
Aide à la communication pour personnes handicapées et prédiction de texte

Problématique, état des lieux et retour sur trente ans de recherche en communication augmentée

Jean-Yves Antoine, Denis Maurel

Université François Rabelais Tours, Laboratoire d'Informatique
jean-yves.antoine@univ-tours.fr, denis.maurel@univ-tours.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente un état de l'art des techniques d'ingénierie linguistique développées au cours des vingt dernières années dans le domaine de l'aide à la communication pour les personnes handicapées. Après avoir constaté, au fil du temps, que les méthodes utilisées se sont orientées des approches centrées connaissances vers des approches centrées données, nous faisons un bilan de l'aide apportée aux personnes handicapées en nous intéressant à l'évaluation de ces systèmes. Nous concluons en montrant que cette problématique est en réalité plus vaste puisqu'elle intéresse toutes les applications de type entrée de texte sur clavier limité.

ABSTRACT. This paper presents a survey of the state of the art in NLP techniques dedicated to alternative and augmentative communication for disabled people. We show that these techniques have mostly evolved during the two last decades from knowledge based approaches to data oriented approaches. Evaluation results give an indication on the efficiency of these prediction techniques as well as on the real aid provided to the user. As a conclusion, we show that the question of text prediction concerns on the whole any text entry application.

MOTS-CLÉS : communication assistée, prédiction de texte, modèle de langage, évaluation.

KEYWORDS : alternative and augmentative communication, text prediction, language model, evaluation.

1. Introduction : communication assistée et prédiction de texte

Le TAL a connu au cours des deux dernières décennies un développement qui s'est traduit par un nombre croissant de réalisations destinées au grand public ou aux professionnels, faisant passer de domaine de recherche du stade d'une linguistique computationnelle à celui de l'ingénierie des langues (Cunningham, 1999). Parmi les champs d'application envisageables de l'ingénierie des langues, l'aide au handicap reste relativement négligée, alors qu'elle répond pourtant à une attente sociétale forte. Cette situation est variable d'un pays à l'autre. En France, le soutien institutionnel sur ces questions a été très tardif, en comparaison par exemple de ce que l'on peut observer dans les pays scandinaves. Cet abandon a fortement limité le développement de recherches et de pôles industriels forts dans le domaine. Quoi qu'il en soit, la thématique du handicap reste peu visible dans les recherches internationales en TAL, peut-être à cause de son caractère résolument pluridisciplinaire.

Pourtant, l'enjeu économique de l'aide au handicap est loin d'être négligeable. Les personnes souffrant d'un handicap reconnu représentent ainsi près d'un français sur douze. En 2007, 12 % de la population active française déclare avoir un handicap, même si seulement 4 % des actifs sont officiellement reconnus comme handicapés. Ces handicaps peuvent remonter à la naissance ou à l'enfance ou survenir à l'âge adulte (33 % des déficiences sont d'origine accidentelle). C'est ainsi qu'en France, 300 000 personnes en âge de travailler deviennent handicapées chaque année. On sait par ailleurs que le vieillissement de la population observé dans les pays développés est synonyme d'une forte augmentation du nombre de personnes âgées en situation de perte d'autonomie. La thématique « vieillissement de la population et handicaps » constitue ainsi une des actions récurrentes des programmes de recherche coordonnés soutenus par l'Union européenne. Un dernier chiffre permettra de quantifier le besoin réel de l'aide au handicap : en France, trois millions de personnes handicapées bénéficient d'une aide humaine ou technique.

Compte tenu du rôle privilégié accordé à la communication langagière dans nos sociétés, l'ingénierie des langues constitue, avec la robotique, le domaine technologique le plus directement concerné par le problème du handicap. Le développement d'Internet, véritable portail vers le monde extérieur pour les personnes isolées et dépendantes que sont souvent les personnes handicapées, ne fait qu'accroître cette demande sociale. Afin d'illustrer l'importance et la diversité de cette problématique, citons quelques exemples d'applications

– **aide à la saisie de texte sur ordinateur** : accélération de la saisie de texte sur ordinateur pour des personnes ayant un contrôle limité ou inexistant de leurs membres antérieurs ; aide à la composition de messages pour des personnes aphasiques ou dyslexiques...

– **compensation d'une modalité défaillante** : synthèse vocale à partir du texte pour des personnes ayant perdu l'usage de la parole. Cette compensation

s'accompagne le plus souvent d'une aide à la saisie de texte ; vocalisation de messages pour les personnes aveugles ;

– **assistance à base de langages spécialisés**, souvent dans un cadre professionnel. On trouve ici les langages de commande pour la robotique d'assistance (Richard *et al.*, 2000), aide à la programmation informatique, à la rédaction d'articles mathématiques¹...

Dans cet article, nous focaliserons notre propos sur la problématique de l'aide à la saisie de texte, qui trouve des applications en dehors du monde du handicap. Celle-ci s'inscrit dans le cadre plus général de la communication augmentée écrite ou orale. Étant donné que les systèmes d'aide à la communication utilisent des synthèses vocales à partir du texte totalement génériques, cette dimension ne sera pas abordée ici.

2. Aide à la communication pour personnes handicapées

Les communicateurs, ou systèmes de communication assistée (AAC en anglais, pour *Alternative and Augmentative Communication*) ont pour objectif de restaurer les capacités de communication de personnes qui souffrent d'un handicap moteur sévère se traduisant par une paralysie des membres (tétraplégie, quadraplégie), une athétose ou une dyskinésie². Ces déficiences limitent de manière très pénalisante le contrôle physique de l'environnement. Dans le cas des pathologies les plus prononcées, les possibilités de communication à l'écrit (écriture manuscrite ou saisie de texte sur clavier d'ordinateur) sont excessivement réduites. Par ailleurs, l'insuffisance du contrôle moteur peut concerner jusqu'à l'appareil phonatoire. Dans ce cas, la communication est également privée de son support oral habituel. Ces types de handicap correspondent à des pathologies variées :

– **l'infirmité motrice cérébrale (IMC ou *cerebral palsy* en anglais)** est due à un accident cérébral anténatal (encéphalite durant la grossesse ou anomalie chromosomique) ou périnatal (accident durant l'accouchement, traumatisme crânien ou méningite durant la première année de vie). Les atteintes neurologiques qui en résultent se traduisent par des tableaux cliniques variés : diplégie, tétraplégie ou encore athétose ou dysarthrie avec difficultés d'élocutions. Souvent, elle s'accompagne de troubles cognitifs qui peuvent, en particulier, se traduire par des dysorthographies, voire des aphasies sévères. L'incidence de cette pathologie est actuellement de 0,6 nouveaux cas pour 1 000 naissances. Heureusement, les degrés

¹ Les travaux les plus avancés dans ce domaine concernent cependant avant tout les systèmes de lecture et d'écriture pour personnes aveugles (Karshmer *et al.*, 2004 ; Archambault *et al.*, 2007).

