirectionnelle.

M. Tokuda [TOK 95] a réalisé la traduction du japonais en amont de la synthèse. Les termes non signés sont éliminés après analyse morphologique, et la traduction se fait ensuite soit par correspondance directe, soit grâce à l'emploi d'un identificateur de concept. L'auteur annonce un taux de réussite de 95%.

De nombreuses autres études concernent la reconnaissance des gestes et leur interprétation en signes. Ohki et al. [OHK 95] schématisent les étapes majeures nécessaires à une traduction bidirectionnelle entre, d'une part, les gestes entrés par un capteur de type DataGlove et un texte japonais, d'autre part, entre la parole et une animation synthétique en langue des signes. B. Dorner et E. Hagen [DOR 94] utilisent des gants munis de cercles lumineux pour obtenir une représentation des configurations et positions manuelles en termes d'angles articulaires. Ils décrivent ensuite un analyseur grammatical détaillé de l'ASL (prenant en compte les références indexées, les différents types de phrases, le temps du discours, ...), destiné à être intégré à un système global de reconnaissance des signes.

1.3. Décrire le signe.

La première représentation d'une langue qui vient naturellement à l'esprit est l'écriture. Si elle constitue un phénomène relativement récent à l'échelle des langues, et ne les concerne d'ailleurs pas toutes, elle joue un rôle de premier plan dans la transmission de l'information à travers l'espace et le temps. Elle permet à des individus distants de communiquer et constitue un facteur favorisant la survie d'une culture, sans toutefois en être une condition *sine qua non*.

Les travaux de Stokoe sur la phonologie du signe ont donné lieu à plusieurs ensembles de représentation. Certains revendiquent le statut de systèmes d'écriture mais demeurent peu utilisés en ce sens par la communauté sourde, et beaucoup sont avant tout des outils linguistiques. Néanmoins, chacun apporte de précieuses informations sur les paramètres du signe et il est intéressant d'en examiner ici les grandes lignes.

1.3.1. Phonétique du signe.

1.3.1.1. Travaux de Stokoe.

William C. Stokoe fut le premier linguiste contemporain à étudier et proposer une description de la langue des signes (en l'occurrence, l'ASL) en termes de **phonèmes** (qu'il dénomma **chérèmes**, du grec *kheir*, la main), et à en bâtir une transcription écrite dont la figure 1.7 ci-après propose un exemple. Dans le dictionnaire de l'ASL qu'il publie en 1965 avec Casterline et Croneberg ([STO 78] pour l'édition révisée), il jette les bases et pave la voie pour une recherche ravivée sur les langues des signes.

Les signes y sont décrits comme combinaisons de chérèmes appartenant à trois classes distinctes :

Classe de chérèmes	Nombre	Description	Exemples
Tabulateur (<i>Tabular</i> , TAB)	12	Position de la main (ou des mains) dans l'espace (i.e. endroit où agit le DEZ).	[] tronc G cou
Désignateur (<i>Designator</i> , DEZ)	19	Forme signifiante de la main (ou des mains). Elle est vue relativement au TAB (à l'intérieur, contre, dessus, ...)	A poing fermé B main ouverte
Mouvement (<i>Signation</i> , SIG)	24	Action effectuée, « dans » la position du tabulateur, par le désignateur (si le signe comporte effectivement une phase dynamique).	> à droite T vers le signeur ⊙ mvt. circulaire ó pronation ω torsion ℓ agitation doigts

Tableau 1.2: Classes de chérèmes.

Le tableau ci-dessus présente quelques exemples pour chacune des classes de chérèmes; on en trouve les listes exhaustives en annexe 1.2. Il est à noter que la notion de SIG englobe en fait des phénomènes fort différents. En effet, outre les déplacements directionnels fondamentaux dont la forme est rectiligne (selon les trois directions de l'espace), circulaire ou courbée, s'y trouvent des mouvements de l'avant-bras, du poignet ou plus localisés encore au niveau de la main. D'autres décrivent la relation entre le désignateur et le tabulateur, ou la façon dont les articulateurs interagissent (convergence, dissociation ou croisement des mains, contact entre le DEZ et le TAB, ...).

Les entrées du dictionnaire de Stokoe et de ses collaborateurs utilisent ce système pour représenter les signes de l'ASL en précisant dans l'ordre le TAB, le DEZ, puis le SIG: TD^S. Dans le cas où les configurations manuelles des deux mains sont significatives, on a la notation TDD^S. De plus, les mouvements peuvent être effectués en séquence (les SIG sont alors notés côte à côte) ou simultanément (notation superposée). Ce qui donne les possibilités suivantes pour les symboles de mouvement : ^S, ^{SS}, _S, _{SS}, ^S_S, ou même ^{SS}. Ainsi, dans la figure 1.7, séparation des mains et rotation du poignet sont simultanées.

Transcription : $\emptyset F^x F \overset{\div}{\omega}$

Chérème	Symbole	Signification
Tabulateur (TAB)	\emptyset	Espace neutre devant le torse
Désignateur (DEZ)	$F^x F$	Configuration manuelle F pour les deux mains initialement en contact
Mouvement (SIG)	$\overset{\div}{\omega}$	Séparation (\div) des mains et rotation simultanée du poignet (ω)



Figure 1.7: Exemple de transcription chérémique (signe LSF *histoire*³).

Remarquons que certains symboles DEZ peuvent servir de lieux d'articulation (TAB). La figure 1.8 ci-contre en donne une illustration : dans le signe LSF *Bouteille*, c'est la main de base statique – en configuration [C] devant le torse – qui constitue le TAB, alors que le DEZ prend également la valeur [C], donnée par la main dominante en position initiale. Le SIG est quant à lui caractérisé par un mouvement vers le haut (^) accompagné de la fermeture (#) simultanée de la main, ce qui nous donne la transcription suivante :

$C^x C \overset{\wedge}{\#}$

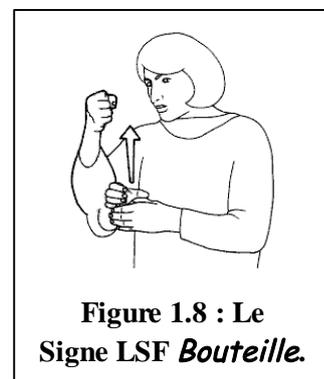


Figure 1.8 : Le Signe LSF *Bouteille*.

La détermination des phonèmes gestuels (en termes linguistiques, le *décodage chérémique*) a été réalisée de sorte que leur combinaison forme un signe spécifiquement déterminé; en d'autres termes, deux signes diffèrent obligatoirement par au moins l'un de leurs chérèmes (c'est la notion de paires minimales). Les sous-primitives au contraire, définies par

³ Au sens de « raconter une histoire ».

Stokoe (sous la dénomination *allochers*) pour préciser la transcription, ne peuvent à elles seules distinguer deux signes. Elles sont constituées en ajoutant aux primitives majeures des signes **diacritiques** qui en modifient légèrement l'aspect visuel. Par exemple, le diacritique " (griffe) est ajouté à la configuration manuelle [5] pour représenter la configuration dite « en griffe » (cf. tableau 1.3).

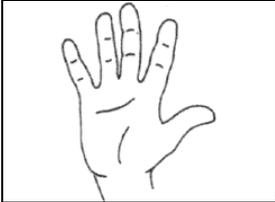
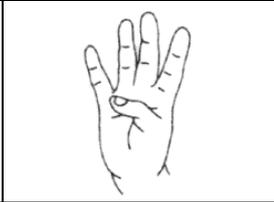
			
[5]	[5 ₄]	[5] ^{...}	[5] [^]
Chérème (DEZ)	<i>Allochers</i>		

Tableau 1.3: Configuration manuelle [5] et *allochers* correspondants.

Autre exemple, l'ensemble du tronc constitue un seul chérème (de type tabulateur), dont les *allochers* peuvent être aussi éloignés que les épaules et les hanches. Cependant, conformément au critère des paires minimales, on ne peut trouver dans le dictionnaire deux signes ne se distinguant que par la position sur le tronc; il existe toujours au moins une différence par ailleurs, que ce soit le DEZ, le SIG, ou l'un et l'autre à la fois.

1.3.1.2. Validation de la description de Stokoe.

Cette décomposition des signes en unités formationnelles non-signifiantes est étayée par plusieurs études qui en confirment la validité.

On trouve d'abord les recherches menées par Klima et Bellugi [KLI 79] sur les erreurs de production dans le discours. Dans les langues verbales, la similarité phonologique de certains mots (par exemple, *après* et *attrait*) est incriminée. Il en est de même dans les langues des signes où les erreurs – visuelles – sont de même type : anticipation (un paramètre formationnel d'un signe est utilisé involontairement dans un autre signe qui le précède), persévération (la valeur d'un paramètre du signe A est conservée dans le signe B), ou échange (substitution mutuelle, ou ***métathèse***). Ces lapsus gestuels ne sont nullement liés au contenu sémantique du signe, mais concernent bien plutôt les paramètres de formation identifiés par Stokoe; dans leur majorité, ils ne concernent d'ailleurs que l'un d'entre eux. L'étude des corpus recueillis par les auteurs sur les erreurs de production, mais aussi de mémorisation à court terme, prouve la réalité psycholinguistique des composants majeurs et leur indépendance dans la formation du signe (ainsi, au passage, que l'existence de règles bien définies dans le processus combinatoire).

D'autres recherches portant sur la perception des signes vont dans le même sens. Grosjean [GRO 79] prouve que les divers paramètres formationnels ne sont pas identifiés simultanément : le mouvement est perçu en dernier, déclenchant la détermination du contenu lexical ; l'identification est par ailleurs facilitée pour les signes mettant en jeu les deux mains, le

torse ou le cou comme lieu d'articulation, ainsi que le maximum d'expression non-manuelle. Poizner [POI 81], quant à lui, démontre l'importance perceptuelle des paramètres de formation à partir de leurs dimensions psychophysiques (plan, direction, courbure et répétition du mouvement).

1.3.1.3. Autres paramètres du signe.

Poursuivant les travaux de Stokoe, certains auteurs ont identifié d'autres paramètres intervenant dans la formation et la distinction des signes.

Battison [BAT 74] en ajoute un quatrième : l'orientation de la main ou des mains, et distingue en outre, au niveau le plus général, quatre zones principales d'articulation du signe : le visage, le tronc, le bras et la main. Klima et Bellugi [KLI 79] définissent l'orientation de la paume de la main comme un paramètre mineur mais en valident l'importance en citant des paires de signes pour lesquelles il constitue le seul critère de distinction (par exemple *child* et *thing*, voir figure 1.9).

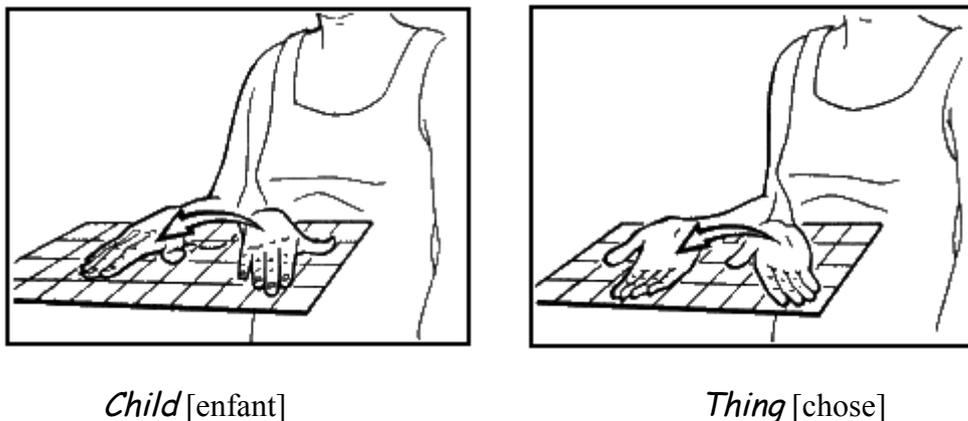


Figure 1.9: Paire de signes ne différant que par l'orientation de la paume [KLI 79].

Ces derniers auteurs reconnaissent également deux autres paramètres mineurs. La région de contact est la zone – ou les zones – de la main pouvant entrer en contact avec un point du corps (joue, avant-bras, front, ...). Le nombre et le lieu des régions de contact dépend de la configuration de la main. D'autre part, l'agencement des mains, décrivant si le signe est réalisé avec une seule ou les deux mains ainsi que les relations spatiales entre elles, constitue un troisième paramètre mineur dont le rôle de différenciation est moins marqué, mais intervenant au premier plan dans les processus morphologiques.

L'approche choisie par François-Xavier Nève de Mévergnies, du Centre d'Etudes Pluridisciplinaires sur la Langue des Signes (Céplus) de Liège est plus fonctionnaliste que celle de Stokoe. Plutôt que de rechercher des universaux linguistiques, l'auteur de l'«Essai de grammaire de la Langue des Signes Française» [NEV 96] se base davantage sur les différences entre les langues; la référence au chinois et ses ressemblances avec la langue des signes y sont d'ailleurs

récurrentes. L'étude en confirme la double articulation, ainsi que les classes de phonèmes gestuels. Rebaptisés *gestèmes*, ceux-ci ont été obtenus par commutation phonologique et sont présentés sous le mnémonyme COLORIACT (COnfiguration, Localisation, ORientation et ACTion). Avec une réserve toutefois : « l'ACT paraît échapper à la gestémologie par les deux caractères suivants :

- leur nombre paraît ouvert
- on ne voit pas comment distinguer ce qui est seulement gestématiquement pertinent de ce qui serait significatif de façon monématique ».

Signalons enfin l'importance, certes limitée, des expressions non-manuelles – et notamment faciales – dans la distinction des items lexicaux. Wilbur [WIL 79] cite à ce propos l'exemple des signes ASL *late* [tard] et *not_yet* [pas_encore], dont la seule différence réside en un léger mouvement de la langue vers l'avant pour le premier.

1.3.2. Affinements de la description et applications.

Plusieurs études se basent sur ces paramètres, souvent en les affinant, pour proposer tantôt d'autres notations (plus « visuelles » que celle de Stokoe), tantôt des outils d'analyse linguistique (grâce à des bases de données), ou encore des dictionnaires dont les fonctionnalités de recherche d'un item lexical sont adaptées aux langues des signes.

1.3.2.1. Encodages informatisés.

Une des premières notations informatisées de la langue des signes est probablement celle de Teuber, Battison et leurs collaborateurs [TEU 80]. Elle vise à constituer un dictionnaire en vue d'études linguistiques, et ceci sur la base de celui de Stokoe, Casterline et Croneberg publié en 1965. Le travail a consisté à transcrire grâce aux caractères ASCII les différents *chérèmes* identifiés par Stokoe, ainsi qu'à définir une structure capable de stocker l'ensemble de la représentation codée de chaque signe (y compris les *diacritiques* et l'orientation de la main). Une des difficultés réside dans l'obtention de caractères informatiques aussi proches que possible des symboles de Stokoe. La saisie numérique du dictionnaire a permis de dresser des statistiques d'intérêt linguistique sur les caractéristiques des signes et leurs contraintes de constitution.

Un logiciel grand public plus récent, SignWriter (qui possède son propre site Internet : <http://www.signwriting.org>), est un système d'écriture de la langue des signes sous forme d'un ensemble de symboles visuels. Si ses fondations linguistiques ne sont pas clairement établies, c'est un moyen de transcrire sur le papier cette langue dans toute sa richesse : les expressions non-manuelles y sont finement représentées et les primitives graphiques permettent d'obtenir, au prix de quelques efforts d'édition, des signes plus ou moins iconiques. Mais la fonction de mémoire avancée par les auteurs de ce système surtout en usage aux Etats-Unis n'est-elle pas déjà bien assurée par la vidéo ?

Plus récemment, une étude a été menée, dans le cadre du projet SignFont, par Mac Intire et ses collaborateurs [MCI 87]. Elle vise également au développement d'un système d'écriture

informatisée de l'ASL. Dans cette optique a été réalisé un nouvel inventaire des configurations manuelles de cette langue, leur regroupement au niveau phonémique, une représentation semi-graphique de ces formes de la main, ainsi que l'encodage informatisé de celles-ci. En outre, les auteurs ont proposé une série de symboles pour les marqueurs syntaxiques non-manuels et, plus récemment [HUT 90], pour les régions de contact et les différents mouvements.

Il est possible de faire le rapprochement avec un autre type de transcription informatisée que nous décrirons brièvement ici, HamNoSys (acronyme d'Hamburg Notation System) [PRI 90a, HAM 98]. Développé à l'origine pour la langue des signes allemande, il a aujourd'hui la prétention, grâce à sa finesse de description, de constituer un système de notation alphabétique internationalement applicable. La contrepartie en est un ensemble de symboles imposant (près de 200 pour les seules configurations manuelles, position, orientation et mouvement). Pour donner une idée de ce codage, prenons l'exemple du signe LSF *histoire* (figure 1.10).

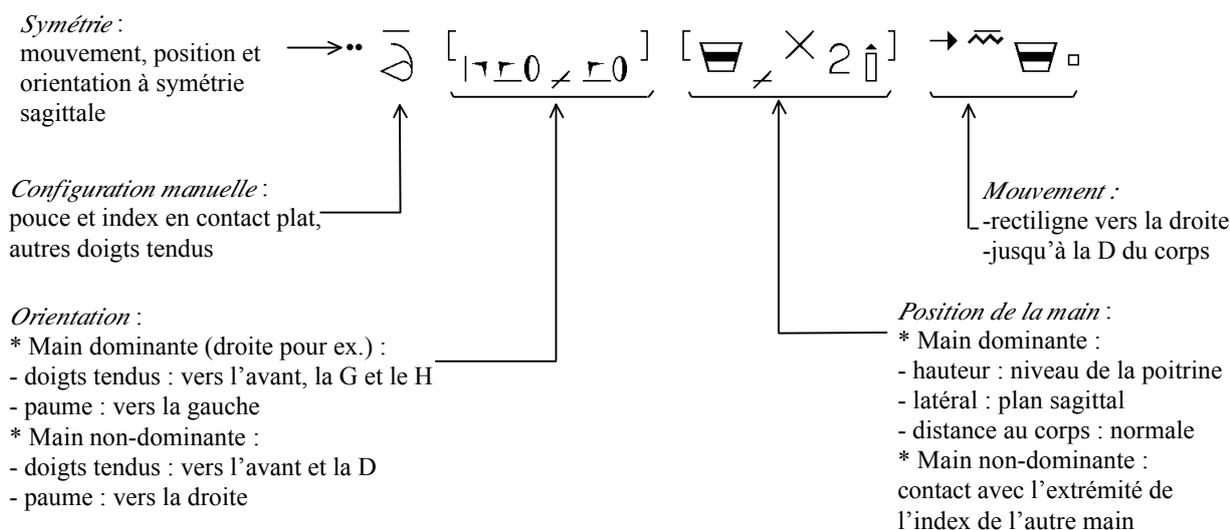


Figure 1.10 : Transcription HamNoSys (LSF *histoire*)⁴.

Mais les notations décrites ci-dessus sont purement scripturales et leur *iconicité* est généralement faible. Bien adaptées pour constituer des bases de données à des fins d'études linguistiques, elles révèlent leurs limites dans la représentation visuelle de la langue des signes. Car l'essence de cette langue est spatiale et dynamique, caractères difficilement transposables sur le papier.

L'utilisation d'un système comme HamNoSys en tant que notation intermédiaire pour l'obtention de signes synthétiques est envisageable. Toutefois, s'il prend en compte certains aspects modulatoires des signes, la symétrie des mouvements et des positions, et quelques

⁴ M'étant enquis sans retour auprès des auteurs d'HamNoSys de la validité de la transcription établie pour ce signe, des incorrections pourraient y subsister. Ainsi, la succession de torsions du poignet a probablement, faute de symbole adéquat, été incorrectement représentée par un zigzag.

composants non-manuels, il n'est pas encore apte – dans son état actuel – à décrire les processus grammaticaux intervenant en langue des signes.

1.3.2.2. Des interfaces pour la langue des signes.

Répondant à la nécessité impérieuse de présenter des signes animés, des interfaces dédiées aux langues des signes ont vu le jour [FRI 93]. Parmi les formes envisageables de représentation visuelle – vidéo et signes synthétiques –, seule est à ce jour vraiment exploitée la première des solutions. L'avènement et la démocratisation de la vidéo numérique ont ainsi permis de réaliser des dictionnaires informatisés et des applications destinées à la fois à l'apprentissage de la langue orale par les sourds et à celui de la langue des signes par les entendants.

La plupart des dictionnaires apportent une solution à ce dernier besoin en fournissant l'équivalent signé d'un mot donné. L'accès direct à la séquence filmée se fait par une liste alphabétique. C'est le principe adopté par le Centre de la Langue des Signes Allemande, à Hambourg, éditeur de plusieurs dictionnaires dédiés à diverses branches professionnelles (menuiserie, informatique, médecine, psychologie, ...), dont certains sont désormais disponibles en ligne (<http://www.sign-lang.uni-hamburg.de/Projects/SLDicts.html>). De telles réalisations sont les pendants des ouvrages lexicographiques papier (dont certains préexistaient d'ailleurs à l'ordinateur personnel).

Parmi ces derniers, il convient de citer le remarquable ouvrage publié par I.V.T. [MOO 86, MOO 90], dont la version électronique a été réalisée à l'université de Lyon II par A. Bonucci et S. Wilcox (voir l'annexe 4 pour l'URL de ce site). Il présente la particularité d'offrir l'ordre de recherche inverse à celui jusque-là considéré et constitue en ce sens le premier dictionnaire bilingue français-LSF. Il est en effet possible de retrouver un signe par trois de ses caractéristiques formationnelles : la configuration de la main, le lieu d'articulation et le nombre d'articulateurs impliqués. Grâce à ce mécanisme, on peut retrouver un signe perçu dont on ignore le sens.

L'ordinateur est évidemment tout indiqué pour systématiser ce type de recherche. Premier logiciel de traduction français-LSF, le Dictionnaire Informatisé de la Langue des Signes (DILS) du Céplus [CEP 98] propose une base de plus de 5000 mots français et leur quelque 1500 correspondants signés. Les données relatives aux signes sont très complètes : définition et utilisation dans un contexte, synonymes, liste des *gestèmes*, vidéo et dessins illustratifs. Mais la fonctionnalité la plus intéressante et originale en est précisément un double mode d'accès aux entrées : outre la clé alphabétique, les paramètres formationnels du signe (configurations manuelles, position, orientation (cf. figure 1.11) et mouvement) permettent de retrouver celui-ci par filtrage progressif.

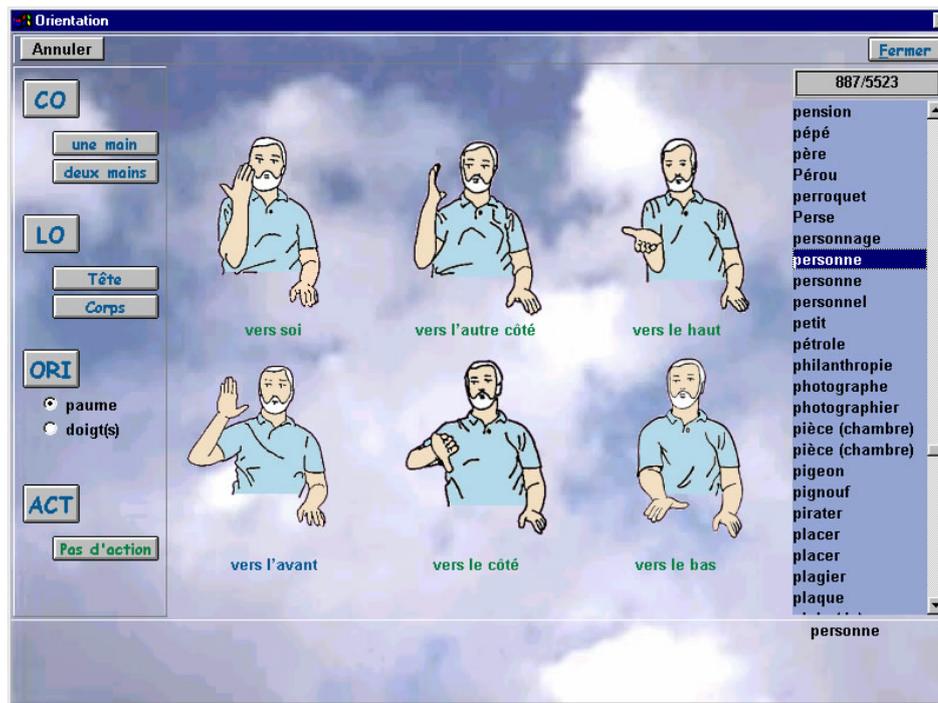


Figure 1.11: Interface du DILS [CEP 98].

Offrant des possibilités de recherche analogues à celle du DILS, Le Dictionnaire Multimédia de l'ASL (MM-DASL) [WIL 94a] est une application de traduction bilingue anglais-ASL tournant sur Macintosh et utilisant la technologie Quicktime pour les vidéos signées. Il a été initié par S. Wilcox et W. C. Stokoe. Une particularité intéressante en est la possibilité d'effectuer une « recherche floue » (*fuzzy search*), lors de laquelle l'utilisateur spécifie le degré de ressemblance, la « distance » entre le signe réel et les valeurs de recherche définies. Pour chaque entrée signée, le dictionnaire comporte, outre la vidéo, un ensemble de mots-clés (les traductions anglaises possibles), la catégorie grammaticale et la définition du mot. L'application présente l'avantage de pouvoir être utilisée avec n'importe quelle langue des signes, bien que les paramètres de recherche phonologiques concernent l'ASL.

SignStream, développé également sur Macintosh dans le cadre de l'ASLLRP (*ASL Linguistic Research Project*), est un outil de base de données sensiblement différent des précédents. Son but est l'encodage et l'analyse de données linguistiques au niveau du discours, mettant l'accent sur l'importance syntaxique des paramètres non-manuels. Ceux-ci sont représentés en parallèle et de façon synchronisée avec la traduction et la représentation vidéo des signes.

1.3.3. Une autre approche : la description de Liddell et Johnson.

Les descriptions étudiées jusque-là mettaient toutes l'accent sur l'aspect simultané de la production des *phonèmes* formant les signes. Stokoe [STO 72], entre autres, insiste sur cette différence avec les langues verbales, dans lesquelles l'apparition des segments est séquentielle et linéaire.

1.3.3.1. Tenues et séquences.

Bien entendu, la production des signes dans le discours est, quant à elle, séquentielle. Dans une introduction à sa description de la langue des signes du Sud de la France, Sallagoïty [SAL 75] note d'ailleurs une telle combinabilité temporelle à ce niveau, les items étant évanescents. Mais les signes eux-mêmes sont bien vus en tant que production simultanée d'un ensemble de primitives, leur organisation séquentielle étant phonologiquement insignifiante.

Toutefois, certains processus en font apparaître l'importance. C'est le cas des « tenues » (*holds* en anglais)⁵. Celles-ci peuvent intervenir en début ou en fin de signe, avant et après le mouvement, ou alors être totalement absentes; elles constituent d'ailleurs une part importante du temps de production et leurs durées varient avec l'accentuation du signe [WIL 79]. Une tenue en début de signe consiste par exemple, après avoir amené la main à l'endroit d'où part le mouvement, à maintenir un bref instant cette configuration initiale (qui est parfois déterminée par la première lettre du mot écrit correspondant – ce processus est dénommé *initialisation*). Ces tenues ne se retrouvent pas dans la pantomime [BEL 78], mais sont bien parties intégrantes et contrastives des signes.

Partant de ces constats, Scott K. Liddell et Robert E. Johnson ont développé une description de la langue des signes (américaine) prenant en compte cette organisation séquentielle. Nous allons ici en décrire les très grandes lignes; on peut se reporter à [LID 89] et [LID 90] pour davantage de précisions (voir aussi l'annexe 1.3).

1.3.3.2. Description segmentale de Liddell et Johnson.

Cette description est basée sur la distinction, dans les segments des langues des signes, entre les composants décrivant d'une part la posture de la main et d'autre part son activité. Les premiers, les paramètres manuels du signe, spécifient notamment où se trouve la main, quelle est sa forme et la façon dont elle est orientée. Les seconds, reflétant l'activité des articulateurs, se divisent en deux classes :

- les tenues (symbole H, *holds* en anglais) sont définies comme les moments pendant lesquels toutes les caractéristiques manuelles demeurent constantes, en particulier la position de la main;

⁵ Nous avons traduit le terme anglais au féminin par analogie avec la « tenue » du champ musical, à savoir l'action de soutenir une note pendant un certain temps.

- les mouvements (symbole M) caractérisent au contraire une phase de transition entre deux ensembles de caractéristiques articulatoires.

En conséquence, un mouvement M est relié à deux de ces ensembles, tandis qu'une tenue H n'est connectée qu'à un seul.

Les signes et les parties du discours sont composés de chaînes simultanées de segments (alternances de M et de H) : une pour chaque main, et une pour chaque paramètre non-manuel (activité du torse, de la tête et du visage). Ainsi, le signe LSF *histoire* est représenté par la structure de la figure 1.12.

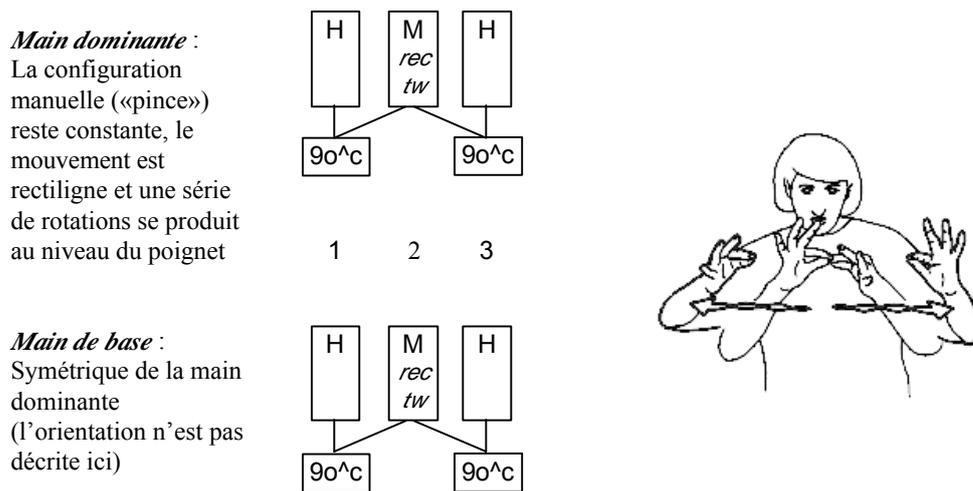


Figure 1.12 : Le signe LSF *histoire* et sa description segmentale.⁶

Détaillons un peu l'étage segmental. Un mouvement est précisé par des caractéristiques :

- de forme de chemin (rectiligne direct, arrondi, en arc de cercle, ... ; pour ces derniers, il convient d'indiquer le plan concerné),
- de qualité temporelle (raccourci, accéléré), spatiale (course réduite ou élargie) ou **kinétique** (mouvement tendu par exemple), ou encore de contact,

ainsi que par les éventuels mouvements locaux tels que rotation du poignet, agitation des doigts, ou autres mouvements rapides internes de la main (par exemple, le frottement pouce/index du geste signifiant *argent*).

Une tenue, quant à elle, est caractérisée par sa durée et également un mouvement local, le cas échéant.

⁶ Par souci de clarté, nous nous sommes contentés de décrire ici les configurations manuelles, forme du chemin et mouvement secondaire - voir l'annexe 1.3 pour une description plus complète sur un autre exemple de signe.

En ce qui concerne l'étage articulatoire, la spécification complète de la main inclut :

- la configuration manuelle proprement dite,
- le point de « contact » :
 - a*- la partie de la main concernée,
 - b*- le lieu où se trouve cette dernière (*a*)
 - c*- la distance entre *a* et *b* (contact, proximale, médiale ou distale)
 - d*- la direction du décalage *c* (*ipsilatéral*, *contralatéral*, en avant, ou une direction relative aux différentes parties de la main de base)
- l'orientation de la main :
 - a*- un point particulier de la main et l'endroit vers lequel il pointe,
 - b*- la partie de la main qui fait face au plan horizontal.

Une description plus complète de la notation des différentes caractéristiques, ainsi qu'un exemple complet de représentation d'un signe, sont présentés dans l'annexe 1.3.

Signalons encore que Liddell fournit aussi une analyse phonémique très proche [LID 90], permettant, grâce à un attachement autosegmental multiple, de réduire sensiblement les redondances induites par la description phonétique.

Enfin, Sandler [SAN 86] propose une représentation segmentale des signes dans laquelle la main d'une part, et le mouvement avec les lieux de départ et d'arrivée d'autre part, occupent respectivement un étage. Le changement de configuration manuelle est transcrit par une caractéristique « ouverture » ou « fermeture ». Néanmoins, comme le note Liddell [LID 90], une telle description ne permet pas de connaître de façon univoque la configuration de la main à la fin du mouvement.

Conclusion.

La langue des signes, par son originalité et toutes les réalités humaines qu'elle sous-tend, mérite toute notre attention. La multiplication des recherches la concernant en est autant de preuves et de conséquences. Travaux des linguistes, d'une part, qui ont conduit à plusieurs descriptions précises des différents paramètres formationnels des signes. Travaux des spécialistes de l'informatique d'autre part, mais aussi de l'intelligence artificielle ou de l'automatique, poursuivant des buts plus pragmatiques : développement de modules de synthèse, de reconnaissance des gestes, ou de traitement du langage naturel, dans l'optique d'une traduction bidirectionnelle avec les langues orales.

Un tel système est susceptible d'apporter un élément de réponse aux problèmes d'éducation et de communication auxquels la communauté sourde est confrontée. Sa mise en œuvre passe par la réalisation d'un module de synthèse performante des signes, qui doit aussi satisfaire des critères d'interfaçage simple. Il est en effet destiné à être inclus dans d'autres applications nécessitant la génération de signes virtuels à l'exécution, telles que la traduction français-LSF.

Des études linguistiques, il ressort qu'une spécification du signe ne saurait s'affranchir des quatre *gestèmes* fondamentaux. Car leur réalité psycholinguistique a été vérifiée, et il nous faudra donc les insérer d'une façon ou d'une autre dans notre système sous peine d'obtenir des signes phonologiquement mal formés et donc sémantiquement erronés. Cependant, il n'est pas à exclure que la synthèse nécessite un affinage de ces paramètres ou une prise en compte de traits non linguistiquement pertinents.

La description du signe fournie par Liddell et Johnson est ainsi très intéressante dans une optique de synthèse, car extrêmement précise. Un tel niveau de détail est parfois contesté par d'autres études dans le même domaine, mais il nous apparaît nécessaire pour éviter la génération de signes synthétiques trop «robotisés». Les travaux de ces auteurs nous sont donc d'une aide des plus précieuses lorsqu'il s'agit par exemple de définir les points de contact corporels.

Mais si les notations développées par les linguistes depuis maintenant trois décennies ont permis de spectaculaires avancées dans la connaissance structurelle des langues des signes, elles sont souvent difficilement abordables et réservées aux seuls initiés, leurs applications étant presque exclusivement confinées au champ d'étude de leurs auteurs. Bien adaptées à l'établissement de données statistiques desquelles peuvent être déduites les règles formationnelles régissant les signes, ou encore à l'élaboration de véritables dictionnaires bilingues, elles ont cependant montré leurs limites en tant que bases de systèmes d'écriture. Aucune n'est en effet utilisée comme telle, ne serait-ce qu'à moyenne échelle, et pas davantage comme transcription servant de point de départ à la synthèse des signes, même si, là encore, la notation de Liddell semble faire exception.

Une nouvelle spécification qui tienne compte des impératifs liés à la synthèse est donc nécessaire ; sa version informatisée doit être aussi lisible que possible, évitant les symboles ou les codes hermétiques sujets aux griefs. Par ailleurs, une synthèse élaborée de la phrase signée ne se résume pas à la description des signes dans leur forme de citation. Elle réclame également la prise en compte des processus grammaticaux et phonologiques de la langue. Tout particulièrement, les phénomènes de flexion et les expressions non-manuelles doivent faire l'objet d'une étude attentive. Le chapitre suivant présente le système de description formelle du signe que nous proposons, et les diverses interactions entre ce dernier et le discours signé, mais aussi entre items au sein même de la phrase.

CHAPITRE 2.

DESCRIPTION FORMELLE DE LA LANGUE DES SIGNES.

L'étude des travaux portant sur la langue des signes a permis d'en dégager les caractéristiques linguistiques essentielles. Le présent chapitre expose comment celles-ci ont été incluses dans une description formelle globale servant de base à la synthèse du signe et du discours signé.

Dans un premier temps, une vue d'ensemble de cette structure hiérarchique descriptive est proposée. Les composants majeurs sont introduits parallèlement aux principes fondamentaux qui les sous-tendent, de façon à constituer une base de référence tout au long du chapitre.

Chacun est alors présenté en précisant le système de spécification adopté et les primitives retenues.

Les entités constituant les spécifications manuelles sont d'abord détaillées, à savoir les configurations manuelles, les localisations dans l'espace et les points de contact corporels, l'orientation palmaire et enfin les différents points de la main utiles pour positionner aisément celle-ci.

Les caractéristiques propres au mouvement sont ensuite examinées. Outre les types de trajectoires et les mouvements locaux, nous décrivons les différentes relations unissant les articulateurs lorsque tous deux sont mobiles, et les diverses formes de répétition rencontrées. Ces spécifications sont complétées par une étude des paramètres temporels du mouvement (dynamique, tenues et synchronisation notamment).

Pour finir, nous présentons une réflexion sur l'importance des paramètres non-manuels du signe et sur la façon dont, plus généralement, les processus grammaticaux du discours signé (flexions, références indexées, ...) peuvent être mis en œuvre dans la synthèse.

Les parties applicatives correspondantes sont décrites au dernier chapitre, avec le système de génération proprement dit.

2.1. Vue générale et définitions.

Nous souhaitons ici exposer dans ses grandes lignes l'ossature de la description formelle proposée pour les signes, afin que son schéma soit bien posé et demeure présent à l'esprit tout au long de la lecture de ce chapitre. La plupart des choix effectués quant à cette structure sont également justifiés dans la présente partie, sur la base de travaux préexistants et à partir d'une observation minutieuse d'un corpus de signes (constitué par le tome 1 du dictionnaire papier d'IVT).

2.1.1. Principes fondamentaux.

En premier lieu, il nous a paru judicieux de séparer la description des signes de celle de la phrase. Comme les mots, les lexèmes des langues signées subissent bien entendu des flexions, et les valeurs de leurs *phonèmes* peuvent être modifiées par la grammaire. Ces processus flexionnels utilisent les ressources visuo-gestuelles de la langue; ils sont ainsi de nature spatiale (localisation par exemple), temporelle (vitesse et dynamique du mouvement), *kinétique* (tension musculaire) ou encore visuelle (expressions faciales notamment). Mais ces flexions semblent assez peu fréquentes (par rapport aux langues écrites du moins) et, pour une grande majorité de signes, elles n'affectent pas les quatre phonèmes majeurs et se limitent aux paramètres non-manuels. C'est pourquoi il est possible de donner une spécification pour chaque signe, de stocker celle-ci dans un dictionnaire, et de s'en servir à la demande par la suite pour générer une phrase signée. Moyennant l'héritage par certains signes de propriétés grammaticales propres à la phrase, nous avons donc opté pour deux systèmes de description séparés. La suite de ce paragraphe se focalise sur celui retenu pour les signes.

Le cahier des charges précédemment exposé nous a guidés vers une description des signes en composantes formationnelles. Quatre d'entre elles, linguistiquement pertinentes, ont déjà été présentées. Ces *gestèmes* constituent la base d'une construction hiérarchique intégrant d'autres primitives et caractéristiques destinées à la synthèse [LOS 99]. Le sommet de l'arborescence ainsi obtenue est évidemment le signe lui-même, scindé en ses parties manuelle et non-manuelle. Chacune est une combinaison graduelle de structures de moins en moins complexes, correspondant à des niveaux de description de plus en plus bas.

2.1.2. Définition d'une primitive de déplacement.

Les mouvements complexes sont très peu fréquents en langue des signes (moins de 3% en LSF selon S. Gibet [GIB 98]). Ils peuvent revêtir la forme de zigzags ou de sinusoïdes mais, dans la plupart des cas, ne peuvent être décrits simplement par un type de trajectoire prédéfini. Ce sont en particulier les mouvements évoquant la forme (*sapin*) ou la chute d'un objet (flocons dans *il_neige* ou feuilles dans *automne*)⁷. Ceux-ci doivent néanmoins pouvoir être précisément spécifiés et, pour cela, être décomposés en mouvements de base.

⁷ Pour ne pas multiplier les figures, les signes de moindre importance cités en exemples ont été reportés en annexe 2.5.

Dans cette optique a été définie la notion de *primitive de déplacement*. Il s'agit d'un changement de position du bras dans lequel le poignet décrit l'une des trajectoires de base : ligne droite, arc ou cercle. Le déplacement peut être très réduit voire même nul, auquel cas il se produit un mouvement interne à la main (car les signes intégralement statiques sont extrêmement rares – citons *pipe* pour mémoire). Grâce aux trois formes ci-dessus, il est possible de créer des mouvements très complexes par combinaison.

Une *primitive de déplacement* comporte la description de la posture de la main au moment où commence le mouvement, la phase dynamique proprement dite, ainsi que la posture manuelle en fin de course. Ces "postures" ont été baptisées *spécifications manuelles*; elles regroupent toutes les caractéristiques relatives à la main : configuration, position et orientation, dont chacune peut varier ou rester constante lors du déplacement.

En première approche, nous pouvons donc schématiser une primitive de déplacement d'un articulateur par la structure ci-dessous :

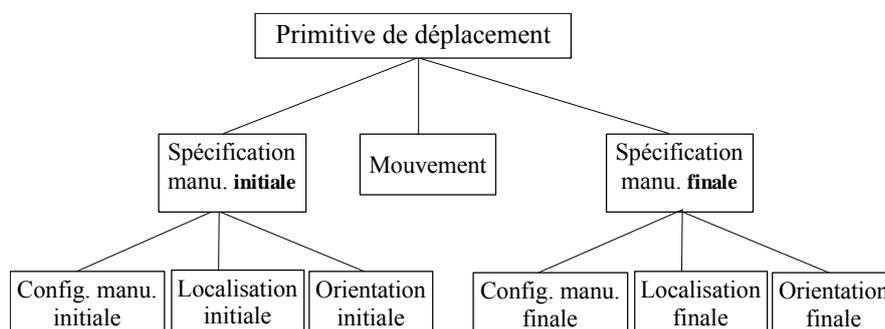
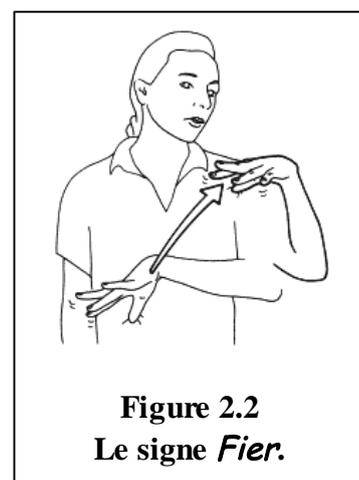


Figure 2.1 : Primitive de déplacement (première approche).

Il est à noter que la structure proposée pour une primitive de déplacement incorpore les quatre types de *gestèmes* décrits par les linguistes.

Une observation minutieuse des signes et une réflexion quant aux problèmes spécifiques à leur synthèse nous ont amenés à affiner cette proposition. Voici quelques éléments supplémentaires importants :

- Dans les cas où la main entre en contact avec une partie du corps (buste, visage, autre bras ou main), la position du poignet n'est plus pertinente; c'est en revanche le *point de contact manuel* qui doit prendre la place renseignée dans la spécification manuelle correspondante. Ainsi en est-il de l'extrémité du pouce dans le signe *fier* (figure 2.2).
- Le mouvement du bras est déjà précisé par la forme de la trajectoire du poignet. Comme il est détaillé plus loin, certains processus grammaticaux affectent de plus son amplitude et sa dynamique; il incombe au *modificateur de mouvement* de renseigner si celui-ci doit être amplifié, écourté, ou encore brutalement stoppé.



- Il apparaît dans certains signes un mouvement local à la main, telle la vibration des doigts dans *fier*. Plus généralement, on désigne par *mouvement secondaire* ce type de va-et-vient répété se produisant au niveau des doigts, du poignet, ou même de l'avant-bras (mais qui n'affecte jamais la position du poignet). Il peut se superposer au mouvement principal ou constituer l'unique caractère dynamique du signe.

La forme finale de la primitive de déplacement est présentée ci-dessous (figure 2.3).

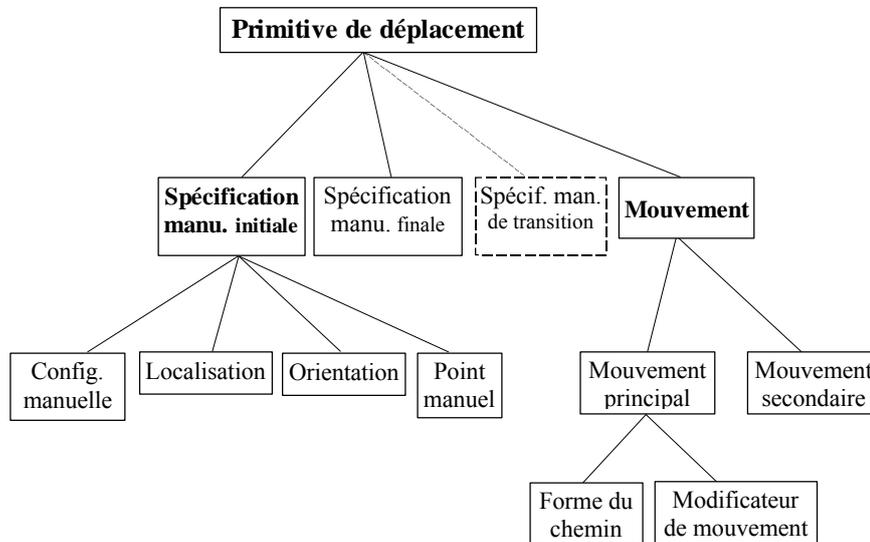


Figure 2.3 : Structure retenue pour une primitive de déplacement.

Remarque : la *spécification manuelle de transition* est requise lorsque survient un changement dans l'un des paramètres de la spécification manuelle au cours du déplacement. Un tel phénomène est tout à fait marginal et concerne avant tout la configuration de la main.

2.1.3. Spécifier un signe complet.

Pour le signeur – comme pour le scripteur –, il existe un côté dominant du corps. Cette latéralité détermine le bras avec lequel il effectue préférentiellement les mouvements. L'articulateur favori est qualifié de *dominant*, par opposition à la *main non-dominante* ou *main de base*. L'utilisation de la main gauche ou droite comme côté dominant ne change aucunement le contenu lexical du signe.

Les articulateurs sont susceptibles d'intervenir dans un signe de trois manières différentes : si la main dominante est toujours impliquée, l'autre main peut soit ne pas entrer dans la formation du signe (elle est alors au repos, le long du corps par exemple), soit servir de main de base (statique) au mouvement de la main dominante, soit être elle aussi mobile. Dans ce dernier cas cependant, il existe presque systématiquement une forte relation entre les mouvements des deux bras, imposée par les règles et tendances formationnelles de la langue. Il s'agit très souvent d'une symétrie, comme il est montré plus loin dans cette partie. De plus, il est parfois nécessaire de

spécifier la synchronisation des mouvements au cas où ceux-ci ne sont pas simultanés (comme dans le signe *se_déshabiller*). Ces observations nous permettent d'introduire la notion de *déplacement* dont les trois formes possibles, reflétant l'implication et l'activité des articulateurs, sont schématisées dans le tableau 2.1.

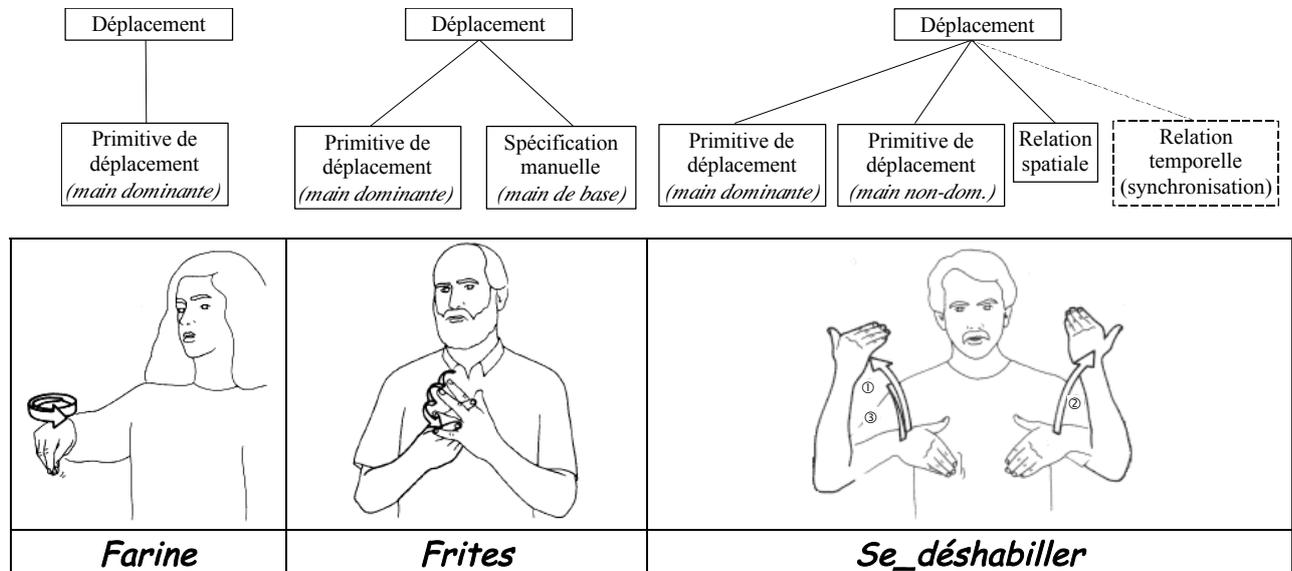


Tableau 2.1 : Description et exemples des trois formes possibles pour un déplacement.

Suggérée un peu plus haut, la décomposition des mouvements complexes en trajectoires simples est appliquée à ce niveau en regroupant plusieurs déplacements au sein d'une même entité nommée *macro-déplacement*. Une caractéristique de répétition y est adjointe dans le but d'alléger et de faciliter la spécification du signe. Les mouvements répétés sont en effet fréquents et particularisables; ils interviennent aux niveaux lexical et grammatical.

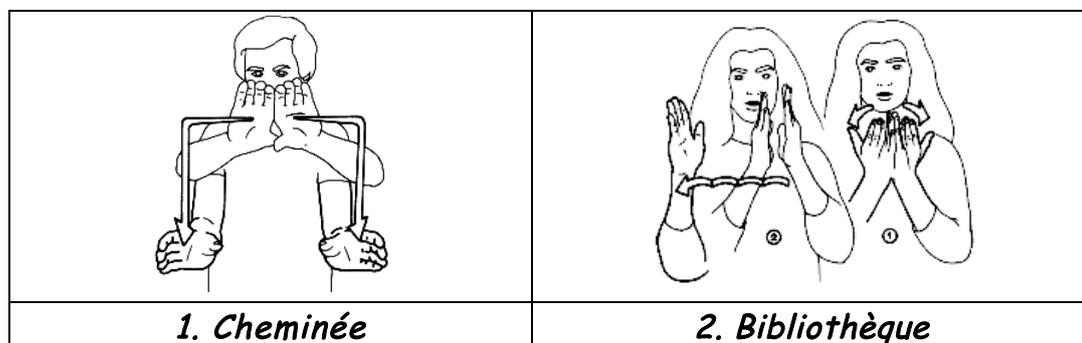


Tableau 2.2 : Signes à déplacements (1) ou macro-déplacements (2) multiples.

Pour décrire les signes les plus complexes (en particulier les composés), plusieurs macro-déplacements sont parfois nécessaires. Dans le signe bibliothèque par exemple (cf. tableau 2.2) apparaissent deux macro-déplacements formés chacun d'un unique déplacement, le second étant répété⁸.

Enfin, nous avons pris en compte les éventuelles tenues initiale et/ou finale, pour obtenir la représentation de la partie manuelle du signe présentée sur la figure 2.4.

La description complète est reprise en annexe 2.1, où, de même que dans toutes les figures de cette partie, les macro-structures telles que les spécifications manuelles ne sont détaillées qu'une seule fois.

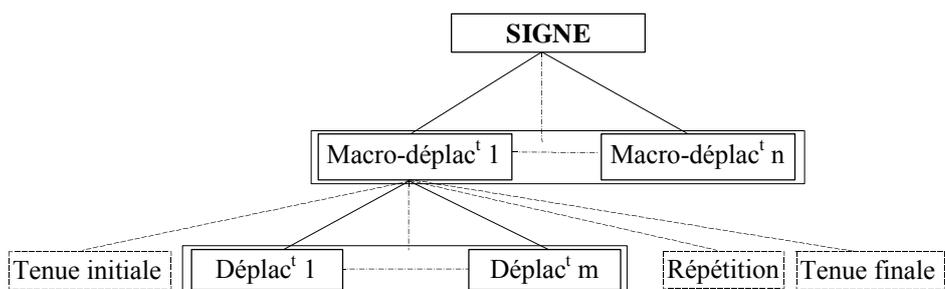


Figure 2.4 : Structure de haut niveau de la partie manuelle.

Il est bien entendu que seuls les signes les plus complexes nécessitent l'utilisation de l'ensemble de cette structure. Grâce notamment aux caractéristiques de répétition des déplacements et de relation spatiale entre articulateurs, l'immense majorité des signes peut être décrite de façon extrêmement aisée. Afin de quantifier quelque peu ces potentialités descriptives, nous nous sommes livrés à un recensement systématique sur les 300 premiers signes français du dictionnaire d'I.V.T. [MOO 86]. Les traits saillants des résultats en sont consignés dans le tableau 2.3.

Articulateur(s) mobile(s)		Signes à (macro-) déplacement unique		Signes à (macro-) déplacements multiples		Total
		1	2	1	2	
Sans mouvement secondaire	Sans répétition	84	54	8	13	159
	Avec répétition	71	39	3	2	115
Avec mouvement secondaire		17	9	-	-	26
Total		172	102	11	15	300
%		57 %	34 %	4 %	5 %	100 %

Tableau 2.3 : Fréquence des différentes caractéristiques dans un corpus de signes.

⁸ Ce signe peut aussi s'effectuer différemment (voir annexe 2.2).

Il en ressort que moins de 10% des signes étudiés nécessitent plus d'un déplacement ou d'un macro-déplacement pour être décrits. Ceci est bien conforme à l'objectif de simplicité que nous nous étions fixé, tout en respectant celui de généralité.

Ces quelques jalons étant posés quant à la description retenue, la suite de ce chapitre se propose d'en détailler chacun des composants, en précisant les différentes valeurs possibles qu'ils peuvent prendre et le système de spécification propre adopté.

2.2. Configurations manuelles.

La première caractéristique manuelle que nous allons étudier est la configuration. Bien qu'elle soit considérée et utilisée dans la description du signe comme une entité indivisible, elle se présente en réalité sous une multitude de formes. Un rapide aperçu de la *dactylogogie* (cf. annexe 1.1) suffit à s'en convaincre, d'autant que ce n'est là qu'une petite partie des configurations utilisées dans la constitution des signes.

Pour décrire celles-ci, on peut se contenter de donner pour chacune les valeurs angulaires d'un modèle de la main. Nous avons plutôt cherché à en extraire les primitives et propriétés remarquables, pour bâtir un système de spécification immédiat à utiliser à partir de la simple perception visuelle de ces configurations.

2.2.1. Description de la main.

Une rapide présentation de l'anatomie fonctionnelle de la main est proposée comme préambule de cette partie, afin de se familiariser avec quelques termes de biologie largement utilisés dans la description des configurations manuelles. Cette étude permet aussi de dégager un modèle réaliste de la main humaine.

2.2.1.1. Description anatomique.

Le squelette de la main humaine (cf. figure 2.5) est formé de 27 os :

- les 8 os du carpe (deux rangées de 4), formant le poignet, dont le scaphoïde et le lunatum sont en contact avec les os de l'avant-bras;
- les 5 métacarpiens (un pour chaque doigt), constituant la paume⁹;
- les 14 phalanges, 2 dans le pouce et 3 dans chaque autre doigt.

⁹ Par abus de langage, nous parlons dans la suite du premier métacarpien et des articulations associées comme appartenant au pouce, et non à la paume, celle-ci sous-entendant les seuls métacarpiens II à V.

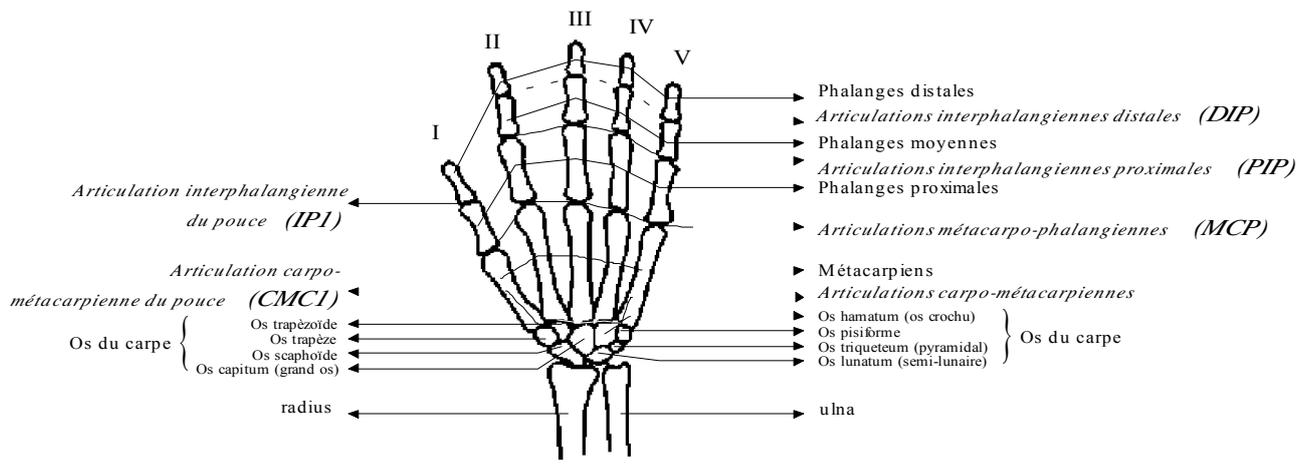


Figure 2.5 : Squelette de la main droite (vue dorsale).

La notation majoritairement adoptée pour la numérotation des doigts, et celle que nous retenons, est la suivante :

- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| I – pouce [thumb] | IV – annulaire [ring] |
| II – index [index] | V – Auriculaire [little] |
| III – majeur [middle] | |

Remarque : Dans la notation des articulations ou des segments, nous utilisons préférentiellement les chiffres arabes correspondants, ainsi que le nom anglais – ou son abréviation –, par souci de concision. Ainsi, l'articulation interphalangienne distale du majeur est notée DIP3 et la phalange distale du pouce DistPhal1.

2.2.1.2. Description fonctionnelle [KAM 94].

L'articulation carpo-métacarpienne (CMC) de l'index et du médus est pratiquement immobile. Celles de l'annulaire et de l'auriculaire sont très légèrement mobiles, permettant à la main de se creuser. Nous allons néanmoins négliger ces faibles rotations, et considérer la paume comme plane. En revanche, l'articulation CMC du pouce est très complexe; elle permet des mouvements de flexion / extension (la flexion incline le pouce vers le creux de la paume, l'extension le place dans le plan de la paume) et d'**abduction** / **adduction** (rapprochant / écartant le premier métacarpien du deuxième) (cf. tableau 2.4). Dans un souci de simplification, ce sont les deux seuls degrés de liberté dont nous tenons compte, bien qu'en réalité, la rotation axiale à ce niveau, contrainte par les deux précédentes, puisse être importante [BUC 92a]; elle explique en outre l'orientation du pouce vers la paume lors de l'opposition (mouvement par lequel la **pulpe** du pouce vient en contact avec celle d'un autre doigt).

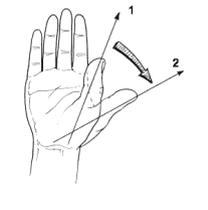
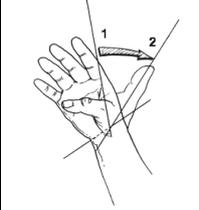
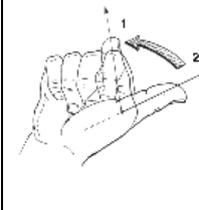
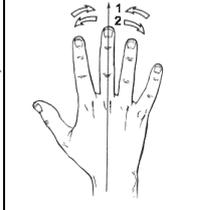
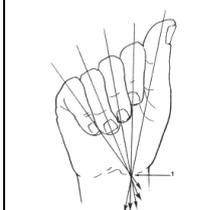
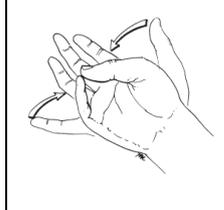
					
Adduction (1) / Abduction (2) du pouce en CMC	Flexion (1) / Extension (2) du pouce en CMC	Flexion (1) / Extension (2) du pouce en MCP	Adduction (1) / Abduction (2) des doigts II à V	Convergence des doigts vers le point scaphoïdien	Opposition du pouce et des doigts (l'annulaire ici)

Tableau 2.4: Divers mouvements fonctionnels de la main.

Au niveau des articulations métacarpo-phalangiennes (MCP) sont permis des mouvements de flexion / extension (qui rapprochent / éloignent de la paume le doigt en question) et d'abduction / adduction. Pour le pouce, ces derniers sont faibles et seule la flexion est donc prise en considération en MCP1. Pour les autres doigts en revanche, l'**abduction** écarte le doigt de l'axe de la main, et l'**adduction** l'en rapproche.

Aux articulations inter-phalangiennes enfin (xIP), nous avons uniquement des mouvements de flexion / extension. La flexion permet à la main de se fermer et d'assurer une prise. L'axe de ces rotations est transversal et légèrement oblique, aussi les doigts convergent-ils, lorsque le poing est fermé, vers le point scaphoïdien.

On peut synthétiser ces observations d'anatomie fonctionnelle en modélisant chaque doigt comme un segment à trois articulations, parmi lesquelles celle en contact avec la paume possède deux degrés de liberté, une en flexion / extension (dont l'angle est noté ζ) et une en abduction / adduction (d'angle ν). Les deux articulations distales de chaque doigt sont, quant à elles, vues comme des liaisons de type rotation pure, en flexion / extension.

2.2.2. Configurations manuelles : travaux existants et démarche adoptée.

2.2.2.1. Etudes linguistiques.

La première étude linguistique détaillée des configurations manuelles (de l'ASL) a été réalisée lors de l'élaboration du DASL. Stokoe et ses collaborateurs ont identifié 19 primitives principales, dont la plupart sont aussi des lettres de l'alphabet dactylogique. Certaines se dérivent en une ou plusieurs sous-primitives, qui ne constituent pas des **chérèmes** au sens du critère des paires minimales; elles diffèrent seulement par l'état fléchi ou tendu, ou encore la position de certains doigts, et sont notées en ajoutant des signes **diacritiques** au symbole de la primitive principale. Ainsi, la configuration [B] se décline (voir tableau 2.5) en :

- une sous-primitive [\hat{B}] avec le pouce tendu (①);
- une [B_{ν}] avec le pouce replié (②);
- une [\hat{B}] avec le pouce tendu et les doigts fléchis (③).