² Dans le cas de l'athétose ou de la dyskinésie, les membres (et autres parties du corps) ne sont pas paralysés. Au contraire, cette pathologie se caractérise par des mouvements irréguliers et de petites amplitudes totalement involontaires. Cette absence de contrôle moteur rend souvent très difficile l'utilisation d'un dispositif physique

d'infirmité varient fortement entre les différents patients qui font l'objet d'une rééducation durant leur jeunesse ;

– **le syndrome d'enfermement** (*Locked-In Syndrom* ou LIS en anglais) résulte d'un accident vasculaire cérébral (AVC) majeur détruisant le tronc cérébral responsable de la transmission des ordres moteurs. Il se traduit par une paralysie complète, à l'exception des clignements de paupières qui peuvent être contrôlés par le patient. Les facultés cognitives et perceptives de ce dernier restent intactes. Comme pour tout AVC, cette maladie touche majoritairement les hommes. Cette atteinte neurologique reste très rare. Cette pathologie se range ainsi dans le cadre des maladies orphelines ;

– **la sclérose latérale amyotrophique** (SLA, *ALS* en anglais pour *Amyotrophic lateral sclerosis*), également appelée maladie de Charcot ou maladie du motoneurone, est une maladie neurodégénérative. On est ici en présence d'une destruction progressive et inéluctable des neurones moteurs du patient. Elle se déclenche généralement entre 40 et 60 ans et se traduit par une paralysie de plus en plus importante - le clignement des paupières étant généralement le dernier mouvement autorisé aux stades ultimes de la maladie - pour laquelle on ne dispose d'aucun traitement. L'utilisation d'une assistance respiratoire permet désormais de retarder de plusieurs années l'issue fatale de la maladie. On estime à environ 5 000 le nombre de personnes souffrant d'une SLA en France. L'incidence de la maladie est d'environ un à deux nouveaux cas survenant chaque année pour 100 000 habitants. Ainsi, en France, 800 nouveaux cas sont détectés chaque année ;

– la **myopathie**, et en particulier la **myopathie de Duchenne** (maladie génétique), se traduit par une dégénérescence progressive des fibres musculaires. Elle est diagnostiquée dès l'enfance, les patients ayant une espérance de vie comprise entre 20 et 30 ans. L'évolution de la maladie va de pair avec une perte de plus en plus marquée du tonus musculaire. À un stade avancé de la maladie, l'interaction avec l'environnement physique ne peut plus se faire qu'à l'aide de dispositifs tels qu'un joystick microgravité, qui sert à piloter le fauteuil du patient mais aussi son ordinateur. L'incidence de la myopathie de Duchenne est de 1 nouveau cas sur 3 500 naissances de garçon ;

– enfin, les victimes d'une **lésion médullaire** (moelle épinière), qui se traduit entre autres par une paralysie complète ou partielle des membres, représentent la majeure partie des utilisateurs potentiels des systèmes d'aide à la communication. Cette lésion peut être due à un traumatisme (accident de la route, du travail ou du sport), mais également à une myélopathie due à une infection, une inflammation ou à une tumeur. Le degré de paralysie dépendra de la hauteur de la lésion. En France, 30 000 personnes sont atteintes d'une lésion médullaire, 1 000 à 1 500 cas venant s'ajouter chaque année, le plus souvent à la suite d'un accident automobile. Dans certains cas, le patient a dû subir une trachéotomie. Le système de suppléance concernera alors aussi bien la communication orale qu'écrite.

Quelle que soit la pathologie concernée, les systèmes de communication augmentée ou alternative doivent proposer à l'utilisateur une aide à la saisie de

message (et éventuellement leur vocalisation automatique) adaptée à leurs capacités très réduites d'action sur le monde physique. Cette saisie va s'effectuer sur un tableau virtuel de symboles (mots, lettres, phonèmes voire icônes pour les patients aphasiques ou les enfants en début d'apprentissage de la langue) qui est affiché sur l'écran d'un ordinateur. Le message est construit en sélectionnant successivement sur le clavier virtuel les symboles qui le composent. Plus précisément, l'utilisation des ces systèmes de suppléance repose sur trois composants principaux (figure 1).

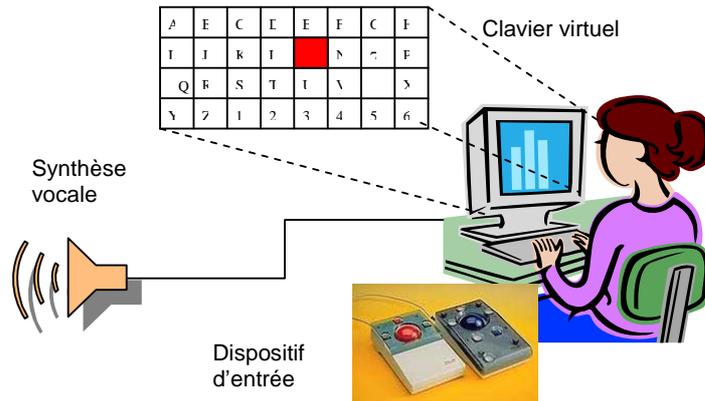


Figure 1. Système d'aide à la communication pour personnes handicapées

Tout d'abord, un dispositif physique joue le rôle de périphérique d'entrée de l'ordinateur. Cette interface matérielle dépend du geste libre laissé par le handicap. Il peut s'agir d'un joystick microgravité (figure 1), d'une commande oculaire ou de détection de clignements de paupière, d'une commande par souffle (figure 2, à gauche), d'un détecteur de mouvement de la tête (figure 2, à droite) ou d'un simple bouton-poussoir, etc.



Figure 2. Deux exemples de dispositifs d'entrée : à gauche, une commande par détection de souffle ; à droite, un détecteur de mouvements de tête

Une caractéristique importante est le nombre de degrés de liberté autorisé par ce dispositif. Le plus souvent, le patient ne peut plus réaliser que l'équivalent d'un

simple clic (commande de type contacteur « tout ou rien »). Dans ce cas, un dispositif de défilement permet, suivant différentes stratégies qui seront présentées plus loin, de parcourir tous les éléments du clavier. C'est donc par défilements, puis clics successifs, que l'utilisateur va sélectionner les éléments du message sur le clavier virtuel, élément central de l'interaction.

Le clavier virtuel peut être associé à un éditeur intégré, ou au contraire permettre le pilotage de toute application externe (éditeur de texte, navigateur Web, client de messagerie...). Enfin, une synthèse de parole à partir du texte peut-être utilisée pour vocaliser le message saisi.

Ainsi constitué, un système d'aide à la communication permet à une personne lourdement handicapée d'interagir librement avec son entourage, que ce soit par écrit ou par oral. Dès lors, le problème qui se pose est celui de la lenteur et de la pénibilité de la composition des messages. Ce problème majeur est particulièrement manifeste dans le cas d'un clavier virtuel piloté par un simple clic : après chaque saisie, l'utilisateur doit attendre que le dispositif de défilement à l'écran atteigne l'item qu'il souhaite désormais sélectionner. Il en résulte des temps de latence très longs, qui s'accompagnent d'un nécessaire effort d'attention rapidement fatigant. L'utilisation d'un système de suppléance se traduit ainsi par une vitesse de communication de un à cinq mots par minute qui est sans commune mesure avec la communication orale entre personnes valides. Ces observations se retrouvent aussi bien sur le français (Le Pévédic, 1997) que l'anglais (Alm *et al.*, 1992).

Type de communication	Vitesse (mots/minute)
Communication orale	150
Communication écrite (écriture manuscrite)	12 à 16
Saisie experte sur clavier (secrétaire)	15 à 20
Saisie un doigt sur clavier (débutant)	11
Saisie handicapé avec système d'aide	5

Tableau 1. Exemples de vitesse de communication en français (Le Pévédic, 1997)

Il est donc nécessaire de proposer des techniques d'optimisation de la saisie et c'est à ce niveau qu'interviennent les recherches en traitement automatique des langues (TAL), mais également en interaction homme-machine (IHM). Deux approches complémentaires sont en fait envisageables pour accélérer la saisie :

– la première consiste à **optimiser le temps d'accès** à la touche recherchée, donc à **réduire le temps de défilement** pour y accéder. Cette optimisation dépend de l'organisation générale du clavier (IHM), mais également de la prise en compte du contexte de saisie ;

– la seconde approche vise à minimiser le **nombre de saisies**, en complétant automatiquement certaines parties du message en fonction du contexte. Peuvent intervenir ici des techniques de désabréviation et de prédiction de texte.

Nous allons maintenant dresser un panorama des techniques relevant du TAL qui ont été envisagées jusqu'ici pour réaliser ces deux types d'optimisation, en commençant par la problématique de la sélection rapide de touches sur le clavier virtuel.

3. Accélérer la saisie : sélection rapide sur le clavier virtuel

Tout étudiant en Interaction Homme-Machine sait que les claviers QWERTY ou AZERTY de nos ordinateurs, hérités de la disposition des marteaux des machines à écrire, ne sont pas optimaux. Le sentiment d'aisance des utilisateurs experts et le refus d'apprentissage (pourtant rapide) d'un nouveau clavier, ont pourtant empêché l'émergence de dispositions plus adaptées telles que celle proposé par August Dvorak, il y a plus de 70 ans (Dvorak *et al.*, 1936).

À l'opposé, le besoin d'un clavier adapté est ressenti très fortement par les personnes handicapées utilisatrices d'un système d'aide à la communication³. Dans ce cas, la recherche d'un clavier optimal va dépendre de plusieurs facteurs :

- la **nature du handicap**, et plus précisément les capacités de contrôle moteur dont dispose l'utilisateur. La question principale, de ce point de vue, est de savoir si l'utilisateur est encore à même de déplacer un pointeur sur l'écran, ou s'il est limité à une commande de type « tout ou rien » ;

- la **nature statique ou dynamique du clavier**, c'est-à-dire la capacité d'adapter la disposition des touches en fonction du contexte courant de saisie. Il faut noter que le choix d'un clavier dynamique dépend également du tableau clinique de l'utilisateur. Si l'adaptation dynamique peut permettre des gains substantiels en terme de vitesse de communication, elle est également susceptible d'accroître la charge cognitive. Par ailleurs, certains troubles cognitifs ou perceptifs ne sont pas compatibles avec une réorganisation dynamique du clavier.

Lorsque le handicap moteur reste limité, l'utilisateur peut encore avoir la possibilité d'utiliser un clavier physique adapté. Un patient athétosique léger utilisera ainsi un guide-doigts pour effectuer une saisie sans erreur. Lorsqu'un contrôle physique du clavier n'est plus envisageable, il faut s'en remettre à un clavier virtuel. Ce paragraphe s'intéresse à la saisie rapide sur ce type de clavier.

3.1. Limiter les mouvements du pointeur : clavier optimisé

Dans le cas d'utilisateurs ayant gardé la capacité de déplacer un pointeur sur un écran, l'optimisation va consister à limiter la distance de déplacement du curseur. Cette question concerne les personnes myopathes équipées d'un joystick microgravité (contrôle physique direct), mais également les patients qui pilotent le curseur souris avec un dispositif de détection du regard (*Eye Gaze Tracking*). Ces

³ Lorsque le handicap n'est pas apparu à l'âge adulte, ces personnes ne sont par ailleurs pas habituées à un clavier standard sous-optimal.

systèmes peuvent faire appel à des techniques d'imagerie (Sibert *et al.*, 2000) ou bien observer l'activité des muscles oculaires pour déterminer la direction du regard (Baretto *et al.*, 2000 ; Felzer Nordman, 2006). Les sélections (clics « souris ») étant également réalisées par commande oculaire, la principale difficulté rencontrée réside dans les sélections non voulues (problème du « toucher de Midas »). Notons enfin que certains dispositifs expérimentaux pilotent la souris à partir de l'analyse de l'activité cérébrale, technique réservée aux pathologies les plus lourdes. On parle d'interface cerveau-machine (*brain-computer interface*), le patient apprenant à activer certaines zones cérébrales pour diriger le pointeur (Wolpaw *et al.*, 2000).