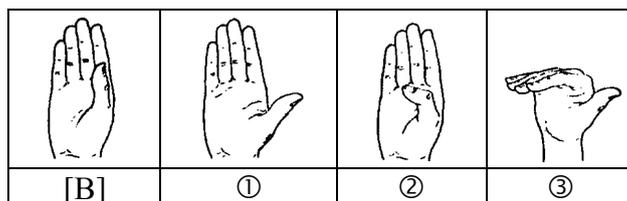


Tableau 2.5 : La configuration [B] et ses sous-primitives en ASL.

Au total, ce sont 40 configurations manuelles qui sont décrites et regroupées selon un critère dominant d'analogie des configurations digitales II à V.

Une étude menée par Klima et Bellugi [KLI 79:164-176] vient confirmer la pertinence de l'extension des doigts dans l'identification des configurations manuelles. De même que les phonèmes des langues orales peuvent être par exemple classifiés en sons voisés ou non – les consonnes étant sonores ou muettes –, les auteurs proposent un modèle en caractéristiques distinctives de ces gestèmes, issu de leur analyse en termes de ressemblance : à partir d'un corpus de configurations manuelles exposées plusieurs fois à différents sujets dans diverses conditions de bruitage, il est possible de dresser la matrice de confusion, puis d'effectuer un regroupement selon la moindre distance.

Les caractéristiques isolées par cette recherche sont, au niveau le plus grossier, la compacité (aucun doigt tendu) et la largeur (3 doigts tendus au moins). Les trois classes ainsi définies se subdivisent ensuite en fonction de critères plus fins : croisement des doigts, index seul tendu, opposition d'un doigt, deux doigts fléchis au moins, ... Au final, 11 caractéristiques distinctives sont nécessaires pour spécifier entièrement et différencier les 20 configurations manuelles étudiées.

L'approche de Liddell et Johnson [LID 89:224-227] vient en conformité avec ces observations : le principe de base est de noter séparément configurations du pouce d'une part, et des doigts d'autre part. Cette description, sans doute moins proche de la réalité linguistique, permet cependant de coder un nombre bien plus important de formes de la main (certains auteurs en ont distingué jusqu'à 150 en ASL). De chaque doigt est encodé l'état d'extension, alors que la position du pouce est décrite avec force détails : rotation en CMC (opposition ou non), flexion / extension en CMC et MCP (4 primitives au total : *ouvert*, *en crochet*, *plat*, et *fermé*), ainsi que le contact éventuel (4 types possibles) avec un autre doigt. Un tel affinage présente néanmoins le risque d'encoder des informations de façon redondante ou, pis, des configurations manuelles incorrectes du point de vue de la notation ou physiologiquement impossibles. Un contrôle strict s'impose donc à ce niveau.

2.2.2.2. Travaux de description structurelle.

Ces études ont été reprises pour donner lieu à plusieurs descriptions structurelles relativement proches, chacune étant associée à une notation plus ou moins lisible des configurations. T. Lebourque [LEB 97] procède par modification de cinq configurations de base selon diverses caractéristiques (écartement, flexion) ; dans un deuxième temps sont décrits les contacts, puis enfin les croisements entre doigts, l'ensemble étant fourni par un langage de description formelle. Kurokawa [KUR 92] propose un système de codage quelque peu différent,

dont les 13 primitives et 4 codes auxiliaires, notés par des symboles suivis des doigts concernés, spécifient aussi bien la flexion que le croisement ou le contact des doigts avec le pouce. Ceci fournit un codage parfois complexe; aussi l'auteur propose-t-il un mécanisme afin d'en réduire la redondance sémantique : la représentation du R de la *dactylologie*, H1H2X21F3F4F5, peut être réécrite H1H2X21 (index et majeur tendus (H) et croisés (X), les autres doigts étant fléchis (F)¹⁰). Nous n'avons pas davantage de détails sur l'implémentation; il apparaît néanmoins difficile de voir dans ce dernier code la description complète de la configuration concernée. En outre, on peut se demander dans quelle mesure le système est capable de distinguer des flexions digitales relativement proches, mais cependant significatives, comme dans *C* et *O* en LSF.

Dans le cadre plus général de la synthèse et de la reconnaissance de la langue des signes [LEE 94a], la description de Lee [LEE 94b], qui inclut également l'orientation de la paume et qui a donné lieu à une notation par pictogrammes, spécifie de façon extensive l'état de pliure de chaque doigt à chacune de ses articulations. Seul le pouce est globalement traité comme une entité pouvant adopter une configuration parmi un ensemble de primitives (intercalation entre l'index et le majeur, contact avec un autre doigt, ...). L'intérêt principal de cette approche réside dans l'introduction de contraintes articulaires, afin de tenir compte autant que possible des possibilités fonctionnelles de la main. Outre les contraintes statiques que constituent les limites naturelles des angles articulaires, l'auteur introduit un ensemble de relations traduisant l'interdépendance des valeurs angulaires :

- en DIP et en PIP pour chaque doigt : $\varphi_{DIP} = 2/3 \cdot \varphi_{PIP}$,
- de flexion métacarpo-phalangienne des doigts II à V grâce à des inégalités [LEE 95],
- d'abduction en MCP pour prendre en compte la convergence vers le point scaphoïdien.

Néanmoins, certaines de ces contraintes sont incompatibles avec des configurations manuelles.

On pense notamment à celle de la figure 2.6, trouvée dans le signe *père* en langue des signes chinoise (et probablement présente en japonais également, car une telle flexion digitale correspond à une primitive de codage dans le système de Kurokawa). Lorsqu'ils sont ainsi contraints, les doigts ne vérifient plus la première relation en flexion.

Par ailleurs, s'il est vrai qu'elle est réduite, il paraît hasardeux de considérer comme nulle l'abduction du majeur ; elle peut en effet avoir son importance pour décrire des lettres de la dactylologie comme le *K*.



Signalons enfin qu'une étude menée par Ikehara et ses collaborateurs [IKE 95], aboutissant à un ensemble de primitives proches de celles proposées par Kurokawa, montre que seules 10% des formes manuelles potentiellement créées avec ce système correspondent effectivement à des configurations existant en ASL et JSL. Ce résultat souligne toute la difficulté d'obtenir un codage suffisamment général pour embrasser l'ensemble des formes rencontrées en langue des signes, tout en évitant les configurations peu réalistes, voire impossibles linguistiquement et physiologiquement.

¹⁰ Les doigts sont numérotés différemment par cet auteur.

2.2.2.3. Démarche d'encodage retenue.

Afin de respecter ces contraintes, la démarche d'encodage que nous avons retenue procède en trois étapes :

- ① Spécification des configurations de chacun des doigts II à V, et éventuellement du pouce, à l'aide de primitives prédéfinies pour chacune de ces deux classes (pouce d'une part, index, majeur, annulaire et auriculaire de l'autre),
- ② Spécification de caractéristiques plus globales de la main, pouvant s'appliquer à un ensemble de doigts (par exemple, l'abduction), ou permettant de positionner le pouce en fonction des configurations courantes des autres doigts,
- ③ Application de contraintes articulaires dans le but d'obtenir des formes manuelles aussi naturelles que possible. Pour les raisons évoquées plus haut, seule est prise en compte l'interdépendance des angles au niveau de l'articulation métacarpo-phalangienne.

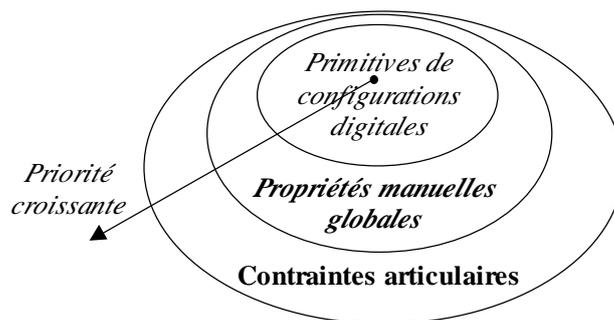


Figure 2.7 : Structures et priorités d'encodage retenues pour les configurations manuelles.

Ces trois étapes constituent des spécifications de niveau de plus en plus élevé des configurations manuelles, et sont appliquées selon cet ordre croissant de priorité, c'est-à-dire que les équations régissant les contraintes sur les angles articulaires définissent de façon ultime et définitive la forme de la main (cf. figure 2.7).

Les primitives et propriétés d'encodage ont été établies à partir des ensembles imprimés de formes manuelles dont nous disposons pour les différentes langues des signes, à savoir principalement :

- les configurations de la main proposées par Stokoe et reprises par Klima et Bellugi, globalement similaires à celles identifiées par Mc Intire et ses collaborateurs du projet SignFont [MCI 87] pour l'ASL,
- celles retenues par Moody pour la LSF,
- l'inventaire réalisé pour la notation HamNoSys [HAM 98], conçue pour coder toutes les formes rencontrées dans les langues des signes du monde entier.

C'est en passant en revue les états de flexion des doigts dans tous ces corpus de configurations que s'est dégagée la nécessité de distinguer le comportement du pouce et celui des autres doigts, et de bien différencier les formes « libres » des doigts et celles où ils interagissent.

2.2.3. Primitives et encodage des configurations manuelles.

Détaillons à présent les deux premières étapes ; l'application des contraintes articulaires est quant à elle présentée avec la synthèse des configurations au chapitre 3.

2.2.3.1. Primitives de configurations digitales.

Les primitives de configurations jouent un rôle différent pour chacune des deux classes de doigts considérées :

- Pour le pouce, il s'agit uniquement de postures sans interaction avec les autres doigts (pas d'opposition ou d'intercalation, par exemple). Il nous faut alors spécifier les 4 degrés de liberté de notre modèle. Cinq primitives ont été isolées (cf. tableau 2.7).
- Pour les autres doigts (cf. tableau 2.6), elles peuvent soit définir également des formes « libres », soit correspondre à des cas de contact ou d'opposition avec le pouce. La donnée des 3 angles de flexion en MCP, PIP et DIP définit la primitive ; l'abduction est quant à elle considérée comme propriété globale de la main.

Symbole	Description	Exemple	Symbole	Description	Exemple
#C [#C]	Doigt mi-fléchi aux trois articulations		#QPlat [#NearFlat]	Comme #Plat mais flexion moins importante en MCP	
#O [#O]	Comme #C avec les flexions plus marquées		#Crochet [#Hook]	Doigt tendu en MCP, replié en PIP et DIP	
#Plié [#Bent]	Doigt replié aux trois articulations		#E [#E]	Comme #Crochet avec une flexion plus marquée encore en PIP et DIP	
#Plaqué [#Stiff]	Doigt fléchi sauf en DIP : contact avec la partie inférieure de la paume		#Tendu [#Extended]	Doigt tendu dans le plan de la paume	
#Plat [#Flat]	Doigt à angle droit par rapport à la paume				

*Tous les exemples sont tirés de la LSF sauf *
(langue des signes chinoise)*

**Tableau 2.6 : Primitives pour les configurations des doigts II à V.
Les exemples donnés concernent l'index.**

Symbole	Description	Exemple	Symbole	Description	Exemple
#Tendu [#Extendé]	Pouce tendu dans le plan de la paume		#Plat [#Flat]	Pouce dans le plan de la paume, en contact avec le second métacarpien de l'index	
#Crochet [#Hook]	Pouce en "crochet" (fléchi en IP)		#E [#E]	Pouce dans la configuration du E de la dactylogogie	
#Plié [#Bent]	Pouce fléchi, replié au creux de la paume				

Tableau 2.7 : Primitives pour les configurations du pouce.

Exemple : La configuration correspondant au **G** de l'alphabet manuel (figure 2.8) est décrite de la façon suivante, avec les simples primitives ci-dessus :

- pouce dans le plan de la paume, en contact avec le deuxième métacarpien (#Plat)
- index tendu (#Tendu), autres doigts fléchis (#Plié)



Figure 2.8 : Configuration G.

2.2.3.2. Propriétés globales de la main.

Les propriétés manuelles globales définissent des contraintes de configurations pour les cinq doigts, les uns relativement aux autres. Ceux-ci peuvent en effet interagir dans une large mesure, grâce aux nombreux degrés de liberté de la main. On rencontre en langue des signes plusieurs types de relations :

- *contact, ou opposition sans contact*, du pouce avec un autre doigt :
 - *contact "ventral"*, dans lequel l'extrémité du pouce vient se placer contre (le milieu de) la phalange moyenne d'un doigt II à V, ce dernier pouvant avoir une configuration quelconque;
 - *contact "plat"* des pulpes du pouce et d'un autre doigt en configuration plate;
 - contact des extrémités du pouce et d'un autre doigt en configuration **O**.
- *croisement de l'index et du majeur* (celui du majeur et de l'annulaire est beaucoup moins naturel, plus contraignant pour les articulations, et ne se retrouve dans aucune configuration manuelle). On ne considère ici que le cas où le majeur se place derrière l'index.
- *intercalation du pouce*, principalement entre l'index et le majeur. Celles entre le majeur et l'annulaire, et entre l'annulaire et l'auriculaire, bien que fonctionnellement envisageables, se rencontrent beaucoup plus rarement en langue des signes. En pratique, l'intercalation du

pouce entre deux doigts i et j est réalisée en plaçant son extrémité au milieu des articulations PIP de i et de j .

- *contact "dorsal"*: recouvrement par le pouce d'un ou plusieurs doigts sur le dos de sa phalange moyenne.
- *recouvrement du pouce*, replié au creux de la paume (primitive #Plié), par un ou plusieurs doigts.
- *l'abduction / adduction* (écartement / rapprochement) est également considérée ici, dans la mesure où elle concerne plusieurs doigts II à V.

On pourrait songer à d'autres propriétés à inclure dans notre description, notamment celle où le pouce vient en contact radial (sur le "côté") avec une des trois phalanges des doigts. Cependant, cette configuration semble trop marginale (on ne la rencontre dans aucun des inventaires cités plus haut). On pourrait encore envisager la possibilité, pour la pulpe du pouce, de recouvrir par le dessus la phalange distale (ou l'ongle) d'un autre doigt. Nous avons confondu cette dernière avec le contact dorsal dont elle est souvent très proche même si, pour des configurations – telle que **W**, figure 2.9 – exigeant certains efforts ligamentaires, la position de l'extrémité du pouce est sans doute plus proche de l'ongle que de la phalange moyenne.



Figure 2.9 :
Configuration W.

Nom	Paramètres		Doigt(s) affecté(s)	Description	Exemples	
	Nom	Valeur			Param.	LSF
#Extrémité [#Tip]	i	2 .. 5	1	Contact entre l'extrémité du pouce et du doigt i	2	
#Pulpe [#Pad]	i	2 .. 5	1	Contact entre les pulpes du pouce et du doigt i	2	
#Abduction/add. [#Abducted/add.]	aucun		2 .. 5	Abduction/add. de tous les doigts tendus (pouce excepté)		
#Abduct/add. [#Abduct/add.]	i, j	$i=2..4,$ $j=i+1$	$i, i+1$	Abduction/add. des doigts i et j	2, 3	
#Croisement [#Cross]	i, j	2, 3	2, 3	Croisement de l'index et du majeur	2, 3	
#Recouvert [#Covered]	i	2 .. 5	1, i	Recouvrement du doigt i par le pouce	2,3,4	
#Ventral [#Ventral]	i	2 .. 5	1	Contact ventral entre le pouce et le doigt i	2	
#PouceEntre [#ThumbBetween]	i, j	$i=2..4,$ $j=i+1$	1	Intercalation du pouce entre les doigts i et j .	2, 3	

Tableau 2.8 : Propriétés manuelles globales.

Le tableau 2.8 récapitule les propriétés globales retenues pour la main. Il est important de remarquer que, dans la majorité des cas, les doigts II à V conservent leur configuration en flexion lors de l'application d'une propriété globale de la main. C'est-à-dire que seul le pouce est affecté, ou l'abduction en MCP redéfinie (celle-ci est nulle par défaut). Nous avons adopté cette stratégie pour pouvoir aisément décrire les cas comme le *C* où le pouce s'oppose aux doigts sans les toucher bien qu'il se trouve (quasiment) dans la même posture que pour le *O*. Il est de même possible, pour spécifier le *K*, d'utiliser un contact ventral virtuel car le pouce y montre une forme très proche de celle qu'il possède dans la configuration *Clé* par exemple (voir figure 2.10).

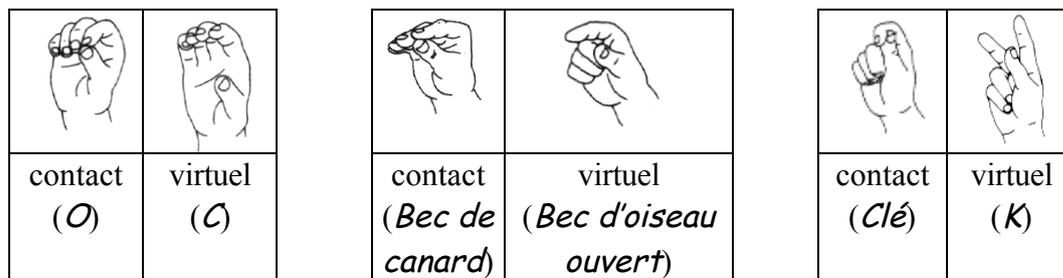


Figure 2.10 : Exemples d'utilisations de propriétés globales pour définir la posture du pouce.

En guise d'exemple complet de description d'une configuration à l'aide des outils définis ci-dessus, prenons le *V* de la dactylogologie (ci-contre). Il peut être spécifié de la manière suivante :

- flexion des doigts : index et majeur tendus, annulaire et auriculaire repliés ;
- propriétés globales : abduction de l'index et du majeur, le pouce venant recouvrir l'annulaire.



Figure 2.11 : Configuration *V*.

Remarque : Pour la raison citée plus haut, il n'aurait pas été nécessaire ici de spécifier l'état de flexion de l'annulaire, puisque ce dernier est de toute façon recouvert par le pouce. En effet, la propriété manuelle de recouvrement est, elle, contraignante pour le doigt concerné.

2.3. Spécifications manuelles.

Spécifier une posture manuelle consiste à définir, outre la configuration manuelle, à quel endroit de l'espace du signeur se trouve la main et comment elle est orientée. Voyons comment ces informations peuvent être encodées.

2.3.1. Localisation.

2.3.1.1. Contraintes liées à l'utilisation de l'espace en langue des signes.

Du point de vue linguistique, seules sont pertinentes un nombre restreint de localisations dans l'espace ou sur le corps du signeur. Rappelons que Stokoe n'en retient que 12 (présentées en annexe 1.2) – auxquelles il convient d'ajouter la main de base – et le DILS [CEP 98] une vingtaine pour la LSF. Liddell et Johnson [LID 89] aboutissent au même total de base (12 sur le visage, 6 sur le torse et 2 sur le bras), alors que Moody [MOO 83] distingue une quinzaine d'endroits sur le corps.

Mais lorsqu'il s'agit de décrire un mouvement pour le synthétiser, ces quelques points ne se révèlent pas suffisamment précis et ne peuvent donc être utilisés tels quels. Par exemple, le *gestème* de localisation en avant du torse (l'« espace neutre » de Stokoe) est bien trop étendu pour savoir d'où part la main et où elle aboutit. Des renseignements supplémentaires de distance au buste ou de hauteur par rapport à la taille sont notamment requis. Le système de spécification de Liddell et Johnson est ainsi affiné à un point tel qu'au moins 80 points corporels peuvent être différenciés (en modifiant les positions de base par de légers décalages dans diverses directions – cf. annexe 1.3).

De fait, au niveau lexical, un système de synthèse performant ne saurait s'affranchir de pouvoir calculer pour le bras une position quelconque de l'espace atteignable. Car quand bien même les postures extrêmes du mouvement seraient limitées à un ensemble de valeurs prédéfinies, les positions intermédiaires devraient malgré tout être calculées. En effet, une simple interpolation entre configurations initiale et finale du bras n'est par exemple pas possible dans les cas où la trajectoire est courbe (arc ou cercle).

Au niveau grammatical en revanche, les processus mis en jeu font intervenir des localisations discrètes. Ainsi, les pronoms personnels sont constitués de références indexées bien définies par rapport à la ligne signeur-interlocuteur. Le même système *déictique* est utilisé pour désigner un objet réel ou virtuel sur la scène, ou pour établir une localisation par indexation. Il est également possible d'assigner un positionnement par translation de l'ensemble du signe vers la droite ou la gauche ; l'expression du temps du discours use d'un procédé analogue de décalage spatial, mais en avant/arrière cette fois. L'utilisation de localisations symboliques est par conséquent envisageable à ce niveau en tant que particularisations des précédentes.

2.3.1.2. Spécifier une localisation.

Les mouvements des signes étant produits avec les seuls bras, l'espace de travail correspond à celui atteignable par ces articulateurs (étudié avec précision dans [LEN 94]) : il se situe en avant du plan **frontal** et majoritairement au-dessus de la taille, même si quelques rares signes (tels *short*, *caleçon* ou *jambe*) atteignent la partie supérieure de la jambe.

Afin de spécifier une position de cet espace, un repère cartésien global est attaché au buste du signeur virtuel, centré au niveau de la ceinture à l'intersection des plans **sagittal** (XY) et frontal (XZ) (voir figure 2.12)

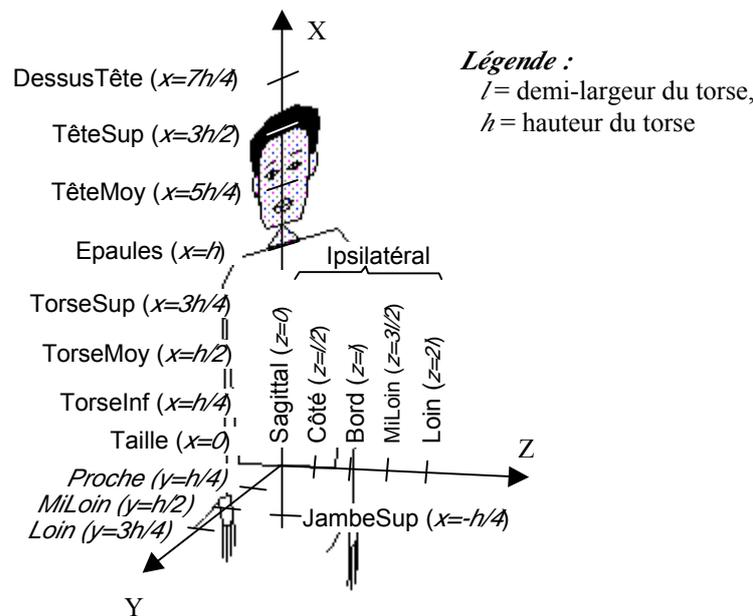


Figure 2.12 : Axes et positions de l'espace du signeur.

Un ensemble de positions symboliques est ensuite choisi le long des trois axes ainsi définis, constituant un maillage de l'espace dont les points sont repérés par l'intersection de trois plans (horizontal, frontal et sagittal¹¹). Ces différents points ont été établis en s'inspirant de ceux retenus par Liddell et Johnson [LID 89] ; en particulier, les finesses des treillis sont comparables. Leurs valeurs sont exprimées en fonction des mensurations du signeur de façon à pouvoir modifier la taille de ce dernier sans conséquence sur les signes décrits à l'aide de ce système. Ces positions se sont révélées suffisamment nombreuses pour servir de spécification dans la majorité des signes. Il reste possible néanmoins de donner un point sous forme de ses coordonnées spatiales, bien que cette solution soit moins lisible et que l'on perde alors l'avantage des valeurs paramétrées.

¹¹ Nous qualifierons désormais de « sagittal » et « frontal » un plan quelconque parallèle à ceux originellement désignés par ces termes. Ces deux derniers (respectivement, XY et XZ) seront repérés par un article défini. Un plan *radial* est quant à lui défini comme un plan perpendiculaire au plan horizontal et passant par l'origine.

Cette notation permet d'indiquer aisément une position dans l'espace ou sur le buste. En revanche, elle n'est pas adaptée pour spécifier des points sur l'autre bras ou le visage, qui dépendent eux de la configuration corporelle à l'instant considéré. C'est pourquoi nous avons fourni le moyen, dans une spécification de localisation, d'utiliser plutôt un point du corps. Celui-ci se présente sous forme d'un symbole qui n'est évalué à l'exécution qu'après avoir correctement positionné les articulateurs impliqués. Ainsi, si ce point corporel appartient à la main de base (comme dans *bouteille*, figure 2.13), le bras non-dominant doit être configuré avant de pouvoir calculer le point de contact (en l'occurrence dans notre exemple, le milieu de l'annulaire).

Les points de contact considérés se situent:

- sur le visage (front, nez, joue, oreille, bouche, lèvres, mâchoire, menton et cou);
- sur le bras de base (épaule, bras supérieur, coude et avant-bras);
- sur la main de base, où ils sont identiques à ceux définis sur la figure 2.13 pour la main dominante.

Des études linguistiques plus poussées devraient permettre de déterminer s'il faut prendre en compte davantage de points sur le visage. Il se peut en effet que ceux retenus ne soient pas suffisants : étant donné que la face est l'endroit où se focalise le regard de l'observateur, ses éléments sont perçus avec plus de précision que ceux du torse – appartenant, eux, au champ de vision périphérique.

2.3.2. Points manuels et orientation.

2.3.2.1. Points manuels.

Dans les situations où il y a contact entre la main dominante et un point corporel, il est plus pertinent et plus facile de spécifier la partie de la main concernée plutôt que la position du poignet, qui n'est pas connue avec précision. Lors de l'évaluation de la spécification manuelle, c'est ce point de contact qui occupe la localisation au lieu du poignet.

La figure 2.13 illustre les points manuels considérés, avec un exemple d'utilisation pour chacun. Ainsi, dans le signe *collier*, c'est l'extrémité de l'index (`#ExtrémitéIndex`) qui est initialement positionnée à la localisation `#(X=Epaule, Y=Contact, Z=CôtéContralatéral)`. Pour encoder *crayon*, la position est cette fois le point corporel `#EspaceIndex-Majeur`, et celle-ci est occupée par le point `#MilieuIndex` de la main dominante.

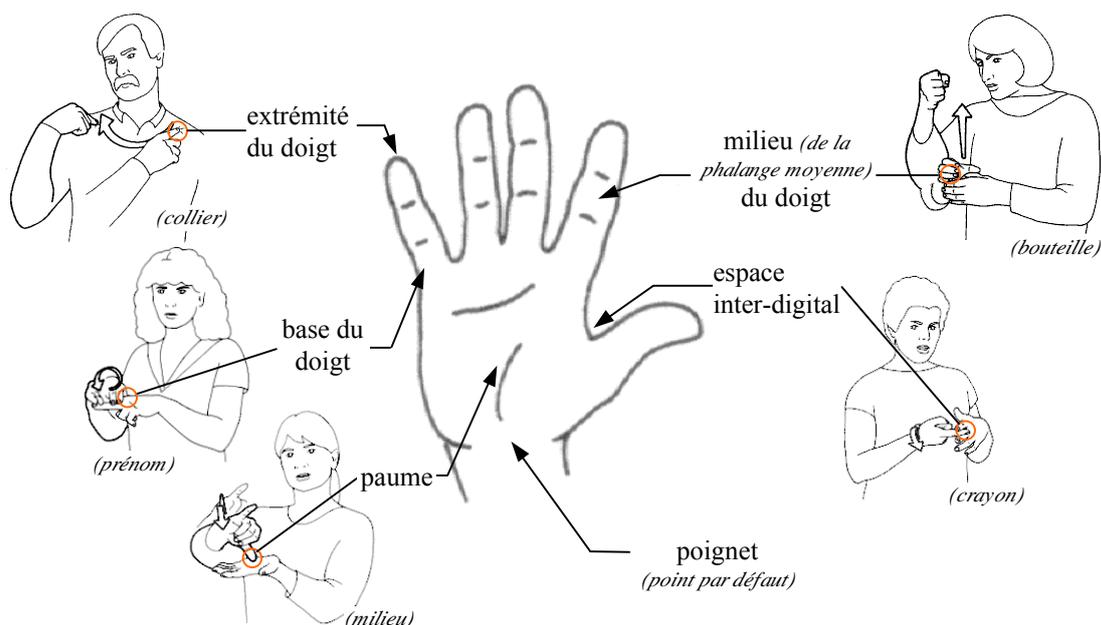


Figure 2.13 : Points de contact manuels.

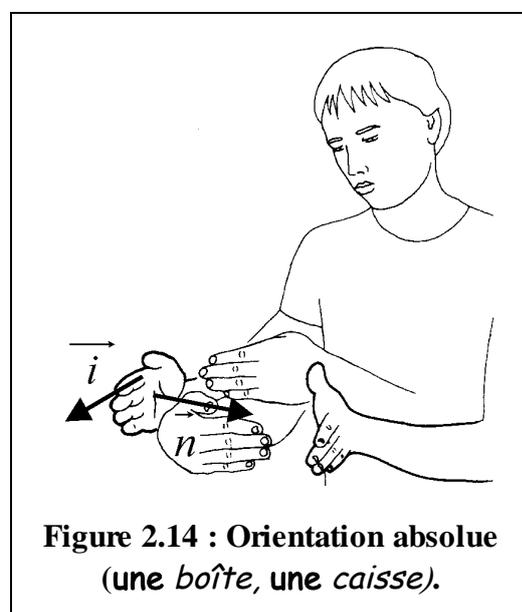
2.3.2.2. Orientation.

Pour les linguistes, l'orientation de la main est avant tout celle de la paume. Il semble en effet que ce critère suffise pour identifier un signe sans ambiguïté, étant donné le faible nombre de paires minimales différenciées par la commutation phonologique. La description la plus communément adoptée est ainsi la possibilité, pour l'intérieur de la paume, de s'orienter selon l'une des six directions principales de l'espace : vers l'avant ou l'arrière, le côté gauche ou le droit, face au sol ou au ciel.

Néanmoins, l'orientation n'est pas toujours facile à spécifier avec un système aussi simple et de nombreux cas limites apparaissent délicats à catégoriser. C'est pourquoi certains auteurs, notamment l'équipe néerlandaise du projet SignPhon [CRA 96], proposent d'autres possibilités dans leur codage phonologique des signes, telles que des combinaisons des directions citées ci-dessus.

Dans l'optique de synthèse qui est la nôtre, nous ne pouvons éviter de spécifier complètement l'orientation de la main, sous peine d'obtenir une représentation bien trop grossière – voire « robotisée » – du signe. En d'autres termes, il nous faudra décrire non seulement la direction de la paume, mais encore celle de l'index dans le plan de cette dernière, c'est-à-dire le couple (cf. figure 2.14) :

{ vecteur normal \vec{n} à la paume
et dirigé vers l'intérieur ,
vecteur directeur \vec{i} de l'index tendu }



Noter que la direction de \vec{i} prise en considération ici est toujours celle de l'index (virtuellement) tendu, telle que dans la configuration « Main plate » – comme dans la figure 2.14. Autrement dit, \vec{i} est orienté selon l'axe du troisième métacarpien, de CMC3 vers MCP3, quelle que soit la configuration manuelle réelle du signe.

Comment dès lors définir ces vecteurs, et surtout, quel niveau de détail adopter dans les différentes directions ? En première approche, une seule subdivision entre les points cardinaux est suffisante. Ceci nous fournit, pour chacune des 8 directions dans le plan horizontal, autant de possibilités dans le plan radial ainsi défini. Soit au total un choix de 26 directions spatiales pour la paume et 8 pour l'index \vec{i} , une fois \vec{n} fixé.

Aux six directions principales de l'espace ont été affectés les symboles suivants, sachant que l'axe X du torse est confondu avec la colonne vertébrale et que Y est orienté vers l'avant du signeur (droitier ici) :

Avant [Front]	+Y	Ipsi [Ipsi]	-Z	Haut [Up]	+X
Arrière [Back]	-Y	Contra [Contra]	+Z	Bas [Down]	-X

La figure 2.15 illustre un exemple de choix d'orientation : dans le plan horizontal, la direction radiale choisie est $\#(Avant\ Contra)$, \vec{n} étant finalement défini par la combinaison de cette direction avec $\#Haut$. Le vecteur \vec{i} est ensuite choisi dans le plan dont \vec{n} est la normale.

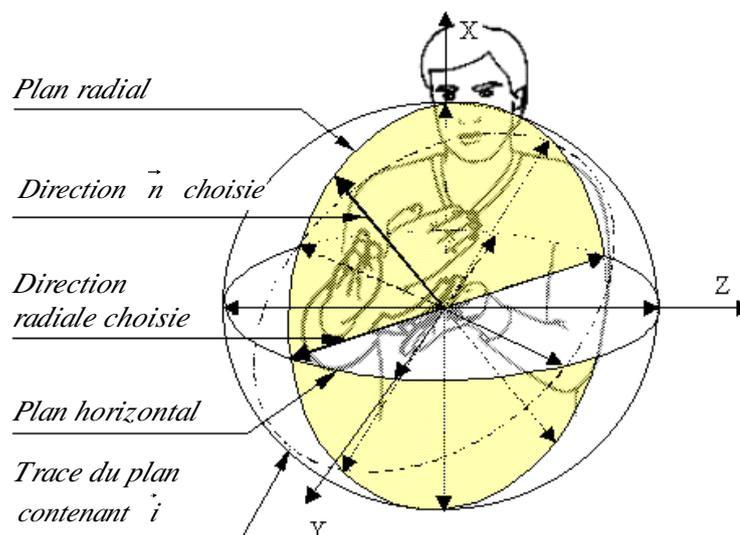


Figure 2.15 : Directions possibles pour l'orientation absolue (exemple : *crédit*).

Si cet ensemble d'orientations absolues semble effectivement constituer les traits pertinents en la matière, il est des cas où spécifier une orientation relative se révèle bien plus aisé. Il s'agit de donner explicitement les angles – éventuellement sous forme de valeurs discrètes prédéfinies –

qui, une fois les angles du bras fixés, déterminent l'orientation de la main. Ce sont les 3 rotations successives (voir figure 2.16) :

- rotation axiale de l'avant-bras, appliquée au niveau du coude (**pronation** / **supination** d'angle \mathcal{E}_c);
- 2 rotations au niveau du poignet :
abduction / **adduction** d'angle α_p et flexion / extension ζ_p .

Dans bien des situations, il n'est d'ailleurs nécessaire de fournir qu'un seul de ces angles (le plus souvent, la rotation radio-ulnaire de l'avant-bras).

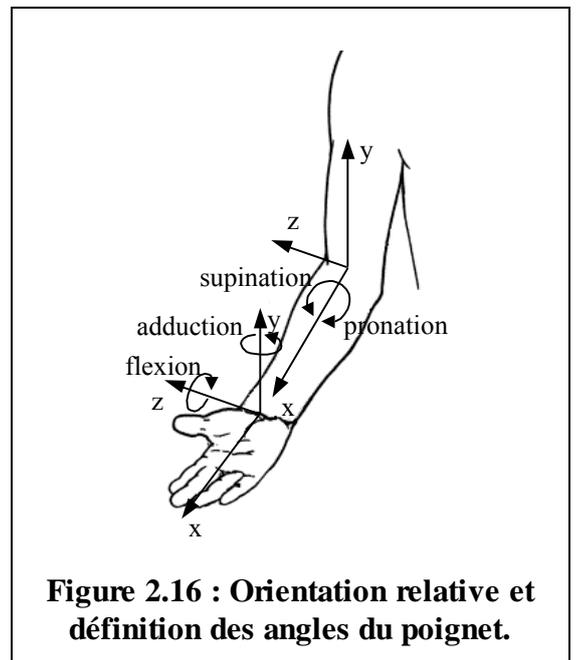


Figure 2.16 : Orientation relative et définition des angles du poignet.

2.4. Le mouvement.

La spécification des postures manuelles étant posée, comment maintenant décrire les différents paramètres du mouvement, et comment en formaliser les caractéristiques de trajectoire et de répétition ? Dans cette partie, nous nous proposons également de préciser les mouvements secondaires internes à la main, ainsi que les relations dans les déplacements des articulateurs. La dynamique du mouvement fait enfin l'objet d'une étude poussée ayant permis d'en dégager certaines tendances concernant les caractéristiques spatio-temporelles, qui sont également présentées dans cette partie.

2.4.1. Le mouvement de base : la primitive de déplacement.

2.4.1.1. Décrire la trajectoire.

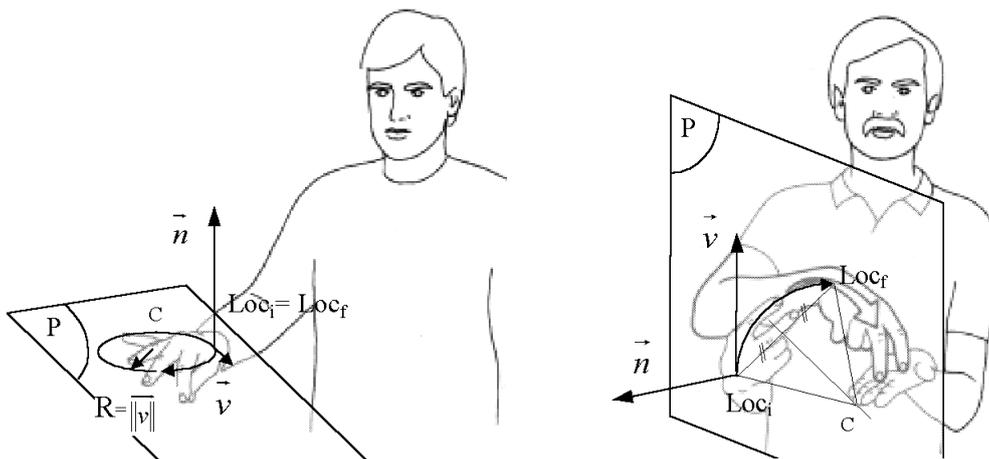
Rappelons en préalable que seules trois classes de trajectoires ont été retenues, les mouvements complexes étant décrits par combinaison et en utilisant les caractéristiques de répétition. Ces formes de chemin élémentaires du poignet sont :

- la ligne droite d'un point à un autre,
- le cercle (pour lequel seule la spécification initiale est requise, étant donné que les points de départ et d'arrivée sont confondus et que la configuration est systématiquement constante au cours du mouvement¹²),
- l'arc de cercle entre deux points de l'espace.

¹² Il convient de nuancer ce propos en justifiant au passage l'utilité de la configuration manuelle de transition : dans le signe *ambulance*, la main s'ouvre alors que le poignet décrit un cercle dans le plan horizontal. Des mouvements locaux de la main peuvent par ailleurs se produire, tel le frottement pouce/index dans *sel*.

Ne considérer que ces trois primitives peut paraître de prime abord simpliste voire réducteur. Nous allons montrer qu'au contraire, cette façon de voir permet d'allier la simplicité de description – applicable à une immense majorité de signes – à la puissance du système de spécification proposé. Par ailleurs, ces formes de base peuvent être modifiées tant par les aspects flexionnels (exposés en 2.5) que par les mouvements secondaires. Dans le même dessein, nous y avons tout de même ajouté la possibilité d'utiliser la trajectoire « naturelle » définie par interpolation des angles du bras entre les postures initiale et finale.

Si le chemin rectiligne direct ne requiert aucun paramètre particulier, il nous faut préciser comment spécifier les trajectoires courbes. Plutôt que de devoir fournir des points intermédiaires (comme dans [LEB 98]), ce qui n'est pas toujours facile, nous avons opté pour la donnée du plan contenant la trajectoire et celle du vecteur de départ (voir figure 2.17).



**Figure 2.17 : Spécification de trajectoire courbes :
cercle (*faire_la_cuisine*) et arc (*se_lever*).**

Le plan P du mouvement est défini par sa normale et le point d'arrivée (i.e. la localisation de la spécification manuelle finale). Le vecteur \vec{v} est quant à lui tangent à la trajectoire en ce point, et donne également le sens de parcours. Dans le cas du cercle, sa norme représente de surcroît le rayon. Ces deux vecteurs sont décrits de manière analogue à ceux de l'orientation de la paume, en donnant à \vec{v} une norme entière positive et en tenant compte évidemment qu'il appartient à P. Précisons encore que dans le cas de l'arc de cercle, la localisation initiale devient son point projeté sur P si elle n'est pas incluse dans ce plan.

2.4.1.2. *Mouvements secondaires.*

Au mouvement principal se superpose dans certains signes un mouvement local consistant en une série de rotations alternées ou simultanées au niveau des articulations de la main, du poignet ou de l'avant-bras. Rapides et répétés, ces mouvements peuvent constituer la principale – voire la seule – partie dynamique du signe.

Un recensement des formes caractéristiques effectué sur le dictionnaire d'I.V.T. pour la LSF [MOO 86] nous a fourni des résultats tout à fait similaires à ceux obtenus pour l'ASL [LID 89] et la langue des signes néerlandaise [CRA 96].

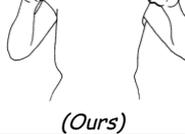
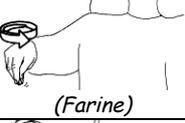
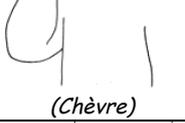
Nom	Doigts concernés	Description du mouvement	Exemple
#Vibrer [#Wiggle]	Doigts II à V non fléchis aux articulations interphalangiennes et sans opposition avec le pouce	Alternance en MCP de flexion et d'extensions en opposition de phase autour d'une position médiane	 (Mathématiques)
#Crocheter [#Hook]	Doigts en configuration #Tendu ou #Crochet aux deux articulations interphalangiennes	Alternance simultanée des doigts entre les configurations #Crochet et #Tendu	 (Ours)
#Frotter [#Rub]	Doigt(s) en contact avec le pouce et doigts en configuration #Plat	Frottement simultané des <i>pulpes</i> du pouce et des autres doigts	 (Farine)
#Coûter [#Cost]	Pouce et index	Frottement de la pulpe du pouce sur la partie latérale de l'index	 (Argent)
#Aplatir [#Flatten]	Doigts II à V non fléchis aux articulations interphalangiennes et sans contact avec le pouce	Alternance de flexions et d'extensions simultanées en MCP	 (Chèvre)
#Découper [#Scissor]	Index et majeur, qui doivent être tendus	Alternances d'abductions et d'adductions de l'index et du majeur	 (Homard)
#Compter [#Count]	Doigts pliés de la configuration manuelle initiale qui sont tendus dans la configuration finale	Extension progressive des doigts, dans l'ordre croissant de leurs numéros	 (Compter)

Tableau 2.9 : Mouvements secondaires internes à la main.

Le tableau 2.9 regroupe les différents mouvements observables au niveau de la main et appelle quelques remarques.

On peut d'abord se demander quelle configuration manuelle assigner à un déplacement présentant une telle caractéristique. Il apparaît que les mouvements secondaires possèdent une amplitude suffisamment faible pour considérer qu'en général, les formes de la main initiale et finale sont identiques.

Le mouvement nommé *#Compter* constitue une exception à plusieurs titres. Outre qu'il n'est pas répété, la remarque précédente ne s'applique pas non plus puisque la configuration manuelle évolue vers une forme de $C = \{\#Un, \#Deux, \#Trois, \#Quatre, \#Cinq\}$ à partir d'une forme (différente) de $C \cup \{\#A, \#S\}$. Cela s'explique par le fait qu'il s'agit d'un artifice destiné à pouvoir spécifier aisément ces quelques signes où la main passe par plusieurs configurations

successives. Si le signe *alphabet* en est un autre exemple, lui peut être en revanche décrit par deux déplacements : un premier évoluant sur une courte distance du #A au #B, prolongé par un second lui-même marqué par une vibration des doigts.

Concernant enfin le nombre de répétitions, les mouvements locaux sont en général simplement dupliqués. Mais davantage d’aller-retours sont susceptibles d’être produits afin de donner plus d’emphase. Le signe *argent* est ainsi amplifié (pour signifier *beaucoup d’argent*) si ce sont trois ou quatre frottements pouce/index qui sont effectués.

Signalons que les descriptions des mouvements secondaires du poignet, consignées dans le tableau 2.10 avec un exemple correspondant, doivent être affinées si l’on souhaite obtenir des signes naturels. Ce problème est abordé au chapitre 3, lorsqu’est présentée la synthèse de ces mêmes mouvements.

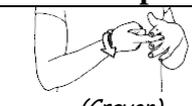
Nom	Description du mouvement	Exemple
#Torsion [#Twist]	Alternance de pronations et de supinations de l’avant-bras	 (Crayon)
#Ondulation [#Wave]	Alternance de flexions et d’extensions du poignet	 (Poisson)
#Circumduction [#Circumduct]	Circumduction du poignet (mouvement complexe au cours duquel la paume décrit un cône irrégulier dans l’espace)	 (Cuiller)
#Oscillation [#Oscillate]	Alternance d’abductions et d’adductions du poignet de façon à ce que la paume oscille autour d’un point central (point manuel à spécifier, en général le milieu de la paume ou l’un des espaces inter-digitaux)	 (Hélicoptère)

Tableau 2.10 : Mouvements locaux du poignet et de l’avant-bras.

2.4.2. Décrire le signe dans son ensemble.

Les notions de déplacement et de macro-déplacement ont été introduites plus haut. Nous souhaitons à présent en exposer les détails, et tout particulièrement les caractéristiques de symétrie et de répétition des mouvements.

2.4.2.1. Déplacements et symétrie des articulateurs.

Parmi les trois formes que peut revêtir un déplacement, celle dans laquelle les deux articulateurs sont mobiles doit être précisée. Les règles de formation des signes imposent en effet

que les mains ne se meuvent pas indépendamment, mais qu'elles sont au contraire liées par une relation spatiale.

E. Radutzky [RAD 90] a prouvé que la condition de symétrie édictée dès 1974 par Battison est bien respectée en langue des signes italienne et que les évolutions *diachroniques* imposent en particulier des configurations manuelles identiques. C'est aussi ce que nous avons pu vérifier en LSF sur notre corpus d'étude, puisque cela s'est avéré de manière systématique. La même tendance est observée pour le mouvement ; U. Bellugi cite par exemple [BEL 78] le néologisme ASL *magnétoscope* qui a évolué de sa représentation mimétique (deux bobines tournant dans le même sens) vers sa forme signée sans rapport avec le fonctionnement réel de l'appareil mais plus aisée à produire (deux cercles décrits dans un sens giratoire orienté vers l'intérieur).

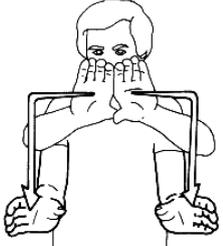
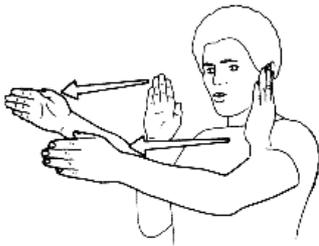
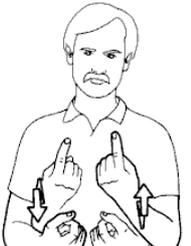
Symétrie complète			
	Par rapport au plan sagittal (<i>cheminée</i>)	Par rapport à un plan radial (<i>couloir</i>)	Par rapport à un plan frontal (<i>fréquenter des personnes</i>)
Conservation de position relative			
	Décalage dans le plan sagittal (<i>sandwich</i>)	Décalage dans le plan frontal ¹³ (<i>math. égal</i>)	Décalage dans un plan radial (<i>nettoyer par terre</i>)
Anti-symétrie			
	Mouvement rectiligne (<i>limonade</i>)	Mouvement circulaire (<i>chimie</i>)	Mouvement « naturel » (<i>être_externe</i>)

Tableau 2.11 : Relations spatiales entre articulateurs.

¹³ Le plan de symétrie de l'orientation est ici le plan sagittal. Dans les deux autres exemples de ce groupe, il coïncide avec le plan du décalage.

Ces observations nous ont amenés à tenter de catégoriser les différents types de relations spatiales unissant les articulateurs. Trois classes principales ont ainsi pu être isolées et caractérisées :

- La *symétrie complète* concerne de loin le plus de signes. Les spécifications manuelles initiale et finale de la main de base sont les symétriques (en orientation et localisation) de celles de la main dominante. Le plan de symétrie est très souvent le plan *sagittal*, mais il peut s'agir également d'un plan radial ou même de tout autre. Celui-ci s'applique aussi aux vecteurs définissant les trajectoires courbes.
- La *conservation de position relative*, dans laquelle les mains gardent au cours du mouvement l'arrangement qui est le leur initialement. Les deux articulateurs ont cette fois des trajectoires identiques, mais la position initiale de la main de base est décalée par rapport à celle de la main dominante, et doit donc être spécifiée explicitement. L'orientation est quant à elle symétrique par rapport à un plan (sagittal ou radial, là encore).
- L'*anti-symétrie* est définie de la manière suivante : les spécifications manuelles initiale et finale de la main de base sont respectivement les symétriques (en orientation et localisation) de celles de la main dominante en fin et début de mouvement. Dans le cas particulier de trajectoires circulaires, le mouvement des articulateurs est alterné, c'est-à-dire que ceux-ci se trouvent à tout instant sur des points diamétralement opposés. La trajectoire est également symétrique par rapport à un plan, généralement le plan sagittal.

Le tableau 2.11 illustre chacune de ces catégories par plusieurs exemples reprenant les diverses possibilités quant au plan de symétrie et à la forme de la trajectoire.

Remarque : le signe *être externe* du tableau 2.11 présente une anti-symétrie non triviale, difficile à catégoriser. Elle correspond néanmoins à la définition que nous en avons donnée ci-dessus. Ceci explique pourquoi les relations spatiales ont été décrites de façon si détaillée.

2.4.2.2. Importance de la répétition en langue des signes.

En langue des signes, la répétition possède une fonction – marginale – de différenciation lexicale, puisqu'elle constitue par exemple la seule distinction entre les signes de l'ASL *clean* [propre], dans lequel le mouvement est dupliqué, et *nice* [gentil], effectué avec un aller simple. Mais l'itération du mouvement est par ailleurs porteuse de processus grammaticaux étendus.

La répétition est d'abord caractéristique des pluriels défini et indéfini [FIS 78]. S'appliquant au sujet et/ou à l'objet d'un verbe, le pluriel défini désigne chaque personne comme participant individuellement à l'action; le mouvement du verbe est répété en balayant les localisations pronominales concernées. Le pluriel indéfini (tel *plusieurs personnes*) est lui caractérisé par une répétition, rapide et sans pause mais détendue, du verbe sur une trajectoire horizontale.

Ces deux types de pluriels s'appliquent aussi aux articles *les* et *des* consistant en un mouvement d'indexation tel que pour *lui*, répété selon les modalités ci-dessus. Pour les noms

également, la répétition exprime le pluriel : ainsi le signe *lumière*, avec l'ouverture vers le sol de la main située au niveau du front, donne *lumières* lorsqu'il est réitéré à trois endroits différents sur l'horizontale, toujours à hauteur du front.

La duplication du mouvement sert aussi à indiquer le déroulement présent, la récurrence ou l'aspect habituel d'une action ou d'un état dans le temps. Klima et Bellugi [KLI 79] ont étudié et isolé différentes modulations sur les prédicats adjectivaux de l'ASL, avec parfois de très fines distinctions entre les nuances évoquées. Les aspects *prédispositionnel*, *continuatif*, *incessant*, *fréquentatif*, *approximatif*, *itératif* et *susceptatif* sont ainsi caractérisés par une itération du mouvement, avec d'autres paramètres par ailleurs (voir annexe 1.4 pour un tableau récapitulatif).

Namir et Schlesinger [NAM 78] mettent encore en lumière deux autres utilisations de la répétition en tant que procédé grammatical : l'expression du degré et de l'emphase, indépendamment de tout marquage de pluralité (l'ambiguïté étant, le cas échéant, levée par le contexte). De même qu'en anglais *very very*, ou *très très* en français, insistent sur l'aspect qui leur est postposé, la langue des signes – comme l'hébreu – utilise la duplication pour exprimer des notions telles que *très riche* (*riche riche*), *minuscule* (*petit petit*) ou *un mauvais rhume* (*rhume rhume*).

Signalons d'ores et déjà que la répétition est bien souvent accompagnée par un autre procédé la renforçant et qui peut être autosuffisant, à savoir une expression faciale. Celle-ci intervient aussi bien comme moyen d'accentuation que lors de l'expression des pluriels.

Klima et Bellugi décrivent enfin des inflexions spécialisées sur les verbes en ASL, mettant en jeu des répétitions :

- *apportionnative external* (respectivement *internal*), action appliquée à tous les membres d'un ensemble donné (resp. à toutes les parties d'un objet ou d'un lieu unique). Le signe correspondant est répété sur un chemin circulaire horizontal (resp. vertical).
- *seriated external* (respectivement *internal*), action appliquée à une série d'objets de même classe, i.e. partageant un ensemble de caractéristiques communes (resp. à toutes les caractéristiques internes ou composantes typiques d'un seul objet). Le signe est cette fois dupliqué sur un chemin *rectiligne* horizontal (resp. vertical).

On retrouve ces types de processus en LSF, bien qu'ils n'aient pas encore été décrits de manière aussi précise. La *distribution* (traduction d'*apportionnative*) externe s'emploie par exemple sur le signe *demander* pour signifier « *je demande à chacun d'entre vous* ». En règle générale, il semble que ce type de répétition le long d'un cercle ou d'une ligne ne s'applique qu'aux signes dont le mouvement est d'amplitude très réduite. Pour les autres (tels que *donner*), on trouve plutôt l'inflexion – très proche – que les précédents auteurs ont nommée *exhaustive*, et consistant en une série d'arcs joignant des positions disposées latéralement (cf. figure 2.18).



Figure 2.18 : Flexion exhaustive.
(« *je donne à chacun de vous* »)

2.4.2.3. Spécification des mouvements répétés.

Au-delà d'importantes fonctions grammaticales, la répétition est présente dans la simple forme de citation de nombreux lexèmes. Ses différents aspects sont en outre largement similaires dans les deux cas, car les signes répétés incluent souvent de façon intrinsèque l'une des modalités citées précédemment. Ainsi le second macro-déplacement de *bibliothèque* est-il dupliqué un certain nombre de fois pour évoquer plusieurs livres disposés côte à côte.

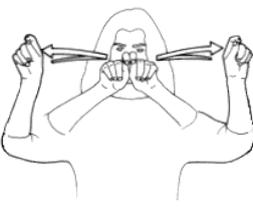
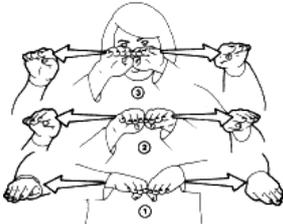
 <p>Répétition simple (<i>chewing-gum</i>)</p>	 <p>Répétition à partir du point courant (<i>scolaire</i>)</p>	 <p>Inversion du rôle des mains (<i>lavabo</i>)</p>
 <p>Mouvement inversé (<i>rideau</i>)</p>	 <p>Répétition à partir d'un point décalé (<i>étagères</i>)</p>	 <p>Répétition à rebroussement (<i>apprendre</i>)</p>

Tableau 2.12 : Formes de répétition du mouvement.

Afin de spécifier simplement des signes de ce type, nous proposons une taxonomie des différentes formes de répétition. Elle est principalement issue de notre corpus d'étude composé de quelque 300 signes, mais d'autres formes rencontrées au cours de nos travaux sont également prises en considération.

- La répétition simple consiste à dupliquer les mouvements à l'identique. Par défaut, la main reprend sa position de départ lors d'une transition, rapidement et en ligne droite (ce qui différencie cette forme de la suivante).
- Dans le mouvement inversé, l'articulateur décrit la même trajectoire en sens opposé et à la même vitesse.
- La répétition à partir du point courant se caractérise par l'itération d'un macro-déplacement en partant de la position de l'articulateur à la fin de celui-ci.

- Le mouvement peut aussi être répété (là encore, configuration et orientation sont conservées) à partir d'un point de départ décalé. Il suffit pour cela d'indiquer le vecteur de translation de cette position.
- Quelques signes montrent un échange rigoureux du rôle des mains dans le mouvement.
- La répétition de la seule partie finale du mouvement a également été prise en compte. Elle est précédée d'un rebroussement partiel de la main.

Le nombre d'itérations constitue un paramètre pour toutes ces formes de répétitions dont le tableau 2.12 présente quelques illustrations. Le mouvement peut ainsi être reproduit jusqu'à quatre fois consécutives.

2.4.2.4. Synchronisation des mouvements.

La spécification hiérarchique du signe que nous venons de présenter repose sur une description essentiellement spatiale du mouvement. Les aspects temporels en sont structurellement implicites : lorsque les mains sont toutes deux impliquées dans un déplacement, leurs actions débutent aux mêmes instants, se déroulent en parallèle pour cesser simultanément. En revanche, pour un même articulateur, les déplacements successifs se produisent en séquence. Nous souhaitons aborder ici les situations où ces deux cas de figure ne sont pas apparemment suffisants pour décrire le signe de manière satisfaisante.

Au vu d'un examen attentif systématique de l'ensemble des signes contenus dans le premier tome du dictionnaire d'IVT, un tel problème semble survenir dans deux principaux types de conditions :

- si les articulateurs sont mobiles tour à tour (par exemple dans *programme*, figure 2.19) ou si leurs rôles respectifs de main dominante et de base paraissent basculer plusieurs fois en cours de mouvement, comme c'est le cas dans le signe *construire* ;

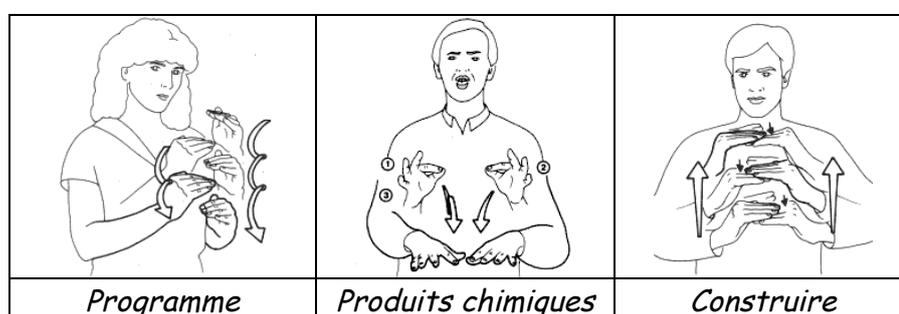


Figure 2.19 : Signes présentant une activité alternée des mains.

- si le début de l'activité de la main non-dominante est plus tardif que celle de l'autre main. Sept signes de ce type ont été recensés sur les 1300 entrées considérées ; la figure 2.20 en présente quelques-uns.

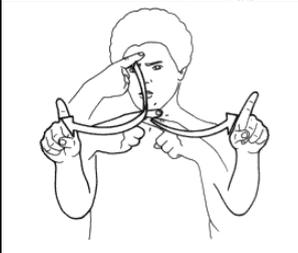
			
<i>Malin</i>	<i>Ne pas être d'accord</i>	<i>Déjà</i>	<i>Avouer franchement</i>

Figure 2.20 : Signes à activités manuelles non parallèles.

Les signes du premier groupe peuvent être aisément spécifiés au moyen des fonctionnalités déjà présentées. Ainsi *construire* est-il la combinaison d'un mouvement répété à partir d'un point de départ décalé avec, à chaque itération, une inversion du rôle des mains. La description de *programme* est identique, avec cette fois une répétition à partir de la position courante des articulateurs. Le signe *progresser* en est un autre exemple, avec comme seule différence un mouvement ascendant. Dans certains de ces cas, il est en outre nécessaire de fournir explicitement le mouvement de transition vers la nouvelle itération : pour que les mains s'évitent mutuellement dans *construire*, celle ayant servi de base au rabattement doit contourner, suivant un arc de cercle, la seconde qui s'élève en ligne directe.

Pour décrire les signes asynchrones du second groupe, nous avons d'abord songé à introduire une valeur de décalage absolue (en millisecondes) ou relative (proportionnelle à la durée du mouvement principal). On pourrait ainsi exprimer que, dans *déjà*, le mouvement de la main non-dominante n'est initié que lorsque l'autre main est à mi-course (on suppose ici que le profil de vitesse de ce déplacement est symétrique). Il était aussi possible de synchroniser les actions par rapport à l'occurrence d'un événement (par exemple, le contact des doigts dans le signe *ne_pas_être_d'accord*) [LEB 98].

Ces solutions n'ont pas été retenues pour deux raisons. D'une part, cela aurait alourdi la description arborescente pour un nombre de signes somme toute très restreint. D'autre part, introduire une valeur de retard dépendant de la durée du mouvement n'est pas satisfaisant car cette durée n'est pas aisée à calculer, ni même à estimer. Elle est en effet fortement liée à l'amplitude et à la dynamique du mouvement, comme cela est largement démontré dans les sections qui suivent.

Nous nous sommes donc bornés à considérer ces signes comme formés de deux déplacements, un premier où seule la main dominante est active (la main non-dominante se positionne simultanément, comme lors d'une transition classique), et un second où les deux articulateurs se meuvent, souvent de façon symétrique. La frontière entre ces deux déplacements est d'ailleurs plus ou moins nette : très marquée dans *avouer_franchement*, elle l'est moins dans *ne_pas_être_d'accord*, alors que le mouvement doit être réellement fluide dans le signe *déjà*. Un soin particulier doit simplement être apporté dans la description des trajectoires et des tenues de ces signes pour qu'ils soient correctement rendus. Mais *in fine*, là encore, les outils introduits précédemment sont suffisants.

2.4.3. Paramètres temporels du mouvement.

L'étude des caractéristiques du mouvement est parachevée dans cette partie. Nous tentons ici de donner une description qualitative et quantitative de ses paramètres temporels en précisant ses aspects cinématiques et dynamiques, ainsi que la durée des tenues et du signe global. Pour cela, nous avons créé un logiciel d'analyse, présenté rapidement avant d'en examiner les résultats.

2.4.3.1. Présentation du logiciel d'analyse.

A cette fin d'analyse des signes, nous avons opté pour un système de vision mono-caméra, dont la mise en œuvre et l'exploitation sont les moins complexes. Comme il a été déjà souligné, c'est en effet le moyen de capture des signes le moins contraignant pour l'utilisateur. S'il offre certainement une précision moindre que les capteurs magnétiques, aux fréquences d'échantillonnage par ailleurs supérieures, le critère de production aisée des données a été jugé prééminent dans notre projet.

Le logiciel fonctionne donc sur le principe suivant : à partir d'un fichier vidéo représentant un signe sont extraites, pour chaque image, les coordonnées spatiales des articulations (épaule, coude et poignet) des membres supérieurs. Pour cela, l'utilisateur déplace la structure articulée composée des segments correspondants, de façon à la faire coïncider avec ceux du signeur filmé. Pour obtenir des coordonnées spatiales à partir des points de l'écran, deux manipulations sont nécessaires :

- sur une image de calibration présentant la personne dans le plan *frontal*, les longueurs des membres en pixels doivent être préalablement mesurées,
- chaque articulation est alors définie grâce aux coordonnées de sa projection (x, y) sur l'image plane, connaissant celle de l'épaule droite pour laquelle on fixe arbitrairement $z=0$. Seule demeure une ambiguïté quant au signe de la profondeur selon l'axe de visée pour les autres articulations. C'est pourquoi l'utilisateur doit préciser si chacune est située en avant (signe $+$) ou en arrière (signe $-$) de celle qui la précède dans la chaîne.