Quel que soit le dispositif d'entrée utilisé dans ces cas, la limitation des déplacements du curseur est bien entendu une priorité. Certains systèmes laissent à l'utilisateur (ou à son thérapeute) la liberté de définir la position de chaque touche sur le clavier virtuel. Plutôt que de s'en remettre à l'introspection de l'utilisateur ou à l'intuition, comme dans le clavier OPTI (MacKenzie et Zhang, 1999), une disposition plus efficace des touches peut être obtenue par un apprentissage automatique prenant en compte la fréquence de cooccurrences des lettres dans la langue. Ainsi, l'organisation du clavier GAG, développé à l'IRIT, se base sur les bigrammes de mots observés sur un grand corpus d'apprentissage en français. Les bigrammes nourrissent un algorithme génétique qui place les caractères sur le clavier afin de minimiser la distance de déplacement moyenne d'une lettre à la suivante (Raynal et Vigouroux, 2005). De même, le clavier KNITS est un clavier optimisé pour l'anglais qui a été estimé sur les bigrammes de lettres observées dans un corpus de trois millions de mots (Leshner, 2000). Un algorithme d'optimisation procédant par essai-erreur sous forme de permutation de touches, conduit à une réduction de 35 % des déplacements par rapport à un clavier QWERTY.

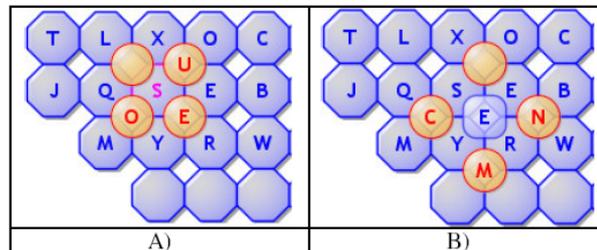


Figure 3. Adaptation dynamique du clavier *KeyGlass*, avec touches contextuelles. A) après la saisie du caractère « s » B) après la saisie d'un « e »

Une disposition encore plus optimale peut être atteinte en considérant le contexte courant de saisie. Cette idée se retrouve sur le clavier *KeyGlass* (figure 3), qui est présenté dans ce numéro dans l'article de Mathieu Raynal. Destiné à des patients myopathes, il s'agit d'un clavier GAG statique auquel s'ajoutent en transparence des touches contextuelles (Raynal et Vigouroux, 2005b) : dès qu'un caractère est sélectionné, *KeyGlass* affiche autour de la touche correspondante les quatre lettres

qui lui semblent les plus susceptibles de poursuivre la saisie. La prédiction s'appuie sur l'interpolation de deux modèles complémentaires : un bigramme de lettres et un arbre lexicographique probabiliste (cf. infra § 3.4). Le caractère translucide des touches contextuelles ne masque pas le clavier statique. Cette solution constitue un bon compromis entre la nécessité d'une certaine stabilité de l'affichage et l'intérêt de son adaptation dynamique pour faciliter la saisie. Comme nous le verrons tout au long de cet article, l'adaptation dynamique des claviers virtuels constitue en fait la question centrale que l'aide à la communication pour personnes handicapées pose au TAL.

3.2. Commande tout ou rien : clavier statique optimisé

Lorsque l'utilisateur n'a pas la possibilité de guider un pointeur sur l'écran, le système doit mettre en œuvre un processus de défilement automatique sur toutes les touches du clavier. L'utilisateur n'a plus qu'à faire une sélection lorsque la touche recherchée est atteinte. Il est dès lors important de minimiser le nombre moyen de défilements. La personne handicapée peut parfois réaliser plusieurs clics différents, par exemple lorsqu'elle a la capacité de contrôler la longueur de ses appuis ou lorsqu'elle garde le contrôle de plusieurs gestes. Il est alors possible d'associer une sémantique différente à chaque type de clic. Certains systèmes utilisent cette capacité pour laisser à l'utilisateur le pilotage du défilement.

Dans le cadre de cet article de synthèse, nous nous intéresserons uniquement au pilotage d'un clavier par clic unique. Notons que la possibilité de gérer des clics différents ne change pas l'organisation des claviers virtuels. Des études ont simplement montré qu'une organisation particulière d'un clavier est plus ou moins adaptée suivant le nombre de clics maîtrisés (Harbush et Kühn, 2003).

Différents paradigmes de sélection ont été envisagés pour les claviers virtuels. Deux approches sont le plus souvent mises en œuvre : le balayage linéaire du clavier, ou le balayage ligne/colonne. Dans ce dernier cas, une sélection nécessite deux appuis pour sélectionner successivement la ligne et la colonne de la touche considérée (figure 4).

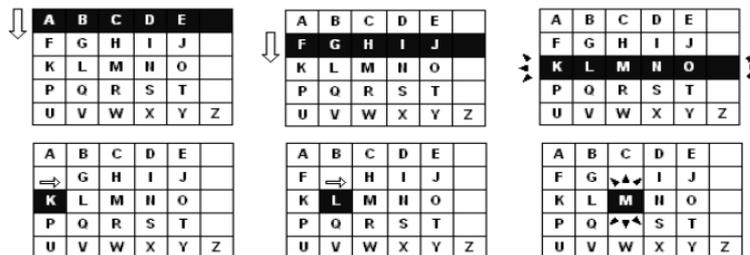


Figure 4. Balayage ligne/colonne : sélection de la ligne (haut) puis de la colonne

Quel que soit le balayage, il est possible de définir une configuration optimale suivant le nombre de touches du clavier (Cantegrit et Toulotte, 2001). Pour un balayage ligne/colonne, on montre aisément que la matrice optimale des touches forme un triangle rectangle dont les côtés opposés à l'hypoténuse se rejoignent en haut à gauche de l'écran (figure 5). La disposition des lettres sur la matrice du clavier dépend de leur fréquence d'apparition dans la langue.

Le clavier *SwitchXS* utilise un balayage ligne/colonne en trois clics (figure 6). Dans un premier temps, l'utilisateur sélectionne une ligne, puis une de ses quatre sous-parties et enfin le caractère présent dans la sous-ligne considérée.

	SP	e	a	n	l	f	v	-
	t	o	s	d	w	k		
	i	h	u	y	'			
F	r	c	g	x				
	m	p	j					
	b	q						
	z							

Figure 5. Clavier optimisé (pour l'anglais) pour un défilement ligne/colonne

Globalement, chaque type de balayage a ses intérêts et ses inconvénients. Le balayage ligne/colonne permet une sélection plus rapide du caractère recherché que le balayage linéaire. À l'opposé, il nécessite un, voire deux (*SwitchXS*), appuis supplémentaires, ce qui n'est pas sans conséquence sur la pénibilité de la tâche pour l'utilisateur handicapé. Par ailleurs, le balayage linéaire ne demande qu'une attention sur le curseur défilant sur l'interface, alors que le balayage ligne/colonne nécessite une observation globale du clavier, pour programmer la sélection de la ligne, puis de la colonne. D'où une charge cognitive plus importante et la nécessité d'une vision non affectée par le handicap. Le choix d'un balayage particulier dépendra donc avant tout du tableau clinique de l'utilisateur.



Figure 6. Vue partielle du clavier *SwitchXS*, avec ses quatre zones de sélection verticales pour un balayage ligne/colonne optimisé

Dans tous les cas, le gain apporté par un clavier standard optimisé reste encore limité. (Schadle *et al.*, 2002) ont ainsi étudié des claviers français rectangulaires comportant 64 caractères alphabétiques disposés suivant leur ordre fréquentiel d'apparition dans la langue. Ils ont observé sur un extrait du corpus *Le Monde* qu'un balayage linéaire demandait en moyenne 7,1 défilements pour saisir un caractère, tandis qu'un balayage ligne/colonne permettait de limiter l'attente à 4,3. Minimiser plus encore le temps de balayage revient à prendre en considération le contexte courant de saisie. C'est l'objectif des claviers ambigus et des claviers dynamiques.

3.3. Limiter le nombre de défilements : clavier ambigu

Le principe des claviers ambigus est bien connu du grand public, puisqu'il est implémenté pour la saisie de texte sur les téléphones mobiles. L'idée est d'associer à chaque touche plusieurs caractères, le système ou l'utilisateur étant en charge de désambiguïser ensuite la saisie. L'objectif des claviers ambigus est bien entendu de réduire le nombre de touches de saisie. Cette caractéristique présente de nombreux intérêts pour les claviers virtuels :

- elle est adaptée à des interfaces de taille réduite, ce qui permet la conception de systèmes de suppléance portables (Kushler, 1998). La demande pour des dispositifs discrets, pouvant être installés sur un fauteuil, est forte dans le monde du handicap ;

- pour des personnes dysarthriques ou athétosiques, elle facilite une saisie sans erreur par l'augmentation de la taille des touches. Un clavier à quatre touches autorise ainsi une saisie tactile sur un assistant personnel (PDA) où les quatre coins de l'écran jouent le rôle de barrière physique remplaçant le guide-doigts (Froehlich *et al.*, 2007). Une taille de touche accrue est également bienvenue pour les utilisateurs souffrant de troubles visuels associés ;

- dans le cas de la saisie de texte par balayage, le nombre de défilements moyen sera réduit en proportion du nombre de touches, d'où une sélection plus rapide.

Les systèmes de balayage à clavier ambigu utilisent fréquemment un codage de type T8/T9 utilisé également sur les téléphones mobiles. Certains systèmes, tel le clavier UKO (Kühn, 2001), utilisent encore moins de touches (figure 7).

A3	g h i p q r	a b c j k l	O3	b j k n o s	a d f p q r	T8	SPACE	a b c	d e f
	s -	t u v		u v w x	t - '		g h i	j k l	m n o
	d e f m n o	SPACE		c e g h i l	SPACE		p q r s	t u v	w x y z
	w x y z '		m y z						

Figure 7. Quelques exemples de claviers ambigus (Harbush, Kühn, 2003)

La performance d'un système à clavier ambigu va dépendre de sa capacité à désambiguïser la séquence des touches saisies. Lorsque aucune désambiguïstation n'est intégrée (ce qui est le cas de la plupart des systèmes commerciaux), un ou plusieurs appuis supplémentaires vont être nécessaires à l'utilisateur pour préciser

son choix. En pratique, ce type de clavier n'est alors profitable qu'aux utilisateurs pouvant réaliser deux, trois ou quatre types de clics différents (Harbush, Kühn, 2003b ; Tanaka-Ishii *et al.*, 2002).

D'autres systèmes réalisent une désambiguïsation automatique partielle en se basant sur un lexique qui restreint la combinatoire des séquences autorisées de caractères. Le système T9™, proposé par la société *Tegic Communications*, se retrouve sur tous les téléphones mobiles, mais a connu également une application dans le domaine de l'aide à la communication (Kuhlsler, 1998). Il va plus loin en utilisant un lexique fréquentiel : à tout moment, le système lève l'ambiguïté en privilégiant la poursuite du mot qui est compatible avec la saisie en cours et qui présente la fréquence moyenne d'occurrence la plus élevée dans la langue considérée. Bien entendu, ce choix probabiliste peut être erroné. Dans ce cas, l'utilisateur doit réaliser un appui supplémentaire pour sélectionner le caractère correspondant au mot suivant le plus probable. Cette stratégie de rattrapage est cependant assez rarement utilisée, puisque les performances annoncées sont de 1,0051 appui par caractère. Le système *UniGlyph* (Belatar, Poirier, 2007) utilise de même un dictionnaire fréquentiel. Ce clavier original dispose de trois touches principales correspondant à des primitives graphiques rattachées à un ensemble de caractères (figure 8). Pour saisir un mot, l'utilisateur sélectionne la suite des primitives correspondantes : après chaque appui, les mots de même longueur les plus probables (selon le dictionnaire fréquentiel) sont affichés suivant un dispositif de zoom de type « FishEye ». Lorsque le mot attendu est affiché, on peut le sélectionner par un ou plusieurs appuis additionnels ; la liste des primitives est ainsi désambiguïsée. Au final, le système ne nécessite en moyenne que 1,04 appui par caractères.