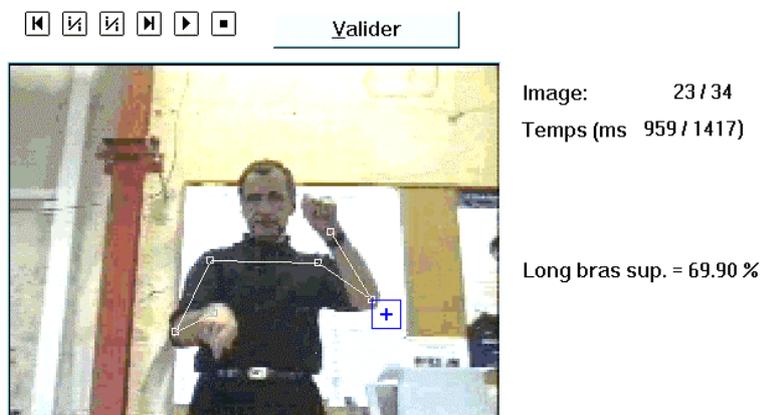


Figure 2.21 : Extrait de l'interface du logiciel d'analyse.

L'interface du logiciel se compose d'une partie supérieure, dans laquelle se trouvent la vidéo, une série de boutons permettant d'en piloter le défilement (y compris pas à pas), ainsi que la position de l'image courante dans la séquence et le temps écoulé depuis le début du film. La partie inférieure présente les copies des images successives et permet de positionner simplement la structure articulée grâce à la souris (voir figure 2.21) :

- Une articulation isolée est déplacée et reliée à ses voisines par un vecteur élastique dès que la souris passe au-dessus de sa poignée de sélection.
- Le positionnement se fait grâce à un simple clic.
- A tout moment est affichée, en pourcentage, la longueur des segments ainsi modifiés, de façon à ce que celle-ci ne dépasse pas la taille initialement calibrée. Dans le cas contraire, la valeur est mise en évidence pour en avertir l'utilisateur.
- Le changement de signe de profondeur se fait au cours même du déplacement en activant le bouton droit de la souris.
- Il est possible d'annuler à tout moment les modifications apportées et de revenir à la position initiale en appuyant sur la touche d'échappement.

Ces diverses fonctionnalités de l'interface facilitent grandement la saisie des points successifs et permettent un travail rapide et efficace. Il est en outre possible de ne traiter qu'une partie de la séquence, toujours en validant les points définis à chaque image. Une fois cette phase terminée, les coordonnées en z sont calculées puis toutes ces données enregistrées dans un fichier texte. Elles sont alors disponibles pour importation et traitement dans un tableur classique.

2.4.3.2. Le corpus d'étude.

Le corpus d'étude est constitué d'une trentaine de vidéos numérisées¹⁴ représentant chacune un signe (voir annexe 2.2 pour toutes les figures), soigneusement sélectionné en fonction de ses caractéristiques de mouvement. Ces dernières sont regroupées selon trois centres d'intérêt :

- Nous souhaitons d'abord évaluer les durées des phases («tenues») pendant lesquelles les articulateurs restent immobiles en début et en fin de signe, et surtout lors de la transition entre deux déplacements dans un même signe. Ont pour cela été sélectionnés :
 - des signes comportant différents types de répétitions tels que *étagères*, *lait*, *s'agrandir* et *construire*
 - des signes présentant deux déplacements ou macro-déplacements distincts (ainsi *bibliothèque* et *facture*)
- Il nous importe également d'étudier les variations de la vitesse dans la production de signes présentant une dynamique particulière propre (comme *vite* et *fixe*), mais aussi en fonction de :
 - la forme de la trajectoire
 - la classe grammaticale du signe (nom ou verbe associé)
 - la nuance exprimée (différenciant par exemple *tard* et *trop_tard*)

¹⁴ Merci à l'International Visual Theatre (IVT), et tout particulièrement à notre informateur sourd Rachid Benelhocine.

- Un troisième but recherché consiste à estimer dans quelle mesure l'utilisation d'un signe dans une phrase modifie ses paramètres temporels. Deux signes disponibles en forme de citation ont pour cela été incorporés dans l'exemple suivant de phrase signée :

« *S'il y a des embouteillages et que je suis en retard, je te téléphonerai avant d'arriver* »

Les résultats de cette étude sont présentés dans les paragraphes qui suivent et utilisés également, pour ceux concernant le discours, dans la partie 2.5 où ils sont confrontés à ceux d'autres recherches.

2.4.3.3. Analyse des tenues.

Les observations issues du dépouillement des données fournies par le logiciel d'analyse sont à nuancer en raison de deux facteurs principaux. La rapidité avec laquelle sont produits les signes entraîne d'abord un nombre réduit d'images significatives pour les phases dynamiques. Leur durée excède en effet rarement une demi-seconde, ce qui correspond à une douzaine d'images dans les cas les plus favorables. Ce nombre peut descendre à quatre pour les signes les plus rapides, voire deux pour ceux dont l'amplitude est la plus faible, tel que le mouvement à peine perceptible de la main vers le torse dans le pronom *je* (bien souvent omis d'ailleurs). Le second bémol que l'on peut apporter a trait à la qualité de la prise de vue. Faute de caméra à obturation rapide, les images dans lesquelles la vitesse est la plus élevée, tout particulièrement au niveau du poignet, comportent un léger flou ayant pour conséquence une imprécision supplémentaire lors du positionnement de cette articulation. En revanche, les cas d'occlusion restent tout à fait marginaux.

Pour la première de ces raisons et parce qu'il se révèle parfois délicat de segmenter le signe en ses parties statiques et dynamiques car la frontière n'en est pas rigoureusement définie, les temps détectés pour chacune de ces phases et leur importance relative dans la production totale peuvent être sujets à imprécision. Néanmoins, on peut dégager certaines tendances quant à leurs durées :

- la tenue initiale est quasi-systématiquement plus courte que la tenue finale. Seul le signe *à l'avance* de notre phrase exemple déroge à cette règle ;
- lorsqu'un signe comporte plusieurs déplacements, les tenues intermédiaires ponctuant chacun sont très brèves, et en tous cas prolongées moins longtemps que celles précédant et suivant le signe complet.

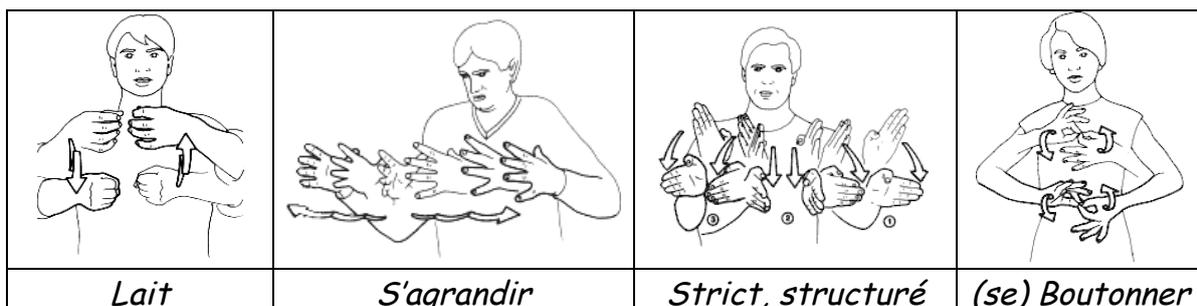


Figure 2.22 : Quatre signes répétés du corpus d'étude.

Tentons à présent de préciser cette dernière remarque au travers des cas particuliers que sont les signes répétés (voir figure 2.22). On observe que la répétition simple (par exemple dans *lait*) ne présente pas de tenue aux points de rebroussement (bien que la dynamique des mouvements rectilignes puisse en donner l'impression). Dans les signes comportant un déplacement répété à partir du point courant, tel *s'agrandir*, une très brève pause de quelques dizaines de millisecondes est observée à chaque itération. Ces temps d'arrêt sont légèrement plus marqués dans *embouteillages*. En ce qui concerne les déplacements réitérés à partir d'un point décalé, il semble que les pauses soient du même ordre, à l'exception du signe *boutonner*. L'unicité de sa répétition et la simplicité de son mouvement pourraient en fournir une explication, par opposition aux signes *strict* ou *gens* pour lesquels le temps de production total aurait trop à souffrir de tenues prolongées.

Plus surprenant *a priori*, les signes *fracture* et *téléphoner*, constitués de deux déplacements indépendants, ne présentent pas pour autant de pause intermédiaire plus marquée. Le mouvement semble au contraire fluide entre la transition, le déplacement qui précède et celui qui suit – tout comme dans le composé *parents*.

Le temps total de production des signes est évidemment fonction de l'amplitude et de la dynamique de leurs déplacements et des transitions les joignant, ainsi que des tenues; il ne saurait donc être question de comparer ces différentes valeurs inter-signes ou intra-signes. On peut néanmoins signaler que les durées totales s'échelonnent entre une demi et deux secondes, exception faite du collectif *bijoux*. L'ensemble de ces données est repris en annexe 2.3. Bien qu'elles aient été estimées sur des formes de citation aux tenues très prolongées, elles ne sont pas dénuées d'intérêt car les durées correspondantes dans un contexte de discours leur sont proportionnelles, comme il est montré un peu plus loin.

2.4.3.4. Analyse des transitions

Pour analyser la dynamique des transitions, nous avons effectué le suivi du mouvement des poignets dans le signe *étagères*. Celui-ci est en effet caractérisé par une séparation des mains en regard, itérée sur trois niveaux¹⁵. La trajectoire peut en être considérée comme rectiligne, bien qu'elle soit en réalité légèrement incurvée en raison de son mode articulaire (une rotation axiale du bras supérieur). A partir des points successifs dans le plan frontal (cf. figure 2.23a), nous avons calculé les positions puis les vitesses spatiales des poignets. Le tracé de la moyenne mobile des vitesses sur deux périodes en atténue les variations dues aux imprécisions de saisie et donne une tendance générale pertinente pour cette grandeur. Sur la courbe 2.23b, les pics correspondant aux différentes phases sont clairement distingués : le seuil de mouvement, estimé d'après plusieurs signes à 150 pixels/s, segmente le tracé en une succession de tenues, de mouvements signifiants et de transitions.

¹⁵ Il diffère de la forme reproduite dans le dictionnaire IVT de 1986 sous deux aspects : l'orientation (paumes en vis-à-vis vs. paumes orientées vers le sol) et la configuration (main à angle droit vs. main plate). D'autres dissemblances ont été relevées pour quelques signes du corpus; elle sont présentées de façon détaillée en annexe 2.2.

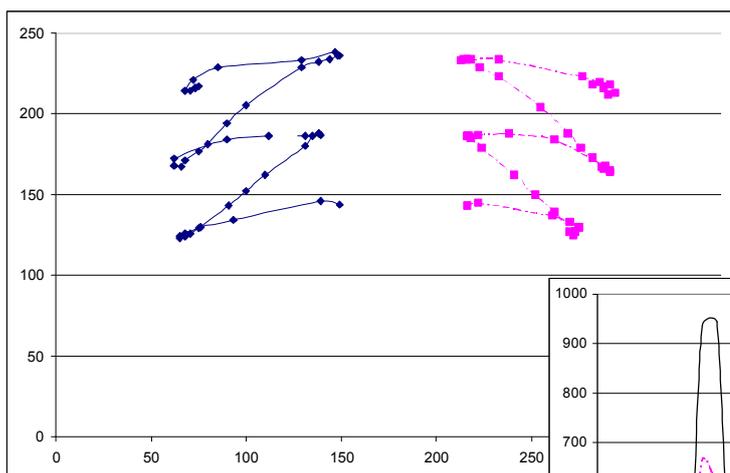
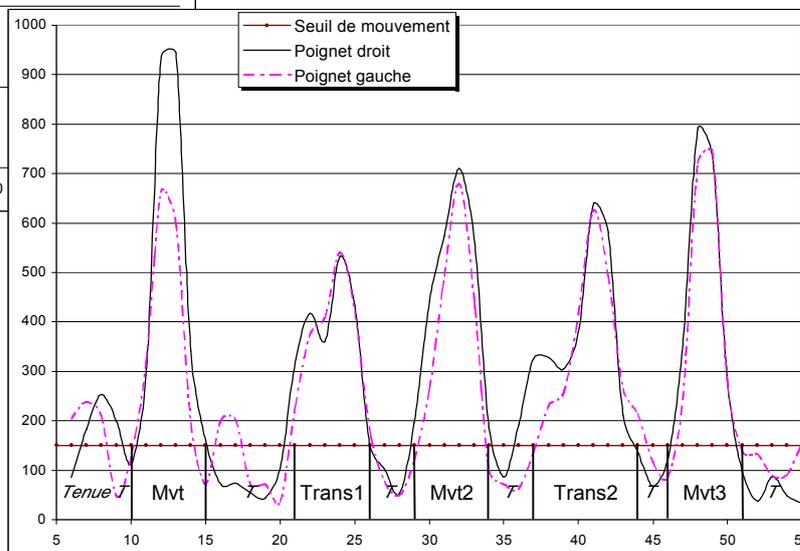


Figure 2.23a :
Trajectoires des poignets
dans le signe *Etagères*.

Figure 2.23b :
Vitesses correspondantes
pour ce même signe
(moyenne mobile sur 2 périodes).



On observe que transitions et mouvements horizontaux sont produits avec des vitesses d'amplitude et de profils comparables, avec cependant une accélération/décélération plus marquée et un maximum de vitesse légèrement plus élevé pour les seconds. Comme de surcroît les distances de transition sont plus importantes, ces phases nécessitent davantage de temps de production. L'étude d'autres signes (*gens*, *strict* et *facture* notamment) confirme ces résultats. Celle de *téléphoner* révèle de plus que le positionnement de la main de base à partir de sa posture de repos le long du corps est effectué avec la plus grande vitesse, ce qui s'explique par l'étendue du chemin à parcourir et le synchronisme requis pour les deux mains.

2.4.3.5. Trajectoire et dynamique du mouvement.

Dans un premier temps, nous avons étudié le profil de vitesse du poignet dominant en fonction de sa trajectoire. De façon à minimiser l'erreur inhérente à l'imprécision sur la coordonnée de profondeur, seuls ont été sélectionnés des signes produits dans le plan frontal. Il s'agit de *mur* et *cheminée* pour les trajectoires linéaires, *laver* et *il_n'y_a_pas* pour les circulaires et de *s'asseoir* pour un mouvement en arc de cercle. Une petite remarque que l'on peut formuler à propos de ces formes de trajectoires concerne les courbes, qui sont plutôt légèrement elliptiques que réellement circulaires. Ceci est particulièrement marqué pour le demi-cercle de *s'asseoir*.

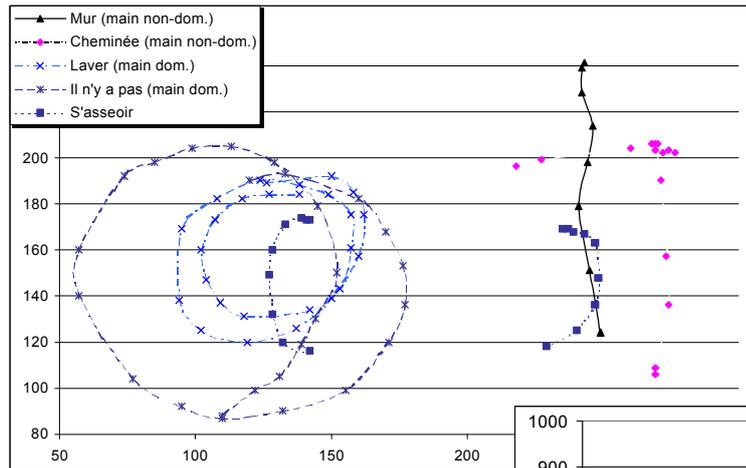
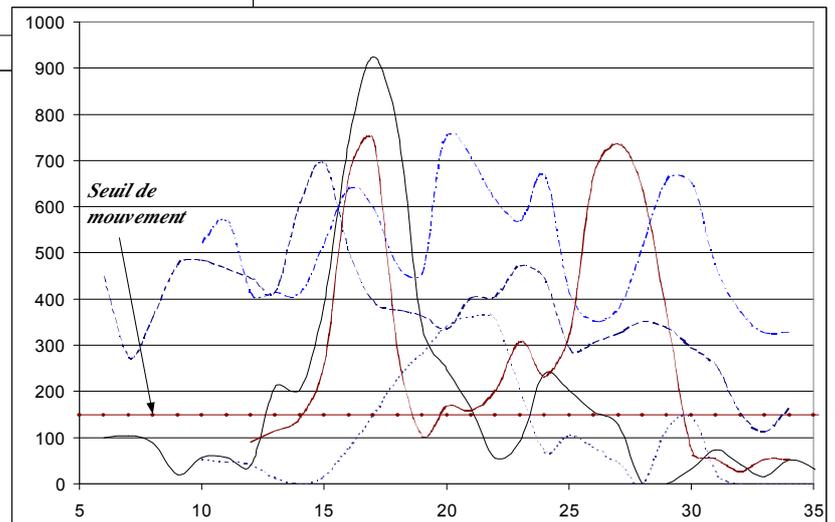


Figure 2.24a :
Trajectoire plane
de différents signes.

Figure 2.24b :
Vitesse du poignet
dominant pour
ces mêmes signes
(moyenne mobile
sur 2 périodes).



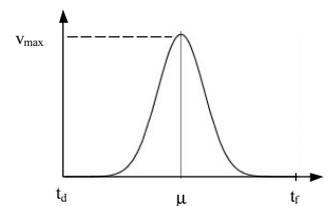
L'étude des graphes de la figure 2.24 révèle que les déplacements rectilignes connaissent un pic de vitesse à mi-parcours, avec une accélération et une décélération progressives et symétriques en début et en fin de mouvement. La trajectoire en arc de cercle du signe *s'asseoir* montre un profil de vitesse similaire, avec cependant une amplitude nettement moindre. En revanche, les déplacements circulaires sont, eux, effectués à vitesse quasiment constante, bien que celle du mouvement répété du signe *laver* diminue légèrement en fin de course jusqu'à l'arrêt de la main. Tous deux sont en outre caractérisés par des tenues très réduites, voire inexistantes.

Tentons à présent de caractériser ces deux classes en donnant l'équation de la vitesse pour chacune. Soient t_d et t_f les temps de début et de fin de phase dynamique, en l'absence de répétition.

① Pour les signes à trajectoire rectiligne ou selon un arc, ces courbes possèdent un profil gaussien de la forme

$$v(t) = K.e^{-\frac{(t-\mu)^2}{K}}$$

où $\mu = \frac{t_d + t_f}{2}$ représente le temps médian correspondant au pic de vitesse, et où $K = v_{max}$ est la vitesse maximale. Le calcul de la largeur totale à mi-



maximum ($\Delta t = 2\sqrt{K' \ln 2}$) sur une dizaine de graphes permet, par régression linéaire, de déterminer pour K' la valeur $2f/K$. On vérifie que ces deux paramètres sont bien ainsi liés en s'assurant qu'alors :

- l'intégrale

$$\int_0^{+\infty} v(t) dt = K\sqrt{K'} \frac{\sqrt{f}}{2} \lim_{z \rightarrow +\infty} \text{erf}(z) = K\sqrt{K'}$$

est bien proportionnelle à $\sqrt{v_{\max}}$ en

traçant la courbe $\sum_{t=t_d}^{t_f} v(t) \cdot \Delta t$ en

fonction de $\sqrt{v_{\max}}$ pour plusieurs déplacements¹⁶;

- les courbes de vitesse données par l'équation

$$v(t) = v_{\max} \cdot e^{-\frac{v_{\max}}{2f}(t-t_0)^2}$$

correspondent effectivement à celles obtenues pour différents signes de cette classe (figure 2.25).

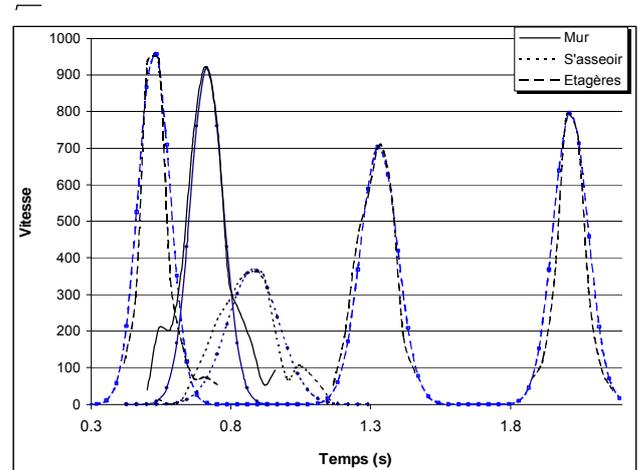
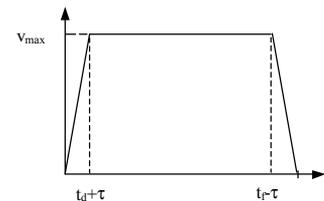


Figure 2.25 : Profils de vitesse réels (lisses) et théoriques (ponctuels).

② Pour les signes à trajectoire circulaire, nous allons considérer, en l'absence d'information plus précise, que la vitesse est constante après un court temps transitoire fixé à $t = \frac{t_d + t_f}{20}$. De cette façon, le régime permanent à $v=v_{\max}$ représente 90% du temps de production.



Une étude complémentaire a de plus permis de montrer que la vitesse maximale v_{\max} est corrélée à la distance totale parcourue selon une loi croissante approximativement linéaire, quelle que soit la forme de la trajectoire.

2.4.3.6. Dynamiques propres particulières.

Nous souhaitons aussi comparer ces dynamiques « standards » à celle de certains signes présentés comme en possédant une particulière dans le dictionnaire de Bill Moody. Si ces résultats doivent être nuancés, une fois encore, par le nombre restreint d'images disponibles pour ces phases de mouvement, les graphiques de la figure 2.26 mettent en lumière l'existence effective d'une dynamique propre. Les pics d'accélération/décélération sont ainsi nettement plus marqués

¹⁶ *Erf* est la « fonction d'erreur » intervenant dans l'intégration de la distribution gaussienne : $\text{Erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{f}} \int_0^z e^{-t^2} dt$. Elle possède les propriétés suivantes : $\text{erf}(0)=0$; $\text{erf}(z)=1$; $\text{erf}(-z)=-\text{erf}(z)$.

dans le signe *piquer* que dans *mur* et *cheminée*. De même, le second déplacement de *fixe* est brutalement stoppé, ce que traduit son profil d'accélération bien plus aigu et accentué que celui de la première partie du signe.

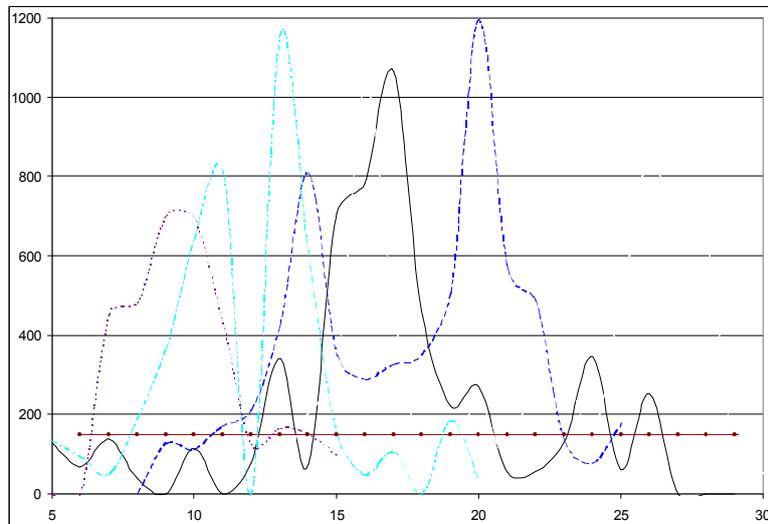


Figure 2.26a :
Vitesses comparées
de différents signes.

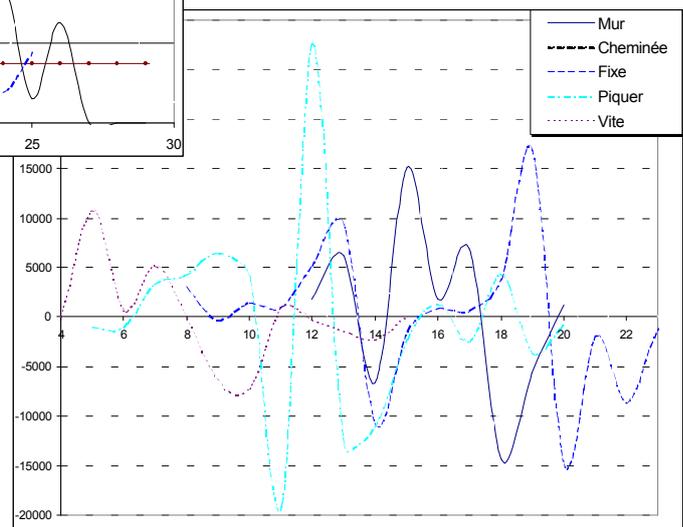


Figure 2.26b :
Accélération comparées
correspondantes.

Le signe *vite* offre l'exemple d'un autre type de dynamique, caractérisé par une vitesse soutenue conservée tout au long du mouvement, qui démarre et cesse en l'espace d'une image. Ce signe présente la vitesse moyenne la plus élevée sur la plage temporelle correspondant à sa phase dynamique.

Enfin, on peut noter que tous les signes possédant une accélération spécifique présentent des tenues très réduites, avec pour conséquence des temps de production globaux les plus faibles du corpus (à peine plus d'une demi-seconde au total).

Comment modéliser ces dynamiques particulières dans l'optique de leur synthèse ? Pour bien les différencier des précédentes, et bien que les profils obtenus lors du suivi ne soient pas à ce point marqués, nous avons choisi une courbe présentant à la fois une accélération brusque en début de mouvement et une décélération brutale avant l'arrêt du poignet (figure 2.27). Celle-ci peut être représentée par la somme de leurs équations caractéristiques respectives, à savoir :

$$v_d(t) = v_{\max} e^{-\left(\ln\left(\frac{t-t_d}{-t_d}\right)\right)^2} \quad \text{et} \quad v_f(t) = v_d(t_f - t).$$

Le pic de vitesse se produit cette fois au temps \sim fixé à $\sim = t_d + \frac{t_f - t_d}{5}$. Afin que $v(\sim) = v_{max}$, il nous faut simplement multiplier la fonction somme par un coefficient. On obtient finalement :

$$v(t) = k \cdot (v_d(t) + v_d(t_f - t)) \quad , \quad \text{avec}$$

$$k = \frac{1}{1 + \frac{v(t_f - \sim)}{v_{max}}}$$

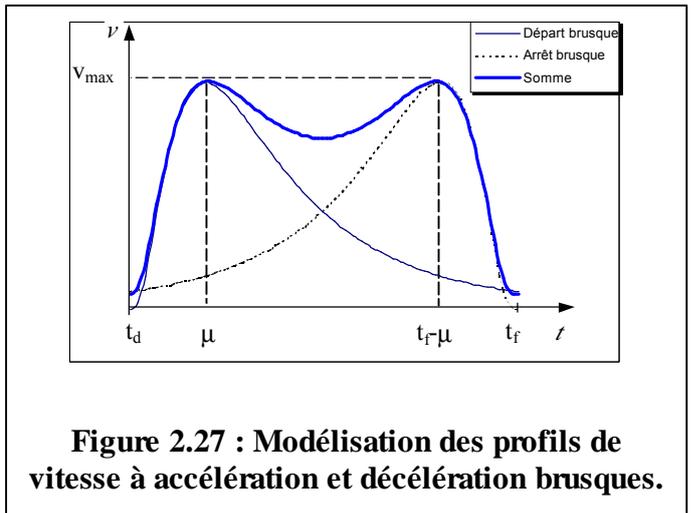


Figure 2.27 : Modélisation des profils de vitesse à accélération et décélération brusques.

Ces profils de vitesse sont bien adaptés pour décrire le signe *piquer* et le second déplacement (également linéaire) de *fixe*. Etant donnée leur similitude avec la courbe modélisant les mouvements circulaires, on peut légitimement étendre cette loi à ce dernier type de trajectoire dans les cas de marquages *kinétiques* prononcés.

Le signe *vite* présente en revanche une courbe de vitesse sensiblement différente : pratiquement symétrique mais plus bombée qu'une gaussienne, elle peut être approchée par une sinusoïde dont l'amplitude est du même ordre de grandeur que celle des profils standards.

L'ensemble de ces observations concernant les paramètres temporels du mouvement ont permis d'en dégager certaines règles auxquelles doit se conformer le système de synthèse graphique des signes. Ces tendances demanderaient probablement à être vérifiées sur un corpus plus conséquent avant d'être érigées en lois systématiques. En voici résumées les plus importantes :

- Les transitions sont effectuées selon un profil de vitesse similaire à celui des mouvements rectilignes et arqués, à savoir une gaussienne dont l'amplitude est proportionnelle à la distance parcourue par le poignet.
- Les trajectoires circulaires sont, elles, décrites à vitesse quasiment constante. Leurs tenues sont bien moins prolongées que les précédentes.
- Le tonus musculaire particulier qui caractérise certains signes peut s'exprimer soit sous la forme d'une vitesse importante, rapidement atteinte et stoppée, soit par un départ et un arrêt plus soudains encore.

Le système de spécification des signes est désormais complet. Il est à même de décrire les mouvements les plus complexes, tant dans leur structure spatiale que temporelle. Parmi les paramètres fondamentaux des signes, il en est pourtant un qui a été délibérément laissé de côté jusqu'à présent : l'expression faciale. C'est que son rôle le plus important est d'ordre grammatical; aussi est-il abordé dans la dernière partie de ce chapitre en compagnie d'autres processus supra-lexicaux.

2.5. La phrase signée.

On se propose en effet d'étudier à présent les modulations que subissent les signes lorsqu'ils prennent place dans une phrase. Ces flexions sont de nature manuelle et spatio-temporelle (modification du lieu d'articulation, de la forme, de l'amplitude ou de la dynamique du mouvement) ou non-manuelle (pour marquer le type de clause par exemple). Pour mieux en appréhender les subtilités, chacune de ces classes fait ici l'objet d'un examen séparé. Puis sont présentées différentes flexions composites où plusieurs d'entre elles interviennent. Dans un dernier temps, nous tentons de cerner l'influence mutuelle des signes au sein de la phrase signée.

2.5.1. Flexions spatio-temporelles.

2.5.1.1. Modulation de la dynamique des signes.

Si, comme il a été vu, certains signes possèdent intrinsèquement une dynamique particulière, d'autres sont susceptibles de voir leur forme standard modulée en vitesse de production ou en tonus *kinétique*. Un tel phénomène correspond soit à une accentuation, soit à une différenciation lexicale entre deux signes sémantiquement proches.

L'intensification du *sème* prend souvent la forme d'un mouvement plus rapide accompagné de tenues prolongées, et parfois d'une répétition. Friedman a étudié les conséquences de ce procédé sur la durée moyenne totale (833 ms pour les signes accentués contre 366 dans le cas contraire) et sur celle de la phase dynamique proprement dite (respectivement 150 et 267 ms). Également rapportés par Wilbur [WIL 79], les travaux de Fischer tendent à systématiser une répétition lente des verbes d'action duratifs (*regarder, laver, ...*) pour indiquer la durée de l'action et leur répétition rapide pour traduire une itération dans le temps. Ces résultats concernant l'ASL sont extensibles à la LSF, notamment sur les verbes de déplacement. L'accentuation de leur vitesse figure ainsi la rapidité de l'action, tandis que la répétition rapide du verbe *aller* exprime le fait d'*aller_souvent* (figure 2.28).

Plus généralement, ces flexions traduisent la manière ou la durée. Elle s'appliquent également aux substantifs et s'accompagnent parfois d'une modification de l'amplitude initiale, surtout si celle-ci est importante. Les mouvements plus rapides et tendus sont en général simultanément raccourcis (tels celui de *courir* donnant *se_précipiter* ou celui traduisant le fait qu'une *minute* paraît particulièrement courte); en revanche, les mouvements ralentis sont amplifiés, comme c'est le cas pour exprimer *avoir_très_faim* (la main balaie le buste de haut en bas plus lentement que pour *avoir_faim*) ou *faire_la_vaisselle_pendant_longtemps*. Dans bien des situations, l'expression faciale concomitante renforce encore l'emphase portée sur le signe.

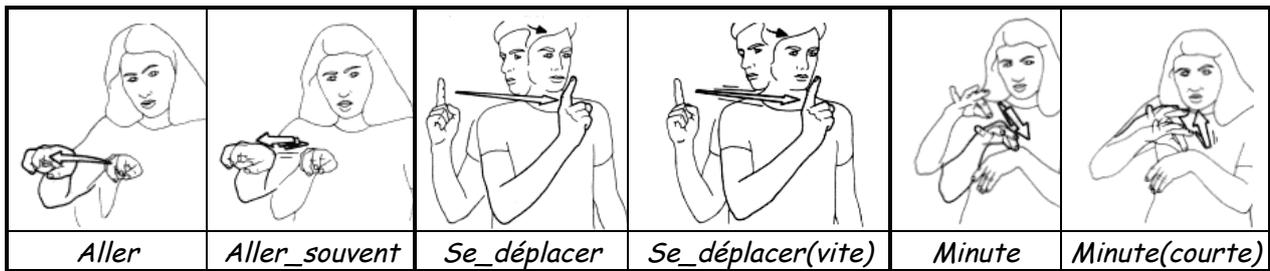


Figure 2.28 : Modulations de signes en dynamique.

D'autres nuances dans lesquelles intervient la « tension » du mouvement nous sont données par Klima et Bellugi au travers des modulations dites *résultative* et *susceptive*, traduisant respectivement les notions « *qui résulte en un changement radical* » et « *facilement sujet à...* ». La première est caractérisée par une accélération progressive du mouvement, terminée par une tenue prolongée en position finale; la seconde est identifiable par une accélération brusque en début de mouvement, avec un profil de vitesse correspondant à celui de $v_d(t)$. De subtiles nuances sémantiques, dont l'annexe 1.4 présente un récapitulatif, utilisent ainsi une modulation de la dynamique du signe.

Cette « tension » du mouvement est également un facteur de différenciation de signes exprimant des notions proches. Souvent associée à d'autres aspects modulatoires, elle constitue toutefois la distinction prépondérante, sinon unique, de couples de signes tels que *poli/respecter*, *nouveau/neuf* ou encore *fondre/disparaître*. Impliquant la tension des muscles eux-mêmes, elle est difficile à rendre aussi bien sur un dessin que dans la synthèse du signe. Il est toutefois possible de la reproduire avec une expressivité satisfaisante grâce à la courbe de vitesse présentant une accélération brusque en début de mouvement et une décélération également brutale en fin de course.

2.5.1.2. *Forme et amplitude du mouvement.*

La forme de la trajectoire est également concernée par la modulation des prédicats adjectivaux en ASL [KLI 79]. Pour exprimer l'aspect *prédispositionnel* par exemple, un signe tel que *sick* [malade] voit son mouvement touchant le front transformé en un cercle, produit au même endroit et avec un contact similaire. Pour exprimer l'aspect *continuatif* (pour reprendre notre exemple, une maladie qui dure depuis longtemps), la trajectoire devient cette fois elliptique. Nous n'avons pas connaissance d'études relatant des processus équivalents en LSF, mais ces derniers ont tout de même été formalisés dans le système de spécification sous forme d'opérateurs de transformation morphologique (voir figure 2.29). Ainsi, l'opérateur \mathcal{E} accepte comme paramètre le rapport k de l'ellipse obtenue à partir du cercle originel. Pour transformer une trajectoire linéaire en une circulaire, il convient de fournir le vecteur normal \vec{n} à l'opérateur \mathcal{E} ; la transformation en arc de cercle requiert en outre le vecteur tangent \vec{v} , tandis qu'à partir d'un cercle, le point d'arrivée Q est suffisant.

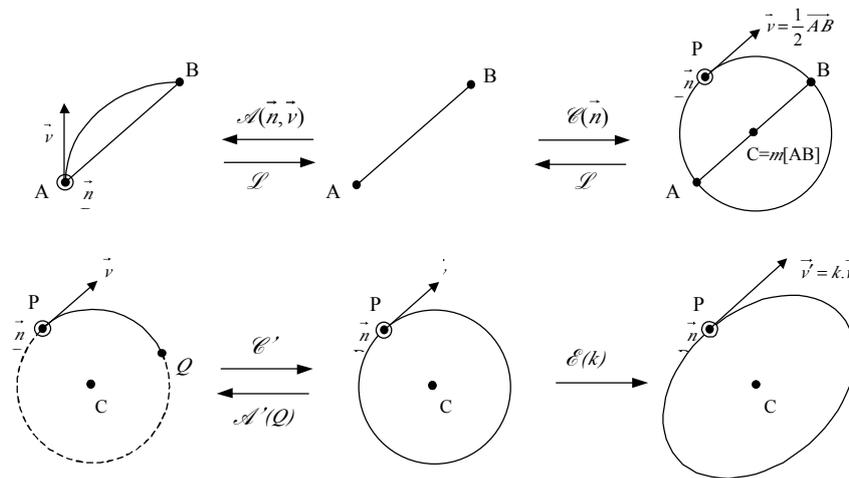


Figure 2.29 : Opérateurs de transformations morphologiques.

L'amplitude du signe est également susceptible d'être modifiée pour en nuancer la signification. C'est ainsi une différence souvent constatée entre un substantif et le verbe associé, généralement plus ample. Sa modulation peut aussi être utilisée pour exprimer une notion proche, comme dans la paire *règle/dessinateur_industriel* où le second signe est plus court et répété.

Par ailleurs, les signes *iconiques* sont parfois naturellement modulés en amplitude, en particulier pour refléter les dimensions du *signifié*. On peut citer le signe *boîte*, très semblable au geste co-verbal correspondant, dans lequel l'écartement des mains indique la taille de l'objet. Namir et Schlesinger [NAM 78] rapportent aussi un des deux signes ISL *plus* consistant en un mouvement ascendant de la main, de la ceinture et face au sol, à une certaine hauteur et face à l'interlocuteur. Cette hauteur est fonction de l'intensification du signe (*un_peu_plus*, *beaucoup_plus*). La différence entre le comparatif *plus* et le superlatif *le_plus* en ASL réside également dans l'amplitude du geste.

Les outils de redimensionnement proposés tiennent compte du fait que le point du mouvement devant rester inchangé n'est pas toujours le même. Les points éventuels de contact avec le corps ou la main opposée sont en effet déterminants en la matière, car ils dictent alors comment appliquer la mise à l'échelle des déplacements. Pour cette raison, trois opérateurs de redimensionnement $\mathcal{R}_x(h)$ ont été définis, où h et x désignent respectivement le rapport et le centre de l'homothétie (voir figure 2.30). Ce dernier coïncide par défaut avec le barycentre du macro-déplacement, mais peut être aussi le point de départ ou de fin du mouvement, ou tout autre (par exemple, un point de contact à mi-parcours). Ces opérateurs s'appliquent globalement aux macro-déplacements, pour lesquels chacun des déplacements composants est actualisé en conséquence. Il est ainsi possible de décrire simplement le signe *grandir* en appliquant au signe *grand* l'opérateur \mathcal{R}_f (car les points finals se situent à des hauteurs comparables) avec un rapport approximatif de trois¹⁷.

¹⁷ Comme on le voit sur cet exemple, l'utilisation des opérateurs \mathcal{R}_i et \mathcal{R}_f n'est pas exclusivement liée à l'existence d'un point de contact.

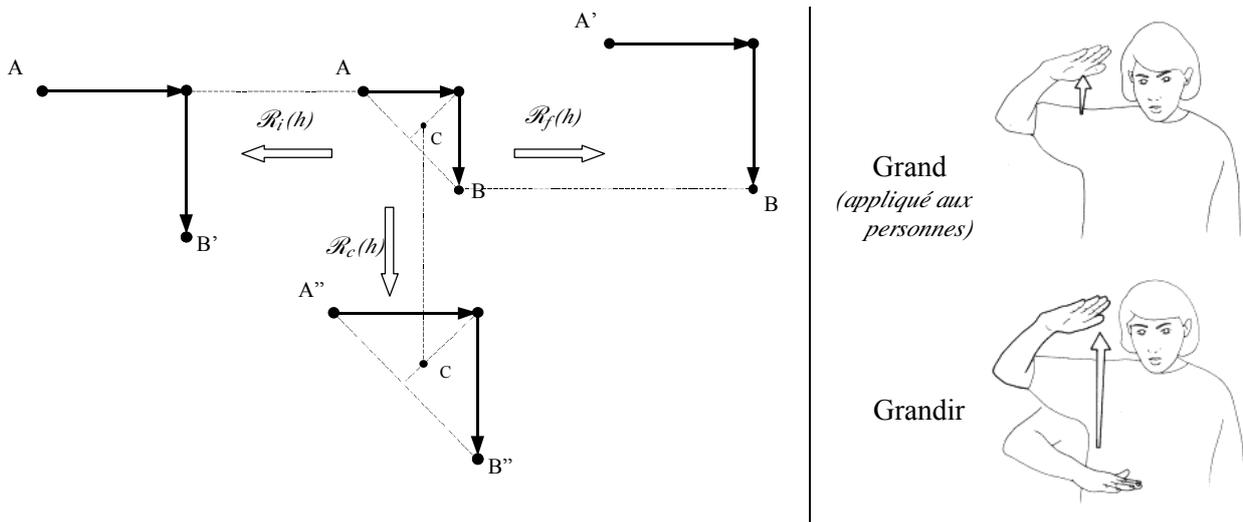


Figure 2.30 : Opérateurs de redimensionnement et exemple d'utilisation de \mathcal{R}_f .

Remarque : Lorsqu'on utilise des orientations relatives pour la paume, il faut garder présent à l'esprit que celles-ci sont liées à la position de la main dans l'espace, et donc susceptibles d'être modifiées à l'occasion d'une amplification ou d'une réduction du mouvement. Plus généralement, le choix de ce type d'orientation doit être dûment justifié si le signe est sujet aux modulations spatiales.

2.5.1.3. Localisations et verbes directionnels.

L'essence spatiale de la langue des signes permet d'utiliser des mécanismes de même nature pour exprimer les positions et orientations relatives entre entités signifiées. Alors que les langues naturelles disposent à cette fin de prépositions, adverbes, substantifs et verbes spatiaux, les langues gestuelles ont recours aux positions et orientations manuelles. Le signeur utilise ainsi l'espace un peu à la manière d'un marionnettiste, positionnant sur sa scène virtuelle les objets et les êtres animés dont il est question dans sa narration. Par un mécanisme dit de *localisation*, il situe de cette manière les référents absents par rapport à la ligne imaginaire qui le relie à son interlocuteur (les personnes et les choses physiquement présentes lors du discours sont, elles, désignées par indexation). Après avoir affecté une position à une entité, il peut ensuite y faire référence – notamment dans les actions –, jusqu'à une nouvelle assignation ou une rupture du discours.

Selon Dorner et Hagen [DOR 94], quatre à cinq points de référence peuvent être simultanément actifs. Mais on admet plus communément la seule distinction des deux régions situées à gauche et à droite de la ligne signeur-interlocuteur (figure 2.31), cette dernière étant réservée aux pronoms personnels singuliers de la première et de la seconde personne.

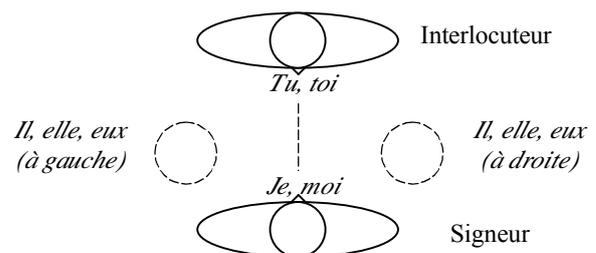


Figure 2.31 : Localisation des pronoms.

Plusieurs techniques, en fonction des contraintes formationnelles du signe, permettent d'établir une localisation [MOO 83] :

- En décalant le signe (comme dans la figure 2.32), si cela est possible (pas de contact avec le corps ou d'emplacement articulaire fixé);

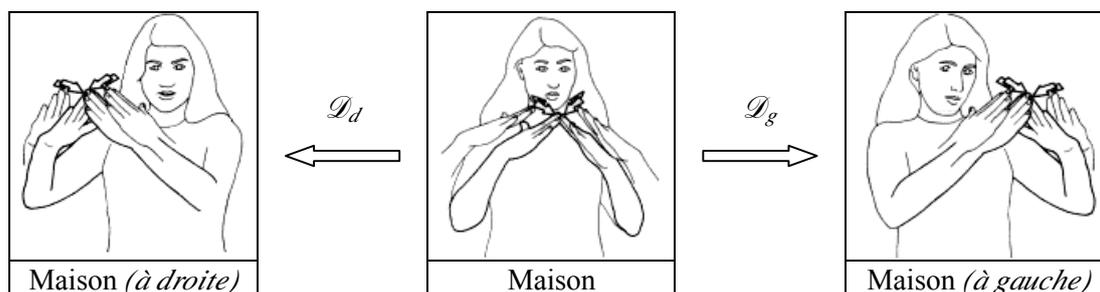


Figure 2.32 : Opérateurs de localisation
(cas d'une localisation par décalage).

- En désignant de l'index l'endroit adéquat
 - soit simultanément avec la main de base, si celle-ci n'est pas requise dans la production du signe,
 - soit en postposant le signe **déictique là**¹⁸;
- En orientant le regard, la tête et/ou le buste pendant que l'on signe le référent ;
- En utilisant l'un des signes particuliers – en petit nombre – possédant une fonction intrinsèque de localisation, signe auquel est préposé ou postposé le référent. Ce peut être :
 - certains verbes directionnels, tels *rencontrer*, *fréquenter*, ou *prévenir* ;
Exemple : garçon je_le_rencontre(à droite)
 - le signe *là*, effectué à un endroit précis (déterminant non seulement la position sagittale mais aussi la hauteur et l'éloignement) et dont la configuration manuelle joue le rôle de **classificateur** pour évoquer la taille et la forme de l'objet.
Exemple : pomme là(par terre,objet_sphérique_moyen)

Nous avons défini la façon d'établir la localisation comme un attribut de chaque signe, dont le choix parmi les techniques exposées ci-dessus est laissé à l'appréciation de l'utilisateur. C'est ce dernier qui est en effet le plus à même d'estimer quelle est la méthode utilisée préférentiellement au sein de la communauté sourde. Les opérateurs de localisation \mathcal{D}_g et \mathcal{D}_d s'appliquent ensuite de manière transparente en fonction de la technique sélectionnée.

Les verbes en langue des signes se divisent en deux principaux groupes : ceux, dits *directionnels*, qui ont la faculté de s'accorder avec leur sujet et leur objet, et tous les autres qui au contraire ne peuvent incorporer les pronoms personnels. Alors que les seconds sont toujours produits de la même façon, et les références pronominales alors réalisées par indexation, les premiers possèdent la particularité de modifier leurs déplacements en fonction du contexte. La

¹⁸ Cette technique est également employée pour localiser un référent épilé.

figure 2.33 illustre l'exemple du signe *donner* : la position et l'orientation initiales et finales dépendent de l'agent et du patient par rapport auxquels le signe est fléchi.

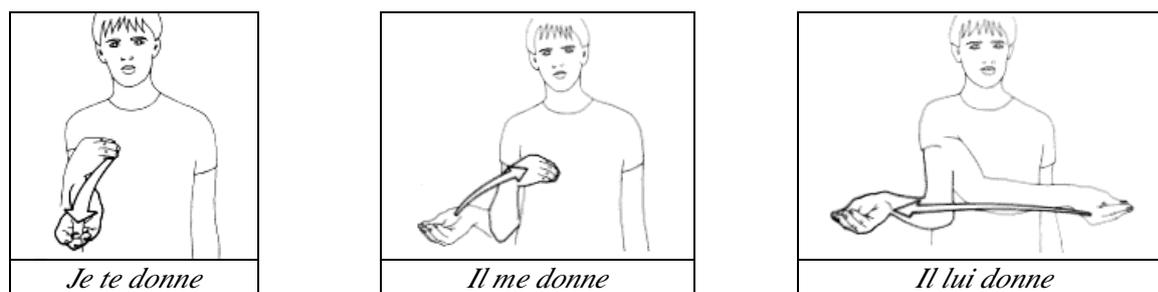


Figure 2.33 : Accord agent/patient d'un signe directionnel (*donner*).

Pour illustrer les mécanismes de localisation et de références pronominales, considérons les phrases suivantes :

Avant-hier cinéma(gauche) moi aller(cinéma)

Avant-hier, je suis allé au cinéma

Julie(droite) cinquante franc devoir(Julie,moi)

Julie me doit cinquante francs

Dans les deux cas, les référents sont d'abord positionnés par rapport à la ligne signeur-interlocuteur, le premier par décalage du signe *cinéma* sur la gauche, le second par un pointage (indexation) à droite après son épellation¹⁹. Puis ces localisations sont utilisées respectivement comme direction du verbe de déplacement et comme sujet du verbe directionnel *devoir*.

2.5.2. Expressions et flexions non-manuelles.

Dans un langage visuo-gestuel tel que la langue des signes, les expressions non-manuelles, et particulièrement faciales, possèdent d'importantes fonctions syntaxiques mais aussi, dans une moindre mesure, lexicales. Celles-ci sont ici brièvement décrites; leur mise en œuvre pratique est présentée dans la partie suivante.

2.5.2.1. Implications aux niveaux lexical et monématique.

Les paramètres non-manuels accompagnent de façon naturelle les signes exprimant des sentiments, des qualités, des attitudes (précipitation par exemple), etc. Ils servent aussi à nuancer ou renforcer le message, voire le contredire dans le cadre de l'humour gestuel. La fonction *paralinguistique*, proche de celle des langues orales, est portée principalement par le visage

¹⁹ Pour désigner une personne, les sourds utilisent généralement un signe conventionnel évoquant un trait physique (barbe, grain de beauté, ...) ou moral (rusé, dynamique, ...) qui la caractérise. On suppose ici qu'aucun signe n'est reconnu par les deux interlocuteurs pour *Julie*, dont le prénom doit donc être épilé. Comme il est difficile de pointer simultanément une direction avec l'autre main, l'indexation postsignée a été préférée pour la localisation.

(bouche, nez, sourcils, yeux, front, joues, menton), et les différentes postures du torse et des épaules, parallèlement au rythme d'émission et au marquage kinétique des signes. Les expressions non-manuelles sont ainsi utilisées pour exprimer le degré ou l'intensité : avec une mimique faciale appropriée, *courageux* donne *très_courageux*, la *gorge* se transforme en *mal_de_gorge* et le *rêve* devient *cauchemar*. Néanmoins, si elles portent une part certaine de l'expressivité des signes, les expressions non-manuelles ne semblent pas absolument fondamentales dans le décodage lexical de ceux-ci. On peut tout de même signaler plusieurs exemples, donnés par Bill Moody, de paires de signes dont la seule distinction réside dans l'expression portée par le visage, et ceci en dehors de tout contexte : *content* (expression de joie) et *mal_au_cœur* (peine), ou encore *impossible* (non marqué) et *détester* (répulsion). Dans le même esprit, Jouison [JOU 86] signale des formes gestuelles pour lesquelles l'absence de mimique faciale serait perçue comme une suppression.

Mac Intire [MCI 87] rapporte également une utilisation monématique adverbiale de certaines expressions faciales en ASL : appliquées parallèlement à une clause, elles en modifient le sens de façon spécifique. Ainsi, une configuration faciale baptisée *mm* (lèvres en *o* et menton froncé) ajoute la signification « facilement, sans effort ou régulièrement »; celle appelée *th* (avec la bouche entrouverte, la langue apparente) a le sens « sans faire attention ».

2.5.2.2. Flexions composites.

Les expressions non-manuelles interviennent aussi, en compagnie d'autres types de modulations, dans de nombreuses flexions composites. On a déjà cité l'intervention de la dynamique dans l'intensification de la durée. Pour exprimer une action particulièrement longue, il s'y superpose une mimique faciale consistant en une moue et un gonflement des joues, qui caractérisent par ailleurs les objets volumineux ou lourds. Au moyen du logiciel d'analyse précédemment décrit, nous avons souhaité préciser l'importance relative des divers aspects modulatoires utilisés pour distinguer d'une part le verbe et son substantif associé, et d'autre part différentes nuances sémantiques d'un même signe.

L'étude des couples de signes *contrôle/contrôler* et *bénéfice/faire_du_bénéfice* révèle un mouvement plus ample, plus rapide et plus tonique pour le verbe, et un mouvement plus détendu de faible amplitude pour la forme nominale. Dans les deux cas, les caractéristiques non-manuelles jouent également un rôle discriminant de premier plan, car l'expression neutre du substantif contraste avec l'engagement du corps et le regard insistant vers l'endroit d'articulation relevé dans le prédicat (figure 2.34). Ceci confirme les observations relatées dans la littérature, bien que celles-ci tendent en outre à systématiser la répétition du nom comme autre facteur de différenciation (Klima et Bellugi citent la forme prédicative *get* [acquérir] et le substantif dérivé *acquisition*, pour lequel le mouvement est restreint et dupliqué); les formes de nos deux signes-tests sont au contraire similaires à ce niveau (mouvement répété pour *contrôle* et *contrôler* par exemple).

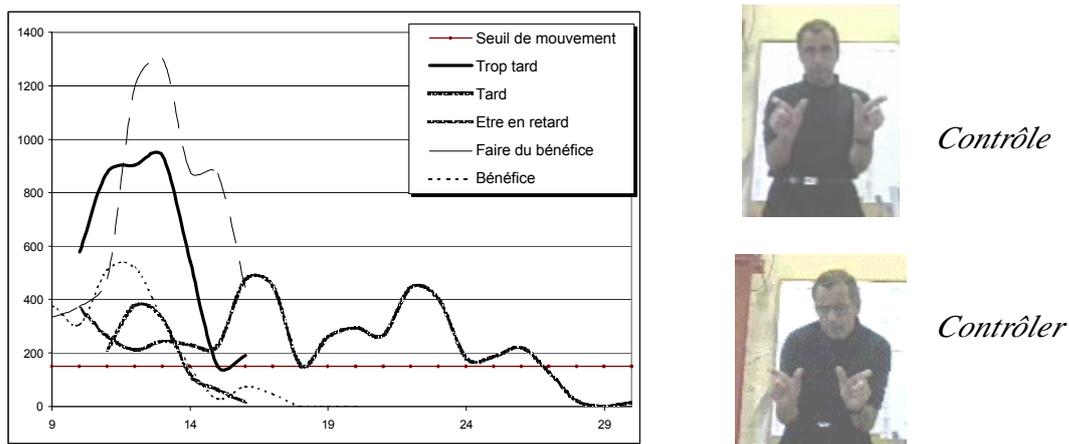


Figure 2.34 : Implication de la vitesse et des caractéristiques non-manuelles dans la différenciation lexicale.

Plusieurs caractéristiques spatio-temporelles et non-manuelles du signe sont également impliquées dans la distinction des formes lexicales *être_en_retard*, *tard* et *trop_tard*. Le second signe est marqué par un mouvement non répété, de courte durée car plus rapide et moins ample ; le dernier se particularise par un mouvement très ample et rapide, dirigé vers le ciel, accompagné d'un regard furtif dans cette même direction.

2.5.2.3. Marquage du type de clause.

Mais c'est au niveau syntaxique que les expressions non-manuelles revêtent le plus d'importance, en modifiant le type des clauses (une phrase non marquée étant par défaut déclarative). La **thématisation**, par exemple, s'accompagne d'une mimique faciale caractéristique avec les sourcils relevés et la tête éventuellement basculée légèrement vers l'arrière. Il en est de même pour les interrogatives, parmi lesquelles on distingue :

- les questions appelant une réponse par « oui » ou « non », signées avec les sourcils relevés et les yeux écarquillés. Un autre cas particulier d'utilisation de cette expression faciale est constitué par les questions rhétoriques (auxquelles l'interrogateur répond lui-même aussitôt).
- les questions demandant une information particulière (introduites par *qui*, *que*, *quoi*, *où*, *quand*, ... – ce sont les *wh-questions* en anglais), accompagnées d'un froncement de sourcils (et d'une diminution de l'ouverture des yeux) et d'un regard insistant à destination de l'interlocuteur [VOG 90]. Cette mimique faciale est également utilisée pour exprimer le doute.

Certains signes incluent une condition (*si*, *au_cas_où*, *on_va_voir*, ...), mais le conditionnel est lui aussi avant tout marqué par une expression faciale spécifique, à savoir un haussement de sourcils et souvent un léger mouvement de la tête sur le côté. Signalons qu'une fois encore, on retrouve des procédés tout à fait semblables en ASL et ISL.

La négation est souvent incluse dans un signe de la phrase (*jamais, pas, rien, ...*), mais la proposition négative est de plus marquée par un hochement latéral de la tête, parfois accompagnée d'une moue et, en ISL, d'un haussement d'épaules [NAM 78]. Ce marquage de la négation peut se superposer aux mimiques d'interrogation pour une question négative²⁰. Les phrases assertives sont signalées par un hochement de bas en haut de la tête, figurant l'insistance sur tel ou tel point. Les phrases impératives sont, elles, caractérisées par un mouvement tendu accompagné d'un regard insistant vers l'interlocuteur et d'un ferme mouvement de la tête et du buste vers l'avant.

2.5.2.4. Inclusion dans le système de description.

Au contraire des marqueurs précédemment cités, les hochements de tête de la négation et de l'assertion, tout comme l'avancée du buste qui caractérise les clauses impératives, présentent la particularité de se produire tout au long du signe. Cette remarque nous a amenés à scinder les caractéristiques non-manuelles du signe en deux classes (figure 2.35) :

- d'une part celles, statiques, qui sont maintenues tout le temps que dure le signe. Elles regroupent bien sûr les primitives d'expression faciale du signe non fléchi, mais également celles du type de clause ou d'éventuels paramètres s'y superposant ;
- d'autre part les caractéristiques dynamiques qui doivent au contraire être mises à jour à chaque nouvelle image produite par le système de synthèse, et qui de surcroît doivent s'effectuer en continu sur plusieurs signes. Dans une clause négative par exemple, le mouvement de tête doit être poursuivi d'un signe à l'autre.

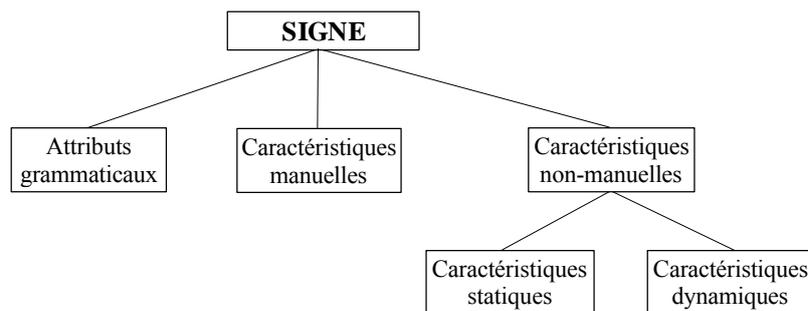


Figure 2.35 : Caractéristiques non-manuelles du signe.

Nous n'allons pas exposer ici les primitives d'expressions faciales définies pour chacune des parties du visage et du torse, ni les macro-expressions prédéfinies à partir de celles-ci. Cela fait l'objet d'une présentation détaillée au chapitre 3. En revanche, la section qui suit jette les bases du paramétrage des signes, et notamment la relation entre les marqueurs non-manuels du discours et les caractéristiques correspondantes de ses unités lexicales.

²⁰ Il existe aussi une formulation lexicale de la négation : certains signes (tels *vouloir* et *aimer*) sont susceptibles d'être suffixés par un monème de négation consistant en un mouvement tournant du poignet, parfois accompagné d'une modification du mouvement et de la configuration manuelle. Ce procédé peut être autosuffisant (comme dans *être_d'accord* et *avoir_besoin*, où nul hochement de tête n'est perceptible) et s'applique aussi à l'ASL qui en a hérité [WIL 79].

2.5.3. Spécification de la phrase signée.

L'étude des processus modulateurs que subissent les signes lorsqu'ils s'insèrent dans la phrase démontrent la nécessité de distinguer clairement le niveau du signe et celui du discours signé. La nature des composantes et des mécanismes linguistiques intervenant à chacun de ces niveaux est en effet suffisamment différente pour justifier une telle distinction.

La présente partie explicite comment est mise en œuvre, au moyen du paramétrage, l'interaction entre ces deux étages, puis présente la structure de spécification du discours signé.

2.5.3.1. Paramétrage des signes.

La nature modulaire de certains signes (on a déjà cité les verbes directionnels) plaide *de facto* pour l'utilisation de paramètres²¹ comme interface avec le niveau du discours. Dans la description textuelle que nous souhaitons utiliser, les paramètres présentent l'avantage de fournir une bonne lisibilité grâce à une notation parenthésée très proche de celle que nous avons naturellement employée jusqu'alors (pour la localisation par exemple). L'utilisateur initié à la programmation informatique est également en terrain connu, puisque le mécanisme s'apparente directement au passage d'arguments lors de l'appel de fonctions.

Le paramétrage des signes a pour rôle de transmettre les informations dont ceux-ci doivent hériter de la phrase. Il prend en charge les importants processus grammaticaux mentionnés précédemment :

- l'assignation des localisations, par indexation ou toute autre technique possible pour un signe donné :

Julie (droite) , Cinéma (gauche)

- l'accord pronominal des signes non standards, c'est-à-dire ceux qui sont complétés de façon dynamique lors de l'évaluation (notamment les verbes directionnels) :

Donner (toi, Julie) , Rencontrer (moi, homme_barbu)

- d'autres aspects modulateurs, par exemple :
 - la flexion en dynamique : *Passer (vite)* ,
 - celle de redimensionnement spatial : *Cheminée (grande)* ,
 - ou encore les flexions non-manuelles composites impliquées principalement dans l'expression de la manière : *Faire_la_vaisselle (long, pénible)* .

Le même mécanisme a été par ailleurs mis à profit pour faciliter l'édition des signes :

- de façon à pouvoir décrire avec le minimum d'information utile des signes ne différant que par l'un de leurs *gestèmes*, il est commode de spécifier un signe générique en paramétrant le gestème variable. Ainsi, les jours de la semaine *lundi*, *vendredi*, *samedi* et *dimanche* sont tous effectués en décrivant un cercle en avant du torse, avec la paume faisant face à

²¹ Il ne s'agit pas ici des « paramètres » au sens où l'on entend parfois les gestèmes. Quelques auteurs parlent en effet préférentiellement des quatre ou cinq « paramètres » du signe, sans les qualifier de phonèmes *stricto sensu*.

l'interlocuteur. Seule la configuration manuelle change pour correspondre à l'initiale du mot correspondant (procédé appelé *initialisation*). Ces signes sont créés de la façon suivante :

Jour_semaine (lundi) , Jour_semaine (vendredi) , etc.

où *jour_semaine* est le signe générique décrit au préalable.

- Certaines signes paramétriques ne relèvent pas des cas de flexions précédemment cités, mais leurs caractéristiques formationnelles sont néanmoins variables. Ainsi en est-il de l'écartement des mains pour indiquer la taille d'une *boîte*. Les modulations d'amplitude ne sont pas adaptées dans un tel cas , mais nous souhaitons tout de même être en mesure d'utiliser dans la phrase un signe identique paramétré :

Boîte (petite) , Boîte (moyenne) , Boîte (grande)

L'utilisation pratique de ces paramètres dans la description des signes et la façon dont ils sont interprétés et traités par le système de synthèse sont exposées au chapitre 3.

2.5.3.2. Le niveau du discours.

Les localisations établies possèdent ceci de particulier qu'elles sont persistantes au niveau de la phrase, leur portée s'étendant sur une portion entière du discours. Le référent assigné à un locus doit donc être mémorisé à ce niveau afin que son nom puisse être ensuite utilisé de façon symbolique à la place de sa position physique.

Outre les localisations, d'autres flexions grammaticales s'inscrivent dans un contexte plus global que l'unité lexicale :

- le type de clause (négative, interrogative, ...) ;
- le temps du discours, marqué par un décalage des signes selon une ligne frontale sur laquelle l'avant représente le futur, et l'arrière le passé. La référence temporelle peut également être portée par une avancée ou un recul du buste selon une règle analogue ;
- le rôle joué par le signeur. Il est fréquent en effet que ce dernier, dans sa narration, occupe lui-même le rôle des protagonistes, en respectant les relations qui peuvent exister entre les divers personnages²².

Le schéma de la figure 2.36 illustre comment la phrase, constituée d'une chaîne de marqueurs globaux (*MG*) et de signes éventuellement paramétrés, est évaluée pour produire les signes fléchis destinés à être ensuite synthétisés. L'exemple choisi contient une clause conditionnelle, formée des deux premiers signes, et d'une clause déclarative formée d'une assignation locative et de son utilisation :

Demain ^{si} il pleut bibliothèque (droite) aller (bibliothèque).

²² Le signeur peut même personnifier des objets, telle une plaque de chocolat (exemple cité par C. Cuxac dans son intervention au GW'99).

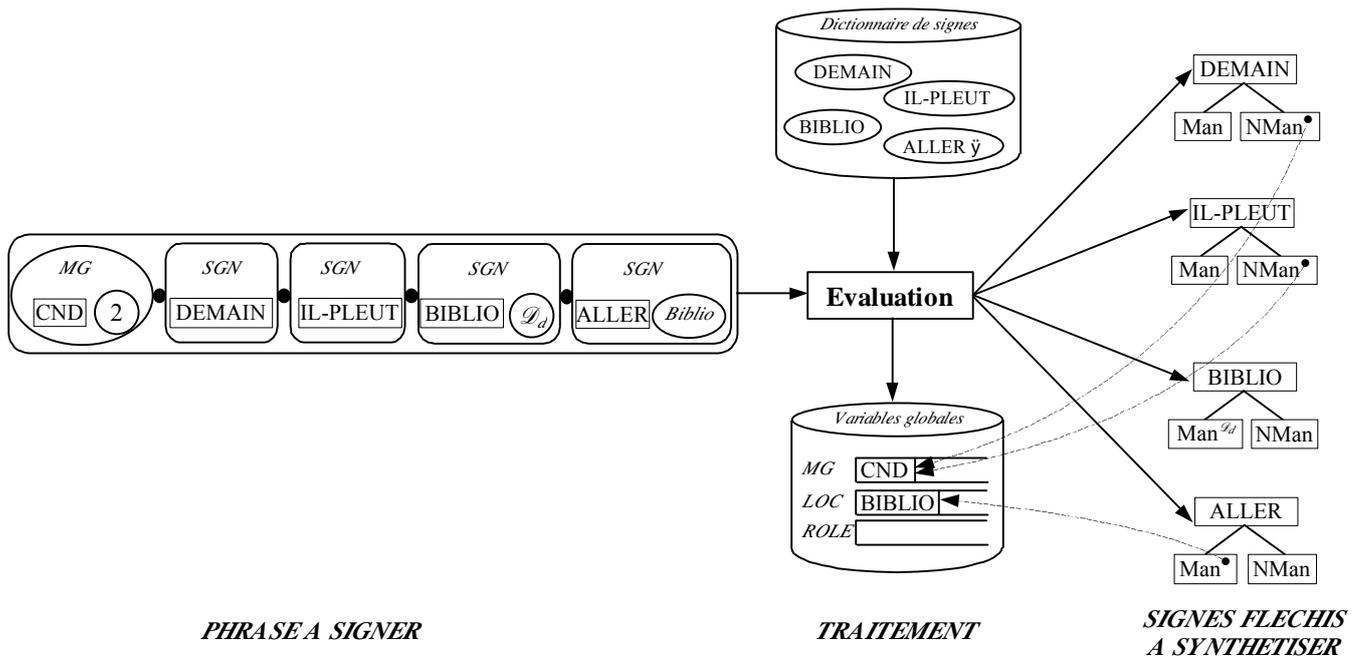


Figure 2.36 : Obtention de la spécification hiérarchique de signes paramétrés à partir d'une phrase.

A partir du dictionnaire de signes et des listes de marqueurs globaux, de localisations et de rôles établis, le système d'évaluation génère les représentations hiérarchiques adéquates. Ainsi, aux caractéristiques non-manuelles des signes *demain* et *il_pleut* s'est ajoutée l'expression du conditionnel. Le signe *bibliothèque* a été localisé à droite par décalage, tandis que cette position a été transmise comme paramètre pour compléter la partie manuelle du signe *aller*.

2.5.4. L'enchaînement des signes.

Nous souhaitons compléter l'étude de la phrase signée en précisant différentes propriétés relatives à l'enchaînement des signes, au travers d'une synthèse des travaux menés sur ce sujet, complétée d'observations personnelles. Dans un premier temps, nous nous plaçons dans une perspective de traduction pour présenter en quelques lignes la manière dont sont choisis et ordonnés les signes, et comment caractériser les pauses dans le discours. Nous tentons ensuite d'analyser en quoi diffèrent les signes produits dans et hors du contexte de la phrase, avant d'examiner comment sont régies les transitions entre signes.

2.5.4.1. Les signes et leur séquence.

Il faut savoir que la langue des signes exprime avant tout l'idée, et produit en conséquence environ moitié moins d'items lexicaux que les langues orales. Ainsi, ne sont en général pas traduits les articles, les prépositions [DEV 90] et les verbes d'état (être, paraître, ...), souvent sémantiquement implicites (Stokoe [STO 72] note que 6 des 15 mots les plus utilisés en anglais

n'ont pas d'équivalent signé : *the, of, a, is, ...*); il en est de même pour de nombreux mots sous-entendus ou contenus intrinsèquement dans les signes ou les expressions non-manuelles : adverbess de lieu, de manière, etc. La richesse sémantique des signes compense ainsi un temps moyen d'articulation plus élevé que celui de la parole, aboutissant à des débits d'information comparables.

Quant à l'ordre des signes dans la phrase, lui aussi est dicté en priorité par l'expression de l'idée. On peut donc en parler seulement en termes de tendances et non de règles strictes. Woodward [WOO 72] a décrit des règles de grammaire générative engendrant des structures de phrases. L'ordre des éléments peut toutefois être largement permuté par transformations. Nous nous bornons ici à synthétiser les grandes lignes dégagées par différents auteurs ([RON 86], [NAM 78], [WIL 79]) :

- Les signes sujet-prédicat sont quasi-systématiquement présentés dans cet ordre; selon Sallagoity [SAL 75], ils forment un noyau rarement inversé ou éclaté dans la langue des signes de Marseille. Le prédicat peut être ici un verbe (*ton frère arriver*) ou un prédicat adjectival (*fils grand : mon fils est grand*).
- De façon plus générale, l'idée tend à être placée en tête de discours sous forme d'un topique (procédé de **thématisation**); celui-ci est suivi du commentaire s'y rapportant :

<i>Vin préférer Bordeaux moi</i>	<i>Nager piscine aimer_beaucoup</i>
<i>En vins, je préfère le Bordeaux</i>	<i>Nager à la piscine, j'adore cela</i>

Cette structure *topique-commentaire* conduit à définir la langue des signes comme orientée par le discours, à la manière du chinois, plutôt que par la phrase comme c'est le cas pour la plupart des langues orales [LIL 90].

- L'ordre des compléments des verbes d'action apparaît relativement libre. Selon Fischer [FIS 75], la structure de surface dominante en ASL est Sujet-Verbe-Objet (mais cet auteur cite aussi [FIS 90] deux cas d'exception dans lesquels l'objet peut précéder le verbe : lorsque celui-ci est thématiqué, ou lorsqu'il forme avec le verbe une sorte de formule toute faite). Par ailleurs, sont également fréquentes les constructions Sujet-Objet-Verbe (pour Oléron [OLE 78], le verbe apparaît préférentiellement en fin de phrase en LSF), ou Objet-Sujet-Verbe (par exemple, *Parapluie femme ouvrir*). Dans tous les cas, le verbe ne se trouve pas en tête, sauf lorsqu'il est thématiqué. Selon Namir, le contexte joue un rôle important en ISL pour lever l'ambiguïté des termes.
- Lorsque l'action se déroule à un moment défini, ce dernier est fixé en tête de phrase (*deux_heures moi marcher : je pars me promener dans deux heures*). Les signes de durée se placent en revanche à la fin de l'énoncé (*moi marcher deux_heures : j'ai marché pendant deux heures*).
- Dans les expressions qualificatives, l'attribut suit presque invariablement l'entité qualifiée (*voiture rouge, homme petit*). L'ordre est identique pour l'attribution ordinale (*jour sept : le septième jour*), mais inverse dans l'attribution quantitative cardinale (*sept jour : sept jours, beaucoup argent : beaucoup d'argent*).
- Les adverbess, locutions adverbiales et compléments circonstanciels tendent à suivre le verbe auquel ils se rapportent (*parler correctement, dormir sur canapé*).

Notre système de génération se situe en aval de l'ordonnement des signes, puisqu'il se base sur une représentation textuelle correcte de la phrase signée, ainsi qu'il est spécifié dans le cahier des charges. Il nous semblait néanmoins intéressant de préciser ici ces quelques données relatives à l'ordre des signes.

2.5.4.2. Les pauses dans le discours.

Le discours signé est émaillé de pauses possédant un rôle grammatical. Ainsi, le procédé de **thématisation** inclut une pause après l'énoncé du topique pour distinguer clairement celui-ci de son commentaire. Ces « coupures d'intonation » sont parfois capitales pour l'identification du sujet et de l'objet dans la phrase. Elles interviennent aussi pour marquer la fin d'une expression conditionnelle.

Virginia C. Covington a étudié avec précision ces coupures dans l'ASL [COV 73]. Elle en distingue quatre types :

- Une jonction interne (notée '+') indique les limites d'un signe ou d'un mot épelé. Elle est presque imperceptible et souvent, deux signes consécutifs sont apparemment fusionnés; ils peuvent toutefois être séparés par une légère hésitation. La coupure entre deux mots épelés doit, elle, être suffisamment nette pour être interprétée comme telle; elle consiste en une tenue de la dernière lettre du premier mot.

et trois jonctions terminales :

- Une « suspension » ('|') sépare les clauses et les phrases, et sous-entend que le signeur va poursuivre son discours. Cette pause est plus longue que /+/, et les mains y persistent dans la position et souvent la configuration du dernier signe.
- Une « question » ('||') termine les clauses ou phrases interrogatives. Elle en conserve d'ailleurs les paramètres non-manuels (sourcils levés, ...). Jusqu'à l'obtention d'une réponse, le signeur peut soit conserver les mains dans leurs position/configuration, soit les ouvrir en direction du récepteur (la paume est alors dirigée vers le haut), soit pointer une main vers ce dernier et amener la seconde dans la position de repos.
- La jonction « repos » ('#') signale la fin d'un énoncé; un interlocuteur peut alors s'exprimer. Outre une durée accrue, cette pause est caractérisée par le retour des mains dans une position de repos (le long du corps, sur la main de base ou un objet tel qu'un meuble, etc.).

Grosjean [GRO 79] fournit quant à lui les durées de ces différentes pauses, toujours pour l'ASL. Il définit 215 ms comme la durée minimale d'une coupure de phrases. D'autre part, les durées des pauses se répartiraient ainsi en moyennes : 47% entre phrases, 28% entre propositions coordonnées, 22% entre le **syntagme** nominal et le syntagme verbal, et seulement 1 à 2% à l'intérieur de ces derniers. L'auteur en conclut que la durée des pauses est proportionnelle à l'importance syntaxique de la coupure. Malheureusement, quoique celles-ci soient sans doute largement généralisables, nous ne disposons pas pour le moment de données aussi précises concernant les autres langues des signes, et notamment la LSF.

2.5.4.3. Durée des signes et transitions dans le discours.

Afin d'évaluer les différences existant entre les signes en forme de citation d'une part et dans le contexte du discours d'autre part, nous avons analysé la phrase suivante :

si
Embouteillages je être_en_retard je avant arriver téléphoner_à(toi)
S'il y a des embouteillages et que je suis en retard, je te téléphonerai avant d'arriver

Celle-ci inclut les signes *être_en_retard* et *téléphoner_à* dont nous disposons par ailleurs des formes isolées. La comparaison révèle, par rapport à ces formes de citation, une diminution de la durée globale de production (cf. figure 2.37), due à :

- la suppression des tenues intermédiaires,
- la réduction des temps de tenues initiale et finale,
- la diminution de la durée des phases dynamiques des signes (due plus à une vitesse supérieure qu'à une amplitude moindre), ainsi que de la durée de la phase statique initiale de *téléphoner* pendant laquelle la configuration manuelle *Y* (représentant le combiné, comme dans le geste co-verbal) est maintenue à proximité de l'oreille.

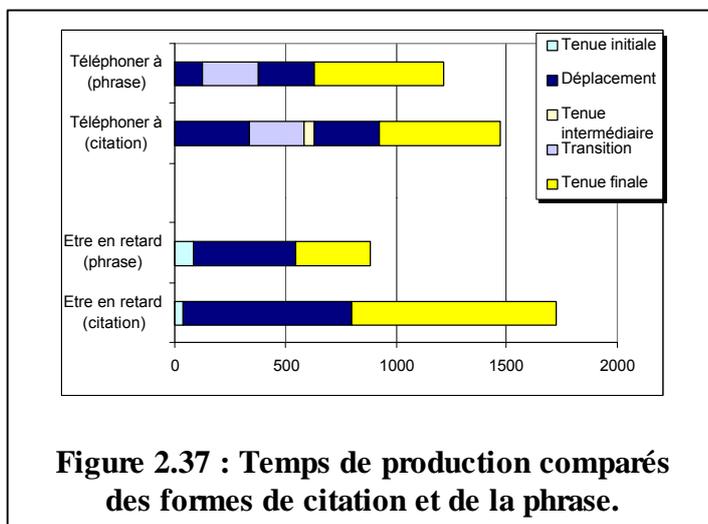


Figure 2.37 : Temps de production comparés des formes de citation et de la phrase.

On note par ailleurs que, parmi les différentes phases de production des signes (préparation, tenue initiale, mouvement, tenue finale, rétraction), seuls les déplacements sont porteurs d'information. Les tenues intermédiaires servent à mettre ces derniers en évidence, en les isolant. En conséquence, les phases de préparation et de rétraction se résument à des transitions lorsque les signes s'enchaînent, tandis que les tenues initiales sont particulièrement courtes. En se gardant de généraliser, on peut toutefois remarquer que, dans notre phrase test, les tenues finales suivies d'une transition ample semblent prolongées.

Enfin, il est intéressant de noter le comportement de la main non-dominante au cours de la production de la phrase signée. Etant donné qu'elle n'est pas systématiquement impliquée dans la formation des signes, elle peut se retirer davantage vers la position de repos. Cette position n'est toutefois jamais totalement atteinte, car la main de base anticipe également les postures qui vont être les siennes dans les signes suivants. Ainsi, elle se rétracte le long du corps après le signe *embouteillages*, mais commence aussitôt à se positionner pour servir de main de base dans *être_en_retard*, comme le montre la trace des déplacements des poignets portée en annexe 2.4.

2.5.4.4. Composition et coarticulation.

L'interaction entre signes est ici étudiée sous deux angles principaux : la formation des composés d'une part, et la fusion des signes insérés dans le discours d'autre part. Ces deux procédés mettent en jeu des mécanismes similaires de coarticulation.

De même qu'en français, la langue utilise des mots existants pour en former de nouveaux (par exemple, *avant-hier*), deux signes ayant une existence propre peuvent être produits en séquence et composés en un nouvel item lexical (noté ici sous la forme *avant^ahier*), souvent sémantiquement dépendant. Un signe composé est un élément lexical autonome; il possède donc les caractéristiques de tout signe : c'est une unité indivisible, base de constructions syntaxiques élaborées, susceptible de subir des processus modulateurs.

Lors de la composition, il y a souvent *assimilation*, c'est-à-dire que les éléments tendent à se ressembler dans le nouveau lexème. Ainsi, les signes peuvent changer de configuration manuelle, de position dans l'espace, ou toute autre caractéristique formationnelle. En règle générale, ils subissent une simplification (mouvement moins élaboré, suppression des répétitions et des tenues, raccourcissement spatio-temporel), particulièrement marquée pour le premier signe racine²³.

Pour obtenir une transition rapide et fluide entre les mouvements respectifs, il peut y avoir déplacement du point d'articulation ou anticipation, dans le premier signe, de l'utilisation de la main non-dominante (*assimilation progressive*). Ainsi, dans le composé LSF *après^amidi*, la flexion du poignet du signe *après* est effectuée à l'endroit où débute *midi*. Le tableau 2.13 illustre un autre exemple, *parents*, dans lequel on note une perte de répétition par rapport aux deux lexèmes composants, ainsi que la persistance de la configuration manuelle du premier signe.

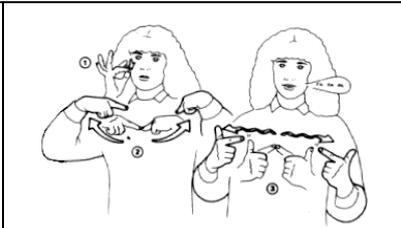
				
Signe	Papa	Maman	Parents	Bijoux
Durée totale (ms)	1092	1302	1386 (84+252+1050)	3612 (1344+420+588+252+1008)

Tableau 2.13 : Composition des signes (formes de citation).
(les durées des tenues sont incluses et celles des transitions sont en *italique*)

²³ Les processus phonologiques intervenant dans la composition en ASL ont été décrits de façon détaillée par Liddell [LID 89]. Il en a d'ailleurs inclus certains dans son système de transcription : suppression des tenues intermédiaires, insertion d'un mouvement de transition - *épenhèse* - entre les signes racines, ou encore inversion du mouvement - *métathèse* - de l'un des constituants du composé dans certaines conditions (ainsi, le mouvement de *deaf* [sourd] est inversé dans *mother^adeaf* [maman est sourde] car le signe *mother* est articulé près du menton, là où se termine normalement *deaf*).

La simplification intervenant dans la composition se répercute sur la durée du signe composé. Le nouvel élément est généralement bien plus court que la somme des durées des signes dont il est issu – il serait plus proche de leur moyenne. Un cas particulier est celui des super-ordinaires, ou collectifs, tels que *fruits*, *meubles*, etc. Ils sont constitués par juxtaposition de plusieurs (généralement trois) instances représentatives, auxquelles est souvent ajouté le signe *etc*. Selon C. Cuxac [CUX 86], le temps d'émission du composé résultant est voisin, là encore, de la durée moyenne des éléments pris isolément, dont les durées ont subi des taux de réduction comparables. Si cette règle est bien vérifiée dans le composé *parents*, tel n'est pas le cas pour l'item collectif *bijoux*, dont la durée est nettement supérieure à celle d'un signe ordinaire. Il semble bien constituer une exception, car la simplification évoquée plus haut y est très peu perceptible.

Les interactions entre signes ne se limitent pas à celles observées lors de la composition. Dans le discours courant (*prose*), les signes sont parfois fort différents de la simple succession de leurs formes de citation isolées. Valli [VAL 90] rapporte un exemple de phrase ASL dans laquelle les signes subissent une fusion, avec des conséquences sur les caractéristiques formationnelles proches de celles de la composition : suppression des tenues, assimilation progressive des configurations manuelles, etc. Lorsque *I want go_to store* [il faut que j'aille faire des courses] devient *I_want go_to_store*, ces deux derniers signes ne se composent plus chacun que d'un mouvement réduit à sa plus simple expression signifiante et exécuté avec la seule main dominante.

Conclusion.

La décomposition des caractéristiques formationnelles du signe a permis d'en bâtir une spécification hiérarchique. Par combinaison graduelle d'éléments structurels, on construit ainsi une arborescence de complexité croissante, jusqu'au niveau le plus élevé du signe complet. A chaque étage, des ensembles de primitives ont été proposés dans le souci de couvrir le plus large éventail possible de langues signées.

Si les caractères spatiaux et structurels ont été privilégiés par rapport à une description de type événementiel, c'est qu'ils sont mieux adaptés aux spécificités des langues visuo-gestuelles, et plus faciles à mettre en oeuvre et à utiliser par le public auquel le système de synthèse est destiné.

Grâce à un corpus de signes numérisés, les aspects dynamiques des signes ont été formalisés, de même que les différentes modulations qu'ils subissent. Ces dernières interviennent dans un grand nombre de processus grammaticaux et de flexions porteuses de subtiles nuances sémantiques, en compagnie de caractéristiques non-manuelles particulièrement importantes en tant que véhicules de l'information.

La séparation franche des niveaux du signe et du discours, légitimée par un impératif d'édition aisée, a nécessité la mise en place d'une interface. Ce rôle est assumé par le paramétrage des signes, qui fournit par ailleurs de nombreux avantages en termes de lisibilité grâce à une formulation naturelle de la phrase signée. La tâche de spécifier les types de clauses et les basculements temporels a été dévolue aux marqueurs globaux.

Le système de synthèse proprement dit fait l'objet du prochain chapitre. Il y est détaillé l'implantation des concepts et des mécanismes introduits jusqu'ici, ainsi que leur utilisation pratique au moyen d'une interface graphique.

CHAPITRE 3.

UN SYSTEME DE SYNTHESE GRAPHIQUE ANIMEE.

Ce chapitre présente comment les composantes et les processus grammaticaux précédemment introduits ont été implantés pour aboutir à l'animation d'un signeur virtuel capable de produire des phrases signées synthétiques.

Pour cela, il nous a d'abord fallu résoudre le problème du positionnement et de l'orientation de la chaîne articulée que constituent les segments du corps humain. A partir d'un modèle de ce dernier, nous détaillons les méthodes retenues pour la synthèse des configurations manuelles et pour la localisation et l'orientation de la main dans l'espace. Puis nous explicitons la manière dont les mouvements sont générés pour s'approcher des courbes de vitesse issues de leur analyse.

Après une partie introductive destinée à justifier un certain nombre de choix de développement, la description textuelle du signe est abordée, tant pour la partie manuelle que pour les expressions du visage, ainsi que l'utilisation des paramètres.

Nous présentons ensuite les phases successives impliquées dans la synthèse proprement dite du signe, avant d'étudier l'implantation des mécanismes grammaticaux au niveau du discours.

Les différentes composantes ayant été introduites, est alors proposé un aperçu synoptique de la structure du logiciel développé, muni de son dictionnaire de signes et de son interface graphique.

Pour clore ce chapitre, nous insistons sur les résultats de l'évaluation à laquelle les signes synthétiques ont donné lieu, avant d'en présenter un cas concret d'utilisation.

3.1. Génération de configurations et de mouvements naturels.

L'animation graphique d'un personnage virtuel n'est autre qu'une suite d'images fixes affichées à une cadence suffisante pour donner l'impression de mouvement, ce qui consiste d'abord à être en mesure de générer des postures corporelles. Afin que celles-ci soient aussi naturelles que possible, il nous faut disposer d'un modèle réaliste du corps humain, présenté rapidement au début de cette partie. Puis nous examinons comment cette structure articulée est effectivement utilisée pour synthétiser les configurations de la main et du bras. Enfin, la production du mouvement proprement dit est présentée ici.

3.1.1. Modélisation géométrique du corps humain.

3.1.1.1. Structures articulées.

Les structures articulées décrivent des objets possédant un mouvement global non rigide, mais dont chacune des parties constituantes se conforme isolément aux contraintes des mouvements rigides [AGG 94]. Ce type de modèle est utilisé pour représenter aussi bien les bras de robots que les corps des vertébrés à squelette interne. Il consiste en une chaîne de segments de longueur constante, reliés par des articulations possédant chacune un ou plusieurs degrés de liberté. Dans le cas du corps humain, il s'agit d'une à trois rotations, physiologiquement contraintes en amplitude (et dont les axes ne sont pas toujours faciles à définir de façon très précise).

A chaque segment est associé un repère cartésien local, centré en son articulation proximale, et défini de la manière suivante :

- l'axe X est l'axe principal du segment, orienté de l'articulation proximale vers l'articulation distale, autour duquel s'effectue la rotation interne/externe (ou *roulis*) d'angle \mathcal{E} ;
- l'axe Z, orienté de sorte que la flexion (ou *tangage*) \mathcal{I} soit positive, est tel que les points du segment planaire (par exemple, la paume de la main) se trouvent dans le plan (X,Z) ;
- l'axe Y est tel qu'il forme avec X et Z un trièdre direct. C'est l'axe d'abduction / adduction (ou *lacet*), dont l'angle est noté \mathcal{A} .

Pour définir la paume droite par exemple (figure 3.1), nous attachons au poignet un repère dont l'axe X est dirigé suivant la plus grande dimension de la main (i.e. vers MCP3), et l'axe Z

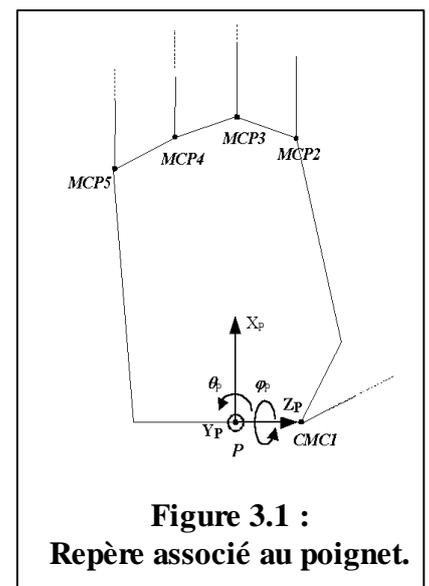


Figure 3.1 :
Repère associé au poignet.

orienté vers l'articulation CMC1 à la base du pouce. Seules deux rotations sont permises en cette articulation²⁴.

Toute la partie supérieure du corps humain est ainsi modélisée sous la forme d'une chaîne articulée, y compris les éléments du visage dont nous présentons les particularités plus loin dans ce chapitre. Le repère de référence absolue est situé à la base du torse, comme on peut le constater dans l'annexe 3.2 qui reprend l'ensemble de la structure. Les longueurs et les limites angulaires des articulations sont issues de différentes études anthropométriques [HUM 90, BUC 92b, KOB 89].

3.1.1.2. Formalisme matriciel.

Si le positionnement d'un solide dans l'espace est relativement aisé, il en va différemment de son orientation. Pour faire coïncider un repère cartésien avec un autre repère orienté de façon quelconque, trois rotations successives sont nécessaires. Aux angles d'Euler et aux angles de roulis-tangage-lacet, peu utilisés en biomécanique, nous avons préféré la séquence lacet-tangage-roulis qui fournit des coordonnées plus faciles à visualiser [BUC 92a, ROM 94]. Comme le met en évidence la figure 3.2, l'ordre de ces rotations détermine l'orientation finale : l'abduction/adduction θ autour de y_0 transforme d'abord le repère initial (indiqué 0) en (x', y_0, z') ; la flexion/extension ϕ autour de z' transforme alors celui-ci en (x'', y'', z') , lui-même amené sur le repère final (x_I, y_I, z_I) par la rotation axiale d'angle ψ autour de x'' .

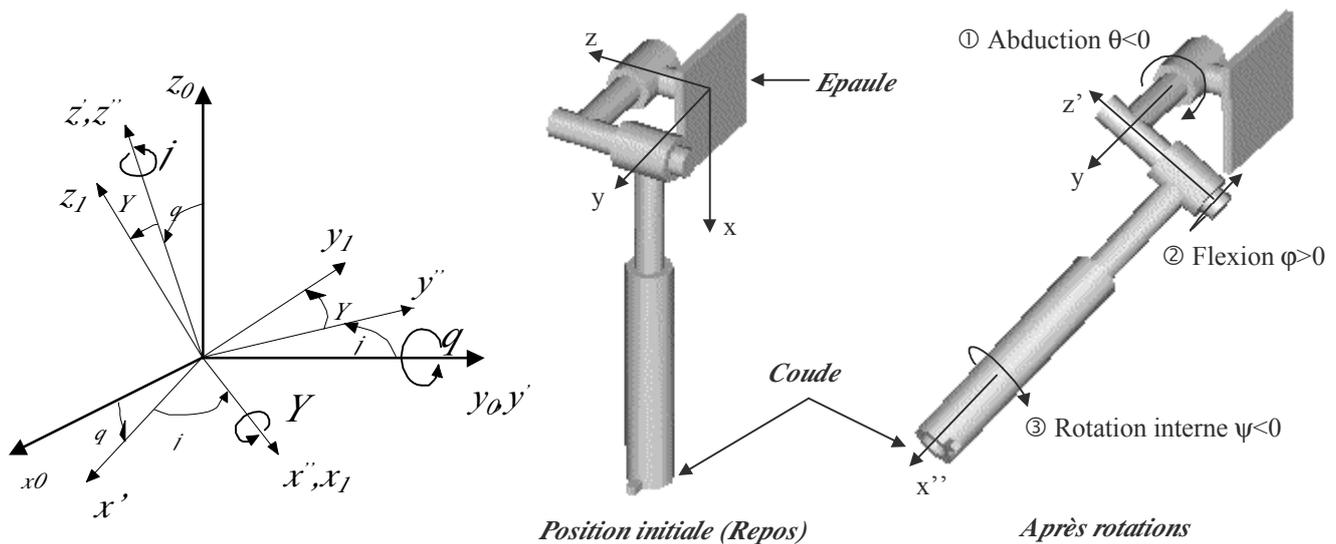


Figure 3.2 : Convention adoptée pour les angles et exemple de l'épaule droite²⁵.

²⁴ On rappelle ici que la pronation/supination de l'avant-bras est prise en compte au niveau du coude (cf. figure 2.16).

²⁵ Dans ce schéma en rendu 3D, seule est réellement non nulle la longueur de l'avant-bras. Les autres segments visibles sont des artifices pour figurer le mécanisme.

Ces changements de repères peuvent être avantageusement représentés sous forme matricielle en vue de calculs ultérieurs. La notation homogène permet de plus de composer rotations et translations par simple multiplication, en faisant intervenir des matrices carrées de dimension 4x4. Dans le formalisme retenu, la matrice de passage du repère lié à l'articulation i (R_i) au repère lié à l'articulation $i+1$ (R_{i+1}) s'écrit ainsi :

$${}^i T_{i+1} = \begin{pmatrix} [{}^i A_{i+1}] & {}^i D_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

où ${}^i D_{i+1}$ est le vecteur translation entre l'origine de R_i et celle de R_{i+1} , et où ${}^i A_{i+1}$ est la matrice de changement de repère en orientation définie par les 3 angles ${}_{i,i}$, ζ_i et \mathcal{E}_i de R_i :

$${}^i A_{i+1} = r_y({}_{i,i}) \cdot r_z(\zeta_i) \cdot r_x(\mathcal{E}_i) = \begin{pmatrix} c_{i,i} c \zeta_i & -c_{i,i} s \zeta_i c \mathcal{E}_i + s_{i,i} s \mathcal{E}_i & c_{i,i} s \zeta_i s \mathcal{E}_i + s_{i,i} c \mathcal{E}_i \\ s \zeta_i & c \zeta_i c \mathcal{E}_i & -c \zeta_i s \mathcal{E}_i \\ -s_{i,i} c \zeta_i & s_{i,i} s \zeta_i c \mathcal{E}_i + c_{i,i} s \mathcal{E}_i & -s_{i,i} s \zeta_i s \mathcal{E}_i + c_{i,i} c \mathcal{E}_i \end{pmatrix}$$

(c et s signifient respectivement *cosinus* et *sinus*).

Soit x_i un vecteur x , exprimé dans le repère R_i . Si l'on connaît les coordonnées de x dans le repère distal R_{i+1} , celles-ci s'expriment alors dans le repère proximal par la relation :

$$x_i = {}^i T_{i+1} \cdot x_{i+1}$$

Un tel calcul peut être propagé le long de la chaîne articulaire par multiplications successives pour obtenir l'expression de tout vecteur dans n'importe quel repère, et notamment ses coordonnées globales :

$$x_0 = {}^0 T_1 \cdot {}^1 T_2 \cdots {}^{n-1} T_n \cdot x_n \quad (1)$$

Par cette méthode, tout calcul de position d'un point manuel, ou de l'orientation d'un segment quelconque dans l'espace (en particulier la paume), s'effectue par simples multiplications matricielles. Cela va aussi nous permettre de résoudre le problème de positionnement par des méthodes numériques, présentées de façon concise dans les paragraphes qui suivent.

3.1.2. Synthèse des configurations manuelles.

Le système hiérarchique choisi pour la description des configurations manuelles fait appel à la cinématique directe pour l'affectation des primitives aux différents doigts. Pour les propriétés manuelles se posent en revanche des problèmes de géométrie inverse, fréquemment rencontrés en robotique et en biomécanique.

3.1.2.1. Configurations du pouce.

Il s'agit ainsi de placer l'extrémité du pouce à une certaine position de la main (par exemple, l'extrémité du majeur – propriété #*Extrémité* – ou la partie ventrale de l'index). Or la complexité cinématique de cet articulateur rend impossible l'obtention de solutions littérales, même avec un modèle simplifié comme le nôtre.

Différentes méthodes sont utilisées pour résoudre ce problème. La philosophie générale est de procéder par itérations successives [KOR 82]. Certains auteurs [RIJ 91] s'appuient en outre sur des relations expérimentales existant entre les angles du pouce. Une autre méthode intéressante [BAD 87] consiste, dans un premier temps, à modéliser sous forme d'arbre la chaîne à décrire, puis à réduire celui-ci en fonction des segments affectés par les buts. Le critère de convergence est l'équilibre de l'arbre pondéré par l'importance de chaque but, traduisant la minimisation de la distance par rapport aux positions cibles. La méthode et l'algorithme décrits par Badler et ses collaborateurs sont d'ailleurs adaptés par Lee [LEE 93] au suivi par la main d'un modèle animé. Ils peuvent aussi être utilisés dans l'animation et la spécification de mouvement à un niveau plus élevé [MOR 90]. Il en est de même de la cinématique inverse, en particulier lorsqu'elle est couplée à la description de la trajectoire de l'organe terminal [BAD 99].

Pour le pouce qui n'est formé que de trois segments, nous n'allons pas mettre en œuvre une technique aussi sophistiquée et lourde à manipuler, mais plutôt résoudre le système (redondant) de positionnement en faisant l'hypothèse que la flexion en MCP est connue. Celle-ci ne varie en effet pas sensiblement et reste faible (aux alentours de 10°) dans toutes les configurations.

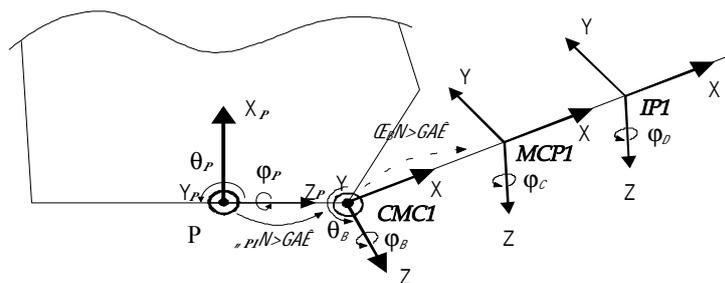


Figure 3.3 : Modèle cinématique du pouce.

Si nous appelons respectivement R_1 , R_2 et R_3 les repères liés aux articulations CMC, MCP et IP (cf. figure 3.3), \mathcal{E}_1 la rotation initiale (constante) de passage de R_1 à R_2 , et p_1 , p_2 , p_3 les longueurs des segments du pouce (respectivement méta-carpien, phalanges proximale et distale), les coordonnées de son extrémité T s'écrivent :

$$x_T = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{R_1} = \begin{pmatrix} c_{\theta_1} c \ell_1 & -c_{\theta_1} s \ell_1 c \mathcal{E}_1 + s_{\theta_1} s \mathcal{E}_1 & c_{\theta_1} s \ell_1 s \mathcal{E}_1 + s_{\theta_1} c \mathcal{E}_1 & p_1 c_{\theta_1} c \ell_1 \\ s \ell_1 & c \ell_1 c \mathcal{E}_1 & -c \ell_1 s \mathcal{E}_1 & p_1 s \ell_1 \\ -s_{\theta_1} c \ell_1 & s_{\theta_1} s \ell_1 c \mathcal{E}_1 + c_{\theta_1} s \mathcal{E}_1 & -s_{\theta_1} s \ell_1 s \mathcal{E}_1 + c_{\theta_1} c \mathcal{E}_1 & -p_1 s_{\theta_1} c \ell_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \ell_2 & -s \ell_2 & 0 & p_2 c \ell_2 \\ s \ell_2 & c \ell_2 & 0 & p_2 s \ell_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_3 c \ell_3 \\ p_3 s \ell_3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

La méthode que nous allons appliquer, dite *de la descente par coordonnées*, est inspirée de [KOB 89]. Elle consiste à considérer la distance du point x_T au point cible x comme fonction d'une seule des inconnues, les autres étant fixes. Appelons r_i le i -ème couple de rotation et déterminons sa valeur optimale r_i^* . Réécrivons x_T

$$x_T = a_\alpha \sin \alpha_i + b_\alpha \cos \alpha_i + d_\alpha \quad (2)$$

où les vecteurs a_α , b_α , et d_α ne dépendent pas de α_i .

La distance $|x - x_T|^2$ minimale est alors obtenue pour

$$\frac{d[(x - x_T)(x - x_T)]}{dr_i} = 0 \quad \text{soit} \quad (a_r \cos r_i - b_r \sin r_i)(a_r \sin r_i + b_r \cos r_i + d_r - x) = 0 \quad (3)$$

En dérivant (2), équation paramétrique du cercle de centre d_r , il vient :

$$(a_r \cos r_i - b_r \sin r_i)(a_r \sin r_i + b_r \cos r_i) = 0$$

Et en retranchant cette équation de (3), on obtient finalement

$$\boxed{\operatorname{tg} r_i^* = \frac{a_r(d_r - x)}{b_r(d_r - x)}}$$

Des deux valeurs possibles pour r_i^* , il nous faut garder celle pour laquelle $|x - x_T|$ est minimale, c'est-à-dire celle qui fournit une dérivée seconde – ou encore la quantité $(a_r \sin r_i + b_r \cos r_i)(d_r - x)$ – positive. De l'intervalle admissible, on retient enfin la borne la plus proche, au cas où la valeur trouvée n'y est pas comprise.

Cette méthode fournit des configurations réalistes pour le pouce. La figure 3.4 illustre, en représentation fil de fer et sous divers points de vue, différentes formes obtenues pour des contacts issus de propriétés manuelles.

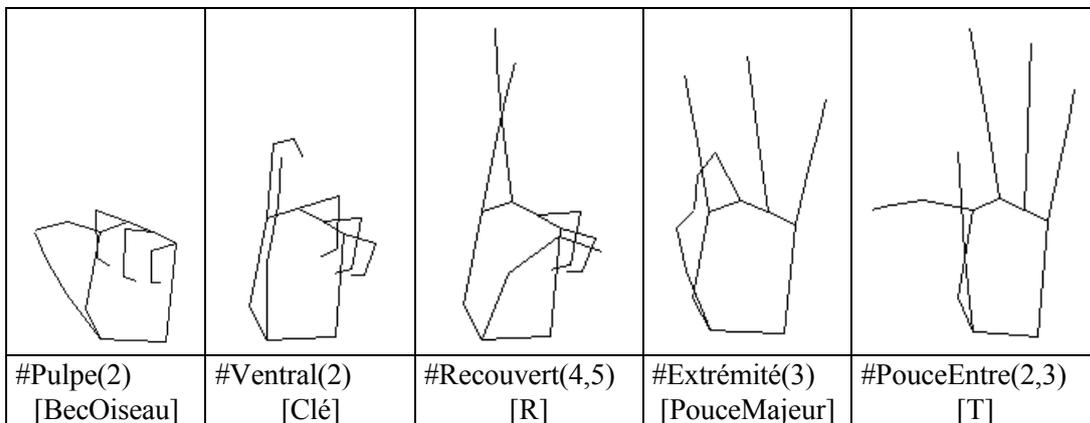


Figure 3.4 : Propriétés manuelles et configurations du pouce correspondantes.

3.1.2.2. Contraintes sur les angles articulaires.

La structure ligamentaire métacarpo-phalangienne de la main humaine est telle que les flexions respectives des doigts au niveau de cette articulation sont fortement interdépendantes. C'est une relation que l'on ne saurait ignorer si l'on souhaite obtenir des configurations réalistes. Elle se traduit par le fait que la flexion d'un doigt isolé est limitée par l'état d'extension des doigts adjacents et, inversement, que l'extension d'un doigt est entravée par la flexion de ses voisins. En pratique, la main humaine procède naturellement à un compromis dans les cas les plus critiques, à savoir que si deux doigts voisins doivent être l'un tendu, et l'autre replié, ni la flexion ni l'extension ne sera maximale, mais chacune prendra une valeur moyenne.

L'étude de Lee [LEE 95] a permis de dégager quatre doubles inégalités traduisant ces limitations mutuelles :

$$\begin{aligned} \max(\varphi_3 - 54^\circ, \varphi_{2\min}) &\leq \varphi_2 \leq \min(\varphi_3 + 25^\circ, \varphi_{2\max}) \\ \max(\varphi_2 - 25^\circ, \varphi_4 - 45^\circ, \varphi_{3\min}) &\leq \varphi_3 \leq \min(\varphi_2 + 54^\circ, \varphi_4 + 20^\circ, \varphi_{3\max}) \\ \max(\varphi_3 - 20^\circ, \varphi_5 - 44^\circ, \varphi_{4\min}) &\leq \varphi_4 \leq \min(\varphi_3 + 45^\circ, \varphi_5 + 48^\circ, \varphi_{4\max}) \\ \max(\varphi_4 - 48^\circ, \varphi_{5\min}) &\leq \varphi_5 \leq \min(\varphi_4 + 44^\circ, \varphi_{5\max}) \end{aligned}$$

Ces contraintes sont appliquées *a posteriori* pour modifier éventuellement les angles définis par les configurations digitales et les propriétés manuelles globales.

Deux autres types de contraintes ont été prises en considération :

- L'abduction maximale diminue avec la flexion pour atteindre une valeur quasiment nulle à partir d'une certaine limite, fixée aux deux tiers de la flexion maximale :

$$\zeta \leq \frac{2}{3} \zeta_{\max} \Rightarrow \theta = \min\left(\theta_{\max}, \theta_{\max} \left(1 - \frac{\zeta}{2/3 \cdot \zeta_{\max}}\right)\right)$$

- Afin de tenir compte de la convergence des doigts en flexion vers le point scaphoïdien, et étant donné l'ordre des rotations choisi, il nous faut définir (artificiellement) une abduction proportionnelle lorsque la flexion dépasse cette même limite :

$$\zeta \geq \frac{2}{3} \zeta_{\max} \Rightarrow \theta = \frac{2}{3} \theta_{\max} \left(3 \frac{\zeta}{\zeta_{\max}} - 2\right)$$

Ces deux lois ont été empiriquement déterminées sur la base de résultats probants.

3.1.2.3. Système d'encodage et synthèse.

Les configurations manuelles ont la particularité d'être considérées comme des composants élémentaires dans notre système, bien qu'elles soient initialement générées à partir d'entités et de propriétés plus fines (dont on a vu les détails dans le chapitre 2). Elles sont en effet destinées à être utilisées telles quelles dans la description d'un signe, et doivent donc être mémorisées au préalable. Détaillons un peu le mécanisme de création de ces configurations.

Leur description se trouve dans un fichier texte que l'utilisateur a tout loisir de modifier (Configs.hcs). Elle respecte une certaine syntaxe, composée d'une suite d'affectations, dont la spécification formelle est la suivante :

```

“Config” <nom>
“Fingers”
  (<n°_dgt> | <nom_dgt> | “AllFingers”) “:” (<nom_config> | [ $\theta_{MCP}$ ]  $\phi_{MCP}$   $\phi_{PIP}$   $\phi_{DIP}$  | ¶
                                                                    [ $\theta_{MCP/CMC}$ ]  $\phi_{CMC}$   $\phi_{MCP}$   $\phi_{IP}$ )
“Hand”
  [<type_contact> [“:” <n°_dgt1> [“,” <n°_dgt2> [“,” <n°_dgt3>] ] ]
“End”

```

La première étape consiste à assigner (dans la section Fingers) les primitives de configurations digitales aux différents doigts. Les doigts concernés sont spécifiés soit par leur numéro, soit par leur nom anglais (cf. tableau 3.1). Le mot-clé AllFingers permet d'affecter la même configuration à tous les doigts simultanément. Il est également possible de l'utiliser dans le cas où tous ne sont pas concernés : étant donné que les assignations sont effectuées dans leur ordre d'apparition dans le fichier, il suffit de spécifier ensuite une autre configuration pour les doigts qui font exception (comme l'index et le majeur dans la figure 3.5).

Section Fingers					
n°_dgt	1	2	3	4	5
nom_fr_dgt	Pouce	Index	Majeur	Annulaire	Auriculaire
nom_dgt	Thumb	Index	Middle	Ring	Little
nom_config	<i>Pouce</i> : {Extended Hook Bent Flat E} <i>Autres doigts</i> : {C O Bent Stiff Flat NearFlat Hook E Extended}				
Section Hand					
type_contact	{Tip Pad Abducted Adducted Abduct Adduct Cross Crossed Covered CoverThumb Ventral ThumbBetween}				

Tableau 3.1 : Symboles disponibles pour la description des configurations manuelles (repris des tableaux 2.6 à 2.8).

Dans un deuxième temps, les propriétés manuelles globales peuvent être spécifiées dans la section Hand. Le symbole correspondant vient en tête de ligne, suivi du ou des doigts concernés (indiqués dans le tableau 2.8).

La figure 3.5 illustre, à travers l'exemple du V, les trois étapes de l'obtention d'une configuration manuelle à partir de sa description textuelle. L'annexe 3.3 contient par ailleurs une liste exhaustive des spécifications et des représentations synthétiques pour les formes rencontrées en LSF.

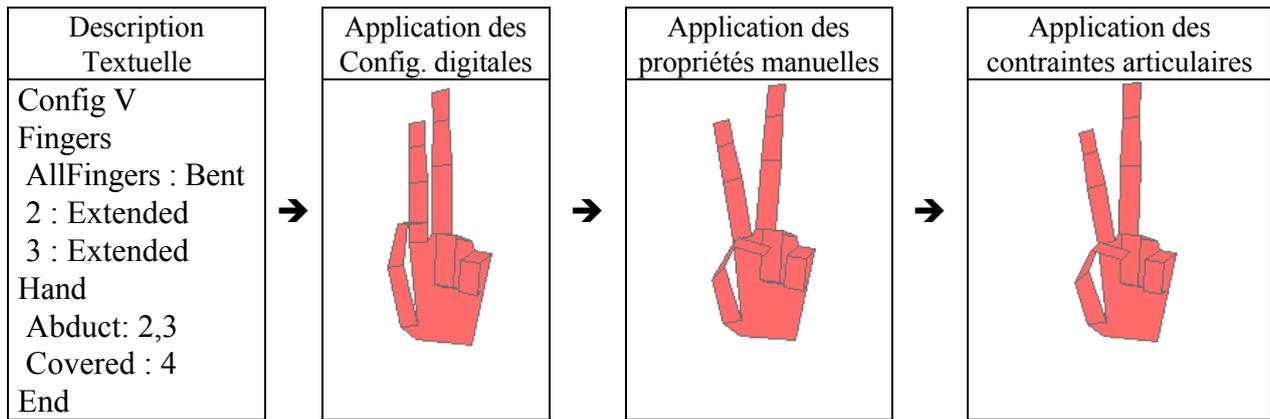


Figure 3.5 : Etapes de la synthèse de la configuration V (main gauche).

3.1.3. Localisation et orientation.

Pour pouvoir générer une spécification manuelle complète, nous devons aussi être en mesure de calculer les angles du bras et du poignet, qui définissent respectivement la localisation et l'orientation de la main dans l'espace.

3.1.3.1. Positionnement du poignet dans l'espace.

Le positionnement du poignet [LOS 98] est également un problème de type géométrique inverse et s'exprime de la façon suivante : étant donnée une position souhaitée du poignet (x, y, z) , quels sont les angles articulaires à appliquer au bras (c'est-à-dire au système {bras supérieur/épaule, avant-bras/coude}) pour atteindre ce point ?

Pour obtenir la position du poignet P , nous devons prendre en compte les 4 degrés de liberté suivants du bras humain :

- trois rotations possibles dans l'épaule : flexion/extension (angle ζ_e), abduction/adduction (angle η_e), et rotation axiale (angle \mathcal{E}_e);
- une rotation en flexion au niveau du coude (angle ζ_c), la rotation radio-ulnaire \mathcal{E}_c n'intervenant pas dans le positionnement de P mais dans l'orientation de la paume.

Ecrivons les équations donnant la position de P dans le repère R_1 (lié à l'épaule). En appelant l_1 et l_2 les longueurs respectives du bras supérieur et de l'avant-bras, on exprime aisément les coordonnées de P dans le repère R_2 lié au coude :

$$x_P = (l_2 c \zeta_c, l_2 s \zeta_c, 0, l_1)$$

On trouve alors l'expression de x_P dans R_1 en appliquant (1) :

$$\begin{aligned}
 x &= l_2 c_{\eta_e} c \zeta_e c \zeta_c - l_2 c_{\eta_e} s \zeta_e c \mathcal{E}_e s \zeta_c + l_2 s_{\eta_e} s \mathcal{E}_e s \zeta_c + l_1 c_{\eta_e} c \zeta_e \\
 y &= l_2 s \zeta_e c \zeta_c + l_2 c \zeta_e c \mathcal{E}_e s \zeta_c + l_1 s \zeta_e \\
 z &= -l_2 s_{\eta_e} c \zeta_e c \zeta_c + l_2 s_{\eta_e} s \zeta_e c \mathcal{E}_e s \zeta_c + l_2 c_{\eta_e} s \mathcal{E}_e s \zeta_c - l_1 s_{\eta_e} c \zeta_e
 \end{aligned} \tag{4}$$

Une telle chaîne articulaire est redondante du point de vue du positionnement du poignet: il est clair que le nombre d'inconnues (4) est supérieur au nombre d'équations (3); il existe donc une infinité de solutions à ce système. Autrement dit, le poignet étant fixé, le bras peut posséder de nombreuses configurations différentes, correspondant à diverses positions du coude. Comment choisir celle qu'adopte naturellement le bras humain ?

La procédure utilisée pour le calcul des postures du pouce s'est révélée mal adaptée à celui des postures cherchées pour le bras. Cela est dû au fait que, pour le pouce, nous avons pu faire l'hypothèse d'une flexion limitée en MCP, et nous ramener ainsi à un système non redondant. D'autres méthodes de robotique basées sur la pseudo-inverse [COI 86] ou des fonctions de coût [ROM 94] ne donnent pas complètement satisfaction relativement à nos objectifs. Ceci nous a amenés à proposer une méthode spécifique.

De prime abord, la minimisation des moments de gravité paraît être un critère à prendre en ligne de compte. Mais dans bien des cas, il semble que ce soit plutôt celle des efforts générés au niveau des surfaces articulaires (épiphyses, ...) qui détermine la forme du bras. Cette étude dépassant néanmoins le cadre de la présente thèse, et n'en ayant d'ailleurs pas trouvé trace dans la littérature, nous nous sommes orientés vers une méthode simple dont les résultats sont tout à fait satisfaisants. Celle-ci consiste :

- ① à sélectionner manuellement la configuration la plus probable du bras pour un certains nombre de points de l'espace. Pour cela il nous faut au préalable :
 - exprimer ζ_e , \mathcal{E}_e et ζ_c en fonction de ${}_{ne}$.
 - pour tous les angles ${}_{ne}$ acceptables pour l'épaule, calculer les angles ζ_e , \mathcal{E}_e et ζ_c .
- ② à rechercher la position la plus « naturelle » possible en un point quelconque par moyennage des angles correspondants aux points environnants précédemment trouvés.

① Cherchons à exprimer littéralement ζ_e , \mathcal{E}_e et ζ_c en fonction de ${}_{ne}$. il vient de (4) :

$$xc\zeta_e + ys\zeta_e c_{ne} = l_2 c_{ne} c\zeta_c + l_2 s_{ne} c\zeta_e s\mathcal{E}_e s\zeta_c + l_1 c_{ne}$$

et

$$xs_{ne} + zc_{ne} = l_2 s\mathcal{E}_e s\zeta_c$$

soit encore

$$l_2 c\zeta_c = xc_{ne} c\zeta_e + ys\zeta_e - zs_{ne} c\zeta_e - l_1$$

et

$$l_2 s\mathcal{E}_e s\zeta_c = xs_{ne} + zc_{ne}$$

En portant ces valeurs dans y , on obtient alors

$$2l_1 xc_{ne} c\zeta_e + 2l_1 ys\zeta_e - 2l_1 zs_{ne} c\zeta_e = l_1^2 - l_2^2 + x^2 + y^2 + z^2$$

ce qui fournit une équation du second degré en $\tan(\frac{\zeta_e}{2})$ dont les solutions sont :

$$\zeta_e = 2.A \operatorname{arctan} \left(\frac{B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A + C} \right)$$

avec $A = 2l_1 xc_{ne} - 2l_1 zs_{ne}$, $B = 2l_1 y$, $C = l_1^2 - l_2^2 + x^2 + y^2 + z^2$

(5)

On peut remarquer que, parmi les deux solutions possibles pour ζ_e , une seule correspond à une configuration « naturelle » du bras humain.

La redondance du système (4) nous impose de calculer le triplet $(\zeta_e, \mathcal{E}_e, \zeta_c)$ pour chaque valeur acceptable de μ_e . Ensuite, pour chaque point intersection du maillage de l'espace défini par les localisations symboliques introduites au paragraphe 2.3.1.2, il nous a fallu choisir la configuration du bras qui nous paraissait la plus « naturelle ».

- ② Ceci permet alors de sélectionner cette configuration pour n'importe quel point M de l'espace du signeur, en ne retenant bien entendu que la configuration dont les angles sont les plus proches de ceux des points alentours. Détaillons la méthode en quelques lignes.

Pour chacun des 4 angles du bras, on commence par calculer, sur l'ensemble V des points du maillage, la moyenne pondérée par l'inverse de la distance à chacun :

$$r^* = \frac{\sum_{i \in V} \frac{1}{d(M, i)} r}{\sum_{i \in V} \frac{1}{d(M, i)}}, \quad r \in \{\mu_e, \zeta_e, \mathcal{E}_e, \zeta_c\}$$

Ceci nous fournit un quadruplet d'angles \bar{q} . Dans l'ensemble des solutions possibles, noté $Poss$, il nous faut ensuite rechercher celle dont le quadruplet d'angles est le plus proche de celui que nous venons de calculer :

$$q^* = \min_{q \in Poss} (\| q - \bar{q} \|)$$

Ce sont ces quatre angles q^* que nous retenons comme configuration du bras la plus proche de la réalité.

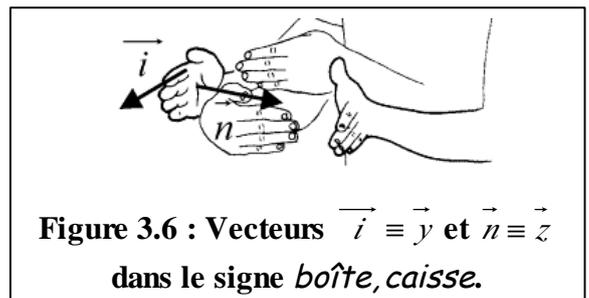
3.1.3.2. Orientation absolue de la main.

Il nous faut à présent obtenir les trois autres angles de la chaîne articulaire du bras, \mathcal{E}_c, μ_p et ζ_p , qui définissent l'orientation palmaire. Les axes définis pour la paume sont tels que \vec{X}_p est confondu avec \vec{i} et \vec{Y}_p avec \vec{n} . La matrice d'orientation globale de la main, notée ${}^{R_0}A_{R_p}$, s'exprime dès lors en colonnes :

$${}^{R_0}A_{R_p} = \left(\begin{array}{c|c|c} \vec{i} & \vec{n} & \vec{i} \wedge \vec{n} \end{array} \right)$$

Ainsi dans l'exemple de la posture initiale du signe

caisse (ci-contre), ${}^{R_0}A_{R_p} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$



Afin de trouver les angles recherchés, exprimons la relation liant la matrice d'orientation globale du poignet ${}^{R_0}A_{R_2}$ (après rotations dans l'épaule et flexion du coude) à la matrice ${}^{R_0}A_{R_p}$:

$${}^{R_0}A_{R_3} = {}^{R_0}A_{R_2} \cdot r_{x_2}(\mathcal{E}_c) \cdot r_{y_3}(\mu_p) \cdot r_{z_3}(\xi_p) \quad (6)$$

Les données du problèmes sont :

- l'orientation courante ${}^{R_0}A_{R_2} = \begin{pmatrix} m_1 & n_1 & a_1 \\ m_2 & n_2 & a_2 \\ m_3 & n_3 & a_3 \end{pmatrix} = (m \ n \ a)$
- l'orientation souhaitée ${}^{R_0}A_{R_p} = \begin{pmatrix} \sim_1 & \epsilon_1 & r_1 \\ \sim_2 & \epsilon_2 & r_2 \\ \sim_3 & \epsilon_3 & r_3 \end{pmatrix} = (\sim \ \epsilon \ r)$

En réécrivant (6) : $r_{x_2}^{-1}(\mathcal{E}_c) \cdot {}^{R_0}A_{R_2}^{-1} \cdot {}^{R_0}A_{R_p} = r_{y_3}(\mu_p) \cdot r_{z_3}(\xi_p)$, et en développant,

$$\begin{pmatrix} {}^t m \sim & {}^t m \epsilon & {}^t m r \\ {}^t n \sim \cdot c \mathcal{E}_c - {}^t a \sim \cdot s \mathcal{E}_c & {}^t n \epsilon \cdot c \mathcal{E}_c + {}^t a \epsilon \cdot s \mathcal{E}_c & {}^t n r \cdot c \mathcal{E}_c + {}^t a r \cdot s \mathcal{E}_c \\ -{}^t n \sim \cdot s \mathcal{E}_c + {}^t a \sim \cdot c \mathcal{E}_c & -{}^t n \epsilon \cdot s \mathcal{E}_c + {}^t a \epsilon \cdot c \mathcal{E}_c & -{}^t n r \cdot s \mathcal{E}_c + {}^t a r \cdot c \mathcal{E}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{\mu_p} c \xi_p & -c_{\mu_p} s \xi_p & s_{\mu_p} \\ s \xi_p & c \xi_p & 0 \\ -s_{\mu_p} c \xi_p & s_{\mu_p} s \xi_p & c_{\mu_p} \end{pmatrix}$$

on trouve les angles recherchés par identification :

$$\boxed{\mathcal{E}_c = -Arctan\left(\frac{{}^t n r}{{}^t a r}\right), \quad \mu_p = Arctan\left(\frac{{}^t m r \cdot c \mathcal{E}_c}{{}^t a r}\right), \quad \xi_p = -Arctan\left(\frac{{}^t m v}{{}^t m \sim}\right)} \quad (7)$$

Bien entendu, l'équation (6) peut admettre un triplet solution qui ne soit pas acceptable pour les angles concernés du corps humain, auquel cas les valeurs de \mathcal{E}_c , μ_p et ξ_p trouvées en (7) ne satisfont pas (6). Ces angles sont en effet calculés grâce à la fonction *Arctan*, qui retourne une valeur comprise dans l'intervalle $]-\pi/2, \pi/2[$, intervalle qui est précisément la plage de valeurs admissibles pour la pronation / supination et un sur-ensemble de celles des angles du poignet.

Dans certaines situations, il n'est pas nécessaire de spécifier complètement l'orientation de la main ; seule celle de la paume (i.e. le vecteur \vec{n}) est réellement pertinente. Non mentionnée jusqu'à présent, cette fonctionnalité permet à l'utilisateur de laisser le système calculer lui-même le vecteur \vec{i} de sorte que la contrainte articulaire du poignet soit minimale. Le critère correspondant est l'annulation de μ_p car c'est cet angle, dont le débattement est le plus faible, qui détermine la direction de l'index une fois \vec{n} fixé. Pour calculer \sim et r connaissant ϵ , on exprime les conditions souhaitées :

$$\begin{cases} \mu_p = 0 \Leftrightarrow {}^t m r = 0 \\ \epsilon_1 r = 0 \\ \|r\|^2 = 1 \end{cases}$$

La résolution de ce système fournit $r = \frac{r'}{\|r'\|}$ et $\sim = \epsilon \wedge r$, avec :

- si $|v_1|=1$, $r'_1 = 0$, $r'_2 = -\frac{m_3}{\sqrt{m_2^2 + m_3^2}}$, $r'_3 = \frac{m_2}{\sqrt{m_2^2 + m_3^2}}$
- si $|v_1| \neq 1$,

$$r'_1 = 1, \left\{ \begin{array}{l} \text{si } m_2 = 0, \\ \text{si } m_2 \neq 0, \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} r'_2 = -\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3 r_3}{\epsilon_2} \\ r'_2 = -\frac{m_1 + m_3 r_3}{m_2} \end{array} \right\}, \quad r'_3 = \frac{m_2 \epsilon_1 - m_1 \epsilon_2}{m_3 \epsilon_{21} - m_2 \epsilon_3}$$

De plus, r étant défini au sens près, on impose (étant données les limites en pronation/supination), la condition $\sim \cdot m > 0$. Si tel n'est pas le cas, r (et donc \sim) doit être opposé.

L'orientation absolue souhaitée pour la main étant ainsi intégralement déterminée, les angles articulaires correspondants peuvent être ensuite calculés comme exposé plus haut.

3.1.3.3. Orientation et positionnement.

Un de nos objectifs est de pouvoir spécifier un point particulier sur la main, point qui est alors placé à la position donnée de l'espace au lieu du poignet. Dans un tel cas, les problèmes de positionnement et d'orientation absolue de la main, que nous venons de traiter dans les paragraphes précédents, ne sont plus indépendants et il nous faut les envisager conjointement.

Exprimé de façon mathématique, le problème se pose en ces termes : étant donné

- un point M, $\overrightarrow{OM}_{R_0} = {}^t(om_1 \quad om_2 \quad om_3)$, à atteindre par
- un point donné de la main dont les coordonnées dans le repère lié à la paume sont connues : $\overrightarrow{PM}_{R_p} = {}^t(pm_1 \quad pm_2 \quad pm_3)$
- et l'orientation absolue ${}^{R_0}A_{R_p} = \begin{pmatrix} \sim_1 & \epsilon_1 & r_1 \\ \sim_2 & \epsilon_2 & r_2 \\ \sim_3 & \epsilon_3 & r_3 \end{pmatrix}$ souhaitée pour la main,

quelles sont les coordonnées absolues $\overrightarrow{OP}_{R_0} = {}^t(x \quad y \quad z)$ du poignet ?