Figure 8. Les trois touches correspondant aux primitives du clavier ambigu *UniGlyph* et le codage des caractères correspondants (Belatar, Poirier, 2007)

Quelle que soit la technique retenue, la désambiguïsation ne sera jamais totale. L'utilisateur d'un clavier ambigu est donc fréquemment amené à réaliser plusieurs appuis par caractère, ce qui est rapidement fatiguant. C'est pourquoi ces interfaces sont généralement limitées à des cadres applicatifs bien définis :

– saisie avec des dispositifs d'entrée à clics multiples, où la multiplicité des clics est moins pénalisante. On retrouve ici ce qui existe depuis de nombreuses années en matière de saisie dactylographique ou de langues orientales à idéogrammes ;

– saisie sur des interfaces limitées (PDA, téléphone mobile).

Dans les autres cas de figure, une saisie par balayage linéaire ou ligne/colonne est recommandée. L'utilisation d'un clavier dynamique constitue une optimisation très efficace du balayage linéaire

3.4. Limiter le nombre de défilements : clavier dynamique et prédiction de lettre

Les claviers dynamiques généralisent un principe déjà rencontré avec le système *Keyglass* (cf. § 3.1) : la disposition des touches est modifiée après chaque saisie afin que les caractères les plus probables soient accessibles en un nombre minimal de défilements (figure 9). L'application de cette idée n'est pas envisageable avec un défilement ligne/colonne. Après chaque remise à jour de l'affichage, l'utilisateur serait en effet obligé de parcourir visuellement la totalité de l'écran pour découvrir la nouvelle position de la lettre recherchée. Au contraire, lorsque le clavier virtuel est utilisé avec un balayage linéaire, le caractère dynamique de l'affichage n'est plus gênant puisque l'utilisateur n'a qu'à considérer la position courante du curseur et, éventuellement, celle qui va lui succéder. Deux approches ont principalement été étudiées jusqu'ici pour mettre en œuvre la prédiction de texte nécessaire à la réorganisation contextuelle des claviers dynamiques.



Figure 9. Clavier dynamique : exemple de réorganisation du clavier lors de la saisie du début du mot « compter »

La première méthode qui généralise l'idée du système T9™, consiste à parcourir un lexique fréquentiel organisé sous la forme d'un graphe probabiliste de lettres. (Ménier et Poirier, 2001) proposent ainsi de compiler un lexique fréquentiel sous la forme d'un arbre. Chaque nœud de l'arbre correspond à un caractère. La probabilité d'occurrence d'un caractère est donnée par la somme des probabilités de ses nœuds fils. Les nœuds feuilles, qui correspondent aux mots complétés, ont pour probabilité finale leur fréquence relative d'occurrence dans la langue.

L'autre approche s'appuie sur une modélisation markovienne. La première version du système *HandiAS* (Le Pévédic, 1998) utilisait ainsi un bigramme de lettres comme modèle de prédiction. Le système *Sibylle*, qui est présenté dans ce

numéro, utilise un pentagramme de lettres (contexte de quatre lettres pour prédire la suivante) qui donne de bons résultats : la lettre recherchée est en moyenne en troisième position⁴ sur un clavier dynamique de 64 touches. Le gain obtenu en augmentant le contexte de prédiction est négligeable (Schadle *et al.*, 2002). Limiter ainsi le nombre de défilements moyen à 3 par caractère est déjà très satisfaisant. À titre de comparaison, un clavier statique à défilement linéaire nécessitera au mieux 9 défilements, tandis qu'un clavier à balayage ligne/colonne optimisé demandera 4,3 défilements, mais également 2 appuis, pour atteindre le même but. Mais l'intérêt principal de ces approches markoviennes réside dans leur robustesse. Puisqu'elle ne met pas en jeu de dictionnaire, la prédiction n'est gênée ni par la présence de mots hors vocabulaire, ni par les erreurs de saisies qui sont très nombreuses dans le cadre de la communication palliative.

Dasher est également un clavier dynamique basé sur une prédiction de lettres (Ward *et al.*, 2000). Son originalité réside dans son interface de saisie. Plutôt que déplacer le curseur sur le clavier virtuel, l'utilisateur va guider le défilement des lettres à saisir successivement à l'écran (figure 10).

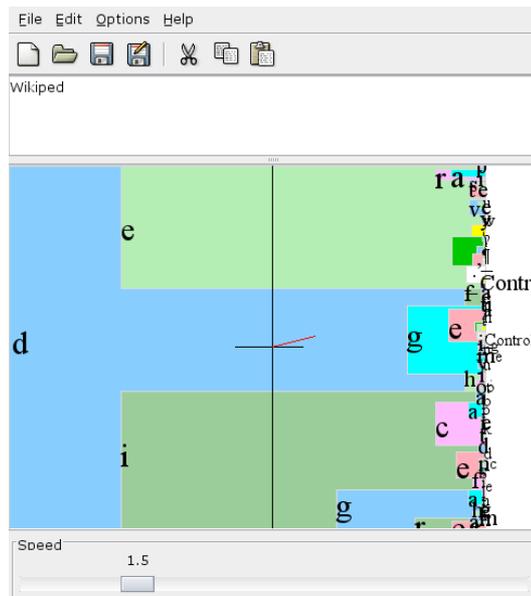


Figure 10. *Le clavier dynamique Dasher*

La saisie sous *Dasher* se déroule comme suit. Imaginons que vous désirez écrire le mot *computer*. Initialement, les lettres les plus probables sont *d*, *p*, *l*, *a* et *e*. Elles

⁴ Plus précisément, position 2,9 pour le français et 3,0 pour l'allemand.

sont affichées sur la droite de l'interface, leur espacement dépendant des probabilités d'occurrence estimées par le modèle de prédiction. Par exemple, une lettre ayant une chance sur deux de survenir occupera à elle seule la moitié de l'interface. Plutôt que de déplacer le curseur vers ces lettres, celles-ci vont se déplacer pour simuler l'avancement de la saisie. L'utilisateur n'a alors qu'à déplacer l'affichage vers le haut ou le bas de l'interface, pour se rapprocher de la lettre désirée. Dans notre cas, le *c* recherché n'est pas dans les lettres les plus probables. Il n'est pas donc pas visible initialement. En se rapprochant des lettres affichées les moins fréquentes (*a, e...*), les suivantes, par ordre de probabilité, vont apparaître par effet de zoom. On peut donc diriger le pointeur vers la lettre *c* qui s'avance automatiquement vers nous. Ce déplacement automatique s'accompagne graduellement de l'affichage des lettres qui suivent. La lettre *o*, qui est la plus probable après la saisie du *c*, s'affiche de manière bien distincte. Le texte est ainsi composé progressivement sans que l'utilisateur n'ait à réaliser un seul appui : il se contente de diriger l'affichage des lettres vers le haut ou le bas, les lettres étant sélectionnées lorsque l'on passe sur la zone les concernant. *Dasher* constitue donc une tentative originale, et plus poussée que le système *KeyGlass*, pour utiliser un clavier dynamique avec un dispositif de pointage encore actif. *Dasher* peut s'utiliser avec un dispositif de pointage par détection du regard (Ward et Mc Kay, 2002).