Les relations vectorielles $\overrightarrow{OM}_{R_0} = \overrightarrow{OP}_{R_0} + \overrightarrow{PM}_{R_0}$ et $\overrightarrow{PM}_{R_0} = {}^{R_0}A_{R_p} \overrightarrow{PM}_{R_p}$ fournissent une réponse immédiate :

$$\overrightarrow{OP}_{R_0} \begin{cases} x = om_1 - (\sim_1 \cdot pm_1 + \epsilon_1 \cdot pm_2 + r_1 \cdot pm_3) \\ y = om_2 - (\sim_2 \cdot pm_1 + \epsilon_2 \cdot pm_2 + r_2 \cdot pm_3) \\ z = om_3 - (\sim_3 \cdot pm_1 + \epsilon_3 \cdot pm_2 + r_3 \cdot pm_3) \end{cases} \quad (8)$$

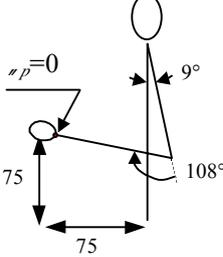
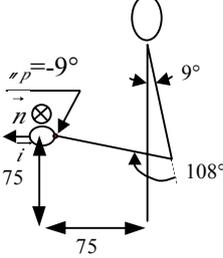
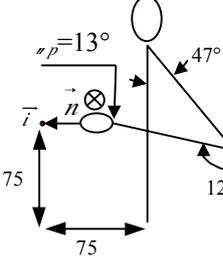
Cas possibles <i>Point à atteindre :¹(75 75 60), configuration Moufle</i>	Angles bras	Angles poignet	Représentation <i>(main gauche, vue de profil)</i>
Cas ① : Orientation relative ($\mathcal{E}_c, \mu_p, \zeta_p$ donnés) - dont « naturelle » ($\mathcal{E}_c = \mu_p = \zeta_p = 0$) - Aucun point spécifié	$\mu_e = 2.6^\circ$ $\zeta_e = -8.8^\circ$ $\mathcal{E}_e = 2.3^\circ$ $\zeta_c = 107.8^\circ$	\mathcal{E}_c donné μ_p donné ζ_p donné	
Cas ② : Orientation absolue ²⁶ ${}^{R_0}A_{R_3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$ Aucun point spécifié	$\mu_e = 2.6^\circ$ $\zeta_e = -8.8^\circ$ $\mathcal{E}_e = 2.3^\circ$ $\zeta_c = 107.8^\circ$	$\mathcal{E}_c = -2.3^\circ$ $\mu_p = -8.8^\circ$ $\zeta_p = -2.6^\circ$	
Cas ③ : Orientation absolue ${}^{R_0}A_{R_3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$ Point spécifié : Extrémité de l'index	$\mu_e = 4.3^\circ$ $\zeta_e = -47.2^\circ$ $\mathcal{E}_e = 4.1^\circ$ $\zeta_c = 124.4^\circ$	$\mathcal{E}_c = -1.4^\circ$ $\mu_p = 12.9^\circ$ $\zeta_p = -2.5^\circ$	
Cas ④ : Orientation relative ($\mathcal{E}_c, \mu_p, \zeta_p$ donnés) Point spécifié	Calcul impossible avec les méthodes exposées car $\overrightarrow{PM}_{R_p} = {}^{R_0}A_{R_1} {}^{R_1}A_{R_2} (\mu_e, \zeta_e, \mathcal{E}_e) {}^{R_2}A_{R_p} (\zeta_c, \mathcal{E}_c) {}^{R_p}A_{R'_p} (\mu_p, \zeta_p) \overrightarrow{PM}_{R'_p}$ et nous n'avons pas $\mu_e, \zeta_e, \mathcal{E}_e$ et ζ_c en fonction de x, y et z .		

Tableau 3.2 : Différents cas possibles de positionnement / orientation, sur un exemple.

Nous sommes désormais capables de calculer l'ensemble des angles de la structure bras/main nécessaires pour amener un point manuel quelconque en une position donnée de l'espace, avec une orientation palmaire définie. Le tableau 3.2 illustre les différentes possibilités de positionnement/orientation offertes par les méthodes précédemment décrites.

3.1.4. Synthèse du mouvement

Pour générer le mouvement, les études les plus poussées utilisent généralement la dynamique inverse, associée à une méthode de contrôle de haut niveau [ZEL 82]. Ces techniques permettent de calculer automatiquement, au prix d'une complexité de mise en œuvre importante,

²⁶ Cette orientation correspond à celle de la main gauche en début de signe dans la figure 2.14.

les couples et forces à appliquer aux différentes articulations de la chaîne à partir de la spécification cinématique de ses extrémités. T. Lebourque [LEB 99b] a pour sa part adapté un modèle de contrôle sensori-moteur [GIB 94] qui respecte certaines lois psychomotrices du mouvement, et qui possède la particularité de gérer la coarticulation. Cette fonctionnalité permet d'aboutir à des trajectoires lissées passant à proximité des cibles à atteindre.

L'objet de notre recherche se focalise davantage sur les propriétés spatiales du signe, directement liées à ses propriétés linguistiques. C'est la raison pour laquelle les aspects temporels de la synthèse du mouvement n'ont été étudiés que dans une moindre mesure, et qu'un système simple a été retenu à dessein. En particulier, les déplacements successifs sont ici supposés indépendants les uns des autres, et les transitions considérées comme des mouvements naturels. L'étude de la génération du mouvement se limite donc à celle des primitives de déplacement.

3.1.4.1. Génération du mouvement.

L'impression de mouvement est produite par la succession d'images fixes à une cadence suffisamment rapide. En animation de synthèse, il suffit souvent de disposer pour cela de quelques images-clés (*keyframes*), l'ordinateur déterminant lui-même les vues intermédiaires par interpolation. C'est la technique que nous avons adoptée. Mais l'automatisation des calculs se heurte à certaines difficultés inhérentes à la complexité du mouvement humain :

- Bien que les lois de vitesse établies au chapitre 2 montrent qu'il existe théoriquement une relation²⁷ entre la vitesse maximale v_m , le temps total de production t_f et la distance parcourue d , il n'est pas possible de calculer littéralement celle-ci en raison de la forme gaussienne retenue pour les trajectoires non circulaires. Ceci plaide pour une simplification du modèle sous forme d'un mouvement uniformément accéléré jusqu'à mi-parcours, puis uniformément décéléré jusqu'au point final. Un tel profil de vitesse en « dent de scie » fournit un chronogramme s'approchant de façon satisfaisante de la forme réelle (figure 3.7).
- L'interpolation doit aussi prendre en compte les mouvements secondaires, tant au niveau de la main que du poignet, ainsi que les modulations de la dynamique du signe. Cela plaide également en faveur d'une simplification du modèle.

En informatique, il n'est pas aisé de travailler avec la variable temps, car les durées effectives de calcul et d'affichage sont beaucoup trop dépendantes des performances de la machine sur laquelle tourne le programme et des choix d'implémentation effectués. Les facteurs influençant ces durées sont d'ordres matériel (processeur, carte graphique, mémoire, ...) et logiciel (langage de développement utilisé notamment). C'est pourquoi on utilise le nombre d'images n et la variable chronologique i , représentant l'index d'une image dans la séquence. Ces

²⁷ Puisque $d = \int_0^{t_f} f(v_{\max}, t_f, t) dt$

variables sont transmises comme paramètres de toutes les méthodes ayant en charge la synthèse du mouvement, de sorte que l'affinage de la détermination de n ne remet pas en cause le système.

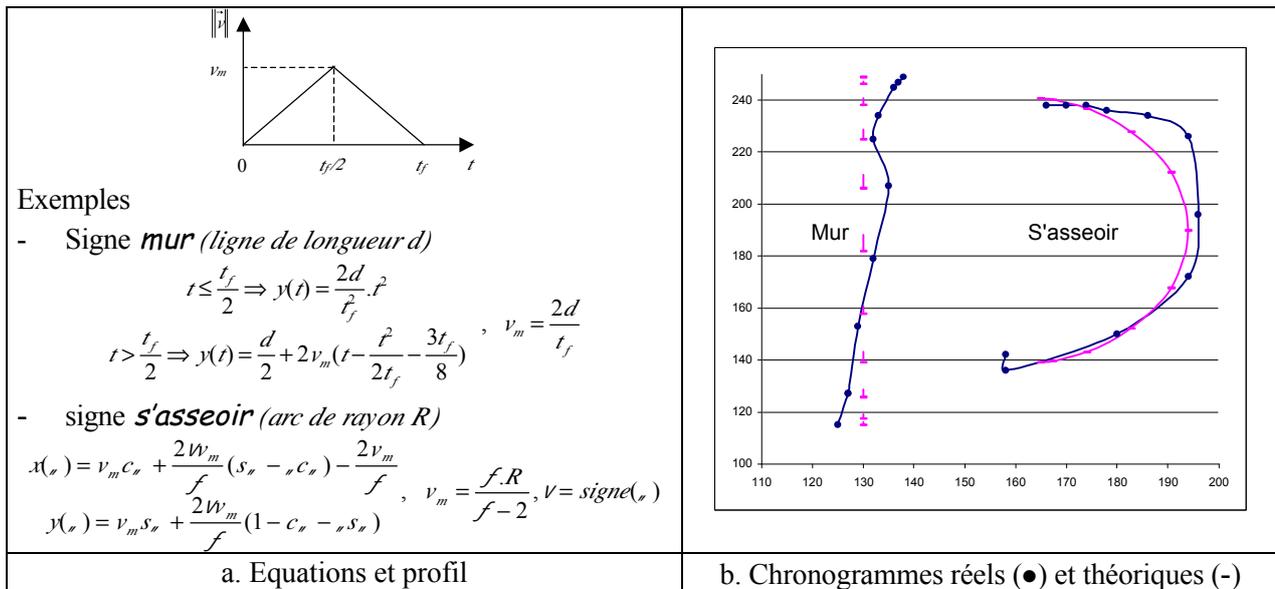


Figure 3.7 : Modèle de vitesse implanté pour les mouvements non circulaires.

Le calcul de n est important, car ce nombre conditionne directement la durée de l'animation ($t_f \cdot n$ n'étant plus connu *a priori*). Pour le moment, sa détermination est basée sur les règles simples suivantes :

- On se donne un nombre N qui reflète globalement les performances de la machine et sert de base à tous les calculs ultérieurs ; il est évalué manuellement par l'utilisateur de façon à faire correspondre la durée des signes synthétiques et celle de leurs équivalents réels.
- Ce nombre de base est modulé en fonction de diverses caractéristiques de la primitive de déplacement. On prend notamment en compte :
 - le type de déplacement (normal ou lettre épelée)²⁸ ;
 - dans le cas d'une pose statique du poignet, le changement ou non d'orientation ;
 - la distance totale à parcourir (rapportée aux dimensions du signeur) et la forme de la trajectoire ;
- l'éventuelle superposition d'un mouvement secondaire. Pour que ce dernier soit perceptible, il faut en effet augmenter le nombre d'images dans ce cas.

²⁸ Bien que les transitions ne soient pas gérées par le logiciel pour le moment, on peut envisager de les modéliser sous forme de déplacements plus brefs (et dont la propriété fondamentale serait justement d'être synthétisés par un nombre réduit d'images).

Une fois déterminé le nombre n d'images, les différentes positions-clés sont interpolées conformément aux lois données à la figure 3.7 pour les trajectoires rectilignes directes et en arc de cercle (les positions étant par ailleurs régulièrement espacées le long d'un cercle). Dans ces équations, le temps t_f est remplacé par n et au temps t se substitue l'index i .

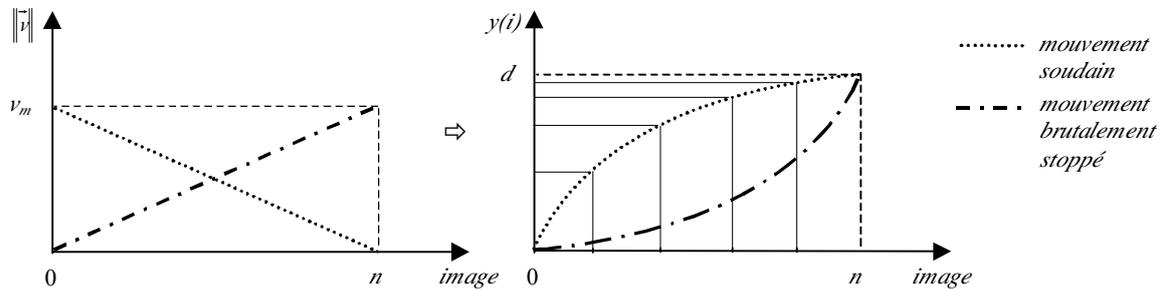


Figure 3.8 : Implantation de dynamiques particulières.

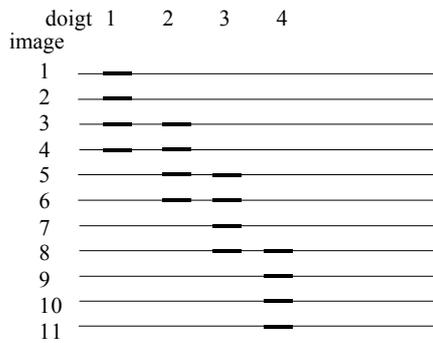
Les dynamiques particulières correspondant aux mouvements brutalement initiés ou stoppés sont modélisés par une distribution différente des positions sur la trajectoire, correspondant respectivement à une vitesse uniformément décroissante ou croissante (voir figure 3.8). Ces lois constituent une simplification des résultats obtenus lors du suivi de mouvement, mais produisent en pratique une impression visuelle très proche de la réalité.

3.1.4.2. *Mouvements secondaires.*

Les mouvements secondaires internes à la main ne posent pas de difficulté particulière. Il s'agit pour chacun d'une alternance de positions d'un ou plusieurs doigts entre deux configurations digitales extrêmes. Le rythme auquel se succèdent ces différentes postures est considéré comme constant et indépendant de la vitesse du mouvement principal. Il est cependant probable que ces deux grandeurs sont corrélées, comme pourrait le montrer une étude plus poussée au moyen d'un gant numérique et d'un capteur de position/orientation.

Ainsi, l'agitation des doigts (*#vibrer*) est générée sous la forme d'une suite de flexions et d'extensions, synchronisées entre les doigts impliqués. A chaque image est ajoutée ou retranchée une valeur fixe, celle de la flexion angulaire moyenne. Le nombre de répétitions dépend donc du nombre d'images à produire, qui doit être suffisamment important.

Le mouvement secondaire nommé *#compter* présente une synchronisation particulière. Il faut en effet s'assurer que la séquence est bien calée sur le nombre total d'images et, pour obtenir une animation fluide, gérer les index des images auxquelles chacun des doigts commence à se déplier (cf. figure 3.9).



Données :

- $n=11$: nombre d'images à produire
- $k=4$: nombre de doigts impliqués

Calculs :

- nombre de positions intermédiaires pour chaque doigt : $s=2+(n-2)/k=4$
(// est la division entière)
- nombre de chevauchements total : $nbChev=s*k-n=5$

Figure 3.9 : Synchronisation du dépliage des doigts dans le mouvement secondaire compter.

Les mouvements se produisant au niveau du poignet sont un peu plus délicats à mettre en pratique.

Pour générer l'ondulation de la main par exemple, on ne peut se contenter d'une simple alternance de flexions/extensions du poignet. Pour obtenir une synthèse acceptable, il faut au minimum tenir compte de l'influence de ces mouvements locaux sur la trajectoire du poignet, qui se met à osciller autour du chemin originel (rectiligne dans la majorité des cas)²⁹. Cela peut être modélisé par une sinusoïde dans le plan défini par les points extrêmes et le vecteur d'orientation \vec{n} de la main au point final. A chaque image i , l'orientation de l'index est alors donnée par la tangente à cette trajectoire (voir l'exemple du signe *poisson* sur la figure 3.10).

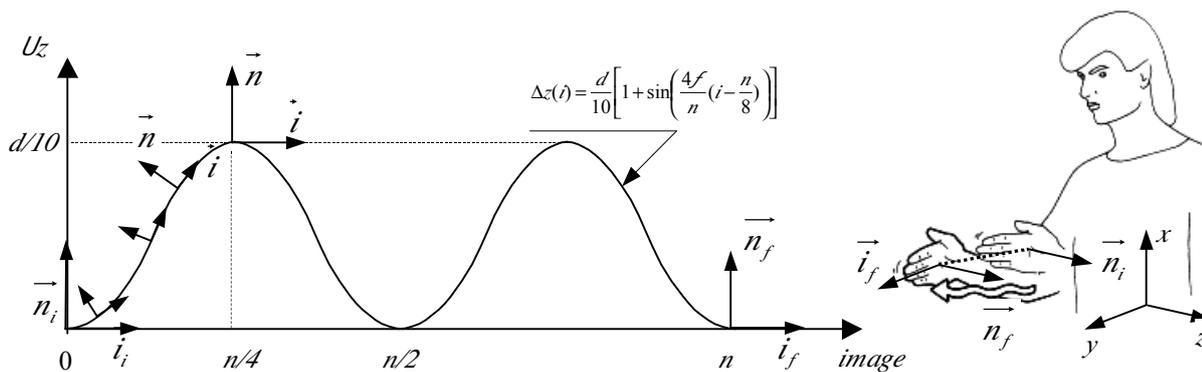


Figure 3.10 : Oscillations du poignet lors du mouvement local d'ondulation.

Le même phénomène survient dans le cas de la *torsion* si la main est initialement perpendiculaire à la trajectoire principale. Ainsi, dans le cas du signe *chameau* (tableau 3.3), le poignet ondule légèrement pendant que se succèdent les pronations/supinations de l'avant-bras, alors que ce dernier mouvement local ne modifie pas la trajectoire du signe *géographie*. Dans un certain nombre de cas, la torsion consiste en fait en une circumduction dont la flexion/extension

²⁹ Une animation très réaliste requiert en outre une légère ondulation de la main plate, par une alternance de flexions/extensions au niveau de l'articulation MCP.

reste modérée. Cela se produit lorsque la main n'est pas dans le prolongement direct de l'avant-bras ; ainsi dans *crayon* l'index doit-il être strictement maintenu dans l'espace inter-digital de la main de base. Un symbole spécial (τ_{wistAt}) a été réservé à cet effet. C'est alors une succession d'orientations qui est calculée, dont chacune conditionne la valeur des angles au niveau du poignet et de l'avant-bras.

La *circumduction* est elle aussi marquée en réalité par un léger déplacement du poignet (autour d'un point ou d'une trajectoire), approximativement circulaire. En première approche toutefois, nous l'avons négligé et avons considéré la seule évolution simultanée des angles de flexion/extension et d'abduction/adduction (l'extrémité des vecteurs \vec{n} et \vec{i} décrit alors un cône dans l'espace), auxquelles peut se superposer la rotation de l'avant-bras (si $\vec{n}_i \cdot \vec{n}_f < 0$). Superposée à une trajectoire principale rectiligne, la circumduction produit un mouvement global de la main hélicoïdal (comme dans le signe *mouche*).

			
Torsion (<i>géographie</i>)	Torsion+sinusoïde (<i>chameau</i>)	Torsion+index à direction fixe (<i>crayon</i>)	Circumduction (<i>mouche</i>)

Tableau 3.3 : Mouvements locaux de torsion et de circumduction.

3.2. Spécification et synthèse informatisée.

Etant donnée sa finalité, notre projet possède une orientation applicative prononcée. Les concepts et mécanismes introduits ont fait l'objet de développements pratiques poussés, et l'implantation informatique représente une part non négligeable du travail fourni. C'est à elle qu'ont trait les propos qui suivent.

Dans cette partie, il est question de la spécification et de la génération du signe et de la phrase signée.

La quasi-totalité du développement a été réalisée en langage Smalltalk, dans sa version de ParcPlace-Digitalk pour Windows95, Visual Smalltalk 3.1.1. L'utilisation de cet outil est motivée par plusieurs points :

- En tant que langage objet, il permet de regrouper les éléments possédant une nature et un comportement identiques. La définition des classes d'objets représentant les caractéristiques manuelles est ainsi obtenue presque directement en calquant la structure hiérarchique proposée pour le signe.

- Il est possible d'utiliser directement la machine virtuelle de Smalltalk pour évaluer des blocs de code. Nous nous appuyons sur cette fonctionnalité car la syntaxe sous-jacente conduit à une description du signe proche du langage naturel, donc très lisible.
- Le mécanisme de débogage intégré est particulièrement performant.
- De façon plus générale, le développement est grandement facilité par l'exécution interprétée du code source. Le chargement en mémoire de l'ensemble des classes permet d'apporter des modifications et de visualiser immédiatement les résultats sans avoir à tout recompiler systématiquement.
- Cette dernière version inclut de plus un environnement permettant de bâtir rapidement des interfaces graphiques par programmation visuelle.

La contrepartie à tous ces avantages réside surtout dans l'allongement des temps de calcul par rapport à d'autres langages tels que C++. Mais, dans le cadre d'un prototypage tel que le nôtre, Smalltalk s'est révélé remarquablement adapté.

3.2.1. Description du signe

Dans un premier temps, nous exposons les outils programmatiques disponibles pour décrire les caractéristiques formationnelles, en détaillant pour conclure l'utilisation pratique des paramètres au moyen des sélecteurs.

Ces derniers sont éventuellement fournis dans l'en-tête du signe, juste à la suite de son nom. Viennent ensuite les parties manuelles et non-manuelles, clairement distinguées au moyen des mots-clés correspondants :

```
"Sign %" <NomSigne> [ "(" <Param1> "," <Param2> "," ... <ParamN> ")" ] "."
"Manual:"
<PartieManuelle>
"NonManual:"
<PartieNonManuelle>
```

Nous nous contentons ici de présenter l'esprit dans lequel sont conçues les descriptions textuelles des signes ; le lecteur peut se reporter à l'annexe 3.1 pour une description exhaustive de la syntaxe utilisée.

3.2.1.1. Partie manuelle.

La partie manuelle du signe consiste en un ou plusieurs macro-déplacements, éventuellement réduits à un déplacement. Les objets de la hiérarchie y sont créés en assemblant des structures de plus bas niveau. Les éléments primaires – c'est-à-dire les « briques » de base – ont été regroupés dans le tableau 3.4.

Caractéristique manuelle	Utilisation dans la construction de...	Notation	Exemples
Configuration manuelle	Spécification manuelle	Symbolique ("#" <i>Nom</i>)	#C, #R, #Index
Point manuel	Spécification manuelle	Symbolique	#IndexTip, #LittleRoot
Orientation	Spécification manuelle, plan des mouvements courbes	Entre crochets (Valeurs symboliques et/ou num.)	[c d & ccf], [f d & 0 14 -14], [Supinated MidExtended]
Localisation	Spécification manuelle, déplacement, relation spatiale	Entre crochets (Valeurs symboliques et/ou num.)	[LowerTorso FrontProx 50], [0 0 -80]
Type trajectoire	Spécification manuelle	Symbolique	#Natural, #Static
Mvt. secondaire	Spécification manuelle	Symbolique	#Scissors, #Wave
Relation spatiale	Déplacement	Symbolique	#Symmetrical, #Opposite

Tableau 3.4 : Types et définitions des structures primaires.

Ils sont utilisés comme arguments de messages adressés aux diverses classes afin de construire des objets plus complexes. Le tableau 3.5 indique les noms anglais de ces éléments. Les expressions ont en effet été anglicisées de manière à fournir une description la plus compacte possible, tout en veillant à donner des noms et des messages évocateurs.

Caractéristique manuelle	Nom de la classe
Partie manuelle	Manual
Spécification manuelle	HandSpec
Macro-déplacement	MacroShift
Mouvement principal	MainMove
Mouvement	Move
Déplacement	Shift
Primitive de déplacement	ShiftPrime

Tableau 3.5 : Classes des structures complexes manuelles.

La syntaxe suivante permet par exemple de définir un déplacement. Elle tient compte des différentes formes que peut prendre cet objet, selon que la main non-dominante est présente ou pas, qu'elle joue le rôle de main de base, qu'elle se déplace de manière autonome ou selon une relation spatiale simultanément à la main dominante :

```

"Shift from:" <handSpec1>
  "to:" <handSpec2>
  "move:" <move>
  [ (" weakMove:" (<weakHandSpec> /<shiftPrime> /<spatialRelation>) /#
    " staticWeak:" <weakHandSpec> ) ]

```

Remarque: l'utilisation d'un objet de la classe `HandSpec` comme argument du sélecteur `weakMove`: se justifie dans les cas où la main non-dominante semble « guider » l'autre main. Le mouvement des deux articulateurs est alors rigoureusement identique et leur relation spatiale, souvent de type contact, conservée (cf. l'exemple de *passer_l'aspirateur*, ci-contre).

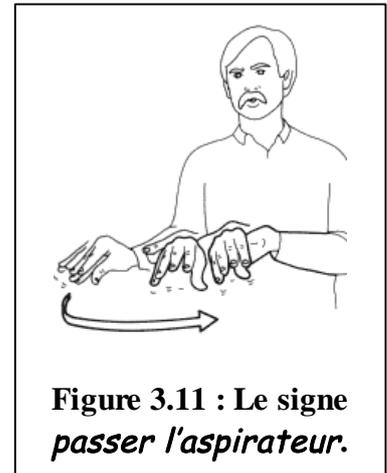


Figure 3.11 : Le signe *passer l'aspirateur*.

Il est important de noter que seule la dernière expression incluse dans la partie manuelle définit réellement celle-ci. L'utilisateur a donc toute liberté de déclarer isolément les différents objets, et rendre ainsi le code plus facile à déchiffrer, avant de les composer finalement. La définition d'une variable locale se fait sans déclaration préalable au moyen de la syntaxe :

`<nom Variable> "=" <caractéristiqueManuelle> "."`

Elle peut ensuite être référencée par son nom dans n'importe quelle autre construction de niveau supérieur ou égal dans la hiérarchie.

Exemple :

```
Sign %Rideau.
Manual:
s1 = Shift
    from: ( HandSpec config: #Clé point: #ThumbRoot at: [Shoulders FrontM:
    to: ( HandSpec point: #ThumbRoot at: [Shoulders FrontM:
Ipsi...
    move: #Natural
    weakMove: #Symmetrical.
s1 reverse.
```

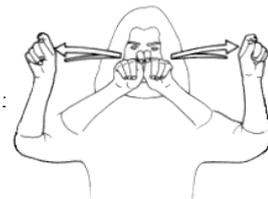


Figure 3.12 : Description du signe *rideau*.

Afin d'alléger la description du signe autant que faire se peut, des valeurs par défaut peuvent être utilisées à bien des niveaux. C'est notamment le cas lors de la spécification d'un déplacement : les caractéristiques manuelles finales sont alors calculées à partir de celles en début de mouvement, et se réduisent à une position spatiale si la configuration, l'orientation et le point manuel sont tous trois conservés :

```
"Shift "
"from: (HandSpec config:" <hc1> [ " point:" <hp1,"#Wrist"> ] " at:" <loc1>¶
    [ " ori:" <ori1,"#Natural"> ] )"
[ " to:" ( <loc2> /"(HandSpec config:" <hc2,hc1> [ " point:" <hp2,"#Wrist"> ]¶
    " at:" <loc2,loc1> [ " ori:" <ori2,ori1> ] )" ) ]
" move:" <move>
```

De même, dans la majorité des macro-déplacements, il y a continuité des caractéristiques manuelles. Ici encore, il est commode de laisser le système déterminer les valeurs omises :

```
"(Shift from:" <handSpec1> [ " to:" (<loc2> /<handSpec2>) ] " move:" <move1> ") , "¶
"Shift" [ " from:" <handSpec3,handSpec2> ] " to:" (<loc4>/<handSpec4>) " move:" <move2>
```

Dans tous les cas, la spécification explicite des valeurs reste possible. Ainsi, dans le signe *cheminée*, il convient d'effectuer la rotation du poignet dans la position acquise au terme du mouvement horizontal (au coin du manteau iconifié). Cette *supination* peut toutefois être vue comme une transition discontinue en orientation. La description du signe ne nécessite plus alors que deux déplacements successifs (figure 3.13).

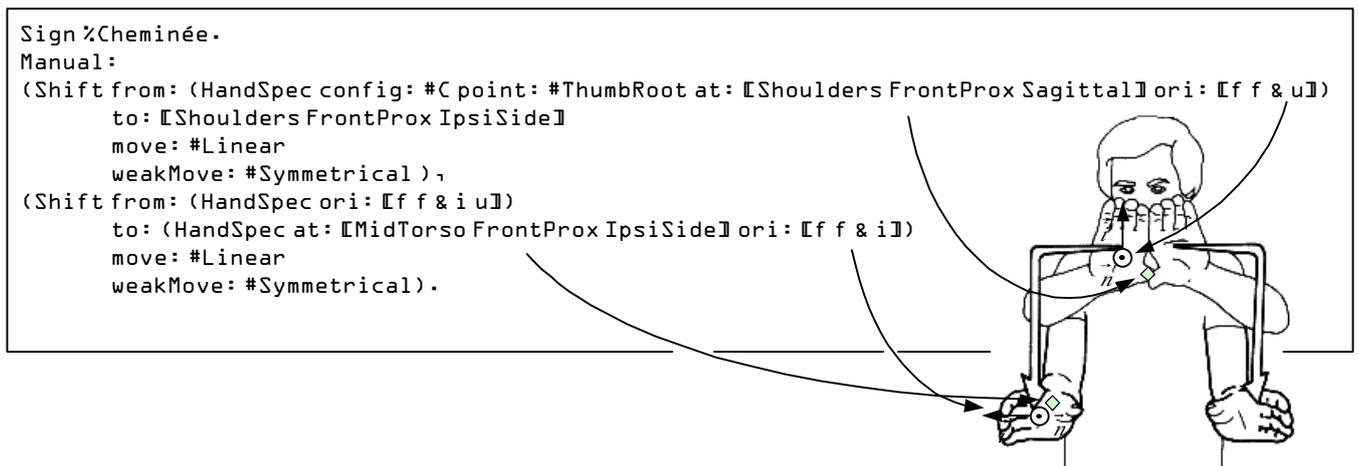


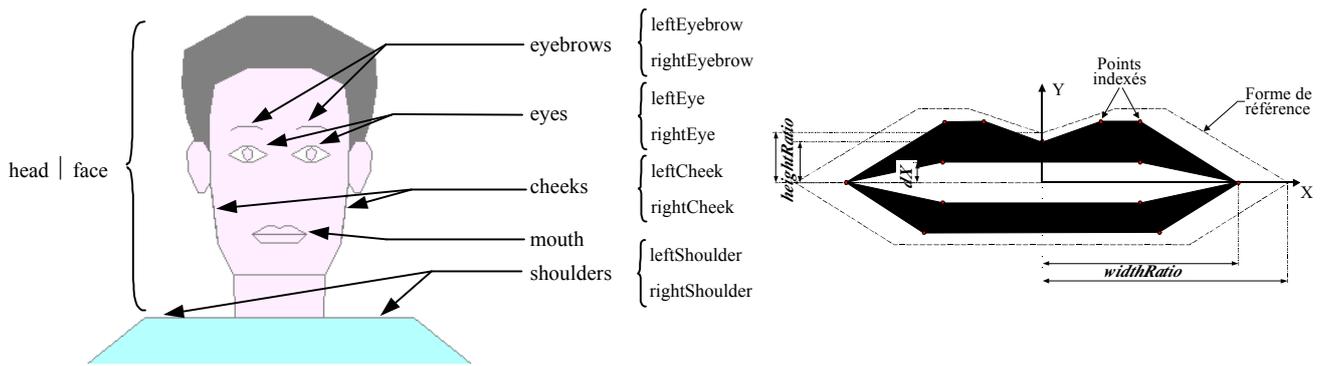
Figure 3.13 : Description du signe *cheminée*.

3.2.1.2. Partie non-manuelle.

Traduire l'expressivité n'est pas chose aisée, en raison des nombreuses composantes intervenant dans l'animation faciale. Des études indiquent cependant que, pour que la traduction soit pleinement acceptée par la communauté sourde, il est primordial qu'elle soit dotée de cette caractéristique [WID 98].

Notre système n'a évidemment pas la prétention d'égaliser les meilleurs travaux existant dans ce domaine [CAS 94, PEL 94]. Il se contente de rendre l'expression faciale présente dans le signe avec le maximum de fidélité, tout en conservant une faible complexité. La démarche adoptée est par conséquent la suivante :

- la grande majorité des primitives sont statiques ;
- les composantes du visage sont modélisées sous forme de structures polygonales planes déformables possédant chacune un comportement propre (figure 3.14). Celui-ci est simulé au moyen de points indexés susceptibles de subir des translations. Dans le cas des lèvres par exemple, les commissures sont mobiles selon deux axes, tandis que les autres points ne se meuvent que verticalement. Ceci permet d'étirer la bouche dans ces deux directions, mais aussi de représenter les formes correspondant à un sourire ou un mécontentement.



**Figure 3.14 : Eléments de contrôle du visage et du torse supérieur.
Exemple de la structure de la bouche.**

Les expressions faciales sont ainsi générées en sélectionnant, pour chaque partie du visage, la primitive au moyen d'un message du type :

`<élémentVisage> <primitive> ". "`

Exemple :

La partie NonManual : du signe *sombre* contient les lignes suivantes :

```
head bend.
eyebrows frown.
eyes halfClose.
mouth openABit.
```



Figure 3.15 : Expression faciale du signe *sombre*.

Elles fournissent la mimique faciale ci-contre, qui traduit bien la difficulté de perception.

Parmi les messages disponibles pour chaque élément, présentés dans le tableau 3.6, la plupart (dits *unaires*) n'ont pas d'arguments. Ils génèrent une combinatoire suffisamment importante pour obtenir des visages expressifs, et concernent :

- les yeux, dont l'ouverture et la direction du regard sont contrôlables ;
- les sourcils, qui peuvent se froncer ou se hausser ;
- la bouche, dont la largeur, la hauteur et l'ouverture sont paramétrables ;
- les joues, plus ou moins gonflées ou creusées – éventuellement indépendamment l'une de l'autre ;
- les épaules, qui peuvent se lever, s'abaisser, tourner selon l'axe médian du torse, ou se pencher vers l'avant et l'arrière.
- le cou, qui modifie la position de la tête, et peut également être incliné dans différentes directions – non représentées ici. Il peut même, étant donnée la complexité de la chaîne cervicale, acquérir des postures en zigzag (dans une attitude dubitative ou de répulsion par exemple).

eyes		eyebrows		mouth		cheeks		shoulders	
lookFront		neutral		neutral		neutral		neutral	
lookLeft				smile					
lookRight		doubt, anger		sad		hollow		lowerABit	
lookAside ³⁰				close					
lookUp		frown		openABit		inflate ABit		lower	
lookDown				halfOpen					
close		pain		open		inflate		raiseABit	
halfClose				fullOpen					
closeABit		raise, surprise		oShape		inflate Left		raise	
open				oClose					
fullOpen				oCloseABit		inflate Right		rotateBy: //	

Tableau 3.6 : Primitives statiques d'expressions non-manuelles.

Les caractéristiques des différentes parties du visage sont largement indépendantes. Certaines relations existent néanmoins entre l'état des joues et la largeur de la bouche ; de même, l'ouverture des yeux contraint la hauteur des sourcils, et l'état de ces derniers fait apparaître, selon les cas, des rides dans l'espace qui les sépare ou sur le front.

Ces primitives ont été utilisées pour prédéfinir un certain nombre d'expressions faciales traduisant la colère, le doute, la joie, la surprise, ... (exemple ci-contre : le vice ou la ruse). Les plus importantes sont celles marquant les différents types de clause ; elles sont présentées avec la synthèse de la phrase signée.



Figure 3.16 :
« la ruse ».

3.2.1.3. Paramètres et sélecteurs.

L'adjonction d'un paramètre à un signe se justifie lorsque ce dernier est susceptible de voir l'une de ses caractéristiques manuelles modifiée. Les verbes directionnels, dont les positions initiale et finale dépendent de l'agent et du patient référencés, en constituent la catégorie la plus importante. Mais sont également concernés les signes que nous avons dénommés *génériques*, dans lesquels seul varie l'un des *gestèmes* (en général, la configuration manuelle).

Pour introduire ce mécanisme, reprenons l'exemple des signes de la semaine répondant au critère précédent (*lundi, vendredi, samedi et dimanche*). Dans un premier temps, nous

³⁰ Le regard est dirigé vers le côté dominant du signeur (droitier dans notre cas).

définissons le signe générique, constitué d'un mouvement circulaire dans le plan *frontal*, et dont la configuration n'est connue que lors de l'évaluation :

```
Sign %Jour_semaine (jour).
Manual:
Shift from: ( HandSpec config: jour selected at: [100 50 50] ori: [f f & u])
            move: ( CircularMove ori: [b b & 0 0 -20] )
```

Le message réservé *selected* permet de sélectionner une valeur pour le paramètre symbolique *jour*. Aux configurations manuelles *L*, *V*, *S* et *D* ont pour cela été préalablement associées les sélecteurs *lundi*, *vendredi*, *samedi* et *dimanche*³¹. La partie manuelle de ces derniers signes se réduit alors à l'appel valué à *jour_semaine* :

<pre>Sign %Lundi. Manual: %Jour_semaine (lundi).</pre>	<pre>Sign %Vendredi. Manual: %Jour_semaine (vendredi).</pre>	<pre>etc.</pre>
--	--	-----------------

Notons au passage que ce mécanisme permettant de réutiliser les caractéristiques manuelles d'un autre signe via la syntaxe

"*%*" <*nom.Signe*> ["(" <*paramètres*> "]"]

n'est pas réservé au paramétrage. Il permet aussi de décrire aisément les signes composés au moyen de leur items lexicaux constitutifs, en en modifiant éventuellement certaines caractéristiques.

Tel est par exemple le cas du signe *avant-hier*³²:

```
Sign %Avant-Hier.
Manual:
MacroShift first: (%Avant>passé finalHandConfig: #AngleDroit) second: %Hier
NonManual:
head bentAside.
```

Le paramétrage des verbes directionnels, quoique relevant du même principe, est quelque peu plus complexe à utiliser. Les caractéristiques modulées sont en effet plus élevées dans la hiérarchie : ce sont cette fois les spécifications manuelles, voire les déplacements complets, qui dépendent des valeurs des paramètres. La définition de variables locales est alors particulièrement avantageuse ; il suffit ensuite d'explicitier la liste de leurs *sélecteurs* grâce au message *selectors* : . De plus, l'accord par rapport à des référents situés à droite ou à gauche de la ligne signeur-interlocuteur est calculé automatiquement à partir des caractéristiques propres à la seconde personne du singulier, comme dans le signe *donner* ci-après³³.

³¹ Ces configurations sont, comme tous les objets nécessaires à la génération du signe, regroupées dans un dictionnaire - au sens de Smalltalk - accessible à partir de toutes les méthodes (variable globale). Les associations évoquées sont réalisées à l'initialisation à partir d'un fichier. Ceci évite d'avoir à les définir dans la description du signe au moyen du mot-clé *selectors* : (voir ci-après).

³² Aucune procédure automatique de mise en œuvre des modulations spécifiques à la composition n'a pour l'instant été implantée. Une description fine du signe *avant-hier* nécessiterait donc l'utilisation de l'opérateur de réduction en amplitude.

³³ La méthode *firstPersonSingular* de la classe *Parameter* retourne simplement la collection des valeurs correspondant à la première personne du singulier, à savoir {*je*, *moi*, *l*}.

```

Sign %Donner (agent , patient).
Manual:
me = HandSpec config: #BecCanard point: #IndexTip at: [UpperTorso¶
                                     FrontContact Sagittal] ori: [b b & c u].
me selectors: Parameter firstPersonSingular.
you = HandSpec config: #BecCanard at: [LowerTorso 70 11] ori: [Supinated].
you selectors: Parameter secondPersonSingular.
Shift from: agent selected
        to: patient selected
        move: #Linear.

```

Comme on le voit, on a déclaré ici deux variables définissant la spécification manuelle pour chacun des pronoms à la première et à la seconde personne du singulier. Celle de la troisième personne (*lui, elle, un groupe situé sur la droite, ...*) est alors obtenue par rotation dans le plan horizontal (d'un angle positif ou négatif, suivant que le référent est situé à droite ou à gauche du signeur).³⁴

Ceci permet d'appeler ce même signe de différentes façons pour l'accorder avec l'agent et le patient (figure 3.17).

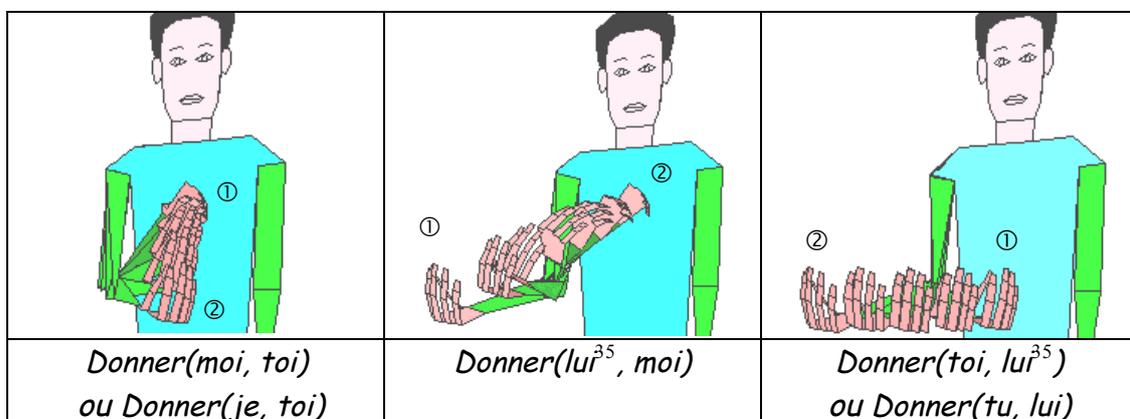


Figure 3.17 : Accord pronominal du signe *donner* au moyen de ses paramètres.

Remarques :

- L'évaluateur doit effectivement trouver une correspondance entre la valeur de chaque paramètre et l'ensemble de celles contenues dans les différents sélecteurs, faute de quoi une erreur est signalée et la génération ne peut être réalisée.
- L'ordre dans lequel les paramètres sont déclarés, d'une part, et transmis, d'autre part, est évidemment important pour établir la correspondance des valeurs formelles et réelles.

³⁴ D'autres pronoms comme *chacun, tous, ..* nécessiteraient de plus la description explicite de leurs déplacements (comme dans la figure 2.18).

³⁵ *lui* représente ici une personne ayant été localisée à droite du signeur.

3.2.2. Synthèse du signe.

A partir de la description textuelle du signe, la synthèse en est réalisée en trois étapes majeures. Dans un premier temps, le système effectue les analyses lexicale et syntaxique du texte fourni en entrée, de façon à s'assurer que celui-ci est syntaxiquement correct. Si tel est le cas, l'évaluation du signe commence alors par un pré-traitement consistant à parcourir l'arbre d'analyse produit, avant de passer la main à l'évaluateur proprement dit. Ce dernier construit en mémoire la spécification hiérarchique du signe et calcule ensuite les différentes configurations correspondantes de la chaîne articulaire. Enfin, la synthèse graphique produit les images successives par projection des points 3D, et gère leur affichage à l'écran.

Chacune de ces phases est largement indépendante des autres, ce qui garantit qu'elle peut être modifiée sans remettre en cause l'ensemble du mécanisme. Une amélioration spécifique du module graphique est par exemple aisément envisageable. La présente partie se propose d'en détailler isolément le fonctionnement et l'interface.

3.2.2.1. Analyses lexicale et syntaxique.

Comme il a été entrevu plus haut, la syntaxe de la description a été calquée pour partie sur celle de notre outil de développement, de façon à utiliser sa machine virtuelle pour l'évaluation. En conséquence, les grammaires sous-jacentes (que l'on trouve respectivement en annexe de ce mémoire et de [DIG 92]) sont assez proches. Le langage engendré par celle retenue pour les parties manuelle et non-manuelle du signe constitue en fait un sous-ensemble de celui engendré par la grammaire de Smalltalk.

Nous avons donc implanté un analyseur ayant en charge la vérification syntaxique du texte d'entrée, et dont la structure est celle que l'on retrouve dans les parties frontales des compilateurs des langages de programmation classiques [AHO 91]. Il s'agit d'un couple producteur/consommateur constitué (cf. figure 3.18) :

- de l'analyseur lexical, qui lit le flot d'entrée et en retourne les unités lexicales,
- de l'analyseur syntaxique, qui consomme ces dernières et les regroupe hiérarchiquement en un arbre d'analyse.

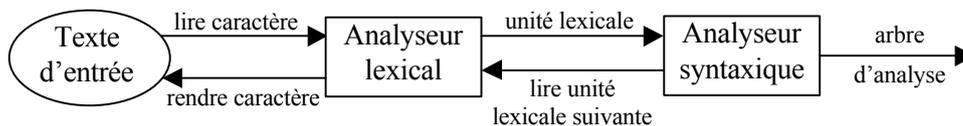


Figure 3.18 : Interface des analyseurs lexical et syntaxique.

L'analyseur lexical est construit à partir de l'automate fini déterministe décrit dans un fichier texte. Pour chaque état y sont consignés les numéros des états accessibles et les conditions de transition. Les états d'acceptation correspondent à la reconnaissance d'une unité lexicale. Ils exécutent une méthode chargée de composer l'association unité lexicale/attribut grâce aux caractères situés dans le tampon d'entrée. Si aucun état n'est accessible à partir de l'état courant,

une erreur est générée, et la position pointée transmise afin de mettre en évidence la portion incriminée du texte.

Outre la reconnaissance des identificateurs et des constantes, l'analyseur lexical permet d'ignorer les espaces, uniquement destinés à faciliter la lisibilité du texte d'entrée.

L'interaction avec l'analyseur syntaxique se réalise simplement en faisant de l'analyseur lexical une procédure qui rend les unités lexicales une à une, à la demande. L'analyseur syntaxique est chargé de déterminer si leur séquence est conforme à la grammaire que doit respecter la description du signe ou de la phrase.

La méthode d'analyse choisie est ascendante de type LR (l'arbre est bâti en partant des feuilles et en remontant vers la racine) et procède par décalages d'états dans une pile de travail et réductions successives des chaînes vers l'axiome de la grammaire. Deux tables d'analyse *Action* et *Successeur*, qui déterminent à chaque étape l'opération à réaliser, sont créées en utilisant l'algorithme SLR (LR simple) fourni dans [AHO 91].

Ces deux outils d'analyse lexicale et syntaxique sont tout à fait génériques et donc aisément réutilisables à d'autres fins. Il suffit pour cela de modifier les fichiers (de type texte) en décrivant le graphe de transition et la grammaire.

3.2.2.2. Evaluation du signe.

Dans le cas où le texte comporte une incorrection syntaxique, l'analyseur affiche un message d'erreur sur la barre d'état de l'éditeur et met le terme correspondant en surbrillance. Dans le cas contraire, il retourne l'arbre syntaxique qui illustre visuellement comment l'axiome se dérive en la chaîne descriptive du signe.

L'évaluateur prend alors le relais. Dans un premier temps, une détection des identificateurs inconnus est effectuée, grâce à un parcours de l'arbre (aucune table de symboles n'est en effet créée lors de l'analyse syntaxique). Les seuls identificateurs acceptés sont les noms des classes utilisées pour coder la représentation hiérarchique du signe (cf. annexe 2.1), ainsi que les paramètres apparaissant dans l'en-tête de la description. Les variables locales sont également détectées et mémorisées lors de cette phase.

Si l'opération précédente est couronnée de succès commence alors l'évaluation à proprement parler. Celle de la partie manuelle résulte en une collection de macro-déplacements (classe `MacroShift` ou une de ses sous-classes, selon le type de répétition)³⁶. Celle de la partie non-manuelle génère une instance (de la classe `NonManual`) décrivant les aspects statiques et dynamiques correspondants. Les éventuelles flexions entrent également en ligne de compte à ce niveau, de même que les caractéristiques non-manuelles héritées de la phrase.

³⁶ Signalons que tout signe, même paramétré, peut être évalué en-dehors de tout contexte de discours (l'utilisateur doit alors simplement fournir les valeurs des paramètres requis).

Le résultat global consiste en un objet dont la structure correspond à celle décrite au chapitre 2. La figure 3.19 représente l'exemple du signe *s'endormir*. Chaque type de primitive y figurant a donné lieu au développement d'une classe d'objets.

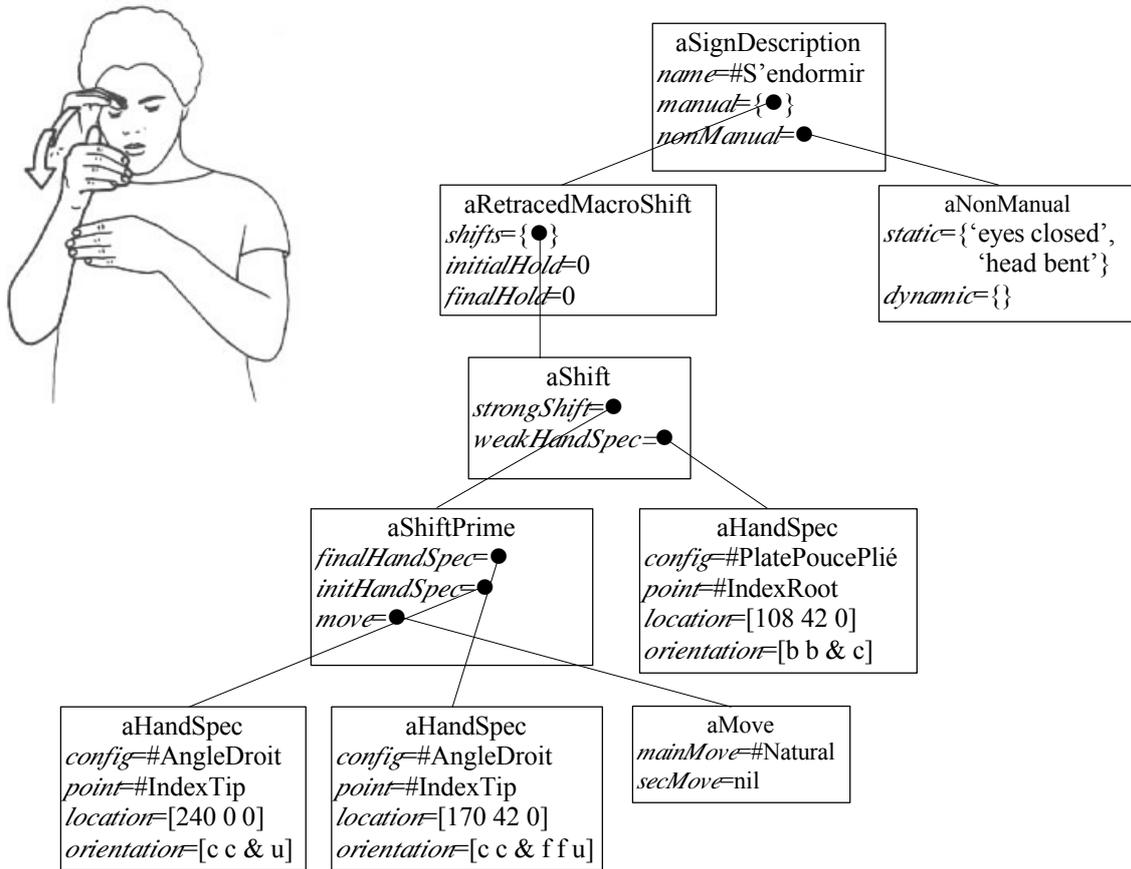


Figure 3.19 : Structure objet intermédiaire du signe *S'endormir*.

Lors de l'évaluation du signe, le système doit être très vigilant à l'ordre des opérations réalisées. En particulier, si un point corporel *contralatéral* est utilisé comme localisation (ainsi le milieu de l'index dans le signe de la figure 3.20), il faut s'assurer que le modèle articulé du signeur virtuel a bien été intégralement mis à jour avant de pouvoir effectivement calculer cette position.

```

Sign %Cimetière.
Manual:
s1=Shift from: (HandSpec config: #Index point: #IndexMid at: [Shoul...
to: (HandSpec point: #IndexMid at: #IndexMid)
move: #Natural
staticWeak: (HandSpec config: #Index at: [113 50 80] ori: [c...
s1 repeat: 3 times from: [Shoulders FrontProx ContraEdge].
  
```



Figure 3.20 : Description du signe *Cimetière*.

Par ailleurs, certaines propriétés implicites découlant de la description du signe ont été incluses dans le code même. Il s'agit, pour reprendre l'exemple précédent du signe *cimetière*, de déplacer la main de base lorsque la main dominante agit sur celle-ci et entre en contact avec un de ses points.

3.2.2.3. Synthèse graphique.

Le module de synthèse graphique est subdivisé en deux phases distinctes. Il doit d'abord calculer les points 3D des différents segments corporels, avant de pouvoir produire les images par projection.

La première de ces phases se base sur l'objet structuré généré par l'évaluation du signe. Pour tous les macro-déplacements, les angles du modèle sont calculés, puis la collection de points correspondant à chaque posture de la chaîne articulaire. Il convient évidemment de prendre en considération le type de répétition associée. Ainsi, pour une répétition simple, les images sont reproduites à l'identique. Il est donc nécessaire de ne les générer qu'une seule fois (ce qui obère moins les ressources système); cela n'est pas le cas pour – entre autres – une répétition à partir d'un point décalé. Les caractéristiques non-manuelles dynamiques doivent également être appliquées à chaque itération d'évolution du modèle.

Pour visualiser graphiquement les segments, nous avons choisi des surfaces gauches polygonales. Bien entendu, il peut en résulter des distorsions visibles dans les segments ayant subi une rotation axiale, ou d'autres aléas inhérents à leur nature surfacique (par exemple, des imprécisions minimales quant à la définition d'un point du segment). Ceci représente cependant un bon compromis entre le temps de calcul – faible par rapport à celui d'une réelle synthèse volumique – et le niveau de perceptibilité – bien meilleur qu'avec une représentation en fil de fer.

Dans un second temps sont calculées les images destinées à l'affichage. A partir de la collection de points 3D représentant l'animation, cinq étapes mènent à l'image finale :

- ① Projection des segments sur le plan de l'écran.
- ② Elimination, le cas échéant, des segments invisibles du visage.
- ③ Affectation des couleurs en fonction de la direction de la normale au segment par rapport à celle de la source de lumière. Pour cela, on multiplie les composantes RVB de sa couleur initiale par le coefficient indiqué sur la figure 3.21.

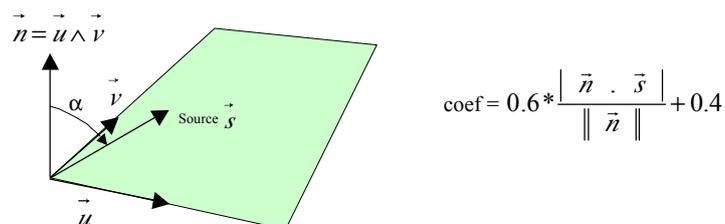


Figure 3.21 : Eclairage d'une surface élémentaire

- ④ Tri des segments suivant l'ordre dans lequel ils doivent être affichés, déterminé par la distance de leur centre de gravité au point d'observation. Cette méthode, moins sophistiquée que celle du Z-buffer mais aussi moins gourmande en puissance de calcul, donne néanmoins des résultats tout à fait satisfaisants.
- ⑤ Affichage des segments dans l'ordre obtenu.

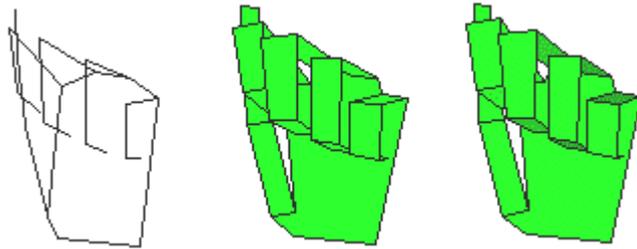


Figure 3.22 : Représentations graphiques du *A* de la dactylogogie.

Cette procédure incluant l'élimination des parties cachées et l'ombrage des surfaces fournit une représentation graphique dans laquelle la position et l'orientation des segments sont immédiatement identifiables. Cela est crucial dans la perception de la main, qui comporte de nombreuses facettes (cf. figure 3.22). La distinction des segments par des couleurs initiales distinctes (telles que l'articulateur dominant en rouge, la main non-dominante et le torse dans des couleurs différentes) permet d'en souligner encore les contours.

3.2.3. Spécification et synthèse de la phrase signée.

Etant désormais en mesure de synthétiser les signes en forme de citation, il nous reste à examiner comment spécifier les flexions non-manuelles et grammaticales que subissent ceux-ci lorsqu'ils sont intégrés au sein du discours signé.

Après une présentation générale des attributs de la phrase, dotée de ses marqueurs globaux, nous exposons la mise en œuvre de processus modulateurs sur les signes, en détaillant tout spécialement l'établissement et l'utilisation des localisations.

3.2.3.1. Spécification du discours.

De même que pour le signe, et pour des raisons identiques, nous avons souhaité donner à la phrase une forme textuelle. Cela permet notamment son stockage dans un fichier texte standard.

Les signes sont inclus dans la phrase en invoquant simplement leur nom, qui peut comporter les caractères spéciaux suivants :

- le tiret (-) pour les composés, comme en français écrit (*avant-hier*),
- le « souligné » () pour les expressions dont l'équivalent signé constitue une seule unité lexicale (*faire_la_vaisselle*),
- le « supérieur » (>), qui introduit une précision sémantique nécessaire pour discriminer deux mots possédant la même graphie (*arriver>endroit, arriver>événement*).

Le nom du signe est suivi des éventuels paramètres entre parenthèses, parmi lesquels on distingue d'une part ceux figurant dans l'en-tête du signe, et qui doivent être nécessairement renseignés, et d'autre part ceux, facultatifs, qui correspondent à des flexions non-manuelles, de localisation ou autres.

Lorsqu'un signe risque d'être inconnu de l'interlocuteur, ou qu'aucun signe conventionnel n'existe pour un nom donné – en particulier pour les noms propres –, le signeur utilise l'alphabet dactylogique pour épeler ce mot. Le système de génération de la phrase a donc été doté de cette possibilité : en faisant précéder un mot du caractère %, l'utilisateur spécifie que celui-ci ne se trouve pas dans le dictionnaire et doit être épelé.

Du point de vue pratique, les lettres ainsi formées ont été implantées comme une sous-classe des macro-déplacements (`FingerSpelledLetter`), l'ensemble du mot étant équivalent à la partie manuelle d'un signe ordinaire. Cela se justifie par le caractère dynamique de certaines lettres, marquées par des changements de position et/ou d'orientation, et qui rend inadaptée leur description par une simple posture manuelle (par exemple le *J* dans la figure 3.23)³⁷. Les courts temps de pause nécessaires à l'identification des lettres, assimilés à des tenues, plaident également en faveur de la ressemblance avec les macro-déplacements.

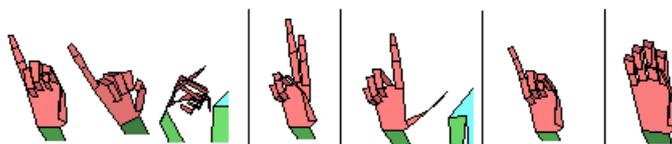


Figure 3.23 : Epellation manuelle du mot « Julie ».

Toutes les lettres de la *dactylogogie* française peuvent être aisément décrites en utilisant une localisation (au niveau de l'épaule, sur le côté) et une orientation par défaut (face à l'interlocuteur). Si certaines (*M*, *P*) possèdent une orientation différente et que d'autres en changent (*J*), seules *Y* et *Z* nécessitent des déplacements du poignet, dont il suffit de donner les vecteurs relatifs.

Parmi les marqueurs globaux ont été implantés ceux qui caractérisent le type des clauses. Il sont introduits dans la description de la phrase sous forme de codes d'échappement au moyen de la barre oblique inverse (`\`), suivie de trois lettres au plus, puis du nombre de signes concernés. Il s'agit essentiellement de marqueurs non-manuels, dont certains sont dynamiques (par exemple, le hochement de tête pour exprimer la négation, ou l'avancée progressive des épaules pour l'impératif).

Le tableau 3.7 reprend les différents marqueurs rencontrés en langue des signes française, et la figure 3.24 donne un exemple illustratif d'une phrase signée complète. Celle-ci inclut une clause conditionnelle, suivie d'une négative couvrant trois signes, puis d'une clause déclarative caractérisée par une expression neutre du visage.

³⁷ La langue des signes britannique utilise même un alphabet dans lequel les deux mains sont mobiles.

Type de clause	Négative	Assertive	Question oui/non	Question
Code	\NO	\YES	\YNQ	\WHQ
Exemple				
Type de clause	Conditionnelle	Thème	Impérative	
Code	\CND	\THE	\IMP	
Exemple				

Tableau 3.7 : Marqueurs de clauses non-manuels.

ICND2 jour_semaine (vendredi) il_pleut *IWO3* je rester maison aller bibliothèque je

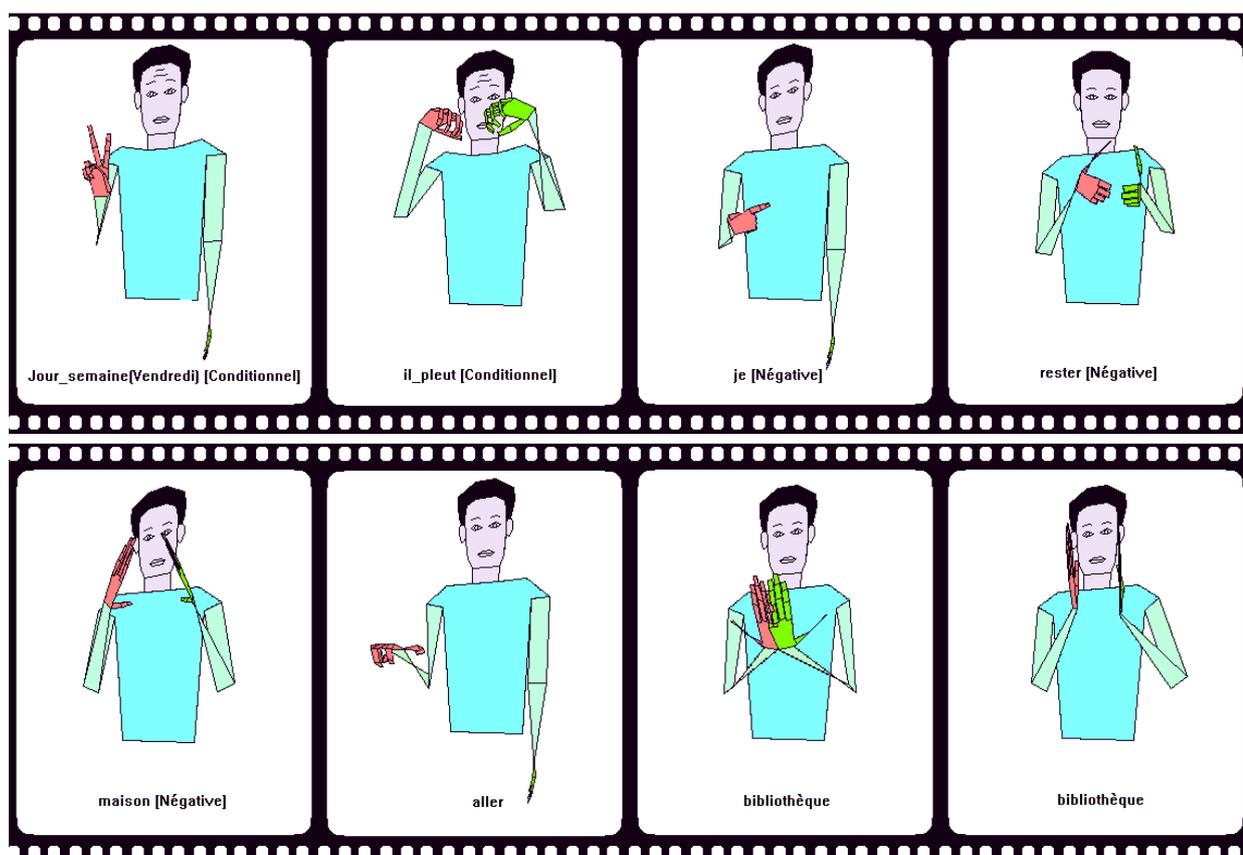


Figure 3.24 : Génération d'une phrase signée à partir de sa description textuelle.

3.2.3.2. Localisations et références.

Comme il a été déjà suggéré, nous avons choisi d'unifier les mécanismes de paramétrage et de flexion des signes en une même notation, de façon à optimiser la lisibilité de la phrase. L'établissement des localisations et leurs référenciations postérieures utilisent toutes deux la notation parenthésée.

Les paramètres réservés 'Droite' et 'Gauche' permettent de situer une personne, un objet ou un groupe sur la scène de narration. Le système procède à la localisation grâce à la technique indiquée dans l'attribut correspondant du signe :

1. Décalage
2. Pointage postsigné
3. Pointage simultané
4. Orientation du corps
5. Orientation du corps et du regard
6. Nom préposé
7. Nom postposé

Le tableau 3.8 ci-dessous propose quelques exemples de localisations.

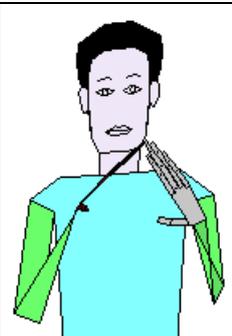
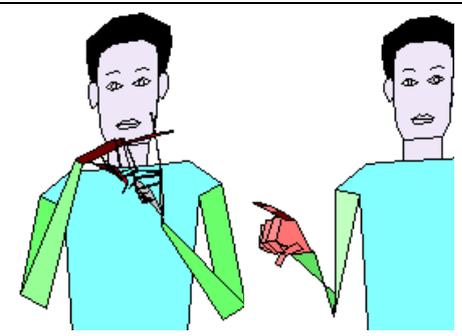
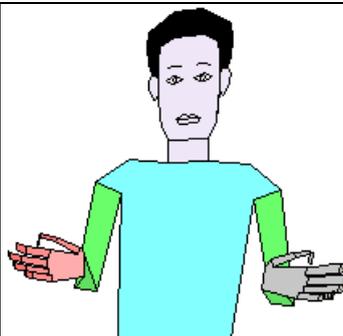
			
1. Maison(gauche)	2. Cimetière(droite)	3. Garçon(droite)	4. Cheminée(gauche)

Tableau 3.8 : Exemples de localisations.

Une fois mémorisée la valeur (i.e. le nom du signe) dans l'une des deux variables globales *droite* et *gauche*, celle-ci peut être ensuite employée comme référent, notamment dans les verbes directionnels. Il faut pour cela transmettre cette valeur comme paramètre aux signes qui utilisent cette localisation. En guise d'illustration, considérons l'énoncé :

Julie m'a téléphoné. Elle sera en retard

Nous le traduisons par la séquence de mots-signes suivante :

```
%Julie(droite) téléphoner(Julie,moi) fini.
Elle(Julie) en_retard arriver.
```

Comme on peut le constater, la localisation est d'abord établie (au moyen du pointage postsigné, qui est la technique par défaut pour les signes épelés). Le verbe directionnel *téléphoner* et le déictique *elle* référencent ensuite la personne désormais située à la droite du signeur. Ainsi que le montre la figure 3.25, ces deux signes sont alors fléchis, le premier pour tenir compte de l'auteur de l'appel téléphonique et de son destinataire, le second pour désigner le sujet de la proposition terminale.

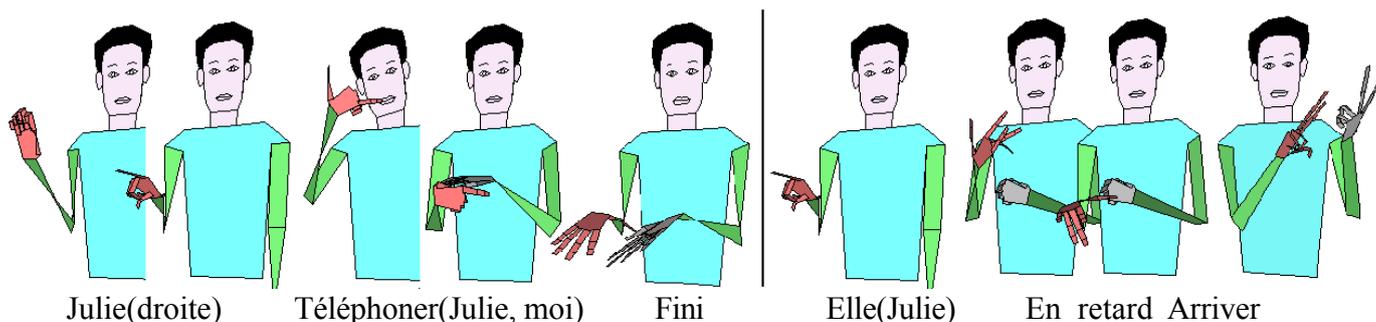


Figure 3.25 : Exemple d'utilisation du mécanisme de localisation.

3.2.3.3. Autres flexions sur les signes

Ainsi qu'il a été présenté à la fin du chapitre 2, les signes sont susceptibles de subir de nombreuses flexions, tant spatio-temporelles que non-manuelles. C'est pourquoi a été défini un ensemble de tables de hachage³⁸ correspondant aux divers opérateurs introduits. Outre les différentes techniques de localisation, celles-ci contiennent :

- les flexions affectant la vitesse et la dynamique du signe,
- les modulations en répétition et les flexions de redimensionnement, qui toutes deux appellent des méthodes propres aux macro-déplacements (à savoir, respectivement :

repeat: <n> times et resizeFrom $\left\{ \begin{array}{l} \text{Start} \\ \text{Center} \\ \text{Stop} \end{array} \right\}$ By: <factor>)

- les modulations des temps de tenue,
- les expressions faciales, définies comme des collections de primitives modifiant chacune un élément précis du visage (exactement comme pour la description non-manuelle d'un signe).

Un niveau supérieur de description est de plus proposé, de façon à regrouper en une même entité plusieurs primitives flexionnelles de nature différente (spatiale, dynamique ou faciale). Ces « macro-flexions » possèdent une valeur adverbiale de manière, et servent notamment à intensifier la durée ou la fréquence d'une action. Elles sont particulièrement adaptées pour encoder les aspects flexionnels complexes identifiés par Klima et Bellugi (voir annexe 1.4), dont certains ont été formalisés en tant que phénomènes phonologiques par Liddell et Johnson³⁹.

³⁸ Le terme de *dictionnaire* a ici été évité (bien que la classe correspondante en Smalltalk soit effectivement *Dictionary*) pour prévenir toute confusion avec le dictionnaire de signes.

³⁹ Il suffit pour cela de disposer des règles de réécriture correspondantes, et d'un mécanisme capable de les analyser. Toutefois, pour prendre en compte l'ensemble des aspects flexionnels décrits par les auteurs cités, il faudrait être en mesure de spécifier aussi les caractéristiques des transitions lorsque le mouvement est répété.

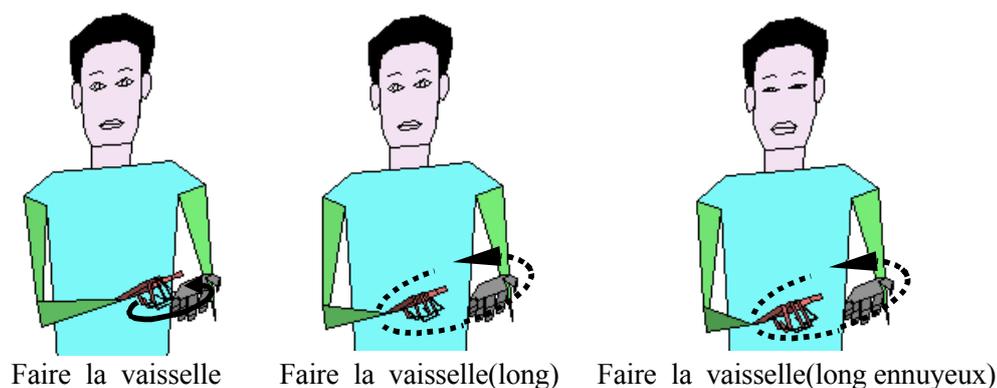


Figure 3.26 : Différentes formes de flexions sur un même signe.

Sur la figure 3.26 est présenté un exemple d'application de différentes flexions sur le signe *faire_la_vaisselle*. Dans la forme de base, la main dominante décrit un petit cercle sur la paume de la main de base, qui elle reste fixe. Le modificateur `long` est une macro-flexion consistant à la fois à agrandir le rayon d'un facteur 2, et à ralentir le mouvement (en produisant un nombre plus élevé d'images). Dans la troisième forme proposée, il est combiné avec l'expression faciale `ennuyeux` pour exprimer que cette action est longue et pénible⁴⁰.

On peut aussi remarquer que, pour garder la cohérence de la notation et la lisibilité de la phrase, les flexions sont, cette fois encore, transmises comme des paramètres⁴¹.

3.3. Présentation, évaluation et utilisation du logiciel.

A présent que les différentes fonctionnalités ont été introduites, nous allons examiner comment celles-ci s'organisent dans la structure globale du logiciel. Ce dernier a par ailleurs fait l'objet d'une procédure d'évaluation, dont les résultats sont également détaillés dans cette partie. Pour finir, nous décrivons un exemple d'utilisation des signes synthétiques, à savoir leur intégration dans l'application LAC présentant des corpus lexicaux.

3.3.1. Présentation du logiciel.

Dans cette partie est exposé le logiciel de synthèse que nous avons développé, d'abord de façon globale pour en appréhender l'organisation des composants essentiels. Y sont ensuite abordés de manière plus détaillée l'éditeur et son interface graphique, le module de visualisation 3D, et enfin le dictionnaire de signes.

⁴⁰ Toute ressemblance avec l'opinion de l'auteur de ces lignes sur le sujet serait purement fortuite.

⁴¹ Noter tout de même l'absence de virgule séparatrice lorsque plusieurs flexions de ce type sont appliquées. Si le signe est effectivement paramétré, il est de plus indispensable de placer ses arguments en tête entre les parenthèses.

3.3.1.1. Présentation générale.

Du point de vue de l'utilisateur, la synthèse de la phrase signée s'articule en trois étapes principales :

- dans un premier temps, chaque signe utilisé doit être complètement spécifié et stocké dans le dictionnaire. L'éditeur de signes permet d'évaluer isolément la description – en fournissant éventuellement les paramètres requis – de façon à affiner et valider celle-ci ;
- l'utilisateur écrit ensuite la phrase qu'il souhaite synthétiser dans l'éditeur correspondant ;
- il en lance enfin l'évaluation.

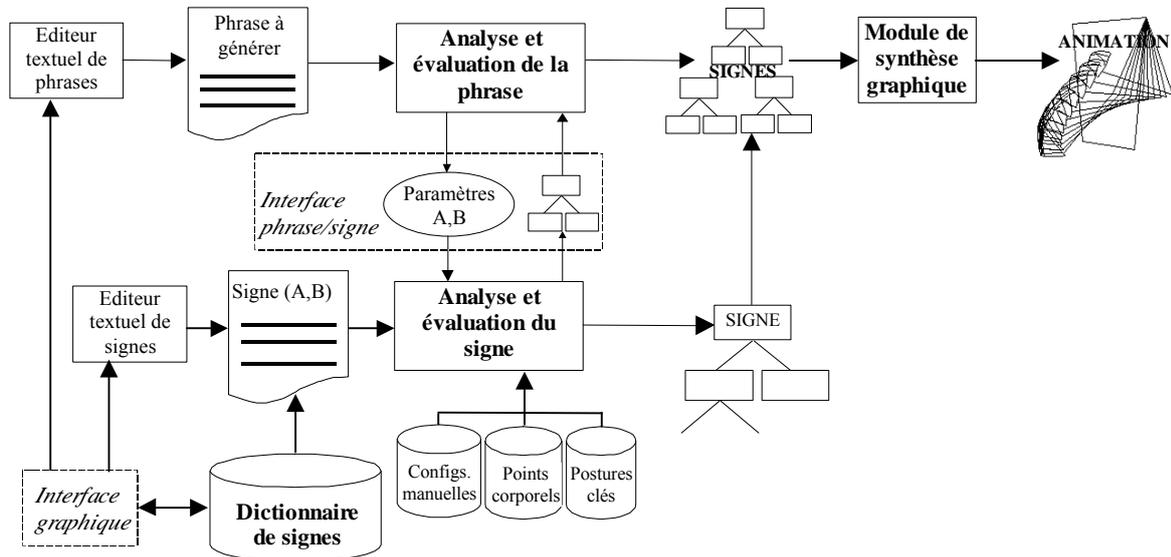


Figure 3.27 : Schéma synoptique du logiciel.

Comme il est explicité sur la figure 3.27, cette dernière phase déclenche l'évaluation de chacun des signes inclus dans la phrase, en lui fournissant si nécessaire la valeur des paramètres ou des flexions. En l'absence d'erreur dans la syntaxe et l'interprétation tant de la phrase que des différents signes, l'ensemble ordonné des structures hiérarchiques est alors produit. Celui-ci est transmis au module de synthèse graphique, qui le traduit en une collection d'images affichées en séquence à l'écran.

Remarque : Dans l'évaluation du signe, les configurations manuelles sont considérées comme des primitives et, de même que les postures du bras aux différents points-clés de l'espace, sont utilisées directement sans être recalculées.

3.3.1.2. L'éditeur et son interface graphique.

Les outils de spécification de la phrase et du signe se présentent, dans leur forme de base, comme de simples éditeurs de texte dotés de menus permettant de lire et de sauvegarder leur contenu dans un fichier et offrant les commandes d'édition classiques (copier/couper/coller, annuler, ...), ainsi que d'un item pour en lancer l'évaluation.

La barre d'état affiche en outre divers messages à l'adresse de l'utilisateur. Elle permet de suivre la progression du calcul, et signale les éventuelles incorrections syntaxiques ainsi que les erreurs survenant lors de l'interprétation (messages inconnus, points de l'espace hors de portée, etc.). Les termes incriminés sont mis en évidence pour en faciliter la correction (figure 3.28)

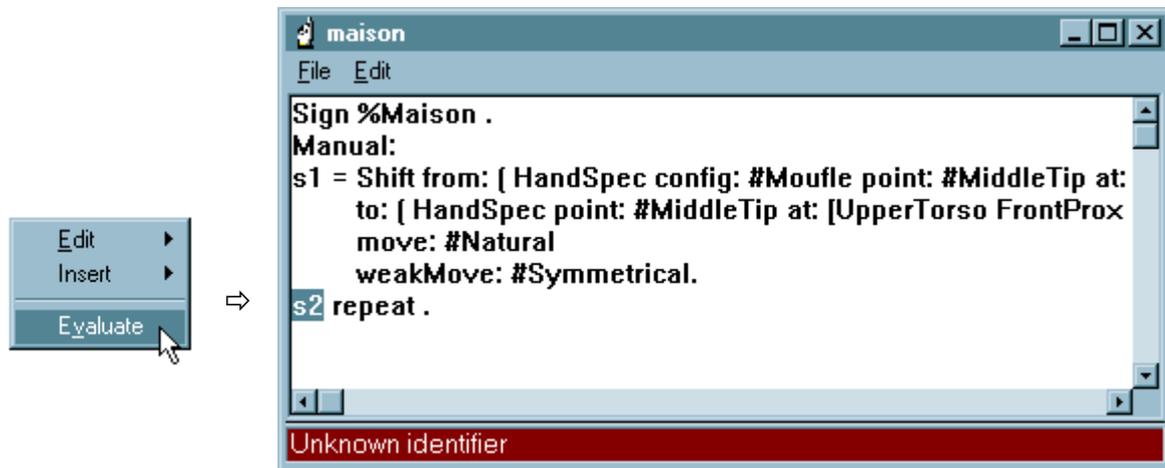


Figure 3.28 : Evaluation du signe et détection des erreurs.

Afin de faciliter la tâche d'édition et réduire les risques d'erreurs lors de l'évaluation de la partie manuelle du signe, nous avons développé une interface graphique qui en génère automatiquement le code descriptif. Celle-ci respecte évidemment la structure hiérarchique de spécification.

Elle se compose d'une première fenêtre (figure 3.29) permettant d'ajouter, de modifier ou de supprimer des macros-déplacements et les déplacements correspondants, ainsi que de définir les caractéristiques de chacun en termes de tenue et de répétition.

La définition proprement dite des déplacements est effectuée dans une suite de fenêtres enchaînées, similaires aux assistants que l'on trouve dans divers logiciels professionnels. Cela permet de progresser ou de revenir sur ses pas dans son travail (figure 3.30).

Ainsi, la première étape consiste à choisir la structure de base du déplacement. En fonction de ce choix, l'utilisateur est alors invité à spécifier la ou les primitive(s) de déplacement, ceci à l'aide d'outils adaptés dans lesquels il peut visualiser l'effet de ses choix successifs sur la posture du signeur virtuel (voir figure 3.31).

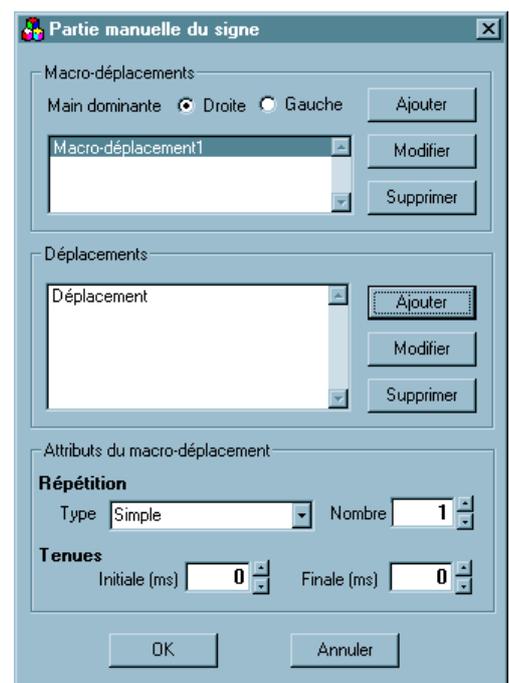


Figure 3.29 : Fenêtre principale de l'interface graphique d'édition de signes.

Au cas où les deux articulateurs sont impliqués dans le signe, il convient également de préciser la relation unissant leurs déplacements respectifs (type et plan de symétrie), ou bien les deux primitives de déplacement s'il n'existe aucune relation.

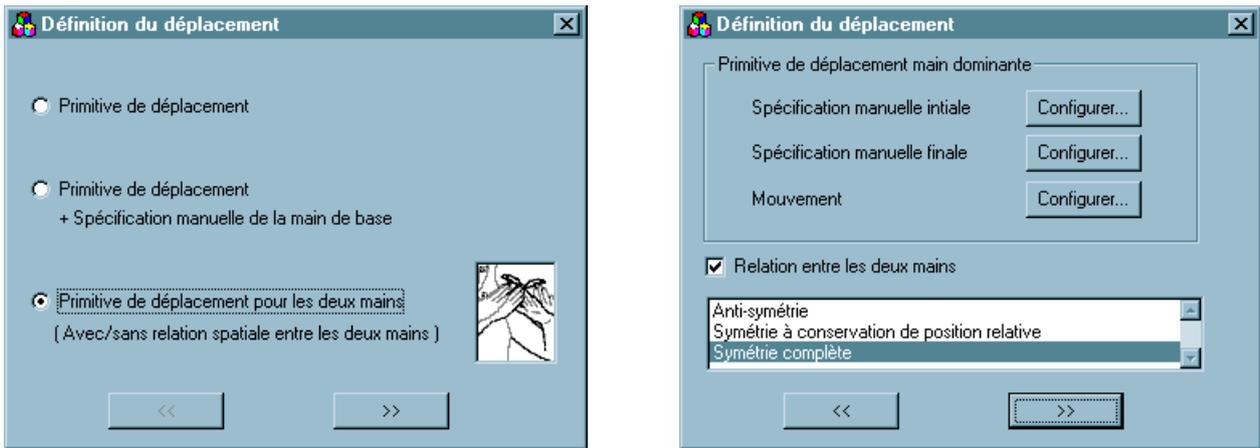


Figure 3.30 : Spécification de la structure du déplacement.

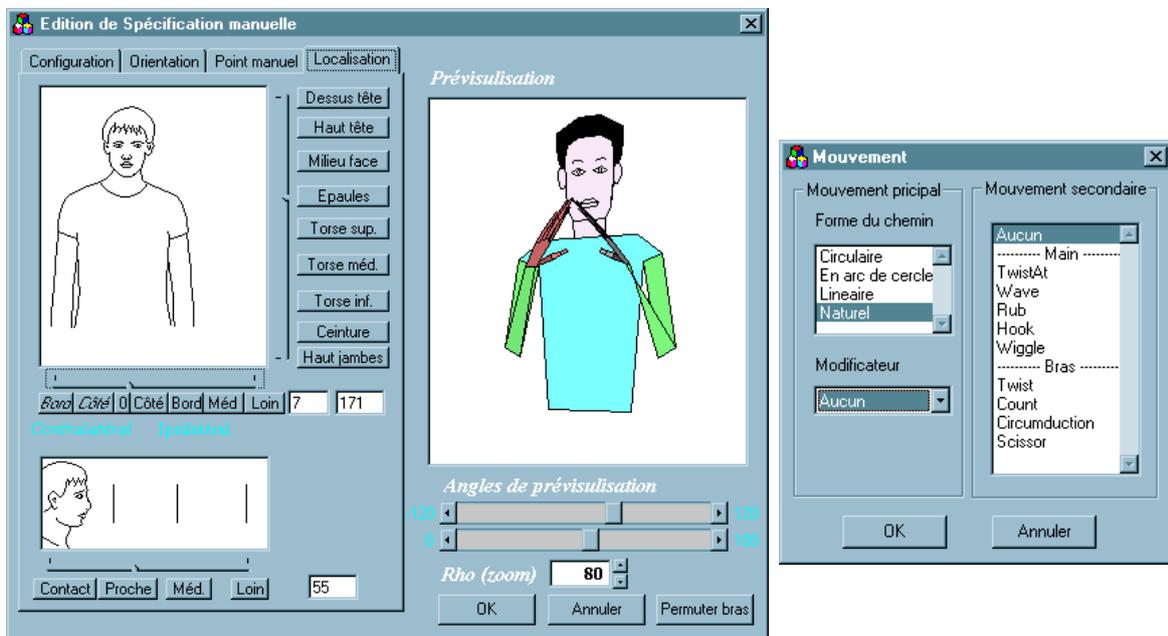


Figure 3.31 : Spécification d'une primitive de déplacement (spécification manuelle et mouvement).

Par une démarche progressive et logique, l'utilisateur spécifie aisément les différentes caractéristiques du signe. Le logiciel convertit ensuite la structure bâtie en mémoire par ce biais en sa représentation textuelle destinée à être insérée comme description de la partie manuelle du signe. Lors de l'évaluation, c'est exactement l'opération inverse qui est réalisée. Pour garantir cette correspondance biunivoque, un soin tout particulier a été porté lors de l'écriture des méthodes correspondantes.

3.3.1.3. Le module de visualisation 3D.

L'animation générée se compose d'une série d'images avec, pour chacune, les coordonnées spatiales des sommets de tous les polygones composant le signeur. Ce n'est qu'au moment de tracer effectivement ces figures que leurs points sont projetés sur le plan de vision, ce qui permet de changer si besoin l'angle de vue de la caméra pour mieux en apprécier tel ou tel détail.

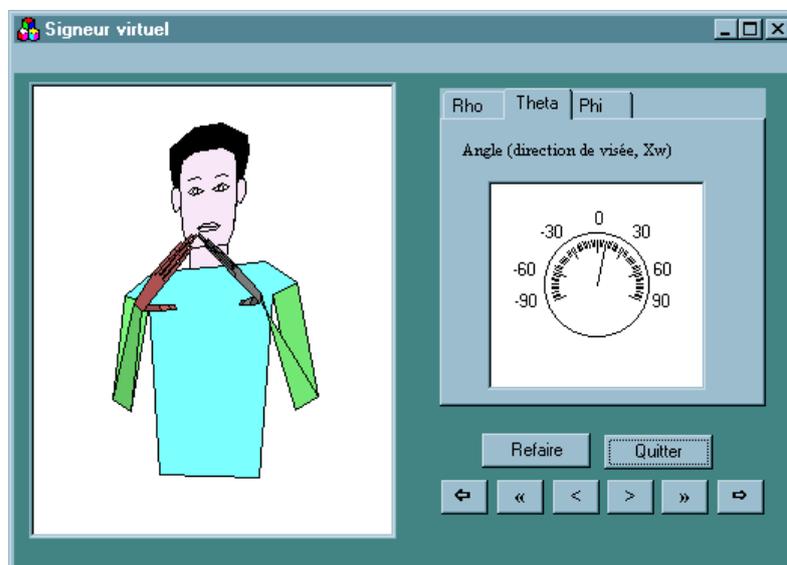


Figure 3.32 : Fenêtre de visualisation de l'animation synthétique.

La fenêtre présentant les signes synthétiques (figure 3.32) offre cette possibilité sous forme de cadrans gradués (un pour l'azimut, un pour l'élévation et un pour la distance à la caméra). En outre, l'animation peut être rejouée, et son film rembobiné ou déroulé pas à pas grâce à une série de boutons rappelant ceux des appareils audiovisuels grand public.

3.3.1.4. Le dictionnaire de signes.

Les signes sont regroupés dans un dictionnaire visant à en faciliter la gestion. La structure de celui-ci est classique, avec une clé alphabétique à laquelle est associé un ensemble de valeurs. La clé est constituée du nom complet du signe (y compris, le cas échéant, les caractères spéciaux '_', '-' et '>') ; elle identifie chaque entrée de manière unique et n'accepte donc pas les doublons. Les champs associés sont présentés dans le tableau 3.9 sur un exemple. Il s'agit notamment d'une liste (champ *synonymes*) de traductions françaises acceptables outre la clé, et de la technique de localisation à utiliser préférentiellement pour ce signe.

Ces différents champs sont pris en compte lors de l'évaluation de la phrase signée, ce qui permet par exemple d'utiliser indifféremment l'un des synonymes, ou de connaître les flexions admises pour un signe donné.

Clé	'cheminée'
Code IVT	38
Thème(s)	1 [La maison]
Description textuelle	'Sign %Cheminée . Manual: (Shift from:(HandSpec config:#C point:#ThumbRoot at:[Shoulders FrontProx Sagittal] ori:[f f & u]) to:[Shoulders FrontProx IpsiSide] move:#Linear weakMove:#Symmetrical), (Shift from:(HandSpec ori:[f f & i u]) to:(HandSpec at:[MidTorso FrontProx IpsiSide] ori:[f f & i]) move:#Linear weakMove:#Symmetrical).'
Synonymes	#() [Aucun]
Précisions sémantiques	nil [Non renseigné]
Classe de lexème	1 [Substantif]
Technique de localisation	1 [Déplacement du signe]
Flexion(s) possible(s)	#(#(Grande Large Big))
Traduction(s) anglaise(s)	#(Chimney Fireplace)
Remarques	nil [Non renseigné]

Tableau 3.9 : L'entrée *cheminée* du dictionnaire de signes.

Remarque : Les traductions en anglais présentes dans le dictionnaire ne se rapportent pas au signe, mais à son (ses) équivalent(s) en français. Il ne s'agit là que d'un artifice pour présenter ces travaux sur la LSF dans la langue de Shakespeare, indépendamment de la forme réelle en ASL (et *a fortiori* en langue des signes britannique).

Le dictionnaire est lui aussi doté d'une interface graphique, dont l'un des composants permet l'édition d'une entrée (en proposant les valeurs possibles pour les différents champs sous forme de listes déroulantes), et l'autre facilite la sélection d'un signe dans la base de données. Pour cela, l'utilisateur a le choix entre une recherche alphabétique directe, ou selon le code, le thème ou la classe du lexème (figure 3.33).

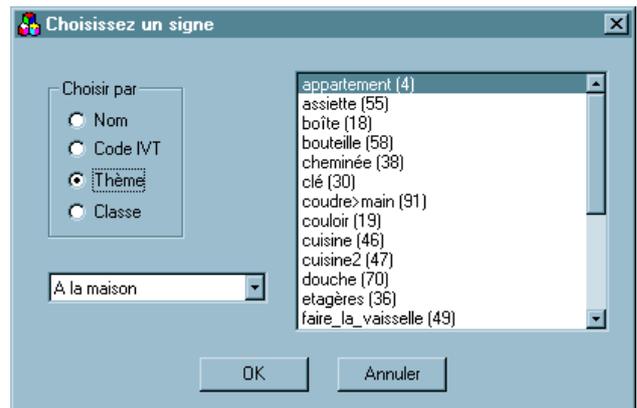


Figure 3.33 : Sélection d'un signe.

Le dictionnaire est stocké à la fois en mémoire volatile et sur le disque rigide pour assurer la pérennité des données. Il lui correspond un fichier unique qui est, comme dans toute base de données correctement conçue, remis à jour dès qu'une description de signe est validée. On évite ainsi au maximum la perte d'information en cas d'incident technique. Ce mécanisme de sauvegarde est illustré sur la figure 3.34, qui reprend l'organisation globale de l'interface graphique du système.

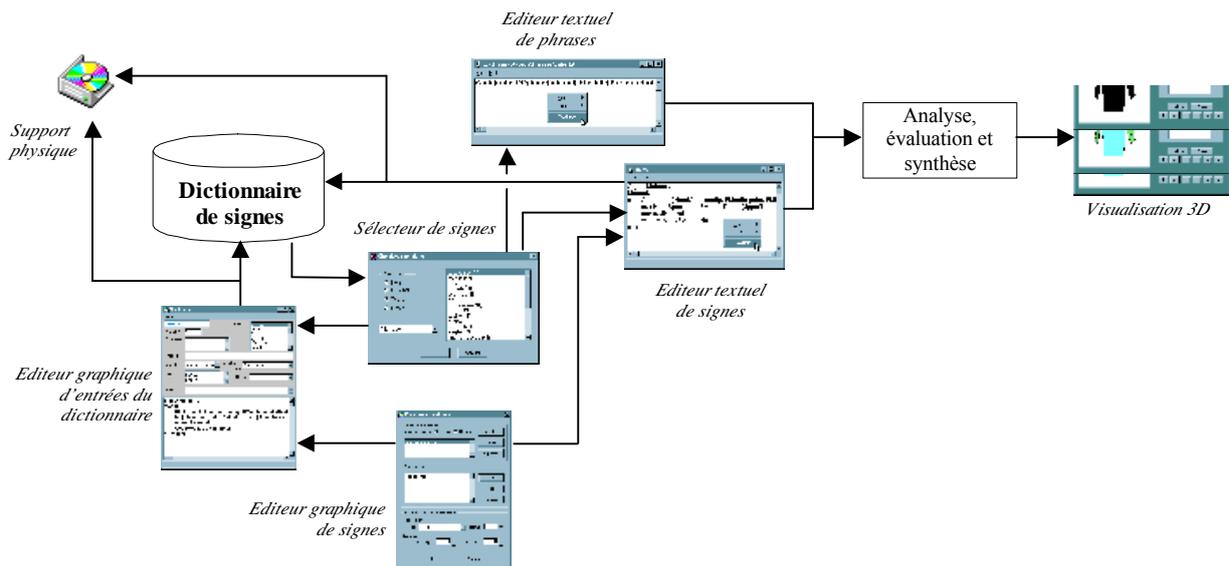


Figure 3.34 : Interface graphique du logiciel et relations avec le dictionnaire de signes.

Pour l'heure, la base contient une bonne centaine de signes sur lesquels nous nous sommes appuyés pour étayer notre propos tout au long de ce mémoire. A titre indicatif, le fichier associé occupe une taille de 30 kilo-octets environ, ce qui est conforme avec notre objectif de compacité des données à transmettre. Nous revenons sur ces considérations dans la conclusion de ce mémoire ; elles sont en effet de première importance quant aux perspectives d'utilisation du système.

3.3.2. Evaluation des signes synthétiques et application.

Dès lors que la génération des signes synthétiques est parvenue à un niveau suffisant d'élaboration, nous avons souhaité soumettre les animations produites à une procédure de validation par des personnes maîtrisant la langue des signes.

Cette partie présente d'abord le protocole mis sur pied à cette fin, puis les enseignements que les résultats ont permis d'en tirer. Pour finir, nous exposons, à travers l'intégration au logiciel LAC, un exemple concret d'utilisation qui illustre parfaitement tout le parti à tirer d'un tel système de synthèse.

3.3.2.1. Mode opératoire.

Le protocole expérimental d'évaluation a été conçu de façon à pouvoir effectuer la validation à distance et de manière autonome. Pour cela, nous avons tiré profit des capacités d'HTML à inclure différents types de média (textes, images, mais aussi vidéos grâce à l'incrustation d'objets).

Seule l'évaluation des signes en forme de citation (i.e. non fléchis, comme dans un dictionnaire) a été ainsi réalisée. Elle se présente comme 5 pages de 10 signes, la première étant introduite par quelques explications sur leur utilisation. Les résultats (i.e. les données contenues dans les champs) sont transmis par courrier électronique au moyen d'un bouton d'envoi à la fin de chacun des 5 formulaires.

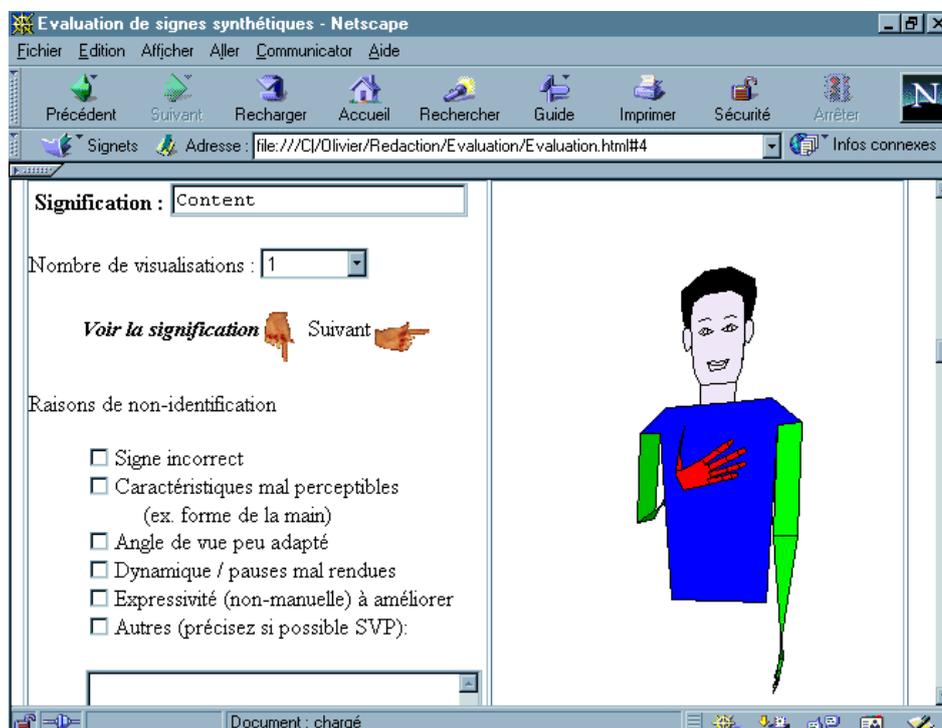


Figure 3.35 : Evaluation d'un signe via Internet.

Le sujet est invité, pour chaque signe, à inscrire le sens qu'il a perçu (cf. figure 3.35) et à indiquer le nombre de fois où il a visualisé l'animation (ce qui donne une indication quant à l'aisance de compréhension). Il peut ensuite découvrir la signification du signe et voir si elle coïncide avec sa propre réponse. Nous lui demandons, si l'identification n'est pas sémantiquement proche du sens théorique, d'essayer de préciser la ou les raison(s) de cette différence. Plusieurs facteurs peuvent *a priori* intervenir :

- La personne ne reconnaît pas au signe synthétique l'acception qui lui est proposée, mais associe à cette dernière un signe plus ou moins différent. Cela peut résulter d'une différence dans tout ou partie des *gestèmes*.

Rappelons à ce propos que les signes sont susceptibles de varier fortement d'un pays, d'une région, et même d'un établissement à l'autre, et que les formes représentées dans le dictionnaire d'IVT ne sont pas systématiquement identiques partout en France. De plus, quoique les dessins en soient très parlants, une erreur d'interprétation – et donc d'encodage – n'est jamais à exclure.

- Dans les autres cas de figure, l'utilisateur est en accord avec la signification donnée, mais n'a pu identifier le signe pour une des raisons suivantes :
 - Un des gestèmes est mal perceptible. Cela peut résulter :
 - de la représentation trop grossière du signeur virtuel, en particulier des détails de la main ;
 - de l'angle de vision mal adapté à ce signe (par rapport à la direction du mouvement notamment).
 - Le signe possède une dynamique propre qui n'a pas été correctement reproduite, ou bien les pauses observées ne correspondent pas à la réalité ;
 - L'expressivité faciale du signeur est trop sommaire et doit être améliorée pour mieux faire passer le message.

Si l'utilisateur ne reconnaît dans aucun des points ci-dessus une raison valable pour laquelle il n'aurait pas identifié le signe, il lui est tout de même demandé d'avancer une autre explication.

3.3.2.2. Résultats et conclusions de l'évaluation.

Pour l'évaluation, nous avons sollicité la collaboration de plusieurs structures en relation directe avec les sourds :

- l'International Visual Theatre (IVT) de Vincennes,
- l'association Sourds Interprètes Entendants (SIE) à Lille,
- le Centre Régional d'Education Spécialisée pour Déficients Auditifs (CRESDA) de Pont-à-Marcq.

Plusieurs membres de chaque structure ont visualisé globalement les signes synthétiques. En soulignant tout l'intérêt qu'ils portaient à ce projet, ils nous ont adressé d'utiles remarques que nous souhaitons relater ici. Pour le moment, ont utilisé intégralement le module d'évaluation des signes Françoise Casas⁴², Sandrine Trottin⁴³, Frédéric Harlez, Sandra Tellier et Nathalie Cruaud⁴⁴, ainsi que quatre jeunes déficients auditifs de Pont-à-Marcq. Ce sont leurs résultats (consignés dans le tableau 3.10), que corroborent largement les observations des autres sourds rencontrés, dont nous allons tirer les principaux enseignements.

Deux remarques préalables s'imposent :

- Comme le note S. Tellier, « il est plus difficile de comprendre quelqu'un qui signe que de signer soi-même » ;
- Surtout, l'identification de signes est beaucoup plus délicate hors de tout contexte qu'au sein d'un discours. Cela est très saillant en langue des signes, car le choix des items lexicaux y est d'abord guidé par l'idée prédominante. Cette remarque s'applique tout

⁴² Françoise est professeur sourde au Centre d'Education pour Jeunes Sourds d'Arras.

⁴³ Sandrine est interprète professionnelle en langue des signes et co-fondatrice de l'association SIE.

⁴⁴ Sandra et Nathalie ont suivi, plusieurs années durant, une formation à la langue des signes. Elle sont à même de converser en signes de façon courante, de même que Frédéric Harlez.

particulièrement aux expressions et aux actions (verbes). Comme on l'a déjà évoqué, un « thème » est bien souvent positionné en début de phrase. Par exemple, le signe *homard* doit être précédé du topique *animal* (ou *cuisiner*, selon que l'on relate un fait zoologique ou culinaire). Ou encore, le signe exprimant une *cheminée* en décrivant son manteau peut aussi bien être interprété comme un *cadre* si une précision (telle que *feu*) ne lui est pas accolée. De même, le signe *nettoyer* s'applique à un objet (une table, une vitre, ...) et n'est quasiment jamais employé isolément.

	Signes corrects		Signes incorrects ⁴⁵					Problème de perception de la profondeur
	Correspondance exacte	Réponse proche ⁴⁶	Signe inconnu ou difficile à identifier hors contexte	Entrée signée différemment	Caract. mal perceptibles			
					Config. manuelle	Mvt.	Expr. faciale	
Test 1	40 (80%)		10 (20 %)					
	36	4	4	1	3	2	1	1
Test 2	34 (68%)		16 (32 %)					
	31	3	10	1	4	0	0	1
Test 3	31 (62%)		19 (38 %)					
	30	1	3	7	2	5	0	2
Tests 4-7⁴⁷	29 (58%)		21 (42 %)					
	27	2	5	10	2	2	0	2
Test 8	34 (68%)		16 (32 %)					
	32	2	2	5	5	2	0	3
Test 9	41 (82%)		9 (18 %)					
	39	2	6	0	2	1	0	1

Tableau 3.10: Principaux résultats de l'évaluation.

Il ressort de cette évaluation que près des deux tiers à 80% des signes, selon l'informateur, ont été correctement interprétés. De plus, parmi les réponses inexactes, un grand nombre s'explique par la méconnaissance de la forme proposée ; très peu sont réellement dues aux modes mêmes de représentation ou de génération du mouvement (autour de 5 seulement, soit un dixième du total). Les raisons majoritairement incriminées ont trait au discernement des caractéristiques manuelles, et tout particulièrement à celle des configurations (comme le remarquent l'ensemble des personnes ayant visualisé les signes). L'amélioration du rendu des formes de la main doit donc être une priorité dans les travaux à venir. De même que la perception des autres segments et de leur profondeur, le problème de l'identification des configurations manuelles trouverait très certainement une réponse adaptée dans une modélisation volumique affinée du signeur (sous forme de surface maillée par exemple).

⁴⁵ Le total du détail dépasse ici le total général, car plusieurs facteurs peuvent être en cause pour chaque signe.

⁴⁶ Ont été considérées comme correctes des réponses sémantiquement proches de celles attendues, par exemple *dormir* pour *s'endormir* ou *taille-crayon* pour *crayon*.

⁴⁷ Il s'agit ici de la moyenne des résultats obtenus avec les enfants de Pont-à-Marçq.

Pour détailler quelque peu les riches remarques fournies, on peut évoquer les points suivants :

- Les principaux cas dans lesquels le mouvement gagnerait à être amélioré se résument aux signes *cuiller* (la *circumduction* est difficile à reproduire) et *lavabo*, dans lequel la transition entre les activités successives des mains est trop brutale ; le frottement devrait au contraire paraître continu.
- L'expressivité du visage est importante pour discerner *faible* d'autres signes desquels son sens peut être rapproché, tels que *mou*.
- Les mouvements circulaires doivent parfois être répétés, par exemple pour préciser si l'on est en présence du signe *coudre* ou d'*aiguille* (même si, là encore, le contexte lèverait probablement l'ambiguïté). Toutefois, les dessins du dictionnaire papier dont nous disposons ne permettent pas de distinguer le nombre de ces itérations.
- Le signe *boîte* est un exemple de signe où la perception de la profondeur intervient, car la main dominante y occulte l'autre en fin d'articulation ; le mouvement peut alors créer une confusion avec *fermer_porte*.
- L'évolution continue de la langue – la création de l'ouvrage d'IVT remonte désormais à une quinzaine d'années – alliée au phénomène de régionalisme, expliquent les différences notées au niveau de certains signes, tels que les jours de la semaine (bien que ceux-ci aient été compris). En particulier, les enfants sourds rencontrés utilisent, pour un nombre important de signes, des formes propres à leur environnement immédiat⁴⁸. De plus, un nombre très réduit d'entrées rarement rencontrées (*homard* et *touriste*) sont, le plus souvent, exprimées par une périphrase (incluant *voyage* pour le second) ; leur forme serait à confirmer par des sourds possédant un vocabulaire très étendu.

Ces quelques résultats, quoiqu'encourageants, ont encore besoin d'être étayés et la collaboration engagée avec les associations citées ci-dessus s'inscrit notamment dans cette perspective. A très court terme, nous devrions être en mesure de préciser ces observations, dans le but de corriger les imperfections du système de synthèse et d'en combler les lacunes principales. Dans un second temps, nous souhaitons mettre le logiciel dans son ensemble à la disposition de l'utilisateur, de façon à perfectionner l'interface d'édition.

3.3.2.3. Application : inclusion au logiciel LAC.

Pour clore cette partie, nous allons exposer brièvement comment le générateur de signes synthétiques a été mis à profit dans le logiciel LAC, évoqué au premier chapitre. Une des motivations pour l'obtention de signes virtuels était de résoudre le problème posé par la création des vidéos, ainsi que le stockage des volumineux fichiers correspondants. Le système que nous avons bâti apporte une solution concrète à ces écueils, grâce à son interface graphique permettant

⁴⁸ Selon l'une de leurs enseignantes, les enfants inventent régulièrement des signes nouveaux, ou de nouvelles formes pour des signes existants, qui ne tardent pas à être compris et acceptés par l'ensemble de l'établissement.

une édition aisée des signes, et à la concision de l'information ainsi générée. La production fluide d'une phrase quelconque est également possible, pour peu que l'on ait créé ses signes constitutifs au préalable.

Le générateur de signes a été d'abord connecté au travail de V. Vanneste sur l'analyse syntaxique de la phrase française. Cet ensemble a ensuite été intégré au logiciel LAC [CAN 99], pour pouvoir y traduire de façon automatique non seulement les mots et thèmes du corpus, mais encore les phrases illustratives présentées pour chacun. Ces dernières se limitent pour l'heure à quelques structures, car la grammaire sur laquelle est basée l'analyse syntaxique est limitée ; on ne dispose de surcroît d'aucun analyseur sémantique. Ce prototype de système de traduction a néanmoins permis d'en démontrer la faisabilité, à travers un petit corpus exemple ayant trait aux pièces de la maison. Celui-ci a été choisi car nous disposions déjà, dans le dictionnaire, de bon nombre de signes relatifs à ce thème.



Figure 3.36 : Intégration du module de génération de signes synthétiques au logiciel LAC.

Par rapport à la version originale de LAC, l'interface a été légèrement retouchée pour refléter les nouvelles fonctionnalités (voir figure 3.36). La fenêtre vidéo a été conservée pour présenter l'illustration du mot sélectionné, ainsi que son équivalent en LPC. Il s'y substitue, pour les signes en LSF, une fenêtre graphique dans laquelle apparaît le signeur virtuel, ainsi que les boutons permettant d'en contrôler l'animation et la direction de la caméra. Une zone de texte permettant de visualiser la forme intermédiaire de la phrase à signer a également été ajoutée, de même qu'un bouton pour déclencher la traduction (celle-ci nécessite en effet quelques secondes).

Conclusion.

La finesse avec laquelle les composantes du signe ont été spécifiées, ainsi que la grande variété de processus flexionnels étudiés et implantés, ont permis de bâtir un système étendu de synthèse des phrases signées. Doté d'un environnement graphique, il offre une édition aisée de la partie manuelle du signe; grâce à une analyse syntaxique de la description, et à l'interception des erreurs à l'exécution, il constitue un ensemble robuste.

Le cahier des charges que nous nous étions fixé a bien été respecté. En proposant une description textuelle du signe, nous avons rempli les objectifs de lisibilité et de compacité. Parce que la description proposée est basée sur les gestèmes validés par de nombreuses études linguistiques, elle répond aussi à l'exigence de généricité. Pour la même raison, et parce que nous nous sommes aussi attachés à reproduire le mouvement avec un maximum de réalisme, le potentiel signifiant est transmis de façon très satisfaisante.

La procédure d'évaluation a en effet mis en lumière l'intérêt des résultats obtenus, tout en soulignant les limites et en fournissant de nouvelles voies d'investigations. Le signeur développé constitue en fait une étape dans la génération d'énoncés en langue des signes. De nombreuses pistes restent à explorer pour s'approcher au mieux des formes réelles produites par les sourds ou leurs interprètes. On songe entre autres à l'amélioration de la représentation de l'avatar lui-même, ou à la transcription du prototype dans un langage informatique compilé. La recherche en reconnaissance des gestes, qui a connu un essor remarquable ces dernières années, devrait également pouvoir être mise à profit pour affiner la synthèse du mouvement.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1. Bilan.

Le travail exposé dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'utilisation du geste de communication dans le dialogue homme-machine. Pour développer une telle interface conversationnelle, il est nécessaire de disposer à la fois d'un module de reconnaissance (gestes en entrée) et d'un système de synthèse (en sortie). C'est sur ce dernier point que s'est focalisé notre intérêt, et tout particulièrement sur les gestes de communication les plus élaborés, à savoir ceux de la langue des signes. Par la diversité – et parfois la complexité – des mouvements mis en jeu, ils constituent un sujet d'étude privilégié, d'autant que les expressions faciales sont, assurément plus encore que dans la gesticulation, d'une richesse inouïe, tant au niveau lexical que grammatical.

A partir d'une solide base regroupant des études linguistiques fondamentales sur la langue des signes, et en examinant bon nombre de travaux se rapprochant de notre thème, nous avons proposé un système de description du signe s'appuyant précisément sur les quatre types de phonèmes gestuels universellement reconnus à l'heure actuelle. Une structure hiérarchique a ainsi été bâtie, rigoureusement équivalente à une grammaire du signe, en respectant les traits linguistiquement pertinents, et en les complétant par des caractéristiques requises par notre objectif de synthèse.

Parmi ces caractéristiques originales, on peut notamment retenir :

- les points manuels, utiles pour positionner aisément la main dans l'espace ou en un lieu de contact avec le corps ;
- les mouvements locaux des doigts ou du poignet, qui se produisent en simultané avec le déplacement principal ;
- les relations de symétrie, qui facilitent grandement la spécification des déplacements de la main non-dominante connaissant ceux de l'articulateur dominant ;
- les divers types de répétition, qui s'inscrivent également dans un impératif de concision de la description textuelle.

L'exigence de généricité qui a guidé cette recherche nous a amenés à proposer une décomposition des configurations manuelles en trois niveaux, qui offrent une combinatoire élevée tout en garantissant des formes réalistes. Ces dernières peuvent ensuite être utilisées en tant que primitives dans la spécification des postures de la main. Comme pour l'ensemble des caractéristiques incluses dans la grammaire du signe, les différentes valeurs retenues sont issues non seulement de l'examen minutieux d'un corpus conséquent de signes français, mais encore de multiples études portant sur diverses langues signées ayant cours de par le monde.

Dans cette thèse, nous avons dépassé le cadre des simples items lexicaux, et largement abordé les processus grammaticaux très particuliers des langues visuo-gestuelles. Un système permettant de prendre ceux-ci en compte a été élaboré, qui consiste à doter les signes de paramètres. C'est ainsi qu'ont pu être modélisés des phénomènes tels que la localisation et l'accord pronominal des verbes directionnels, ou d'autres flexions de nature spatiale ou dynamique. Les expressions non-manuelles, qui revêtent une importance toute particulière au niveau du visage, n'ont pas été oubliées.

La représentation notationnelle structurée du signe a été implantée sur une machine de type PC standard, tout comme l'intégralité des mécanismes décrits précédemment. Il en a résulté un prototype avancé de signeur virtuel, capable de produire une grande variété de signes à partir de leur description textuelle. Grâce à une modélisation de la dynamique des diverses trajectoires, issue d'une étude spécifique consistant en un suivi du poignet par vision, le mouvement lui aussi reproduit aussi fidèlement que possible son équivalent naturel. Le système prend en charge de manière automatique aussi bien la génération du mouvement que le calcul en cinématique inverse du positionnement et de l'orientation des articulateurs. Aucune spécification de bas niveau n'est donc requise de l'utilisateur.

La mise en œuvre du paramétrage permet désormais la génération de phrases signées complètes, incluant le marquage du type de clause et l'accord pronominal avec les référents localisés sur la scène du signeur. Au niveau de la phrase comme du signe, une bonne lisibilité de la description est assurée, tout en respectant l'exigence de compacité.

Pour faciliter encore l'édition, une interface graphique complète a enfin été développée. Elle permet de sélectionner visuellement les composantes du signe en ayant un aperçu direct des choix effectués sur la posture de l'avatar. Le signe ainsi spécifié est stocké dans un dictionnaire adapté où chaque entrée est dotée de caractéristiques linguistiques propres.

L'animation elle-même présente certes encore quelques limites inhérentes au langage de prototypage adopté, telles qu'une succession saccadée des images due au rafraîchissement de la zone graphique. C'est pourquoi l'évaluation des signes a dû être menée sur des vidéos créées en assemblant les images de synthèse générées par le système. Ces animations représentent néanmoins ce que l'on peut attendre à très court terme du moteur de génération – comme il est expliqué un peu plus loin –, et la validation d'une immense majorité d'entre elles par des personnes maîtrisant la langue des signes est autant d'encouragements à poursuivre nos efforts dans cette voie.

2. Perspectives.

Les perspectives d'évolution du système rayonnent dans plusieurs directions. En voici les principales :

- La première est l'amélioration de la fluidité de l'animation et de la représentation du signeur. Situées sur deux plans assez différents, ces deux pistes d'exploration (dont l'interface nécessite une définition soignée) se rejoignent en un point commun : la nécessité de transcrire le logiciel développé dans un langage informatique compilé. Un projet d'envergure est déjà sur les rails en ce sens : il est prévu de traduire en C++ l'ensemble du moteur d'évaluation, de l'analyseur syntaxique à la génération des postures successives. Simultanément a été mise à l'étude l'utilisation des routines graphiques d'OPEN/GL dans l'animation d'un personnage volumique. Ce dernier a d'ailleurs été commandé à un infographiste, avec comme cahier des charges une modélisation sous forme de surfaces maillées de toute la partie supérieure du corps et l'application d'une peau permettant une représentation fine des déformations (notamment au niveau de la main). Diverses primitives de mimiques faciales devraient permettre d'améliorer l'expressivité du personnage tridimensionnel, dont l'exportation au format VRML est nécessaire pour son utilisation dans un système autonome, indépendant de tout logiciel de synthèse 3D du marché.

Le défi à relever dans un tel projet est évidemment celui du compromis à trouver entre le temps de calcul et la finesse de représentation de l'avatar. On doit en effet se rapprocher au maximum de la génération des signes en temps réel, tout en obtenant un rendu du personnage bien supérieur à celui qui est le sien actuellement.

- Disposer d'un modèle volumique du signeur implique l'émergence d'autres problèmes, en particulier celui de la gestion des contacts. Nous voulons ici évoquer non seulement la prise en compte du volume même des segments dans le calcul des positions (par exemple l'épaisseur du torse ou d'un doigt), mais également les signes présentant un contact tel qu'il engendre une modification de ses caractéristiques (configuration manuelle notamment). Il est en effet un petit nombre de signes (par exemple *cadeau*) dont le contact est contraignant et entraîne l'action mutuelle d'un doigt sur un autre. Ce genre de problèmes éminemment complexes est à rapprocher de la gestion des collisions, soit des articulateurs pendant le signe, soit du signeur avec son environnement. La simulation de tels phénomènes fait l'objet de recherches spécifiques sur la modélisation des chocs entre chaînes articulées, qui pourraient trouver ici une application.
- Une autre direction à explorer est celle de la génération même du mouvement. Comme il a été évoqué, cette partie n'a sans doute pas fait ici l'objet d'études aussi poussées que dans d'autres travaux plus directement liés à la biomécanique ou la psychomotricité. L'évaluation menée sur les signes produits tend d'ailleurs à nous donner raison, puisque les erreurs d'identification apparaissent largement indépendantes d'une précision insuffisante à ce niveau. L'analyse des transitions nécessite toutefois d'être davantage étendue, que ce soit au sein même d'un signe ou entre les divers items d'une phrase.
- A plus long terme se profile l'élaboration d'une conversation entre plusieurs signeurs. Les techniques de réalité virtuelle permettent en effet aujourd'hui l'interaction entre un

personnage et le monde qui l'entoure, et la recherche se dirige progressivement vers la modélisation de scènes à plusieurs agents, par exemple des rencontres où chacun s'exprime et adapte ses réponses aux propos de ses interlocuteurs.

Diverses applications sont d'ores et déjà envisageables. Nous avons décrit celle d'un logiciel multimédia de présentation de corpus lexicaux ; tout système nécessitant l'affichage de signes sur un écran est en fait susceptible de tirer profit de leur génération automatique à partir d'une représentation notationnelle, en particulier dans le cadre de l'enseignement assisté par ordinateur (E.A.O.) : dictionnaires informatisés, tutoriels de langue des signes, etc.

Grâce au faible volume d'information de codage nécessaire, les mêmes idées sont directement transposables à la diffusion de signes via un réseau, à commencer par Internet. On peut aisément concevoir de transmettre la phrase seule, ou accompagnée de la description de chaque signe (le client devrait alors disposer du système de génération). Une autre solution consiste à effectuer le maximum de calculs du côté serveur, et à ne communiquer qu'une information réduite (par exemple les angles articulaires) à un petit module de synthèse installé chez le client.

Dans tous les cas, le volume de données est bien inférieur à celui requis par les vidéos. Un rapide calcul, basé sur la phrase exemple utilisée pour le suivi de mouvement, a montré que le rapport est proche de un pour mille : la séquence compressée (formée de 187 images de taille 192x143 en 24 bits) nécessite 3,5 Mo de mémoire pour 8 secondes, alors que les mêmes signes occupent moins de 4 ko dans le dictionnaire (à raison de 0,5 ko par signe, description et autres attributs compris). En considérant ces moyennes, le stockage d'une application – telle que LAC – sur CD-ROM n'autorise guère plus de 20 minutes de vidéos, tandis que celui de signes synthétiques est pour ainsi dire illimité et permet d'envisager des corpus autrement plus conséquents.

Mais l'application par excellence réside naturellement dans un traducteur global d'une phrase française en signes. Un embryon d'un tel système a été proposé, mais nous avons vu que la tâche reste de taille. Sans analyseur sémantique, il n'est concevable de traduire que des phrases relativement simples, sauf à compliquer très sensiblement la grammaire sur laquelle est basée l'analyseur syntaxique [LIG 94]. Néanmoins, les traducteurs entre langues naturelles ont connu de telles améliorations ces dernières années que tous les espoirs sont permis. La perspective de disposer d'un système complet et fiable de traduction permet d'envisager des réalisations qui pourraient accélérer le rapprochement entre le monde des sourds et celui des entendants. On songe notamment à la traduction de pages web ou de livres. Le sous-titrage automatique d'émissions orales en langue des signes via le canal télétexte serait également une piste intéressante à explorer, le système de génération étant particulièrement adapté aux télétransmissions à faible débit. Toutes ces applications sont à même de favoriser l'accès des sourds à l'information en la présentant dans leur langue naturelle.

GLOSSAIRE

Abduction	Mouvement qui écarte un membre du plan médian du corps, ou un doigt du plan médian de la main.
Adduction	Mouvement qui rapproche un membre du plan médian du corps, ou un doigt du plan médian de la main.
Chèreme	Terme introduit par Stokoe, équivalent de <i>gestème</i> .
Circumduction	Mouvement de rotation autour d'un point faisant décrire à un membre un cône dont l'articulation forme le sommet (par exemple, le poignet).
Classificateur	Signe ou configuration manuelle qui décrit et remplace toute une classe d'objets ayant une forme, une taille, une épaisseur, un état de surface ou même un comportement similaire. Par exemple, la configuration <i>C</i> remplace un petit récipient ; le classificateur <i>long_et_épais</i> est utilisé pour désigner une bûche, un rôti, ...
Continuum	Ensemble des valeurs que peut prendre une variable dont les variations sont continues.
Contralatéral ou <i>Controlatéral</i>	Relatif au côté du corps opposé à celui dont il est question.
Dactylologie	Alphabet manuel (dit <i>dactylologique</i>) dans lequel chaque lettre de la langue écrite correspond à une configuration manuelle.
Déictique	Tout élément linguistique dont la fonction consiste à articuler l'énoncé sur la situation particulière dans laquelle il est produit ou à l'inscrire dans un discours. Principaux déictiques en français : les adverbes de temps (hier), de lieu (ici), les pronoms personnels (je) et démonstratifs (ce).
Diachronie	Caractère des faits linguistiques considérés du point de vue de leur évolution dans le temps; succession de synchronies constituant l'histoire de telle ou telle langue.
Diacritique	<i>Signe diacritique</i> : signe qui donne à un caractère de l'alphabet une valeur spéciale, pour en distinguer les mots homographes (cet élément peut être suscrit (accent), souscrit (cédille) ou placé à côté de la lettre qu'il modifie).
Diglossie	Situation de bilinguisme d'un individu ou d'une communauté dans laquelle une des deux langues a un statut socio-politique inférieur. (par exemple, un Alsacien qui utilise le dialecte dans sa famille et le français dans sa vie professionnelle).

Epenthèse	Apparition, à l'intérieur d'un mot ou d'un groupe de mots, d'un phonème que l'étymologie ne justifie pas (par exemple, le [b] du mot français <i>chambre</i> , qui vient du latin <i>camera</i>).
Frontal	<i>Plan frontal</i> : se rapportant au corps humain, désigne le plan vertical du torse.
Gestème	Equivalent gestuel du phonème. A la différence des phonèmes dont la segmentation dans le discours est séquentielle, les gestèmes se combinent spatialement et simultanément dans le signe.
Iconique	Le degré d'iconicité est le degré auquel la forme du geste suggère la forme de ce qu'il représente.
Idiosyncrasie	Réaction ou comportement individuel, propre à chaque homme (⇒ <i>Idiosyncratique</i>).
Ipsilatéral ou <i>Homolatéral</i>	Qui se trouve ou se produit d'un même côté du corps.
Kinésie	Activité musculaire, mouvement. (⇒ <i>Kinésimétrie</i> : Art ou manière de mesurer le mouvement ⇒ <i>Kinésimétrie</i>).
Kinésique	Etude des gestes et des mimiques utilisés comme signes de communication, soit en eux-mêmes, soit en accompagnement du langage parlé.
Kinesthésie	Perception consciente de la position et des mouvements des différentes parties du corps.
Lacet	Mouvement d'oscillation autour d'un axe vertical
Métathèse	Permutation de deux phonèmes de la chaîne parlée (ex. <i>aéroplane</i> → " <i>aréoplane</i> ").
Monème Ou <i>Morphème</i>	Unité minimale de signification que l'on peut obtenir lors de la segmentation d'un énoncé sans atteindre le niveau phonologique. Les monèmes constituent les unités de la première articulation, alors que les phonèmes sont les unités de seconde articulation. Un énoncé comme " <i>les boxeurs souffrent</i> " est constitué de 7 monèmes : <i>le+s+box+eur+s+souffr+ent</i> . On distingue les monèmes <i>lexicaux</i> , appartenant à une liste ouverte (<i>box-</i> , <i>souffr-</i>), et les monèmes <i>grammaticaux</i> , ou <i>liés</i> , appartenant à une liste fermée (<i>le,-eur,-s,-ent</i>).
Paralinguistique ou <i>paraverbal</i> , ou <i>non-verbal</i> pour la <i>comm. orale</i>	Les aspects paralinguistiques de la communication sont les éléments de signification (conventionnels ou non) produits au niveau de la face (et des membres, dans la modalité orale) parallèlement à la production de la parole ou du signe, ainsi que la prosodie , les attitudes et les postures corporelles, dans la mesure où tous ces éléments permettent de nuancer, de préciser, voire de contredire les messages transmis simultanément.
Phonème	Elément minimal, non segmentable, de la reproduction phonologique d'un énoncé, et dont la nature est déterminée par un ensemble de traits distinctifs.