3.5. Autres modalités d'entrée

Certains systèmes de suppléance ne sont pas concernés par la question de la saisie sur clavier virtuel. Ils utilisent en effet une autre modalité d'entrée. Lorsqu'un patient a conservé ses facultés d'élocution, mais a perdu l'usage ou le contrôle de ses membres, le système n'a pour seul objectif que de permettre une saisie de texte sur ordinateur. Dans ce cas, l'emploi d'un système de reconnaissance de la parole peut être conseillé. Les systèmes de dictée vocale présentent désormais des performances très acceptables et peuvent être adaptés pour prendre en compte certaines difficultés d'élocution. (Raghavendra *et al.*, 2001) adaptent ainsi le modèle acoustique d'un système de reconnaissance vocale à l'élocution de patients dysarthriques. En dépit d'un taux d'erreur de mots (WER pour *Word Error Rate*) encore élevé, ils montrent que les transcriptions résultantes sont plus intelligibles que l'écoute directe de la personne⁵. Dans ce cas, le système peut même servir d'aide à la communication orale.

En dépit de ces résultats, de nombreux patients tétraplégiques ne souffrant d'aucun problème d'élocution préfèrent utiliser un clavier à défilement qu'une reconnaissance de la parole. Plusieurs facteurs concourent à cet état de fait. Tout d'abord, la saisie par dictée vocale est moins discrète que la saisie sur clavier, ce qui peut gêner l'utilisateur. D'autre part, les meilleurs systèmes de reconnaissance à grand vocabulaire présentent un taux d'erreur de mots qui peut varier de quelques

⁵ Ils observent ainsi une augmentation de 22 % à 47 % du nombre de phrases comprises, suivant le degré de sévérité de la dysarthrie.

pour cent (parole lue ou préparée) à 30 % (parole spontanée). Quelle que soit l'approche choisie par le système, la correction de ces erreurs par l'utilisateur est le plus souvent très fastidieuse. Le patient préfère alors souvent s'en remettre à une saisie directe sur clavier virtuel. De fait, la parole est généralement utilisée comme modalité d'entrée, ou pour des applications à petit vocabulaire, comme le pilotage de fauteuil électrique. Dans certains cas, le pilotage du fauteuil peut même conduire à un minidialogue oral entre l'utilisateur et la machine (Hockey et Miller, 2007).

4. Accélérer la saisie : éviter les sélections

Comme nous venons de le voir, de multiples approches ont été envisagées pour réduire le temps d'accès aux touches du clavier virtuel. Ces techniques apportent généralement des réponses efficaces au problème de la sélection rapide, la tâche des ergothérapeutes étant alors de choisir l'interface la plus adaptée au handicap de l'utilisateur.

En dépit de ces avancées, la saisie de texte reste fastidieuse pour les utilisateurs. D'où le désir d'accélérer plus encore la composition des messages en évitant à l'utilisateur la sélection d'un maximum de lettres. L'idée ici est de compléter automatiquement le texte à la place de l'utilisateur. Deux catégories d'approches, qui sont par ailleurs le plus souvent complémentaires, sont envisageables ; il s'agit d'une part des méthodes qui font usage d'abréviations et, d'autre part, de celles basées sur de la prédiction de mots.

4.1. Écriture abrégée

Le principe de l'écriture abrégée est connu de toute personne ayant à écrire du texte de manière rapide. Son utilisation est donc naturelle pour une personne handicapée ayant une maîtrise correcte de la langue. L'emploi de l'écriture abrégée est ancien dans le monde du handicap. Elle est courante depuis plusieurs décennies chez les personnes aveugles qui désirent lire et écrire rapidement des textes sur claviers adaptés. Il existe ainsi un abrégé Braille II qui consiste en la définition d'un certain nombre d'abréviations. Leur mémorisation demande bien entendu un effort d'apprentissage et le décodage de l'écriture abrégée a une influence importante sur la charge cognitive de la personne. Il existe toutefois des méthodes d'apprentissage progressif de l'abrégé qui facilitent ces opérations (Ricco et Dutoit, 2001).

Lorsqu'il existe une correspondance biunivoque entre les abréviations utilisées et les mots du lexique, la complétion automatique du texte abrégé est directe. La prise en compte la plus simple de l'écriture abrégée dans le cadre de l'aide à la communication consiste donc à utiliser un dictionnaire d'abréviations. (Tounsi *et al.*, 2000) proposent ainsi de retenir les abréviations de mots ou de groupes de lettres les plus couramment utilisées par l'abrégé Braille II. Le système *Sibylle*, décrit dans ce numéro, intègre quant à lui un module qui se base sur les abréviations définies par l'utilisateur. Point intéressant, ces abréviations sont intégrées en parallèle dans le modèle de prédiction de mots du système. Ces approches basiques

à base de dictionnaires d'abréviations se retrouvent dans de nombreux systèmes commerciaux.

Si cette approche est très utile pour accélérer la composition des mots les plus fréquents de la langue, l'utilisation d'un dictionnaire d'abréviations a pour limite les capacités de mémorisation de ses utilisateurs. En pratique, lorsqu'une personne utilise l'écriture abrégée, elle utilise des règles morphologiques qui ont l'avantage de présenter une large couverture lexicale. Par exemple, un utilisateur pourra décider d'utiliser l'abréviation *mt* pour représenter le morphème *ment* qui termine la plupart des adverbes français. L'aide à la communication à l'aide d'abréviations requiert donc des modules capables de gérer des règles propres à l'utilisateur et susceptibles de ne concerner qu'une partie des mots du lexique.