Phonétique	Etude scientifique des sons de la parole tels qu’ils existent. Reproduction par des signes conventionnels de la prononciation des mots d'une langue. S’oppose à la phonologie en cela que la phonétique étudie la prononciation réelle, alors que la phonologie étudie le système qui sous-tend cette prononciation.
Phonologie	Etude des sons d’une langue tels qu’ils sont classés et perçus ; étude de la représentation mentale des sons une fois la variation éliminée.
Pronation	Mouvement de rotation axiale de l’avant-bras qui a pour effet de ramener la paume vers le sol.
Prosodique	Relatif au rythme, aux pauses et au débit du signe. Dans le cas de la parole, fait également référence à l’intonation.
Pulpe	Nom donné à certains tissus mous des animaux : la pulpe des doigts.
Roulis	Mouvement d'oscillation autour d'un axe longitudinal.
Sagittal	<i>Plan sagittal</i> : pour le corps humain, il s’agit du plan de symétrie vertical perpendiculaire au plan frontal .
Sème ou <i>Trait sémantique</i>	Unité minimale de signification entrant, comme composant, dans le sens d'une unité lexicale.
Signifiant	Partie matérielle ou physique du signe, pris dans son acception la plus large (unité conventionnelle de sens).
Signifié	Partie conceptuelle ou notionnelle du signe, pris dans son acception la plus large.
Supination	Mouvement de rotation axiale de l’avant-bras plaçant la paume vers le haut et le pouce vers l’extérieur.
Suprasegmental	Se dit des éléments prosodiques , comme l'accent, l'intonation et le rythme, qui affectent des unités plus longues que le phonème.
Syntagme	Groupe de mots formant une unité dans une organisation hiérarchisée (on distingue les syntagmes nominal, verbal, prépositionnel et adjectival).
Syntaxe	Partie de la grammaire qui décrit les règles par lesquelles les unités lexicales se constituent en syntagmes et en phrases.
Thématisation	Procédé de la langue des signes par lequel un signe ou un groupe de signes, placé en tête de la phrase, en exprime l’idée dominante. La suite du discours qui se rapporte au thème est parfois baptisée <i>commentaire</i> .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGG 94 Aggarwal J. K., Cai Q., Liao W., Sabata B. (1994). *Articulated and elastic non-rigid motion: A review*. Proc. of IEEE Computer Society Workshop on Motion of Non-Rigid and Articulated Objects., pp. 16-22.
- AHO 91 Aho A., Sethi R., Ullman J. (1991). *Compilateurs : Principes, Techniques et Outils*. InterEditions, Paris. Collection Informatique, Intelligence Artificielle .
- BAD 87 Badler N. I., Manoochekri K. H., Walters . G. (1987). *Articulated Figure positioning by Multiple Constraints*. IEEE Computer Graphics and Application, Vol 7, N° 6, pp. 28-38.
- BAD 99 Badler N.I., Chi D. M., Chopra S. (1999). *Virtual Human Animation Based on Movement Observation and Cognitive Behavior Models*. Computer Animation '99 (org. Computer Graphics Society & IEEE Computer Society), Geneva, 26-28 May 1999, pp. 128-137.
- BAT 74 Battison R. (1974). *Phonological deletion in American Sign Language*. Sign Language Studies, N°5, pp. 1-19.
- BEL 78 Bellugi U., Klima E. S. (1978). *Le langage gestuel des sourds*. La recherche, N° 95, pp. 1083-1091.
- BEL 95 Bellalem N. (1995). *Etude du mode de désignation dans un dialogue homme-machine à forte composante langagière : analyse structurelle et interprétation*. Thèse de l'Université Henri Poincaré – Spécialité: informatique – Nancy – Pdt: J.M. Pierrel .
- BEL 96 Bellik Y. (1996). *Modality Integration: Speech and Gesture*. In : Survey of the State of the Art of Human Language Technology, Chapter 9: MultiModality .
- BRA 96 Braffort A. (1996). *Reconnaissance et compréhension de gestes; application à la langue des signes*. Thèse de l'Université Paris XI Orsay (LIMSI-CNRS) - Spécialité informatique - Pdt. G. Ligozat.
- BRE 97 Brennan M. (1997). *See what I mean? Exploiting BSL visual encoding in teaching and learning*. Procs. of Empower '97 Int. Conf. On Deaf Education, Edinburgh 29-31 août 1997, Helen Mitchell & Elizabeth Izatt eds.
- BUC 92a Buchholz B., Armstrong T. J. (1992). *A kinematic model of the human hand to evaluate its prehensive capabilities*. Journal of Biomechanics, Vol 25, N° 2, pp. 149-162.
- BUC 92b Buchholz B., Armstrong T. J., Goldstein S. A. (1992). *Anthropomorphic data for describing the kinematics of the human hand*. Ergonomics, Vol 35, N° 3, pp. 261-273.

- CAN 99 Cantegrit B., Losson O., Vanneste V. (1999). *An assistive multimedia tool using synthetic signs to train on references databases*. In: Bühler C. / Knops H. (eds) : Assistive Technology on the Threshold of the New Millenium: Procs. 5th European Conference for the Advancement of Assistive Technology, AAATE'99, Düsseldorf, November 99. IOS Press : Amsterdam, pp. 438-442.
- CAS 94 Cassell J., Pelachaud C., Badler N.I., Steedman M., Achorn B., Becket T., Douville B., Prevost S., Stone M. (1994). *Rule-based Generation of Facial Expression, Gesture & Spoken Intonation for Multiple Conversational Agents*. Computer Graphics (Procs. SIGGRAPH '94), pp. 413-420.
- CAS 95 Cassell J. (1995). *The role of Gestures in stories as multiple participant frameworks*. AAAI Spring Symposium: Interactive Story Systems, Stanford, March 1995, pp. 23-26.
- CEP 98 Nève F.-X., Stassart D., Robert J. (1998). *Dictionnaire Illustré de la Langue des Signes française*. Liège: Célus; Bordeaux: Capsas; CD-ROM PC (5000 mots français traduits en 2500 vignettes et 1500 vidéos Betacam).
- CHR 96 Christiaen P. (1996). *Contribution aux recherches en Adéquation Algorithme Architecture dans le cadre de la conception d'un suiveur de regard "tête libre" par caméra*. Thèse de l'Université de Lille I (pdt J.C. Carru).
- COH 99 Cohen C. (1999). *A Brief Overview of Gesture Recognition*. http://www.dai.ed.ac.uk/CVonline/LOCAL_COPIES/COHEN/gesture_overview.html .
- COI 86 Coiffet P. (1986). *Les Robots. T. 1 : Modélisation et commande*. Editions Hermès, Paris.
- COU 96 Couty J.-P., Kaczmarek R. (1996). *Evaluation de la commande oculaire Cyclope*. Actes du colloque de l'I.R.R.H., 6 décembre 1996, Lille.
- COV 73 Covington V. C. (1973). *Juncture in American Sign Language*. Sign Language Studies, N°2, pp. 29-38.
- CRA 96 Crasborn O., Blees M., Van der Hulst H., Van der Kooij E. (1996). *SignPhon: a database tool for phonological analysis of Sign Languages - Manual, version 0.1*. Leiden Sign Phonology Group (Manuscrit non publié).
- CUX 86 Cuxac C. (1986). *La langue des signes française : inventaire des classes syntaxiques*. Modèles linguistiques, Vol. 8, N°1, pp. 53-62.
- DEV 90 De Vriendt S., Rasquinet M. (1990). *Prepositions in a Belgian Sign Language*. In: Edmondson W. H. / Karlsson F. (eds): SLR'87: Papers from the Forth International Symposium on Sign Language Research. Lappeenranta, Finland July 15-19, 1987. (International Studies on Sign Language and Communication of the Deaf; 10). Hamburg : Signum, pp. 57-65.
- DIG 92 *Smalltalk/V Object-oriented Programming System - Tutorial and Programming Handbook*. Digitalk inc (1992).

- DOR 94 Dorner B., Hagen E. (1994). *Towards an American Sign Language Interface*. Artificial Intelligence Review, Vol 8, N° 2-3, pp. 235-253.
- ECO 88 Eco U. (1988). *Le signe – Histoire et analyse d'un concept*. Le livre de poche, éditions Labor, Bruxelles.
- FIS 75 Fischer S. D. (1975). *Influences on word order change in ASL*. In: Li C. N. (ed): Word order and word order change. University of Texas Press, Austin, pp. 1-25.
- FIS 78 Fischer S. D., Gough B. (1978). *Verbs in American Sign Language*. Sign Language Studies, N°18, pp. 17-48.
- FIS 90 Fischer S. (1990). *The Head Parameter in ASL*. In: Edmondson W. H. / Karlsson F. (eds): SLR'87: Papers from the Forth International Symposium on Sign Language Research. Lappeenranta, Finland July 15-19, 1987. (International Studies on Sign Language and Communication of the Deaf; 10). Hamburg : Signum, pp. 75-85.
- FRI 93 Frishberg N., Corazza S., Day L., Wilcox S., Schulmeister R. (1993). *Sign Language Interfaces*. In: Wiklund M. E. (ed): Proceedings of ACM INTERCHI'93 Conf. on Human Factors in Computing Systems, Panel, pp. 194-197.
- GIB 94 Gibet S., Marteau P.-F. (1994). *A self-organized model for the control, planning and learning of a non-linear multi-dimensionnal system using a sensory feedback*. Journal of Applied Intelligence, Vol. 4, pp. 337-349.
- GIB 98 Gibet S., Richardson J., Lebourque T., Braffort A. (1998). *Corpus of 3D Natural Movements and Sign Language Primitives of Movement*. In: Wachsmuth I. / Fröhlich M. (eds): Lecture Notes in Artificial Intelligence : Procs. Bielefeld Gesture Workshop'97 on Gesture and Sign-Language in Human-Computer Interaction. Bielefeld, Germany, September 97. Berlin : Springer, pp. 111-121.
- GOD 98a Godenschweger F., Strothotte T., Wagener H. (1998). *Rendering Gestures as Line Drawings*. In: Wachsmuth I. / Fröhlich M. (eds): Lecture Notes in Artificial Intelligence : Procs. Bielefeld Gesture Workshop'97 on Gesture and Sign-Language in Human-Computer Interaction. Bielefeld, Germany, September 97. Berlin : Springer, pp. 147-157.
- GOD 98b Godenschweger F., Strothotte T. (1998). *Modeling and Generating Sign Language as Animated Line Drawings*. Assets '98.
- GRO 79 Grosjean F. (1979). *Psycholinguistique et langue des signes*. Languages, Vol 56, pp. 35-57.
- HAM 98 Institut für Deutsche Gebärdensprache und Kommunikation gehörloser (1998). *HamNoSys 3.0*. <http://www.sign-lang.uni-hamburg.de/Projekte/HamNoSys/HamNoSysErklaerungen/englisch/Contents.html>.
- HAR 82 Harrison R. (1982). *Computer Representation of Deaf Sign Language* . Proceedings of Eurographics '82, Greenaway D. S. and Warman E. A. editors, pp. 303-308.
- HUM 90 Hume M. C., Gellman H., McKellop H., Brumfield R. H. Jr. (1990). *Functional range of motion of the joints of the hand*. Journal of Hand Surgery, Vol 15A, N° 2, pp. 240-243.

- HUT 90 Hutchins S., Poizner H., McIntire M., Newkirk D. (1990). *Implications for sign research of a computerized written form of ASL*. In: Edmondson W. H. / Karlsson F. (eds): SLR'87: Papers from the Forth International Symposium on Sign Language Research. Lappeenranta, Finland July 15-19, 1987. (International Studies on Sign Language and Communication of the Deaf; 10). Hamburg : Signum, pp. 255-268.
- IKE 95 Ikehara W., Kamikubo E., Hiki S., Fukuda Y. (1995). *A new descriptive system for hand shapes used in signing based on biomechanical modeling of finger actions.*. In: ICPhS 95 Stockholm, Vol. 4, pp. 504-507.
- JOU 86 Jouison P. (1986). *Le rôle du corps dans l'organisation du discours gestuel en L.S.F.*. Etudes et Recherches sur l'Education Bilingue, la Communication, les Langues des Signes, Vol. 4, pp. 1-22.
- KAM 94 Kamina P., Francke J.-P. (1994). *Arthrologie des Membres*. Editions Maloine, Coll. Anatomie – Introduction à la clinique, Paris.
- KAW 85 Kawai H., Tamura S. (1985). *Deaf-and-Mute Sign Language Generation System*. Pattern Recognition, Vol. 18, N° 3-4, pp. 199-205.
- KEN 88 Kendon A. (1986). *How gestures can become like words*. In: Potyatos F. (ed), Crosscultural perspectives in nonverbal communication. Toronto, Canada: Hogrefe, pp. 131-141.
- KLI 79 Klima E. S., Bellugi U. (1979). *The signs of language*. Harvard University Press, Cambridge; Londres (Seconde édition).
- KOB 89 Kobrinski A.A., Kobrinski A.E. (1989). *Bras manipulateurs des robots - Architecture et théorie*. Editions Mir, Moscou, pp. 145-150.
- KOR 82 Korein J. U., Badler N. I. (1982). *Techniques for Generating the Goal-directed Motion of Articulated Figures*. IEEE Computer Graphics and Application, Vol 2, N° 9, pp. 71-81.
- KUR 92 Kurokawa T. (1992). *Gesture coding and a Gesture Dictionary for a Nonverbal Interface*. IEICE Transactions Fundamentals, Vol E75-A, N° 2, pp. 112-121.
- LAT 98 Latoschik M. E., Wachsmuth I. (1998). *Exploiting Distant Pointing Gestures for Object Selection in a Virtual Environment*. In: Wachsmuth I. / Fröhlich M. (eds): Lecture Notes in Artificial Intelligence : Procs. Bielefeld Gesture Workshop'97 on Gesture and Sign-Language in Human-Computer Interaction. Bielefeld, Germany, September 97. Berlin : Springer, pp. 185-196.
- LEB 97 Lebourque T., Gibet S. (1997). *Synthesis of hand-arm gestures*. In: Harling P. A. / Edwards A.D.N. (eds): Progress in gestural interaction. Proceedings of Gesture Workshop '96. Berlin, New York : Springer, pp. 217-225 .
- LEB 98 Lebourque T. (1998). *Spécification et génération de gestes naturels. Application à la Langue des Signes Française*. Thèse de l'Université Paris XI Sud (LIMSI-CNRS) - Spécialité informatique - Pdt. J.-P. Sansonnet.

- LEB 99a Lebourque T., Gibet S. (1999). *A Complete System for the Specification and the Generation of Sign Language Gestures*. In: Braffort A., Gherbi R., Gibet S., Richardson J., Teil D. (eds): *Lecture Notes in Artificial Intelligence : Procs 3rd Gesture Workshop'99 on Gesture and Sign-Language in Human-Computer Interaction*, Gif-sur-Yvette, France, March 99. Springer: Berlin, pp 205-216.
- LEB 99b Lebourque T., Gibet S. (1999). *High-level Specification and Control of Communication Gestures : the GESSYCA System*. *Computer Animation '99* (org. Computer Graphics Society & IEEE Computer Society), Geneva, 26-28 May 1999, pp 24-35.
- LEE 93 Lee J., Kunii T. L. (1993). *Constraint-based Hand Animation*. in *Models and Techniques in Computer Animation World* (Proc. Computer Animation 93), N. Magnenat-Thalmann and D. Thalmann Eds., Springer-Verlag, Berlin., pp. 110-127.
- LEE 94a Lee J., Kunii T. L. (1994). *Generation and recognition of Sign Language using Graphic Models*. IISF/ACM Japan International Symposium : *Computers as our better Partners.*, pp. 96-103.
- LEE 94b Lee J. (1994). *Notational representation of sign language: A structural description of hand configurations*. In : Zagler W. L. / Busby G. / Wagner R. R. (eds): *Computers for handicapped persons*. Proceedings of the 4th International Conference, ICCHP '94 Vienna, Austria, September 14-16, 1994. Berlin, New York : Springer-Verlag., pp. 38-45 .
- LEE 95 Lee J., Kunii T. L. (1995). *Model-Based Analysis of Hand Posture*. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol 15, N° 5, pp. 77-86.
- LEL 85 Lelu-laniece J. (1985). *Voyage dans le monde des sourds*. Editions Pierre-Marcel Favre.
- LEN 94 Lenarcic J., Umek A. (1994). *Simple Model of Human Arm Reachable Workspace*. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 24, N° 8, pp. 1239-1246.
- LID 89 Liddell S. K., Johnson R. E. (1989). *American Sign Language: the phonological base*. *Sign Language Studies*, Vol. 64, pp. 195-277.
- LID 90 Liddell S. K. (1990). *Structures for representing handshape and local movement at the phonemic level*. In: Fischer S. D. / Siple P. (eds): *Theoretical issues in Sign Language Research*. Vol. 1.: *Linguistics*. Chicago, London : University of Chic²ago Press, pp. 37-66 .
- LIG 94 Ligozat G. (1994). *Représentation des connaissances et linguistique*. Editions Armand Colin, Paris.
- LIL 90 Lillo-martin D. (1990). *Studies of American Sign Language syntax and the principles and parameters of Universal Grammar*. In: Edmondson W. H. / Karlsson F. (eds): *SLR '87: Papers from the Forth International Symposium on Sign Language Research*. Lappeenranta, Finland July 15-19, 1987. (International Studies on Sign Language and Communication of the Deaf; 10). Hamburg : Signum, pp. 86-93.
- LOO 83 Loomis J., Poizner H., Bellugi U. (1983). *Computer graphics modeling of American Sign Language*. *Computer Graphics*, Vol 17, N° 3, pp. 105-114.

- LOS 98 Losson O., Vannobel J.-M. (1998). *Sign language formal description and synthesis*. International Journal of Virtual Reality, Vol. 3, N° 4, pp. 27-34.
- LOS 99 Losson O., Vannobel J.-M. (1999). *Sign specification and synthesis*. In: Braffort A., Gherbi R., Gibet S., Richardson J., Teil D. (eds): Lecture Notes in Artificial Intelligence : Procs 3rd Gesture Workshop'99 on Gesture and Sign-Language in Human-Computer Interaction, Gif-sur-Yvette, France, March 99. Springer: Berlin, pp 217-228.
- MAR 79 Markowicz H. (1979). *La langue des signes : réalité et fiction*. Languages, Vol 56, pp. 7-12.
- MCI 87 McIntire M., Newkirk D., Hutchins S., Poizner H. (1987). *Hands and faces: A preliminary inventory for written ASL*. Sign Language Studies, N°56, pp. 197-241.
- MCN 92 McNeill D. (1992). *Hand and Mind : what gestures reveal about thought*. University of Chicago Press, Chicago.
- MES 93 Messing L. S. (1993). *The use of bimodal communication by hearing female signers*. Dissertation submitted to the Faculty of the University of Delaware in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Linguistics.
- MOO 83 Moody B. (1983). *La langue des signes - Tome 1: Histoire et grammaire*. International Visual Theatre (I.V.T.). Editions Ellipses.
- MOO 86 Moody B. (1986). *La langue des signes - Tome 2 : dictionnaire bilingue élémentaire*. International Visual Theatre (I.V.T.). Editions Ellipses.
- MOO 90 Moody B. (1983). *La langue des signes - Tome 3 : dictionnaire bilingue élémentaire*. International Visual Theatre (I.V.T.). Editions Ellipses.
- MOR 90 Morawetz C. L., Calvert T. W. (1990). *Goal-Directed Human Animation of Multiple Movements*. Proceedings of Graphics Interface '90, pp. 60-67.
- MOR 97 Morris D. (1997). *Le langage des gestes - Un guide international*. Editions Calmann-Lévy, Paris.
- MOT 78 Mottez B. (1978). *Des langues gestuelles différentes d'un pays à l'autre*. La Recherche, N° 95, p. 1089.
- NAM 78 Namir L., Schlesinger I. M. (1978). *The grammar of Sign Language*. In: Schlesinger I. M. / Namir L. (eds): Sign Language of the deaf : psychological, linguistic and sociological perspectives. New York : Academic Press, pp. 97-140.
- NEV 96 Nève F. (1996). *Essai de grammaire de la Langue des Signes Française*. Bibliothèque de la Faculté de Philosophie et Lettres de l'Université de Liège; Editions Droz, Genève.
- NOL 98 Nölker C., Ritter H. (1998). *Detection of FIngetips in Human Hand Movement Sequences*. In: Wachsmuth I. / Fröhlich M. (eds): Lecture Notes in Artificial Intelligence : Procs. Bielefeld Gesture Workshop'97 on Gesture and Sign-Language in Human-Computer Interaction. Bielefeld, Germany, September 97. Berlin : Springer, pp. 209-218

- OHK 95 Ohki M., Sagawa H., Hataoka N., Fujisawa H. (1995). *Sign Language Translation System using Pattern Recognition and Synthesis*. Hitachi Review, Vol 44, N° 4, pp. 251-254.
- OLE 78 Oleron P. (1978). *Le langage gestuel des sourds : syntaxe et communication*. Editions du C.N.R.S. Monographie françaises de psychologie.
- PEL 94 Pelachaud C., Badler N.I., Viaud M.-L. (1994). *Final Report to NSF of the Standards for Facial Animation Workshop*. University of Pennsylvania, October 1994.
- PEN 98 Pennel I. (1998). *Interactions perceptivo-motrices : anticipation motrice et anticipation perceptive dans le langage signé*. DEA de l'Université de Lille III.
- PET 94 Petitto L. (1994). *Are signed languages "real" languages? Evidence from American Sign Language and Langue des Signes Québécoise*. Signpost (International Journal of the Sign Linguistics Association), vol. 7, No. 3, pp. 1-10.
- POI 81 Poizner H. (1981). *Visual and "phonetic" coding of movement: Evidence from American Sign Language*. Science, Vol 212, pp. 691-693.
- POI 86 Poizner H., Klima E. S., Bellugi U., Livingston R. B. (1986). *Motion analysis of grammatical processes in a visual-gestural language*. In: McCabe V. / Balzano G. J. (eds): *Event cognition: An ecological perspective*. Hillsdale, N.J. : Lawrence Erlbaum Ass, 1986, pp. 155-174.
- PRI 90a Prillwitz S., Zienert H. (1990). *Hamburg Notation System for Sign Language: Development of a sign writing with computer application*. In: Prillwitz S. / Vollhaber T. (eds): *Current trends in European Sign Language Research*. Procs. 3rd European Congress on Sign Language Research, Hamburg, July, 1989 (International Studies on Sign Language and Communication of the Deaf; 9). Hamburg : Signum, pp. 355-380.
- PRI 90b Prillwitz S. (1990). *Development of a computerized sign language dictionary with animated pictures*. In: Edmondson W. H. / Karlsson F. (eds): *SLR'87: Papers from the Forth International Symposium on Sign Language Research*. Lappeenranta, Finland July 15-19, 1987. Hamburg : Signum, pp. 269-275.
- RAD 90 Radutzky E. (1990). *The changing handshape in Italian Sign Language*. In: Edmondson W. H. / Karlsson F. (eds): *SLR'87: Papers from the Forth International Symposium on Sign Language Research*. Lappeenranta, Finland July 15-19, 1987. (International Studies on Sign Language and Communication of the Deaf; 10). Hamburg : Signum, pp. 94-113.
- REC 96 *Quand l'œil commande*. La recherche, n° 287 (Mai 1996).
- RIJ 91 Rijpkema H., Girard M. (1991). *Computer Animation of Knowledge-based Human Grasping*. Computer Graphics, Vol 25, N° 4, pp. 339-348.
- ROM 94 Romilly D. P., Anglin C., Gosine R. G., Hershler C., Raschke S. U. (1994). *A Functional Task Analysis and Motion Simulation for the Development of a Powered upper-Limb Orthosis*. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 2, N° 3, pp. 119-128.

- RON 86 Rondal J., Henrot F., Charlier M. (1986). *La langue des signes*. Pierre Mardaga, éditeur. Bruxelles. Coll. Psychologie et sciences humaines.
- SAL 75 Sallagoity P. (1975). *The sign language of southern France*. Sign Language Studies, Vol. 7, pp. 181-202.
- SAN 86 Sandler W. *The spreading hand autosegment of ASL*. Sign Language Studies, N°50, 1986, pp. 1-28.
- SAW 98 Sawada H., Notsu T., Hashimoto S. (1998). *Japanese Sign Language recognition based on gesture primitives using acceleration sensors and datagloves*. Proc. 2nd Eur. Conf. on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies, 10-11 sept. 1998, Skövde, Sweden, pp. 149-157.
- SHA 82 Shantz M., Poizner H. (1982). *A computer program to synthesize American Sign Language*. Behavior Research Methods and Instrumentation, Vol 14, N° 5, pp. 467-474.
- SPA 93 Sparrell C. J. (1993). *Coverbal Iconic Gesture in Human-Computer Interaction*. Master of Science in Media Arts and Sciences, MIT, Cambridge MA, Juin 1993.
- STA 95 Starner T. E. (1995). *Visual Recognition of American Sign Language Using Hidden Markov Models*. Master of Science in Media Arts and Sciences, MIT, Cambridge MA, Février 1995.
- STO 72 Stokoe W. C. (1972). *Semiotics and Human Sign Language*. Mouton, The Hague.
- STO 78 Stokoe W. C, Casterline D., Croneberg C. (1978). *A dictionary of American Sign Language on Linguistic principles (Revised Ed.)*. Linstok Press, Silver Spring.
- TEL 98 Tellier S. (1998). *GASPARD : Logiciel d'aide à l'acquisition de la lecture pour de jeunes sourds*. Thèse de l'Université de Lille 1 – spécialité productique.
- TEU 80 Teuber H., Battison R., Lane H., Heck J., Stungis J. (1980). *A computerized lexicon of American Sign Language*. Sign Language Studies, N°29, pp. 349-369.
- TOF 98 Toffin D. (1998). *Capteurs de gestes dans les interfaces homme-machine. Application à la communication gestuelle pour handicapés*. D.E.A. d'instrumentation et d'analyses avancées, Université de Lille I.
- TOK 95 Tokuda M., Okumura M. (1995). *Towards automatic translation from Japanese into Japanese Sign Language*. <http://www.jaist.ac.jp/~tokuda/my-self/paper-e.html>.
- VAL 90 Valli C. (1990). *The nature of a line in ASL poetry*. In: Edmondson W. H. / Karlsson F. (eds): SLR'87: Papers from the Forth International Symposium on Sign Language Research. Lappeenranta, Finland July 15-19, 1987. (International Studies on Sign Language and Communication of the Deaf; 10). Hamburg : Signum, pp. 171-181.
- VAN 96 Vanneste V. (1996). *Logiciel multimédia d'apprentissage des techniques de communication chez les personnes sourdes*. Actes du colloque de l'I.R.R.H., 6 décembre 1996, Lille.

- VAR 98 Varchmin A. C., Rae R., Ritter H. (1998). *Image-based recognition of gaze direction using adaptative methods*. In: Wachsmuth I. / Fröhlich M. (eds): *Lecture Notes in Artificial Intelligence : Procs. Bielefeld Gesture Workshop'97 on Gesture and Sign-Language in Human-Computer Interaction*. Bielefeld, Germany, September 97. Berlin : Springer, pp. 245-258.
- VOG 90 Vogt-svendsen M. (1990). *Eye gaze in Norwegian Sign Language interrogatives*. In: Edmondson W. H. / Karlsson F. (eds): *SLR'87: Papers from the Forth International Symposium on Sign Language Research*. Lappeenranta, Finland July 15-19, 1987. (International Studies on Sign Language and Communication of the Deaf; 10). Hamburg : Signum, pp. 153-162.
- WEX 94 Wexelblat A. (1994). *A Feature-based Approach to Continuous-Gesture Analysis*. Master of Science in Media Arts and Sciences, MIT, Cambridge MA, Juin 1994.
- WID 98 Wideman C. J. (1998). *Signing avatars*. Papers from the CSUN '98 Conference, Los Angeles, March 1998 (http://www.dinf.org/csun_98/csun98_027.htm).
- WIL 79 Wilbur R. B. (1979). *Description linguistique de la langue des signes*. In : Grosjean F. / Lane H. (eds): *La langue des signes*. (=Langages 13:56). Paris : Larousse, pp. 13-34.
- WIL 94a Wilcox S., Scheibman J. (1994). *Multimedia Dictionary of American Sign Language*. Proceedings of ASSETS Conference, Association of Computing Machinists, pp. 9-16.
- WOO 72 Woodward J. C. (1972). *A transformational approach to the syntax of American Sign Language*. In: Stokoe W. C. (ed): *Semiotics and Human Sign Language*, Mouton, The Hague, pp. 131-153.
- WOO 79 Woodward J. (1979). *Quelques aspects sociolinguistiques des langues des signes américaine et française*. *Languages*, Vol 56, pp. 78-91.
- XU 91 Xu J., Aoki Y., Zheng Z. (1991). *Development of a CG System for Intelligent Communication of Sign Language between Japan and China*. *IEICE Transactions*, Vol E74, N° 12, pp. 3959-3961.

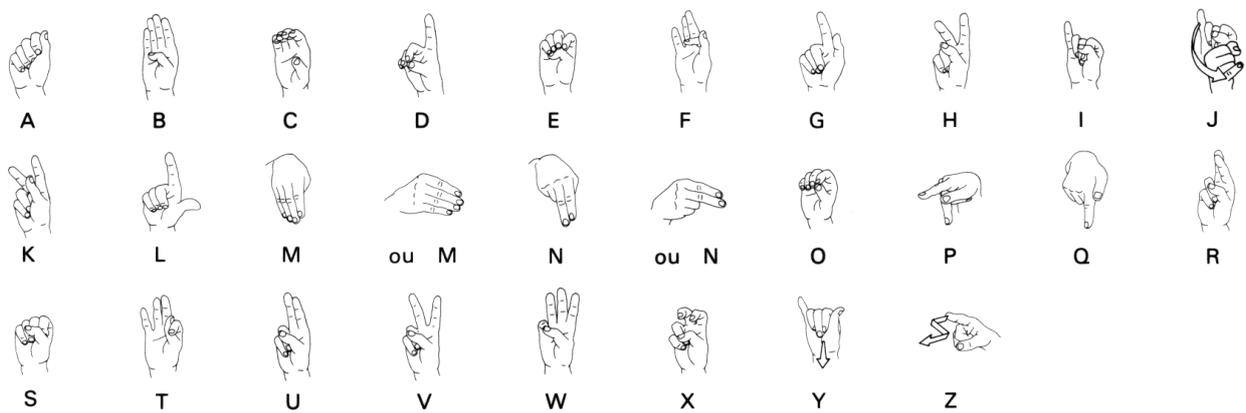
ANNEXES

ANNEXE 1. DONNÉES LINGUISTIQUES	168
1.1. ALPHABETS DACTYLOLOGIQUES LSF ET ASL.	168
1.2 CHÉRÈMES IDENTIFIÉS PAR W. C. STOKOE.	169
1.3. DÉTAIL DES CARACTÉRISTIQUES DE LA TRANSCRIPTION DE LIDDELL ET JOHNSON.	170
1.3.1. Caractéristiques segmentales.....	170
1.3.2. Caractéristiques articulatoires.	171
1.3.3. Un exemple de transcription de Liddell et Johnson.....	172
1.4. ASPECTS FLEXIONNELS IDENTIFIÉS PAR KLIMA ET BELLUGI.	173
ANNEXE 2. DESCRIPTION FORMELLE DE LA LANGUE DES SIGNES	174
2.1. STRUCTURE HIÉRARCHIQUE COMPLÈTE DE SPÉCIFICATION DU SIGNE.	174
2.2. LISTE DES SIGNES UTILISÉS COMME SUPPORTS À L'ANALYSE DU MOUVEMENT.	175
2.3. TEMPS DE PRODUCTION.....	177
2.4. ANALYSE DU MOUVEMENT.....	178
2.5. SIGNES NON ILLUSTRÉS DANS LE CORPS DU TEXTE.....	179
ANNEXE 3. SYNTHÈSE GRAPHIQUE	181
3.1. SPÉCIFICATION DE LA SYNTAXE UTILISÉE POUR LA DESCRIPTION DES SIGNES	181
3.1.1. Spécification générique.....	181
3.1.2. Spécification dédiée	182
3.2. MODÈLE ARTICULÉ DU CORPS HUMAIN.....	184
3.3. SPÉCIFICATIONS ET SYNTHÈSE DES PRINCIPALES CONFIGURATIONS MANUELLES DE LA LSF.....	186
3.4 VALEURS DES SYMBOLES UTILISÉS DANS LA DESCRIPTION DU SIGNE.....	189
3.4 ORGANIGRAMME DE LA SYNTHÈSE DE LA PHRASE SIGNÉE.....	192
ANNEXE 4. ADRESSES INTERNET UTILES.....	193

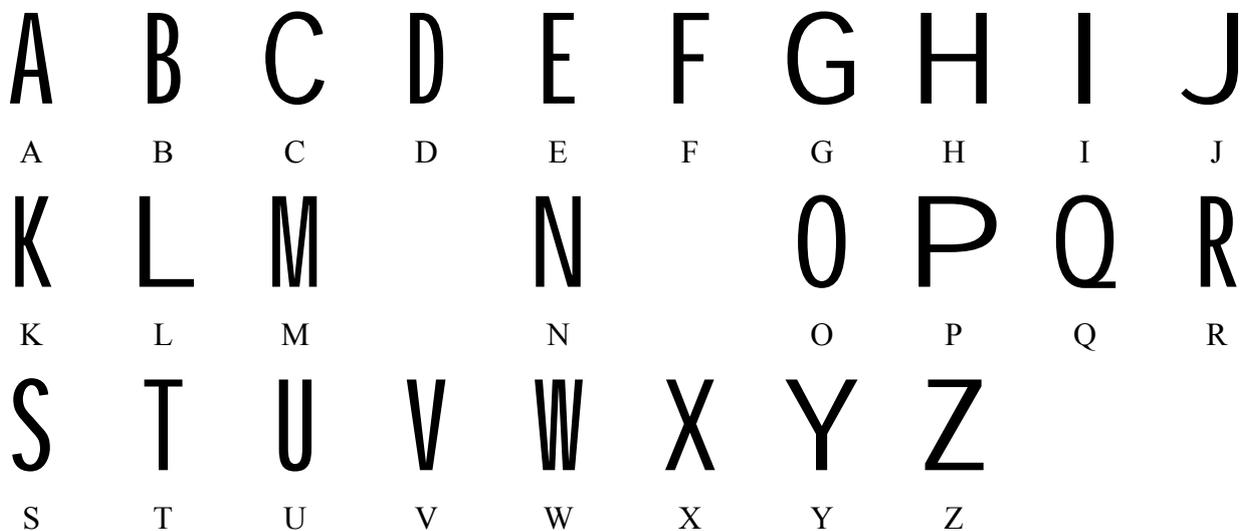
ANNEXE 1. DONNEES LINGUISTIQUES

1.1. Alphabets dactylogologiques LSF et ASL.

Alphabet dactylogologique de la LSF (extrait de [MOO 83]):



Alphabet dactylogologique de l'ASL :



1.2 Chérèmes identifiés par W. C. Stokoe.

Positions dans l'espace (TAB)

- | | | |
|-----|-----|--|
| 1. | ∅ | Espace neutre, par opp. aux autres TAB |
| 2. | ⊙ | Visage ou tête dans son ensemble |
| 3. | ⊖ | Visage supérieur (front, sourcils) |
| 4. | △ | Visage moyen (nez, yeux) |
| 5. | ∪ | Visage inférieur (menton) |
| 6. | ∴ | Visage latéral (joues, tempes, oreilles) |
| | | |
| 7. | G | Cou |
| 8. | [] | Tronc, corps des épaules aux hanches |
| 9. | ∖ | Bras supérieur |
| 10. | √ | Avant-bras, coude |
| 11. | â | Poignet ou bras en supination |
| 12. | ó | Poignet ou bras en pronation |

Configurations manuelles (DEZ) *

- | | | |
|-----|---|---|
| 1. | A | Main fermée (poing) (A, S) |
| 2. | B | Main plate, doigts en contact (B) |
| 3. | 5 | Main ouverte, doigts écartés (5) |
| 4. | C | Main courbée (C, ou plus ouverte) |
| 5. | E | Main contractée (E, griffe) |
| 6. | F | Index et pouce en contact ou croisés, autres doigts tendus (F, pince) |
| 7. | G | Index tendu, main fermée (G, D) |
| 8. | H | Index et majeur tendus (N) |
| 9. | I | Auriculaire tendu, main fermée (I) |
| 10. | K | Index et majeur tendus, pouce intercalé (K) |
| 11. | L | Pouce et index à angle droit (L) |
| 12. | Z | Pouce, index et majeur tendus (3) |
| 13. | O | Doigts courbés, contact pouce-index (O) |
| 14. | R | Majeur et index croisés, autres pliés (R) |
| 15. | V | Index et majeur tendus et écartés (V, 2) |
| 16. | W | Contact pouce-auriculaire, autres tendus (W) |
| 17. | X | Index en crochet (2 plié, crochet) |
| 18. | Y | Pouce et auriculaire tendus, main fermée (Y) |
| 19. | ∅ | Doigts tendus sauf majeur plié (majeur-plié) |

* Les exemples font référence aux lettres dactylogiques de la LSF, ou aux configurations définies par Moody [MOO 83:56]

Mouvements (SIG)

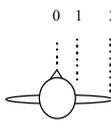
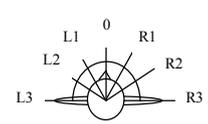
- | | | | | | |
|-----|---|------------------------------------|-----|---|---|
| 1. | ^ | Mouvement vers le haut | 13. | N | Inclinaison ou courbure |
| 2. | v | Mouvement vers le bas | 14. | □ | Ouverture (DEZ final entre parenthèses) |
| 3. | N | Mouvement alterné haut-bas | 15. | # | Fermeture (DEZ final entre parenthèses) |
| 4. | > | Mouvement vers la droite | 16. | ⊂ | Agitation rapide des doigts |
| 5. | < | Mouvement vers la gauche | 17. | ⊙ | Action circulaire |
| 6. | ∑ | Mouvement alterné droite-gauche | 18. |) | Convergence, approche |
| 7. | T | Mouvement vers le signeur | 19. | x | Contact, toucher |
| 8. | ⊥ | Mouvement d'éloignement du signeur | 20. | ⊕ | Liaison, prise, empoignement |
| 9. | ⊖ | Mouvement de va-et-vient | 21. | | Croisement |
| 10. | â | Supination (paume vers le ciel) | 22. | ⊙ | Entrée |
| 11. | ó | Pronation (paume vers le sol) | 23. | ÷ | Séparation, divergence, dissociation |
| 12. | ω | Torsion | 24. | ” | Echange mutuel, correspondance croisée |

1.3. Détail des caractéristiques de la transcription de Liddell et Johnson.

1.3.1. Caractéristiques segmentales.

Caractéristique	Valeurs possibles
Forme du mouvement	<ul style="list-style-type: none"> - str (<i>straight</i>) : en ligne droite - rnd (<i>round</i>) : arrondi - 7 (<i>seven</i>) : chemin indirect à angle aigu - arc : chemin arrondi avec point de départ et d'arrivée différents - circle : chemin arrondi avec mêmes points de départ et d'arrivée
Plan du mouvement (<i>Décrit le plan dans lequel bouge la main</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - HP : plan horizontal parallèle au sol - VP : plan vertical parallèle au torse (plan frontal) - SP : plan parallèle à la surface du corps en un certain endroit - MP : plan médian passant par l'axe médian des organes - OP : plan oblique
Qualité du mouvement	<ul style="list-style-type: none"> - Caractéristiques temporelles : <ul style="list-style-type: none"> long : prolongé short : raccourci acc : accéléré - Caractéristiques non-temporelles : <ul style="list-style-type: none"> tns : tendu sm : chemin réduit lg : chemin étendu - Contact : indique s'il y a contact de la main avec l'autre main ou une partie du corps lors du mouvement
Mouvements locaux (<i>mouvements de répétition rapides, indé- nombrables</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - wg (<i>wiggling</i>) : agitation des doigts - hk (<i>hook</i>) : « crochetage » des doigts en extension - fl (<i>flattening</i>) : rétraction des doigts tendus aux articulations interphalangiennes et rétractés à l'articulation métacarpo-phalangienne - tw (<i>twisting</i>) : rotation alternée du poignet en pronation et supination - nod (<i>nodding</i>) : flexion/extension du poignet - rel (<i>releasing</i>) : extension des doigts qui recouvrent le pouce - rub (<i>rubbing</i>) : frottement des pulpes des doigts et du pouce - <i>circling</i> + spécif. de plan : cercle local autour d'un point dans le plan spécifié

1.3.2. Caractéristiques articulatoires.

Caractéristique	Notation et valeurs possibles *
Configurations manuelles	<p>[/] <FormeMain> <doigts2> [lax] <RotationPouce> <pouce2> [contact]</p> <p>① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦</p> <p>① Si / présent, implication de l'avant-bras (auquel cas, main+avant-bras = 1 entité) ② Etat de flexion/extension des doigts 2 à 5 (25 combinaisons différentes) ③ Diacritiques des doigts en extension : " = en crochet, ^ = plat ④ Si ~ (lax) présent, « assouplit » la position des doigts ⑤ Rotation du pouce : o = en opposition, u = pas d'opposition ⑥ Deuxième paramètre du pouce : open (perp. à la paume), " (crochet), ^ (plat), - (fermé) ⑦ Contact du pouce (1) avec un autre doigt (i) : c = extrémités de 1 et i, p = pulpe de 1 et pulpe ou partie latérale de i, f = pulpe de 1 et ongle de i, t = pulpe de i et ongle de 1.</p>
Point de contact:	
• Partie de la main	Indique quelle partie de la main dominante se trouve ou est en contact avec la localisation du Point de Contact : ex. intérieur main, extérieur doigt, ...
• Proximité	Distance par rapport à la localisation du Point de contact : c(ontact), p(roximal), d(istal), m(édial).
• Relation spatiale	Si pas c(ontact) dans la proximité, il faut indiquer la direction de décalage par rapport au point de localisation. Il peut être absolu (ipsilatéral, dessus, dessous,...) ou relatif à une partie de la main.
• Localisation	<p>* Sur le corps : [%] [i] <Localisation> [t b]</p> <p>① ② ③ ④</p> <p>① % = contralatéral, ipsilatéral si omis ② i = emplacement légèrement décalé vers la périphérie du corps ③ Localisation : une des 20 localisations de base ④ emplacement légèrement décalé vers le haut (t - <i>top</i>) ou le bas (b - <i>bottom</i>)</p> <p>* Dans l'espace : <Proximité> <Décalage ipsilatéral> <Localisation centrale></p> <p>① ② ③</p> <p>ou : <Proximité> <Vecteur> <Localisation centrale></p> <p>① ④ ③</p> <p>① Proximité : p(roximale), m(édiale), d(istale), e(tendue) ② Décalage latéral : 0 = aucun, 1 = niveau de l'oreille, 2 = niveau de l'épaule (cf. schéma) ③ Hauteur : une des 10 primitives (extraites des 20 localisations de base) ④ Vecteur : cf. schéma</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Valeurs pour ②</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Valeurs pour ④</p> </div> </div> <p>* Sur la main de base : <Partie principale> <Zone></p> <p>① ②</p> <p>① Partie principale : main, doigts, avant-bras, pouce ② Zone de la partie principale : pulpe, bout, dos, intérieur, ...</p>

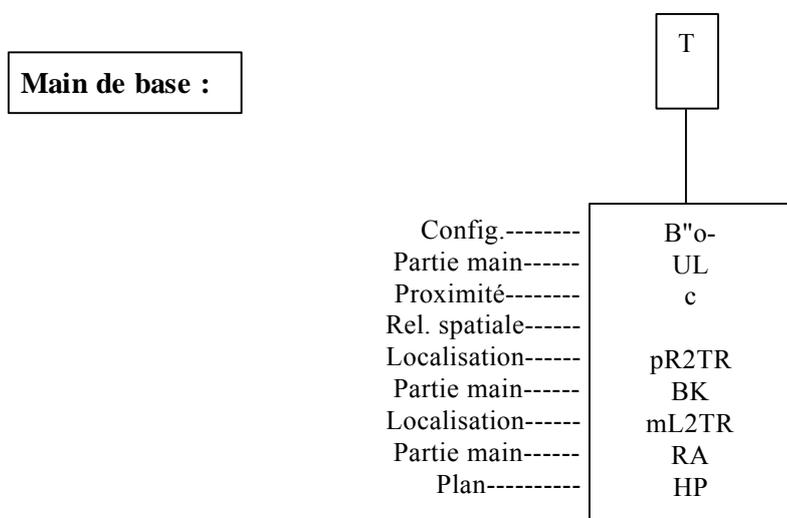
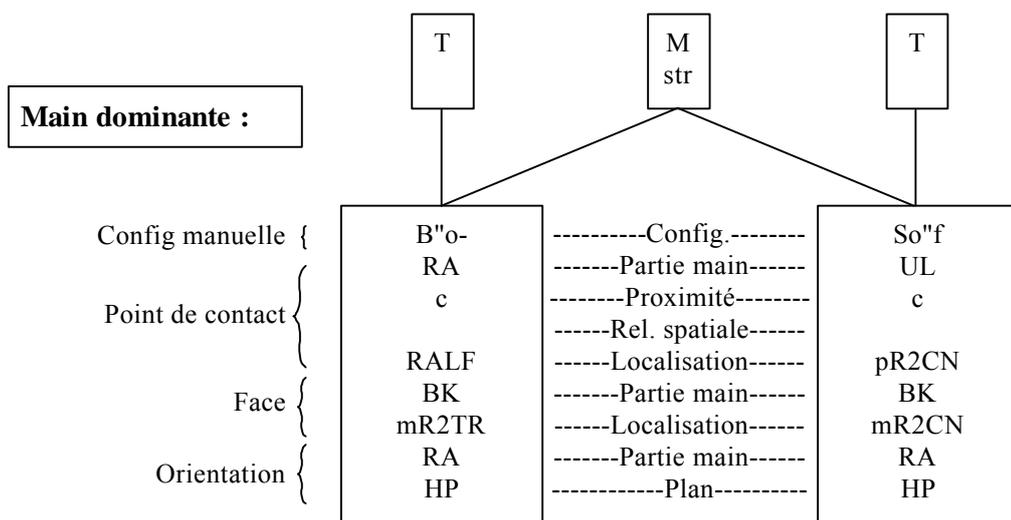
* Les paramètres obligatoires sont notés de manière formelle entre <>, les paramètres optionnels entre [].

1.3.3. Un exemple de transcription de Liddell et Johnson.

Le signe LSF *Bouteille*.



*Le signe
bouteille*



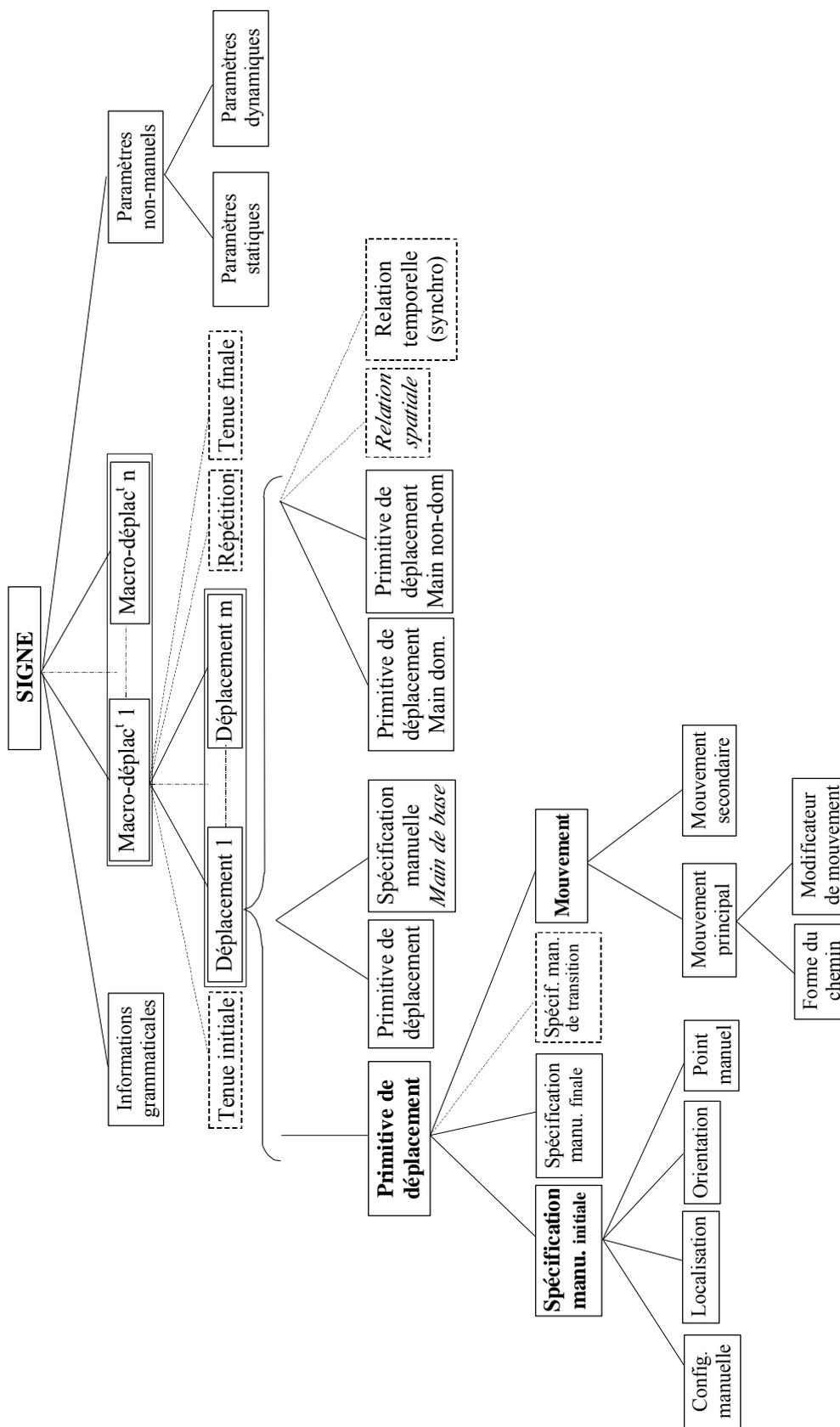
1.4. Aspects flexionnels identifiés par Klima et Bellugi.

Aspect flexionnel (Nom de la modulation)	Signification	Exemples	Description
Approximatif	Sorte de ..., façon de	Plutôt triste	Main lâche; mvt. rapide très réduit
Augmentatif	De plus en plus	Apprendre de mieux en mieux	Mvt. répété sur une ligne déterminée par le signe non fléchi
Continuatif (<i>Elliptical</i>)	Pendant longtemps	Etre malade depuis longtemps	Mvt. elliptique, lent, répété
Facilitatif	Aisément	Ecrire avec aisance	Mvt. rallongé et rapide
Fréquentatif	Fréquemment	Tomber souvent malade	Mvt. très tendu; 4 à 6 répétitions régulières
Habituel	Habituellement		Mvt. réduit et répété
Incessant (<i>Tremolo</i>)	Sans arrêt	Tomber sans arrêt malade	Mvt. réduit, tendu, très rapide et plusieurs fois itéré
Inceptif	Commencer à ...	Commencer à aimer	
Intensif	<Intensification>	Etre très malade	Mvt. tendu, rapide; tenues prolongées en début et fin
Itératif	Plusieurs fois de suite	Regarder plusieurs fois de	Retour par un arc dans la position initiale, tenue, le tout itéré
Prédispositionnel (<i>Circular</i>)	Prédisposé, enclin à ...	Etre maladif	Mvt. circulaire, régulier, itéré
Protactif	De façon ininterrompue	Fixer quelqu'un longtemps	Tenue très prolongée, sans mouvement
Résultatif (<i>Accelerando</i>)	Résultant en un changement radical	Tomber gravement malade	Mvt. tendu rallongé, progressivement accéléré, avec tenue prolongée en position finale
Susceptatif (<i>Thrust</i>)	Susceptible de ...	Tomber facilement malade	Main relâchée; mvt. réduit et tendu, brusquement accéléré en début

Aspect flexionnel	Répétition		Tenues (durée)		Paramètres spatiaux		Paramètres cinématiques et dynamiques	
	Nombre	Transition	Début	Fin	Amplitude	Forme	Vitesse	Accélération «Tension»
Approximatif					- -		+	-
Augmentatif	plusieurs	déplacem.						
Continuatif	3					grande ellipse	-	
Facilitatif					+		+	-
Fréquentatif	4 à 6							0 (<i>régul.</i>)
Habituel	plusieurs				-		+	
Incessant	nombreuses				-		++	+
Intensif			+	+			++	+
Itératif	plusieurs	arc	+					
Prédispositionnel	plusieurs					grand cercle	+	0 (<i>régul.</i>)
Protactif			++				0	
Résultatif				+	++			+
Susceptatif				-	-		+	- (<i>décel.</i>)

ANNEXE 2. DESCRIPTION FORMELLE DE LA LANGUE DES SIGNES

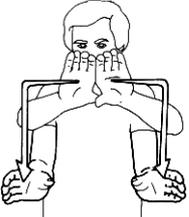
2.1. Structure hiérarchique complète de spécification du signe.



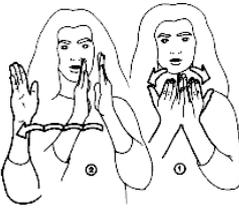
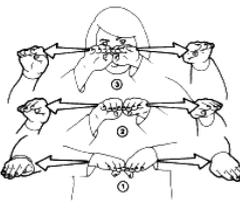
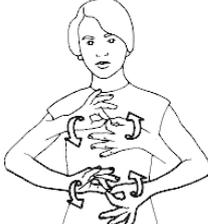
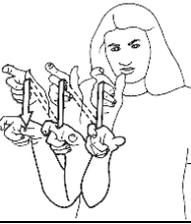
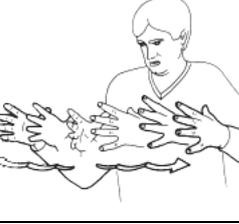
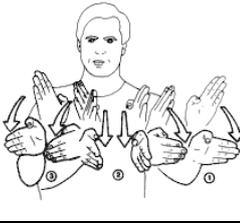
2.2. Liste des signes utilisés comme supports à l'analyse du mouvement.

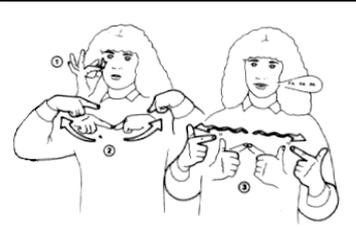
Le tableau ci-dessous présente les signes que nous avons sélectionnés à des fins d'analyse du mouvement. Ils sont classés selon trois groupes, en fonction de la caractéristique principale étudiée pour chacun.

① Etude de la trajectoire

				
			Mur (21)	Cheminée (38)
				
S'asseoir (41)	Laver, nettoyer (82)	Pizza (169)	Raisin (178)	Il n'y a pas (1001)

② Etude des temps de production, des transitions et des tenues

				
Construire (14)	Bibliothèque (35)*	Etagères (36)	Lait (135)	(se) Boutonner (208)
				
Gens (299)	S'agrandir (382)	Strict, structuré (424)	Facture, addition (534)*	Ne pas être là (980)

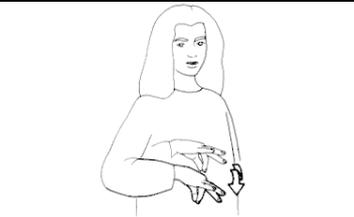
				
<i>Signe directionnel</i> Téléphoner à (910)	<i>Collectif</i> Bijoux (230)	Papa (314)	<i>Signe composé</i> Maman (315)	Parents (316)

Remarque : L'astérisque (*) dénote des signes différents dans notre corpus et dans le dictionnaire IVT (dont les dessins ont été repris ici). Ainsi :

- dans *bibliothèque*, le déplacement figurant un livre est effectué en joignant les mains deux fois de suite et non en les ouvrant ; celui représentant une rangée d'objets vient d'abord et présente une rotation du poignet au lieu de l'arc répété ;
- dans *facture*, la main de base est absente.

Nous ne sommes pas en mesure de préciser si ces changements relèvent de la diachronie du signe ou s'il s'agit de variantes synchroniques. Ce que l'on peut dire est que ces différences tendent globalement à une simplification formationnelle, de même que celles observées ci-dessous au niveau des verbes associés à certains noms.

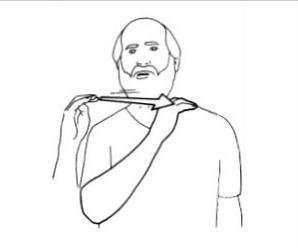
③ Etude de la dynamique et de la vitesse

		
<i>Différence nom / verbe</i>	<i>Nuances lexicales</i>	
Contrôle (551) <i>Avec un mouvement non répété, plus sec :</i> Contrôler	Bénéfice (535) <i>Avec un mvt. non répété, plus ample, plus tonique :</i> Faire du bénéfice	Etre en retard (1124) <i>Avec un seul mvt. rapide et plus tonique : Tard</i> <i>Avec un seul mvt rapide, plus ample, un haussement d'épaules et l'expression faciale ad hoc : Trop tard !</i>

Remarques : Une fois encore, certaines différences sont notables dans les signes filmés dont nous disposons en ce qui concerne les verbes suivants :

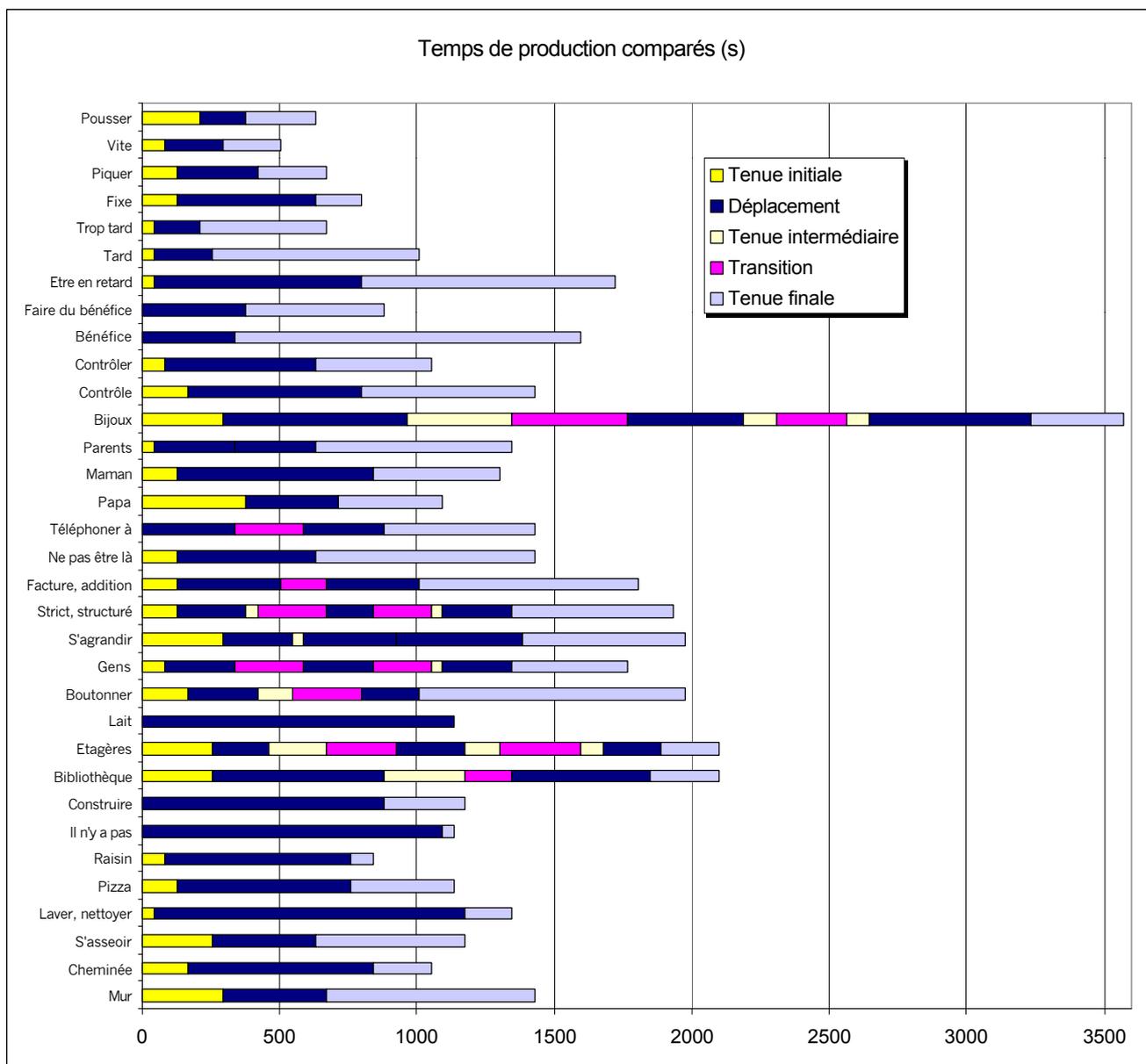
Contrôler : *Mouvement répété, tenues plus marquées, engagement des épaules et yeux dirigés fixement là où se produit le mouvement.*

Faire du bénéfice : *Mouvement non répété (comme pour bénéfice), plus ample, avec davantage d'engagement du corps et le regard fixé vers le lieu d'articulation.*

			
<i>Signes à dynamique particulière propre</i>			
Fixe (473)	Piquer (1038)	Vite (1164)	Pousser (1294)

2.3. Temps de production.

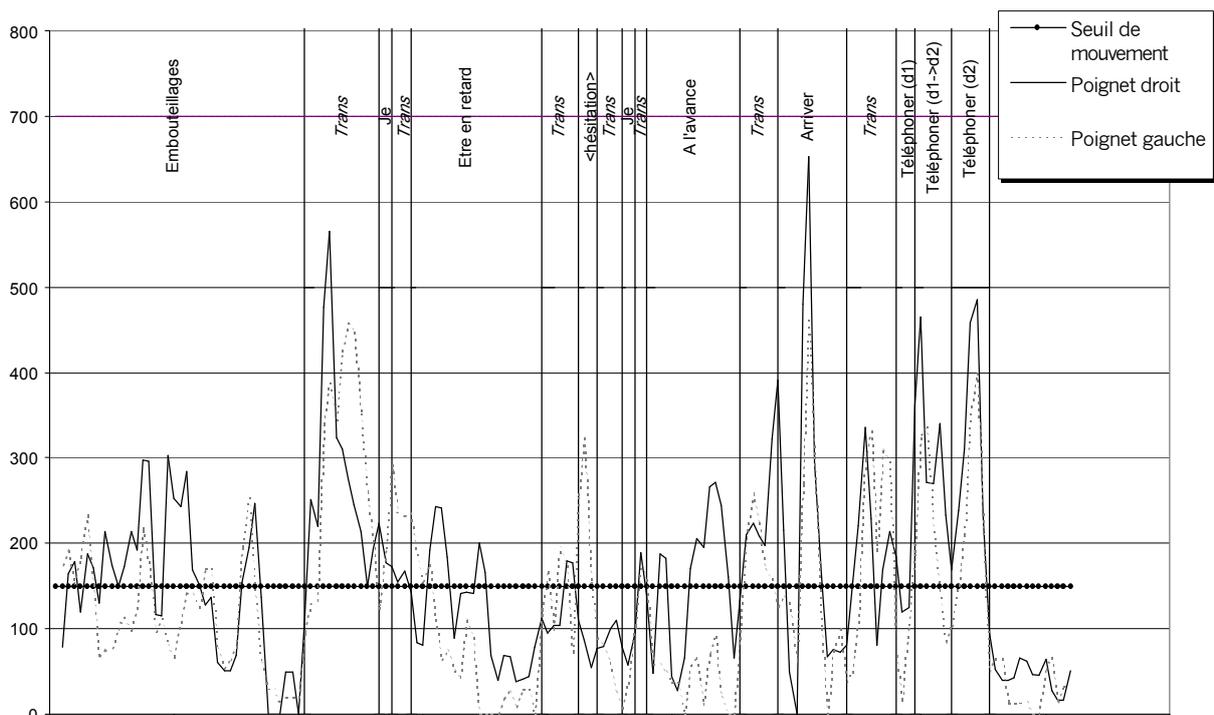
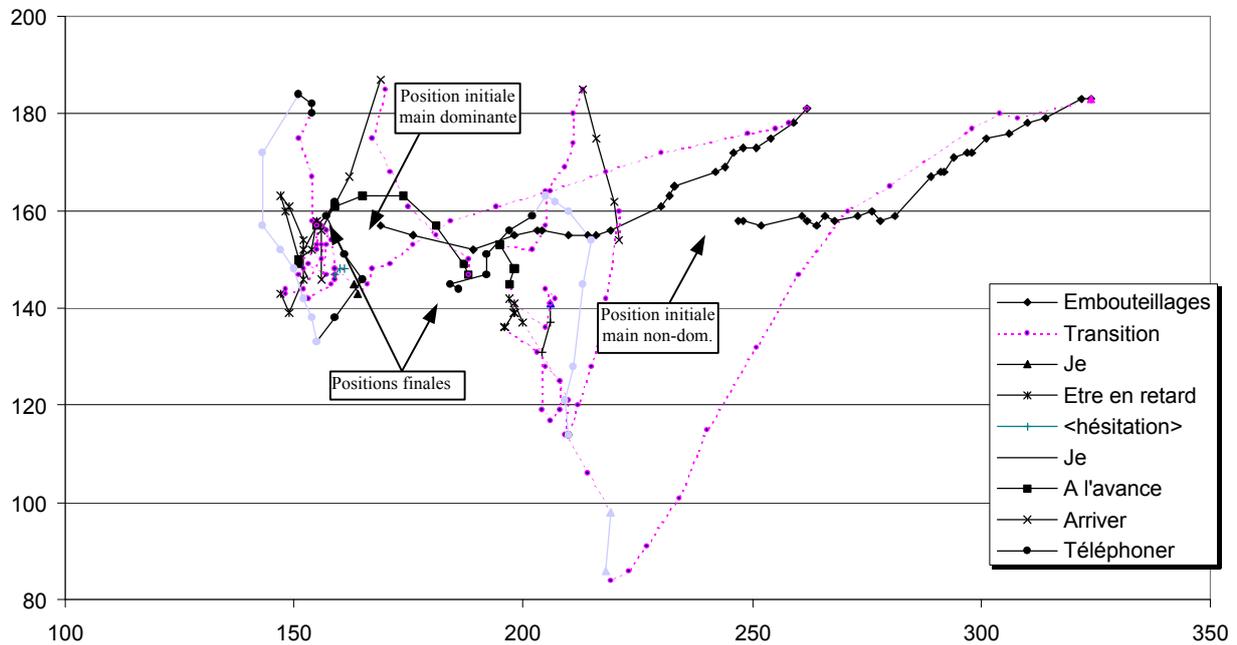
Le diagramme suivant représente les temps de production comparés de différents signes en forme de citation, tirés de notre corpus d'étude. Il met en lumière les proportions relatives des phases dynamiques, des transitions et des tenues.



2.4. Analyse du mouvement.

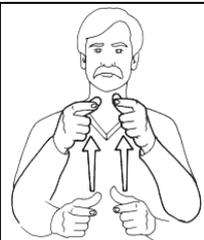
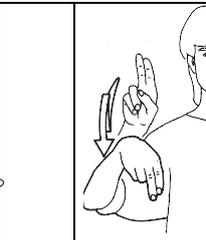
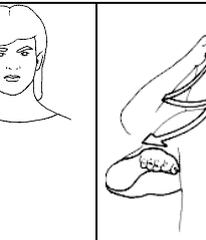
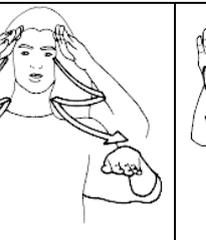
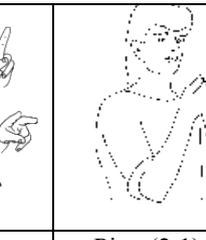
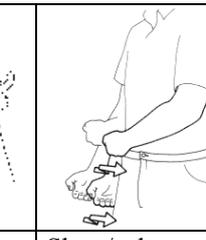
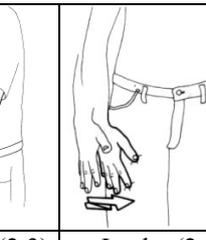
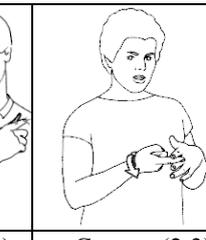
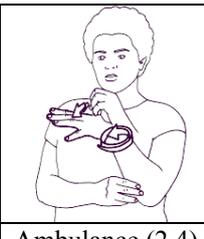
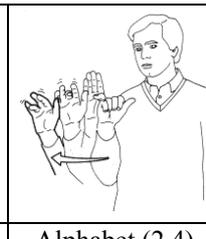
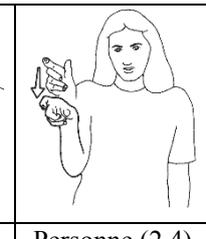
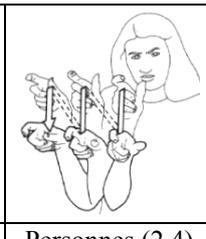
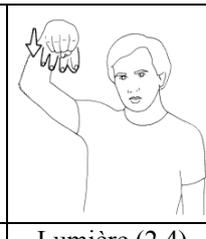
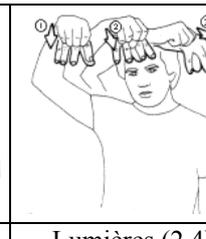
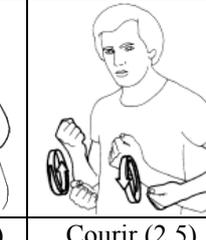
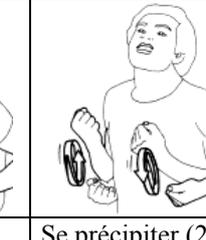
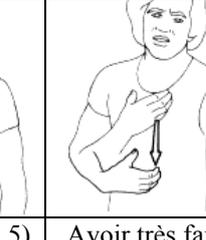
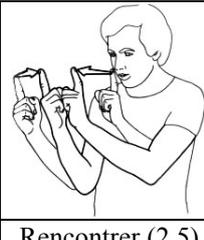
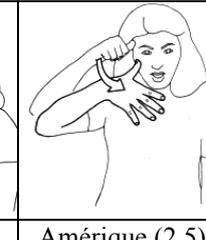
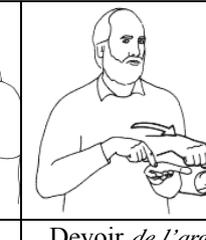
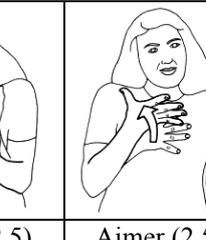
Les graphes ci-dessous représentent la position et la vitesse des poignets lors de la production signée de la phrase :

S'il y a des embouteillages et que je suis en retard, je te téléphonerai avant d'arriver



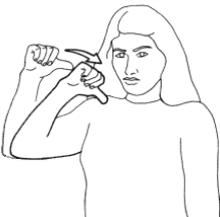
2.5. Signes non illustrés dans le corps du texte.

Afin de ne pas surcharger le corps du texte, nous n'avons pas systématiquement illustré les signes évoqués. Toutefois, de façon à faciliter une bonne compréhension du document, cette annexe présente précisément ceux auxquels nous avons fait référence sans les représenter par une figure numérotée (la partie correspondante est notée entre parenthèses).

					
Ascenseur (1)	Faire la vaisselle (1,3)	Peindre (1)	Sapin (2.1)	Il neige (2.1)	
					
Automne (2.1)	Pipe (2.1)	Short/caleçon (2.3)	Jambe (2.3)	Collier (2.3)	Crayon (2.3)
					
Ambulance (2.4)	Alphabet (2.4)	Personne (2.4)	Personnes (2.4)	Lumière (2.4)	Lumières (2.4)
					
Demander (2.4)	Progresser (2.4)	Courir (2.5)	Se précipiter (2.5)	Avoir faim (2.5)	Avoir très faim (2.5)
					
Rencontrer (2.5)	Prévenir (2.5)	Amérique (2.5)	Devoir de l'argent (2.5)	Vouloir (2.5)	Aimer (2.5)

				
Lundi (2.5)	Mardi (2.5)	Vendredi (2.5)	Samedi (2.5)	Dimanche (2.5)

			
Mal au cœur (2.5)	Content (2.5)	Impossible (2.5)	Détester (2.5)

			
Hier (3)	Avant-hier (3)	Téléphoner à (3)	Cadeau (Conclusion)

ANNEXE 3. SYNTHESE GRAPHIQUE

3.1. Spécification de la syntaxe utilisée pour la description des signes

3.1.1. Spécification générique.

Les lignes suivantes constituent la spécification formelle générique de la syntaxe utilisée pour la description d'un signe, suivant le formalisme de Backus-Naur étendu (EBNF). Les symboles terminaux y sont notés en gras et commencent par une minuscule. Les non-terminaux débutent par une majuscules et sont réécrits dans une règle de production qui suit celle où ils apparaissent pour la première fois. Comme il est de rigueur dans un contexte de compilation, cette grammaire est non ambiguë.

```

Sign → SignHeader Manual [NonManual]
SignHeader → "Sign " SignNameWithParams
SignNameWithParams → signName [ "(" { Parameter } ")" ]
Parameter → VariableName
Manual → "Manual:" ExpressionSeries
NonManual → "NonManual:" [ExpressionSeries]
ExpressionSeries → { Expression "." } Expression
Expression → [Setting] ( Primary | MessageExpression { ";" KeywordMessage } )
Setting → VariableName "="
Primary → VariableName | SignNameWithParams | "(" Expression ")" | position
MessageExpression → UnaryExpression | BinaryExpression | KeywordExpression
UnaryExpression → Primary UnaryMessage { UnaryMessage }
BinaryExpression → ( UnaryExpression | Primary ) BinaryMessage { BinaryMessage }
KeywordExpression → ( BinaryExpression | Primary ) KeywordMessage
KeywordMessage → selector ( Primary | UnaryExpression | BinaryExpression ) ¶
                                     { selector ( Primary | UnaryExpression | BinaryExpression ) }
BinaryMessage → ", " ( UnaryExpression | Primary )
UnaryMessage → UnarySelector
UnarySelector → identifier
VariableName → identifier

```

Les symboles terminaux, transmis par l'analyseur lexical, possèdent les définitions régulières suivantes :

```

selector → identifier ":"
identifier → letter { letter | digit | "_" }
symbol → "#" identifier
signName → "#" identifier { ("-" | "'" | ">") identifier }
position → "[" { identifier | number } [ "&" { identifier | number } ] "]"
number → digit { digit } [ "." digit { digit } ]
digit → "0" | "1" | ... | "9"
letter → "A" | "B" | ... | "Z" | "a" | "b" | ... | "z"

```

3.1.2. Spécification dédiée.

Dans cette section est exposé l'ensemble des messages disponibles pour spécifier les diverses caractéristiques manuelles du signe, du niveau le plus élevé aux primitives les plus élémentaires. La syntaxe de ces messages se conforme bien évidemment à la grammaire du langage examinée plus haut.

Remarque : le parenthésage et la ponctuation n'ont pas été inclus dans cette spécification ; il doivent cependant être respectés en cas de messages imbriqués ou enchaînés.

Macro-déplacement :

* Cas général :

```

MacroShift → "MacroShift first:" Shift "second:" Shift [ "third:" Shift
                                                                    [ "fourth:" Shift ] ]

```

* Cas à 2 déplacements :

```

MacroShift → Shift " ," Shift

```

* Cas à 1 déplacement :

```

MacroShift → "MacroShift with:" Shift

```

Déplacement :

```

Shift → "Shift" ShiftPrimeMessage [ ( "weakMove:" ( HandSpec / ShiftPrime /
                                                                    SpatialRelation ) / "staticWeak:" HandSpec ) ]

```

```

SpatialRelation → SpatialRelationSymbol / SpatialRelationMessage

```

```

SpatialRelationSymbol → "#Symmetrical" / "#AntiSymmetrical" / "#Opposite" /
                                                                    "#OppositeAboutIpsi" / "#OppositeAboutContra"

```

```

SpatialRelationMessage → "ConstantGap of : [ " NumericVector "]" /
                                                                    "SymmetricalGap of : [ " NumericVector "]" /
                                                                    "ConstantGapAboutIpsiPlane of : [ " NumericVector "]"

```

Spécification des répétitions sur un déplacement :

* Répétition simple :

```

Shift ( " repeat" / " repeat:" <n> " times" )

```

* Répétition radiale :

```

Shift " repeatRadial"

```

* Répétition avec échange du rôle des mains :

```

Shift " repeatExchangingHands"

```

* Mouvement inversé :

Shift " **reverse** "

* Mouvement inversé et répété :

Shift " **reverseAndRepeat** "

* Rebroussement partiel :

Shift " **retrace** "

* Répétition à partir du point courant :

Shift " **repeatFromCurrentPoint:** " <*n*> " **times** "

* Répétition à partir d'un point décalé :

Shift " **repeat:** " <*n*> " **times from:** " *Location*

Primitive de déplacement :

ShiftPrime → " **ShiftPrime** " *ShiftPrimeMessage*

ShiftPrimeMessage → **from:** " *HandSpec* " **to:** " (*HandSpec* / *Location*) " **move:** " *Move*

Spécification manuelle :

HandSpec → " **HandSpec config:** " *HandConfig* [" **point:** " *BodyPoint*] " **at:** " *Location* ¶
[" **ori:** " *Orientation*]

Mouvement :

Move → *MainMove* | *SecMoveSymbol*

MainMove → *MainMoveSymbol* | (" **CircularMove** " | " **ArcMove** ") " **ori:** "
nvVectors

nvVectors → "[" *SymbolicVector* "&" *NumericVector* "]"

NumericVector → **number** " " **number** " " **number**

MainMoveSymbol → "#Natural" | "#Static" | "#Linear"

SecMoveSymbol → "#Wiggle" | "#Hook" | "#Rub" | "#Cost" | "#Flatten" | ¶
"#Scissor" | "#Count" | "#Twist" | "#Wave" | "#WaveAt" | ¶
"#Circumduct" | "#Oscillate"

Configuration manuelle :

Il s'agit de l'une des configurations décrites dans le fichier *config.hcs* (voir l'annexe 3.3 pour les formes de base).

Localisation :

Location → "[" (*Hpos* *Fpos* *Spos* | *BodyPoint*) "]"

Hpos → "UpperLegs" | "Waist" | "LowerTorso" | "MidTorso" | ¶
"UpperTorso" | "Shoulders" | "MidFace" | "TopHead" | "OverHead"

Fpos → "FrontContact" | "FrontProx" | "FrontMid" | "FrontFar"

Spos → "ContraSide" | "ContraEdge" | "Sagittal" | "IpsiEdge" | ¶
"IpsiSide" | "IpsiMidFar" | "IpsiFar"

Orientation :

Orientation → "[" (*AbsoluteOrientation* | *RelativeOrientation*) "]"

AbsoluteOrientation → *SymbolicVector* "&" *SymbolicVector*⁴⁹

SymbolicVector → *RadialDirection* " " *Direction*⁵⁰

⁴⁹ Ces deux vecteurs, correspondant respectivement à \vec{n} et \vec{i} , sont orthogonaux

⁵⁰ *Direction* est à choisir parmi celles contenues dans le plan défini par *RadialDirection*

RadialDirection → "f" / "cff" / "cf" / "ccf" / "c" / "bcc" / "bc" / "bbc" / "b" / "b" / "bbi" / "bi" / "bii" / "i" / "fii" / "fi" / "ffi"

RelativeOrientation → *FlexExtSymbol* " " *AbdAddSymbol* " " *PronSupSymbol*

FlexExtSymbol → "flexed" / "midFlexed" / "unFlexed" / "midExtended" / "Extended"

AbdAddSymbol → "abducted" / "unAbducted" / "midAdducted" / "adducted"

PronSupSymbol → "pronated" / "midPronated" / "unPronated" / "midSupinated" / "Supinated"

Point corporel :

BodyPoint → *HandPoint*

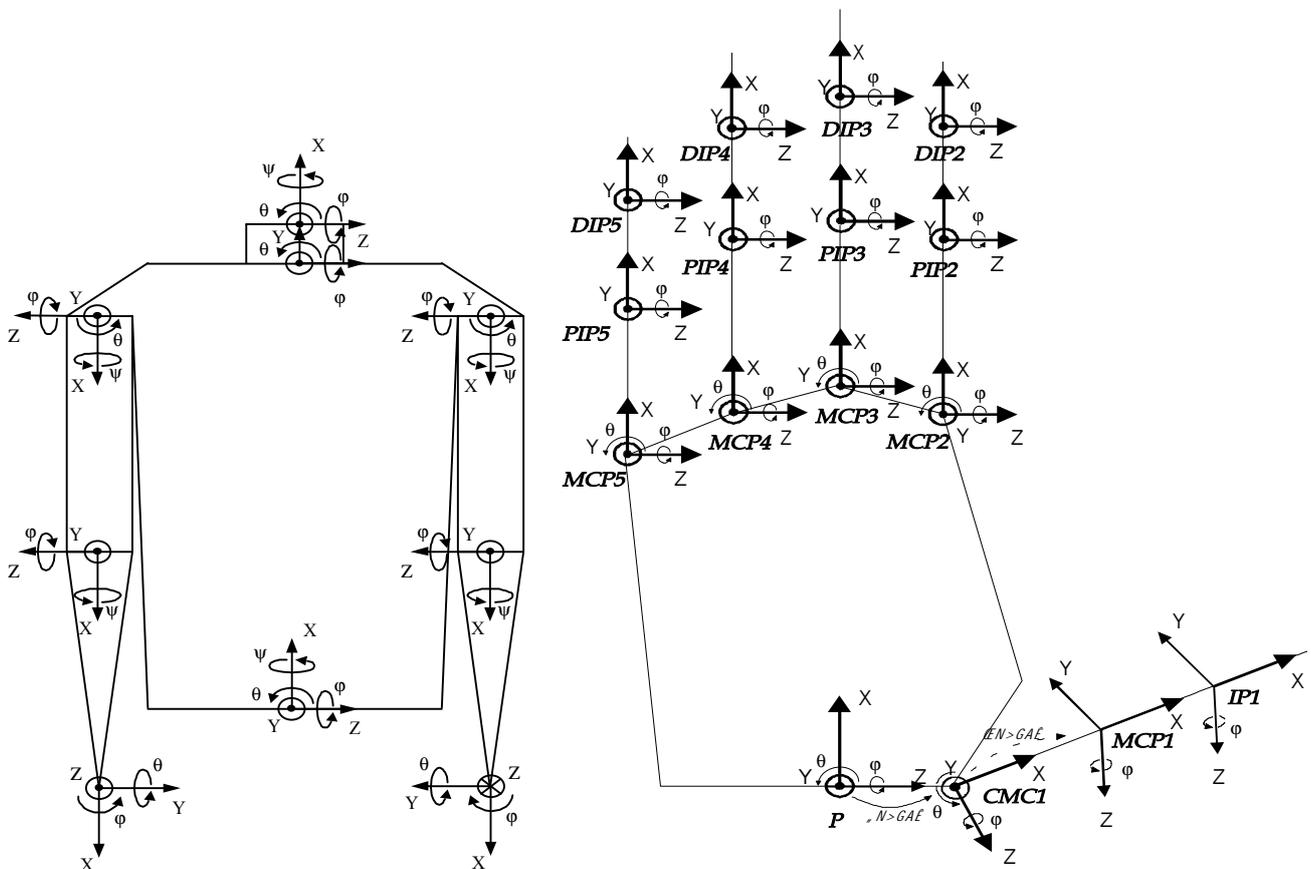
HandPoint → "#Wrist" | "#Palm" | "#" *Finger FingerPoint*

Finger → "Thumb" | "Index" | "Middle" | "Ring" | "Little"

FingerPoint → "Pit" | "Root" | "Mid" | "Tip"

3.2. Modèle articulé du corps humain

Les schémas ci-dessous donnent une définition exhaustive de la structure articulaire adoptée pour modéliser le corps du signeur virtuel en précisant, pour chaque articulation, l'orientation du repère attaché et les rotations correspondantes avec leur sens positif.

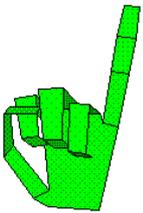
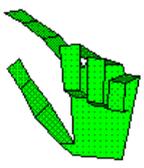
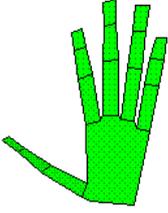
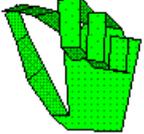
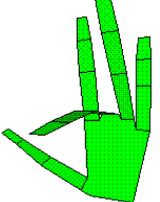
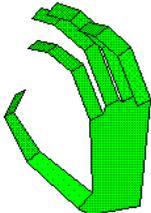
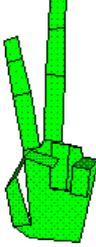
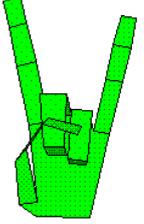
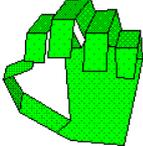
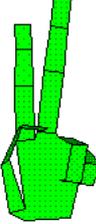
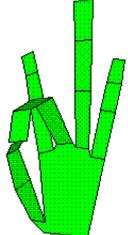


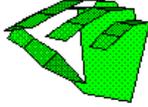
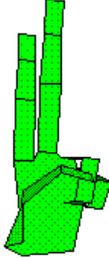
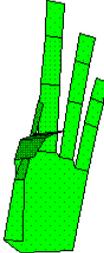
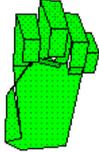
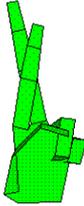
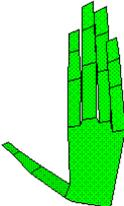
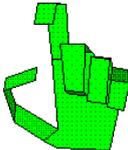
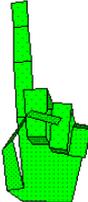
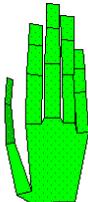
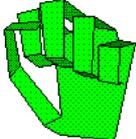
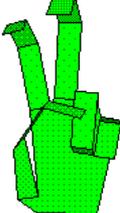
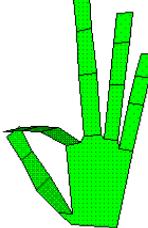
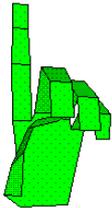
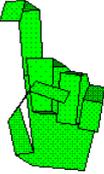
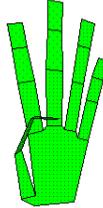
Le tableau ci-dessous décrit la structure arborescente des segments corporels (marquée par l'indentation dans la colonne *Nom*) et leur regroupement en macro-segments. Pour chacun est précisée l'articulation proximale attachée, et notamment les débattements du ou des degrés de liberté possibles.

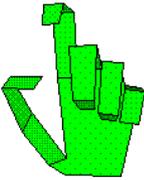
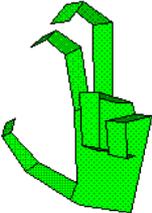
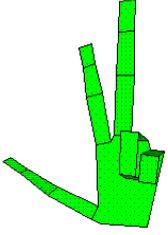
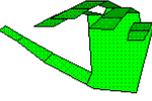
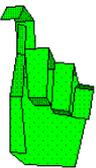
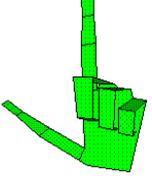
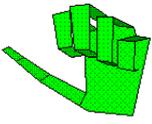
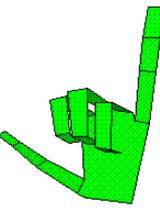
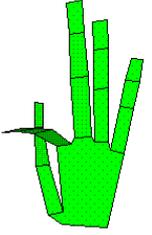
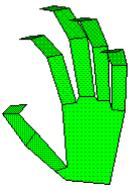
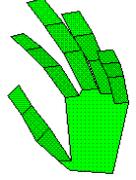
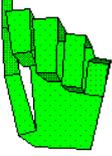
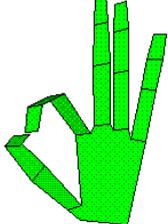
Macro-segment	Segment		Articulation attachée			
	Nom	Description : Long/larg _{ini} [/larg _{fin}] ou Points (<i>en gras : articulations filles</i>)	Nom	Angles et débattements (en °)		
Body		Torso	World	$\theta=-5..5, \varphi=-5..15, \psi=-10..10$		
	Arm	UpperArm	90 / 10	Shoulder	$\theta=-30..135, \varphi=-25..160, \psi=-35..95$	
		ForeArm	90 / 10	Elbow	$\varphi=0..150, \psi=-85..80$	
	Hand	Thumb	Palm	(0@7.5,0@-7,3.5@-9,25@-6,27@0,25@5.5,22.5@10)	Wrist	$\theta=-40..15, \varphi=-70..80$
			ProxPhal1	16 / 2.5	CMC1	$\theta=0..60, \varphi=0..50$
			MidPhal1	11.5 / 2.5	MCP1	$\varphi=10..40$
			DistPhal1	7 / 1.5	IP1	$\varphi=-10..80$
		Index	ProxPhal2	14.5 / 2.5	MCP2	$\theta=-10..2, \varphi=0..80$
			MidPhal2	8.5 / 2.5	PIP2	$\varphi=0..100$
			DistPhal2	5.5 / 2 / 1.5	DIP2	$\varphi=0..70$
		Middle	ProxPhal3	16 / 2.5	MCP3	$\theta=0..10, \varphi=0..85$
			MidPhal3	10 / 2.5	PIP3	$\varphi=0..100$
			DistPhal3	6.5 / 2 / 1.5	DIP3	$\varphi=0..70$
		Ring	ProxPhal4	14.5 / 2	MCP4	$\theta=-2..8, \varphi=0..90$
			MidPhal4	10 / 2	PIP4	$\varphi=0..100$
			DistPhal4	6.5 / 2 / 1.5	DIP4	$\varphi=0..70$
		Little	ProxPhal5	12.5 / 2	MCP5	$\theta=-5..12, \varphi=0..100$
			MidPhal5	7 / 2	PIP5	$\varphi=0..100$
			DistPhal5	5.5 / 2 / 1.5	DIP5	$\varphi=0..70$
		Head	Neck		Neck	$\theta=-3..3, \varphi=-5..10$
			Hair		} FaceJoint	$\theta=-10..10, \varphi=-5..10, \psi=-60..60$
			Ears			<i>statique</i>
			Face			<i>statique</i>
	Mouth, Eye, Eyebrow, EyeBrowWrinkles, FrontWrinkles		<i>aJoint</i>	<i>statique</i>		

3.3. Spécifications et synthèse des principales configurations manuelles de la LSF.

Ces configurations correspondent à celles proposées par Moody [MOO 83], auxquelles ont été ajoutées celles recensées par Braffort [BRA 96] sur un corpus de près de 1300 signes. Les noms suivent majoritairement la terminologie de Moody.

Config I Fingers AllFingers : Bent 5 : Extended Hand Abduct : 5 Covered : 2,3 End		Config BecOuvert Fingers AllFingers : Bent 2 : NearFlat Hand Pad : 1,2 End		Config Cinq Fingers AllFingers : Extended Hand Abducted End	
Config Griffes Fingers AllFingers : Hook Hand Abducted End		Config BecOiseau Fingers AllFingers : Bent 2 : Flat Hand Pad : 1,2 End		Config MajeurPlié Fingers AllFingers : Extended 3 : Flat Hand End	
Config C Fingers AllFingers : C Hand Tip : 1,2 End		Config V Fingers AllFingers : Bent 2 : Extended 3 : Extended Hand Abduct: 2,3 Covered : 4 End		Config Cornes Fingers AllFingers : Extended 3 : Bent 4 : Bent Hand Abducted Covered : 3,4 End	
Config O Fingers AllFingers : O Hand Tip : 1,2 End		Config K Fingers AllFingers : Bent 2 : Extended 3 : Extended Hand Abduct: 3 End		Config PouceMajeur Fingers AllFingers : Extended 3 : O Hand Abducted Tip : 1,3 End	

<p>Config BecCanard Fingers AllFingers : Flat Hand Pad : 1,2 End</p>		<p>Config U Fingers AllFingers : Bent 2 : Extended 3 : Extended Hand Adduct: 2,3 Covered : 4 End</p>		<p>Config T Fingers AllFingers : Extended 2 : Flat Hand Abducted ThumbBetween : 2,3 End</p>	
<p>Config E Fingers AllFingers : E Hand End</p>		<p>Config R Fingers AllFingers : Bent Hand Crossed Covered : 4 End</p>		<p>Config Moufle Fingers AllFingers : Extended Hand Adducted End</p>	
<p>Config DeuxPlié Fingers AllFingers : Bent 2 : Hook Hand Tip : 1,2 End</p>		<p>Config Index Fingers AllFingers : Bent 2 : Extended Hand Covered : 4 End</p>		<p>Config Plate Fingers AllFingers : Extended 1 : Flat Hand Adducted End</p>	
<p>Config S Fingers AllFingers : Bent Hand Covered : 2,3 End</p>		<p>Config X Fingers AllFingers : Bent 2 : Hook 3 : Hook Hand Abduct: 2,3 Covered : 4 End</p>		<p>Config Pince Fingers AllFingers : Extended 2 : Flat Hand Abduct : 4,5 Pad: 1,2 End</p>	
<p>Config D Fingers AllFingers : O 2 : Extended Hand Tip : 1,3 End</p>		<p>Config Crochet Fingers AllFingers : Bent 2 : Hook Hand Covered : 3,4 End</p>		<p>Config Quatre Fingers AllFingers : Extended 1 : Bent Hand Abducted End</p>	

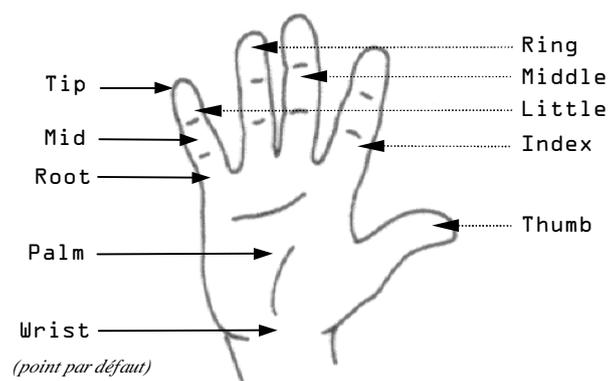
<p>Config Crochet2 Fingers AllFingers : Bent 2 : Hook Hand Tip : 1,2 End</p>		<p>Config PetiteGriffe Fingers AllFingers : Hook 4 : Bent 5 : Bent Hand Abducted End</p>		<p>Config Trois Fingers AllFingers : Extended 4 : Bent 5 : Bent Hand Abducted End</p>	
<p>Config AngleDroit Fingers AllFingers : Flat 1 : Extended Hand End</p>		<p>Config Clé Fingers AllFingers : Bent 2 : Hook Hand Ventral : 1,2 End</p>		<p>Config Deux Fingers AllFingers : Bent 1 : Extended 2 : Extended Hand End</p>	
<p>Config Un Fingers AllFingers: Bent 1 : Extended Hand End</p>		<p>Config Y Fingers AllFingers : Bent 1 : Extended 5 : Extended Hand End</p>		<p>Config F Fingers AllFingers : Extended 1 : Flat 2 : Flat Hand Abduct : 5 End</p>	
<p>Config Boule Fingers AllFingers : C Hand Tip : 1,2 Abducted End</p>				<p>Config CinqPlié Fingers AllFingers : NearFlat Hand Pad : 1,2 Abducted End</p>	
<p>Config A Fingers AllFingers : Bent 2 : 65 120 60 1 : Flat Hand End</p>				<p>Config Zéro Fingers AllFingers : Extended 2 : O Hand Tip : 1,2 Abduct : 5 End</p>	

3.4 Valeurs des symboles utilisés dans la description du signe.

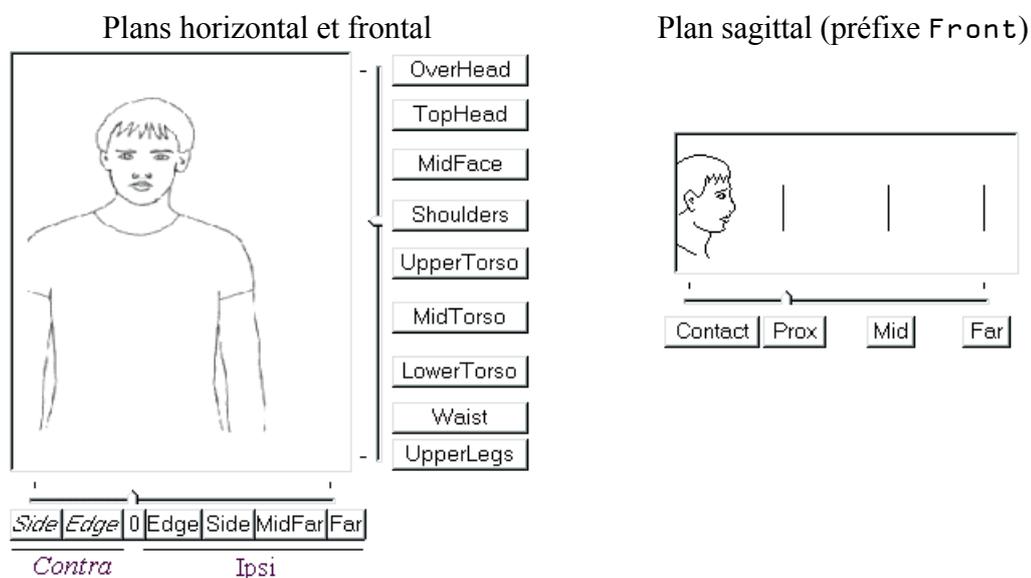
Nous présentons ci-dessous les valeurs des différents symboles intervenant dans les messages de description d'un signe. Ce document constitue en fait un condensé des éléments décrits tout au long du mémoire.

Dans un premier temps sont exposés les caractéristiques de la spécification manuelle : outre les configurations vues en 3.3, on trouve les points manuels, la localisation et l'orientation. Pour ce qui est des mouvements, nous nous bornons à reprendre la liste de ceux définis comme « secondaires » et se produisant au niveau du poignet ou de la main. Sont enfin détaillés les différents types de symétrie et de répétition.

1. Points de contact manuels

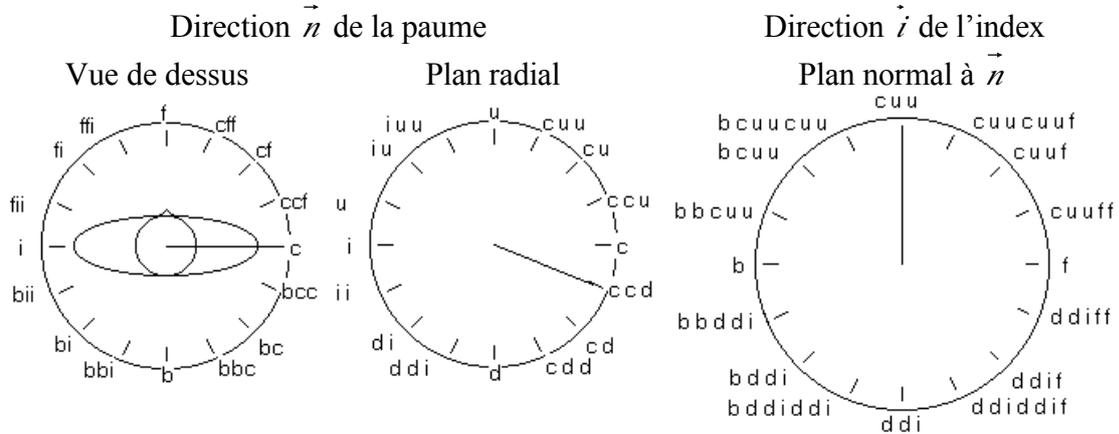
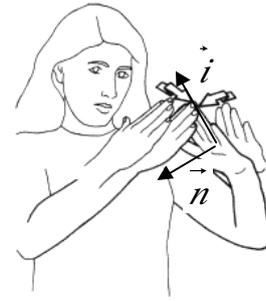


2. Localisations



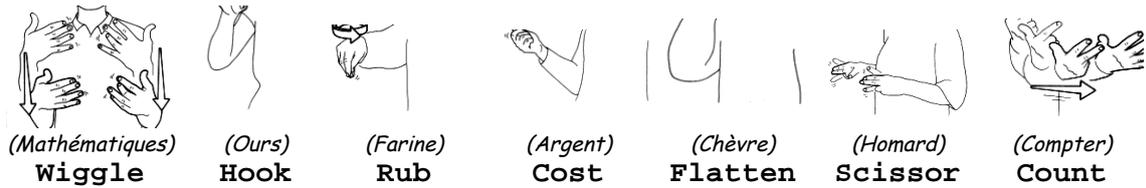
3. Orientations

Exemple : signe LSF *Maison*

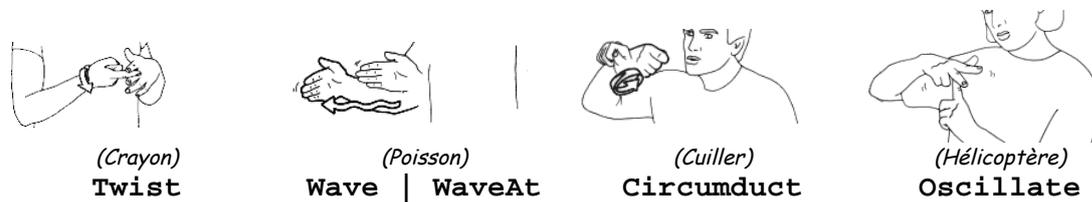


4. Mouvements secondaires

4.1. Au niveau de la main

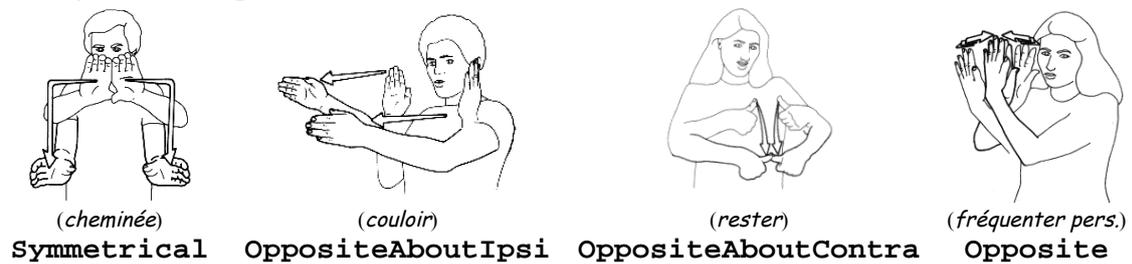


4.2. Au niveau du poignet



5. Symétrie.

5.1. Symétrie complète.



5.2. Conservation de position relative.



(*apporter*)
ConstantGap
of:



(*sombre*)
SymmetricalGap
of:



(*touriste*)
ConstantGap
aboutRadialIpsiPlaneOf:

5.3. Anti-symétrie.



(*limonade*)
AntiSymmetrical

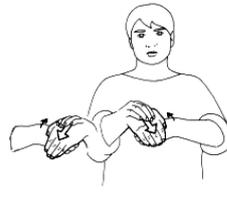
6. Répétitions.



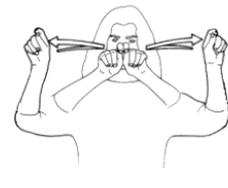
(*maison*)
repeat



(*touriste*)
repeatRadial



(*lavabo*)
RepeatExchanging
Hands



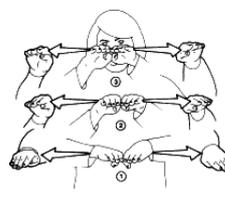
(*rideau*)
reverse



(*apprendre*)
retrace



(*limonade*)
reverseAndRepeat

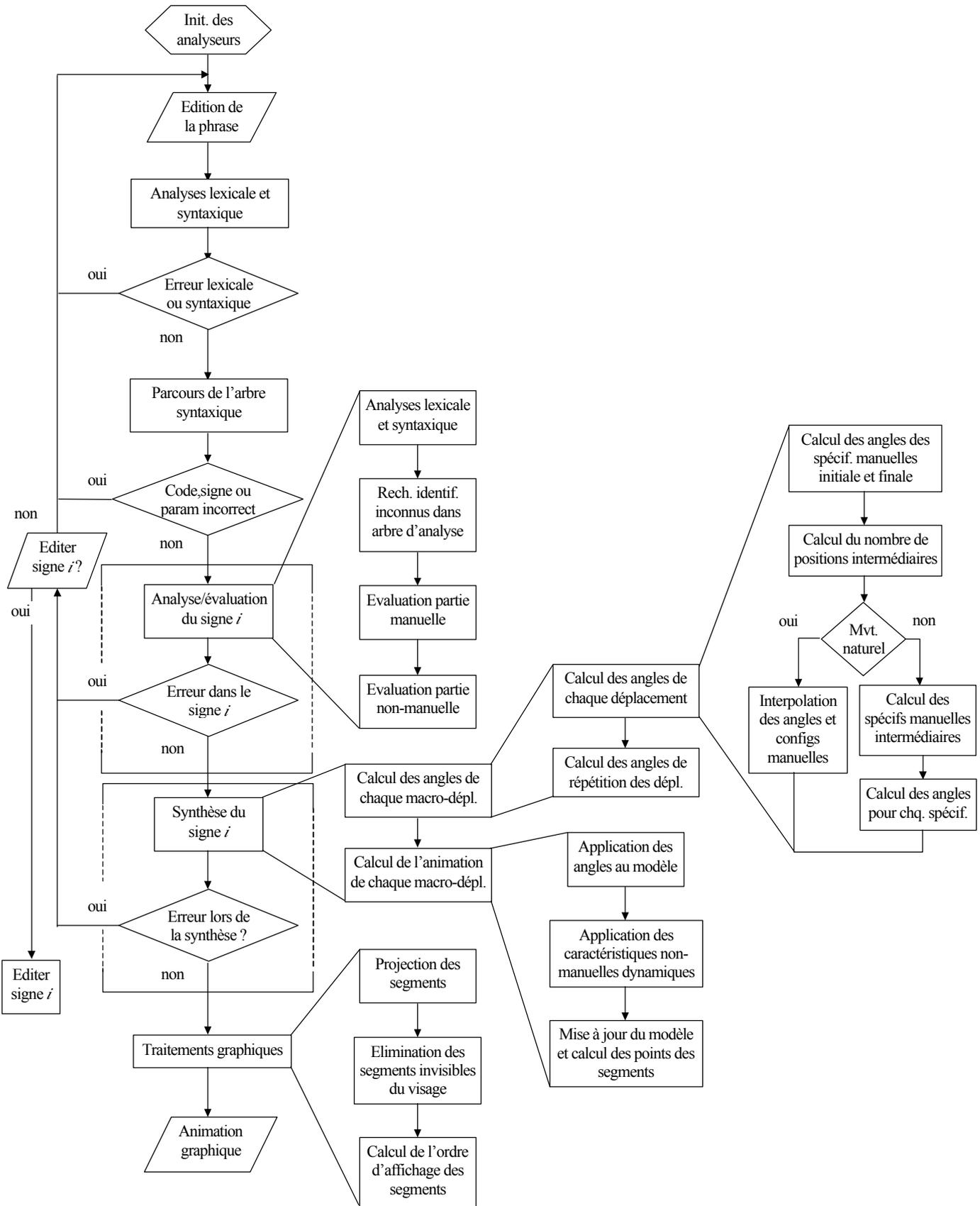


(*étagères*)
repeat: <N>
times from:



(*scolaire*)
RepeatFrom
CurrentPoint:

3.5 Organigramme de la synthèse de la phrase signée.



ANNEXE 4. ADRESSES INTERNET UTILES

Voici quelques adresses Internet traitant de la surdité, la langue des signes, la reconnaissance et la synthèse du geste communicatif. On ne saurait bien entendu être exhaustif en la matière, d'autant qu'il se crée quotidiennement de nouvelles pages. Sont simplement présentés ici quelques sites Web qui nous ont semblé présenter un intérêt tout particulier. De chacun nous fournissons le titre, la dernière adresse connue, et un court résumé du contenu.

Surdité : ressources générales		
1. <i>Hamburg, Germany</i>	http://www.sign-lang.uni-hamburg.de/english.html	Notation (HamNoSys) et dictionnaires , SyncWriter Bibliographie internationale de la LDS
2. <i>Université de Lyon II</i>	http://bonucci.univ-lyon2.fr/home/lsf-univ-lyonII.html	Dictionnaire en ligne de la LSF, base de signes multilingue et traduction, alphabets manuels de différents pays
3. Deaf World Web	http://dww.deafworldweb.org	Le Web des sourds : un réseau dans le réseau
4. Royal Association in aid of Deaf People	http://www.royaldeaf.org.uk/royaldeaf/links.htm	Une mine d'informations sur le monde des sourds sur le Net
5. Gallaudet Research Institute	http://gallux.gallaudet.edu	Etudes et données sur la culture sourde et sa langue, au Centre Gallaudet
6. Cued Speech FAQ	http://www.weizmann.ac.il/~xlacha1/deaf-l_faq/cued_speech.html	Tout ce qu'il faut savoir sur le langage parlé complété (LPC ou Cued Speech)
7. Deaf / Hand sign WWW sites list	http://www.jaist.ac.jp/~tokuda/deaf/link/index-e.html	Nombreux liens vers d'autres sites dans le monde entier et tous les domaines

Linguistique		
1. <i>Leiden Sign Phonology Group</i>	http://www.leidenuniv.nl/hil/sign-lang/	Le projet SignPhon : base de données pour l'étude phonologique des LDS
2. <i>Introduction à l'étude du langage</i>	http://www.fsj.ualberta.ca/beaudoin/ling/	Un site très riche sur les notions fondamentales de la linguistique moderne
3. ASL Linguistic Research Project	http://web.bu.edu/ASLLRP/	Etudes sur la structure syntaxique de l'ASL
4. Université du Québec à Montréal	http://www.ling.uqam.ca/Ling/recherche.html	Etudes linguistiques sur les LDS
5. Deaf sign language	http://www.sil.org/ethnologue/families/Deaf_Sign_Language.html	Données sur toutes les LDS connues de tous les pays
6. Stockholm Univ. – Dept of SL	http://w3.ling.su.se/sign/tsa.htm	Département Langue des Signes de l'université de Stockholm : publications, alphabet suédois, ...

Congrès		
1. ICDVRAT '2000	http://www.cyber.reading.ac.uk/P.Sharkey/WWW/ecdvrat/	3 ^{ème} conférence internationale sur le handicap, la réalité virtuelle et les tech. associées, à Alghero.
2. Bielefeld Gesture Workshop '97	http://www.TechFak.Uni-Bielefeld.DE/GW97/	Le geste dans la communication homme-machine : congrès tenu en 1997 à Bielefeld (D)
3. York Gesture Workshop '96	http://www.cs.york.ac.uk/gw96/	Le geste dans la communication homme-machine : congrès tenu en 1996 à York (GB)
4. TISLR 5	http://www.er.uqam.ca/nobel/d126244/TISLRhomepage.html	Programme du colloque (Université du Québec) : SignPhon, SignStream, SignFont, Morphologie, ...

Reconnaissance du geste, Suivi de mouvement, Geste naturel		
1. <i>Annelies's home page</i>	http://www.limsi.fr:80/Individu/braffort/	Travaux d'A. Braffort et Gesture Workshop '99
2. INT-SIM Department : Publications	http://www-sim.int-evry.fr/Publications/	Publications de l'INT d'Evry, et notamment travaux de H. Ouhaddi (suivi de la main)
3. Research	http://www.jaist.ac.jp/~tokuda/my-self/research-e.html	Travaux et docs de M. Tokuda de traduction du japonais en JSL (dont thèse)
4. Hidden Markov Models for Interactive Learning ...	http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/space/www/hmm/hmm.html	Système de reconnaissance de gestes basé sur les modèles de Markov cachés
5. Hand movement tracking	http://fas.sfu.ca/cs/people/ResearchStaff/amulder/personal/vmi/HMTT.pub.html	Discussion et référence sur les différents systèmes de reconnaissance de mouvements disponibles
6. GRASP	http://www.cse.unsw.edu.au/~waleed/thesis.html	Reconnaissance de la LdS australienne utilisant des gants numériques (thèse de Waleed Kadous)
7. 9 Multimodality	http://www.cse.ogi.edu/CSLU/HLTsurvey/ch9node2.html#Chapter9	Livre en ligne : Survey of the State of the Art in Human Language Technology (chapitre 9)

Synthèse du geste et infographie		
1. Justine Cassell	Http://justine.www.media.mit.edu/people/justine/	Page de J. Cassell au MIT Media Lab : animation de personnages en conversation (gestes naturels)
2. Groupe IMM	Http://www.limsi.fr/Recherche/IMM/theme3.html	Travaux du thème Gestes, mouvement et animation (responsable S. Gibet) du groupe Interaction et Multi-modalités au LIMSI.
3. Center for Human Modeling and Simulation	Http://www.cis.upenn.edu/~hms/home.html	Modélisation et animation synthétique du mouvement humain (dont projet Jack)
4. Chris's Recent Publications	http://www.cms.dmu.ac.uk/~cph/Publications/cphpubs.html	Liste de publications (disponibles en ligne) tournant autour du thème de la réalité virtuelle
5. Facial Animation	http://mambo.ucsc.edu/psl/fan.html	Animation faciale (modèle de Parke)
6. 3D Animation Workshop	http://www.webreference.com/3d/	Cours d'animation 3D en 67 leçons
7. VRML Humanoid Animation Working Group	http://ece.uwaterloo.ca/~h-anim/	Modélisation d'un humanoïde en VRML 97, y compris le visage.

8. <i>Signing avatars</i>	http://www.seamless-solutions.com/html/demonstrations/signing_avatars.htm	Par Seamless Solutions Inc., 3 avatars capable de produire des phrases en Langue des signes.
9. Sign Language Synthesis	http://razor.fer.uni-lj.si/~slavkok/sinteza.html	Article sur la synthèse de la langue des signes à partir de clips vidéo signés.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. GESTE COMMUNICATIF ET SIGNE.....	5
1.1. GESTES ET LANGUES DES SIGNES.....	6
1.1.1. Du geste au signe, la communication gestuelle.....	6
1.1.1.1. <i>Caractérisation du geste et définitions.....</i>	<i>6</i>
1.1.1.2. <i>Catégorisation des gestes.....</i>	<i>8</i>
1.1.1.3. <i>Le geste co-verbal.....</i>	<i>9</i>
1.1.2. Le geste en interaction homme-machine.....	11
1.1.2.1. <i>Les gestes de manipulation.....</i>	<i>11</i>
1.1.2.2. <i>Capter et reconnaître le geste naturel.....</i>	<i>12</i>
1.1.2.3. <i>Les interfaces gestuelles en communication palliative.....</i>	<i>13</i>
1.1.3. Les langues gestuelles.....	14
1.1.3.1. <i>Pourquoi étudier les langues gestuelles ?.....</i>	<i>14</i>
1.1.3.2. <i>Genèse [MOO 83].....</i>	<i>15</i>
1.1.3.3. <i>Les langues des signes aujourd'hui.....</i>	<i>16</i>
1.1.3.4. <i>Langues des signes et langues orales.....</i>	<i>17</i>
1.1.4. Une langue à part entière.....	18
1.1.4.1. <i>Iconicité et capacité de communication.....</i>	<i>18</i>
1.1.4.2. <i>Capacité de communication.....</i>	<i>19</i>
1.1.4.3. <i>La double articulation des langues.....</i>	<i>19</i>
1.1.4.4. <i>Les subtilités d'une langue.....</i>	<i>20</i>
1.2. SYNTHÉTISER LE SIGNE : CADRE DE L'ÉTUDE ET ÉTAT DE L'ART.....	21
1.2.1. Pourquoi synthétiser ?.....	21
1.2.1.1. <i>Répression de la langue des signes et problèmes liés.....</i>	<i>21</i>
1.2.1.2. <i>Signes synthétiques et vidéo : quels avantages ?.....</i>	<i>22</i>
1.2.2. Cadre de l'étude.....	24
1.2.2.1. <i>Vue globale des objectifs.....</i>	<i>24</i>
1.2.2.2. <i>Tenants et aboutissants.....</i>	<i>24</i>
1.2.3. Signes synthétiques : état de l'art.....	26
1.2.3.1. <i>Premiers travaux d'animation.....</i>	<i>26</i>
1.2.3.2. <i>Synthèses tridimensionnelles des signes.....</i>	<i>27</i>
1.2.3.3. <i>Vers une communication bidirectionnelle.....</i>	<i>28</i>
1.3. DÉCRIRE LE SIGNE.....	29
1.3.1. Phonétique du signe.....	29
1.3.1.1. <i>Travaux de Stokoe.....</i>	<i>29</i>
1.3.1.2. <i>Validation de la description de Stokoe.....</i>	<i>31</i>
1.3.1.3. <i>Autres paramètres du signe.....</i>	<i>32</i>

1.3.2. Affinements de la description et applications	33
1.3.2.1. Encodages informatisés.....	33
1.3.2.2. Des interfaces pour la langue des signes.....	35
1.3.3. Une autre approche : la description de Liddell et Johnson.....	37
1.3.3.1. Tenues et séquences.....	37
1.3.3.2. Description segmentale de Liddell et Johnson.....	37
CHAPITRE 2. DESCRIPTION FORMELLE DE LA LANGUE DES SIGNES.	43
2.1. VUE GÉNÉRALE ET DÉFINITIONS.....	44
2.1.1. Principes fondamentaux.....	44
2.1.2. Définition d'une primitive de déplacement.....	44
2.1.3. Spécifier un signe complet.....	46
2.2. CONFIGURATIONS MANUELLES.....	49
2.2.1. Description de la main.....	49
2.2.1.1. Description anatomique.....	49
2.2.1.2. Description fonctionnelle [KAM 94].....	50
2.2.2. Configurations manuelles : travaux existants et démarche adoptée.....	51
2.2.2.1. Etudes linguistiques.....	51
2.2.2.2. Travaux de description structurelle.....	52
2.2.2.3. Démarche d'encodage retenue.....	54
2.2.3. Primitives et encodage des configurations manuelles.....	55
2.2.3.1. Primitives de configurations digitales.....	55
2.2.3.2. Propriétés globales de la main.....	56
2.3. SPÉCIFICATIONS MANUELLES.....	59
2.3.1. Localisation.....	59
2.3.1.1. Contraintes liées à l'utilisation de l'espace en langue des signes.....	59
2.3.1.2. Spécifier une localisation.....	60
2.3.2. Points manuels et orientation.....	61
2.3.2.1. Points manuels.....	61
2.3.2.2. Orientation.....	62
2.4. LE MOUVEMENT.....	64
2.4.1. Le mouvement de base : la primitive de déplacement.....	64
2.4.1.1. Décrire la trajectoire.....	64
2.4.1.2. Mouvements secondaires.....	65
2.4.2. Décrire le signe dans son ensemble.....	67
2.4.2.1. Déplacements et symétrie des articulateurs.....	67
2.4.2.2. Importance de la répétition en langue des signes.....	69
2.4.2.3. Spécification des mouvements répétés.....	71
2.4.2.4. Synchronisation des mouvements.....	72
2.4.3. Paramètres temporels du mouvement.....	74
2.4.3.1. Présentation du logiciel d'analyse.....	74
2.4.3.2. Le corpus d'étude.....	75

2.4.3.3. Analyse des tenues.....	76
2.4.3.4. Analyse des transitions.....	77
2.4.3.5. Trajectoire et dynamique du mouvement.....	78
2.4.3.6. Dynamiques propres particulières.....	80
2.5. LA PHRASE SIGNÉE.....	83
2.5.1. Flexions spatio-temporelles.....	83
2.5.1.1. Modulation de la dynamique des signes.....	83
2.5.1.2. Forme et amplitude du mouvement.....	84
2.5.1.3. Localisations et verbes directionnels.....	86
2.5.2. Expressions et flexions non-manuelles.....	88
2.5.2.1. Implications aux niveaux lexical et monématique.....	88
2.5.2.2. Flexions composites.....	89
2.5.2.3. Marquage du type de clause.....	90
2.5.2.4. Inclusion dans le système de description.....	91
2.5.3. Spécification de la phrase signée.....	92
2.5.3.1. Paramétrage des signes.....	92
2.5.3.2. Le niveau du discours.....	93
2.5.4. L'enchaînement des signes.....	94
2.5.4.1. Les signes et leur séquence.....	94
2.5.4.2. Les pauses dans le discours.....	96
2.5.4.3. Durée des signes et transitions dans le discours.....	97
2.5.4.4. Composition et coarticulation.....	98
CHAPITRE 3. UN SYSTÈME DE SYNTHÈSE GRAPHIQUE ANIMÉE.....	101
3.1. GÉNÉRATION DE CONFIGURATIONS ET DE MOUVEMENTS NATURELS.....	102
3.1.1. Modélisation géométrique du corps humain.....	102
3.1.1.1. Structures articulées.....	102
3.1.1.2. Formalisme matriciel.....	103
3.1.2. Synthèse des configurations manuelles.....	104
3.1.2.1. Configurations du pouce.....	105
3.1.2.2. Contraintes sur les angles articulaires.....	107
3.1.2.3. Système d'encodage et synthèse.....	107
3.1.3. Localisation et orientation.....	109
3.1.3.1. Positionnement du poignet dans l'espace.....	109
3.1.3.2. Orientation absolue de la main.....	111
3.1.3.3. Orientation et positionnement.....	113
3.1.4. Synthèse du mouvement.....	114
3.1.4.1. Génération du mouvement.....	115
3.1.4.2. Mouvements secondaires.....	117
3.2. SPÉCIFICATION ET SYNTHÈSE INFORMATISÉE.....	119
3.2.1. Description du signe.....	120
3.2.1.1. Partie manuelle.....	120
3.2.1.2. Partie non-manuelle.....	123
3.2.1.3. Paramètres et sélecteurs.....	125
3.2.2. Synthèse du signe.....	128

3.2.2.1. Analyses lexicale et syntaxique.....	128
3.2.2.2. Evaluation du signe.....	129
3.2.2.3. Synthèse graphique.....	131
3.2.3. Spécification et synthèse de la phrase signée.....	132
3.2.3.1. Spécification du discours.....	132
3.2.3.2. Localisations et références.....	135
3.2.3.3. Autres flexions sur les signes.....	136
3.3. PRÉSENTATION, ÉVALUATION ET UTILISATION DU LOGICIEL.....	137
3.3.1. Présentation du logiciel.....	137
3.3.1.1. Présentation générale.....	138
3.3.1.2. L'éditeur et son interface graphique.....	138
3.3.1.3. Le module de visualisation 3D.....	141
3.3.1.4. Le dictionnaire de signes.....	141
3.3.2. Evaluation des signes synthétiques et application.....	143
3.3.2.1. Mode opératoire.....	143
3.3.2.2. Résultats et conclusions de l'évaluation.....	145
3.3.2.3. Application : inclusion au logiciel LAC.....	147
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	151
1. BILAN.....	151
2. PERSPECTIVES.....	153
GLOSSAIRE.....	155
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	158
ANNEXES	167
ANNEXE 1. DONNÉES LINGUISTIQUES	168
1.1. ALPHABETS DACTYLOGIQUES LSF ET ASL.....	168
1.2. CHÉRÈMES IDENTIFIÉS PAR W. C. STOKOE.....	169
1.3. DÉTAIL DES CARACTÉRISTIQUES DE LA TRANSCRIPTION DE LIDDELL ET JOHNSON.....	170
1.3.1. Caractéristiques segmentales.....	170
1.3.2. Caractéristiques articulatoires.....	171
1.3.3. Un exemple de transcription de Liddell et Johnson.....	172
1.4. ASPECTS FLEXIONNELS IDENTIFIÉS PAR KLIMA ET BELLUGI.....	173

ANNEXE 2. DESCRIPTION FORMELLE DE LA LANGUE DES SIGNES	174
2.1. STRUCTURE HIÉRARCHIQUE COMPLÈTE DE SPÉCIFICATION DU SIGNE.	174
2.2. LISTE DES SIGNES UTILISÉS COMME SUPPORTS À L'ANALYSE DU MOUVEMENT.....	175
2.3. TEMPS DE PRODUCTION.....	177
2.4. ANALYSE DU MOUVEMENT.....	178
2.5. SIGNES NON ILLUSTRÉS DANS LE CORPS DU TEXTE.	179
ANNEXE 3. SYNTHÈSE GRAPHIQUE.....	181
3.1. SPÉCIFICATION DE LA SYNTAXE UTILISÉE POUR LA DESCRIPTION DES SIGNES	181
3.1.1. Spécification générique.	181
3.1.2. Spécification dédiée.....	182
3.2. MODÈLE ARTICULÉ DU CORPS HUMAIN.....	184
3.3. SPÉCIFICATIONS ET SYNTHÈSE DES PRINCIPALES CONFIGURATIONS MANUELLES DE LA LSF.....	186
3.4 VALEURS DES SYMBOLES UTILISÉS DANS LA DESCRIPTION DU SIGNE.....	189
3.5 ORGANIGRAMME DE LA SYNTHÈSE DE LA PHRASE SIGNÉE.	192
ANNEXE 4. ADRESSES INTERNET UTILES	193
TABLE DES MATIÈRES	196