C'est par exemple l'objectif du projet Hook (Ricco et Dutoit, 2001) qui utilise des transducteurs pour compléter un texte saisi en écriture abrégée. Plus précisément, le transducteur est compilé à partir de règles de réécriture multiniveaux permettant d'encapsuler plusieurs types d'abréviations. Dans l'article cité, le transducteur MLRR n'était utilisé que pour l'utilisation d'abréviations lexicales. Les auteurs annonçaient cependant son utilisation future pour le décodage de morphèmes abrégés dans le cadre du projet européen *Fasty*.

Dans le même esprit, le système *Compansion* (McCoy *et al.*, 1995) détecte des abréviations à la volée (c'est-à-dire sans que l'utilisateur n'ait eu à les définir) à partir des règles morphophonétiques les plus souvent utilisées en pratique. Par exemple, l'élision de certaines lettres d'un mot (*bjr* pour *bonjour*). Le système va même plus loin dans la gestion des abréviations. Il autorise en particulier des abréviations de nature morphosyntaxique. L'utilisateur peut ainsi rédiger son texte sous forme télégraphique, sans fléchir les mots. *Compansion* termine alors la rédaction par un traitement en trois étapes :

- analyse syntaxique de surface du texte abrégé : étiquetage en parties du discours puis parenthésage en segments minimaux non récursifs, encore appelés *chunks* (Abney 1991) ;
- détermination du rôle sémantique de chaque segment sous forme de cas sémantiques (Fillmore 1968) ;
- génération/traduction de la forme complétée du texte à partir de ces deux informations.

Cette approche est a priori très puissante. Elle pose cependant la question de l'ambiguïté de la saisie de formes non fléchies, qui peut se traduire par des erreurs d'expansion. Par ailleurs, elle nécessite une rédaction non naturelle, qui peut gêner l'utilisateur ayant une bonne maîtrise de la langue, ou au contraire perturber l'apprentissage de la langue par un jeune enfant. En conclusion, il semble que l'écriture abrégée doit être limitée à la réduction non ambiguë de morphèmes, avec éventuellement l'utilisation d'abréviations lexicales pour un nombre limité de mots

très fréquents ou définis pas l'utilisateur. L'écriture abrégée est par ailleurs une solution complémentaire à la prédiction de mots.

4.2. Prédiction de mots : point de vue utilisateur

Par opposition à l'écriture abrégée, l'utilisation de la prédiction de mots ne demande aucun effort de mémorisation. Toutefois, elle peut également accroître la charge cognitive de l'utilisateur. Son principe est le suivant. Après chaque saisie de caractère, le système tente de prédire le mot (ou groupe de mots) qui est en cours de saisie. Lorsque l'utilisateur choisit de retenir une de ces prédictions lexicales, le mot sélectionné est inséré dans le texte en cours de composition, sans que l'utilisateur n'ait à composer l'ensemble des lettres qui le composent. L'affichage des prédictions peut se faire de deux manières principales :

- **complétion intégrée** : ici, le système ne prédit qu'un seul mot à chaque saisie. Cette proposition est directement intégrée au texte en cours de saisie, l'utilisateur n'ayant qu'à valider par un appui la sélection éventuelle de la proposition. Cette stratégie de complétion se retrouve par exemple dans le système VITIPI (Boissière et Dours, 2001). Certains systèmes peuvent proposer une complétion intégrée partielle, en particulier pour gérer le problème des flexions. Prenons l'exemple de la saisie d'un verbe conjugué : après la saisie des premières lettres du mot, il est fréquent qu'on puisse deviner le radical du verbe sans pouvoir prédire son temps et donc ses suffixes flexionnels. Dans ce cas, le système ne complètera que la partie non ambiguë du mot (radical), l'utilisateur gérant la saisie des caractères qui terminent le mot (morphèmes flexionnels) ;

- **liste de mots** : lorsque plusieurs propositions sont retenues à chaque fois par le système, la liste de mots correspondants est affichée dans une zone spécifique du clavier. Dans ce cas, un appui supplémentaire est nécessaire pour accéder à la liste de prédiction.

La prédiction de mots peut *a priori* accélérer d'une manière significative la composition des messages. L'évaluation sur corpus de certains systèmes de prédiction montre qu'ils ont le potentiel d'éviter la saisie d'un caractère sur deux en moyenne. En pratique, ce gain est toutefois plus limité. On observe en effet que les patients ignorent souvent les propositions de la prédiction (Biard *et al.*, 2006). Cet état de fait résulte de l'accroissement de la charge cognitive des utilisateurs, qui doivent à la fois écrire leur texte et lire les propositions du système. Ce conflit entre fonctions cognitives antagonistes est *a priori* moins important dans le cas de la complétion intégrée. Comme le montrent par exemple (Wandmacher et Antoine, 2007b) dans ce numéro, l'aide apportée par la prédiction de mots est en revanche moins importante lorsque celle-ci est limitée à une seule proposition. Comme souvent en communication assistée, l'apport de la prédiction dépendra donc d'un compromis entre efficacité de la prédiction et adéquation de l'interface homme-machine du système de suppléance avec le handicap de l'utilisateur. Il n'en reste pas moins que l'assistance apportée par la prédiction de mots est essentielle. Nous

allons maintenant présenter les différentes techniques qui ont été développées pour la réaliser.

4.3. Prédiction de mots : analyse syntaxique et modèles de langages markoviens

La première idée qui vient à l'esprit en matière de prédiction de mots est l'utilisation d'un lexique (fréquentiel ou non). Chaque séquence de caractères est comparée aux mots du dictionnaire et la complétion automatique est possible dès que le nombre d'items filtrés est suffisamment réduit. À titre d'exemple, le système VITIPI se limitait dans sa première version à l'exploration d'un lexique fréquentiel auquel s'ajoutait un module d'apprentissage du lexique personnel de l'utilisateur (Boissière et Dours, 1996). L'originalité du système est qu'il était capable de détecter et corriger à la volée des erreurs de saisies simples. VITIPI parvient ainsi à corriger 72 % des fautes de frappe et 75 % des erreurs dues à une méconnaissance de l'orthographe du mot.

Des techniques d'optimisation classiques permettent une exploration rapide du dictionnaire même sur des dispositifs ayant une faible puissance de calcul. C'est pourquoi ce type de complétion se retrouve sur la plupart des systèmes commerciaux d'aide à la communication, mais également sur les téléphones portables ou tout dispositif de saisie à interface limitée.

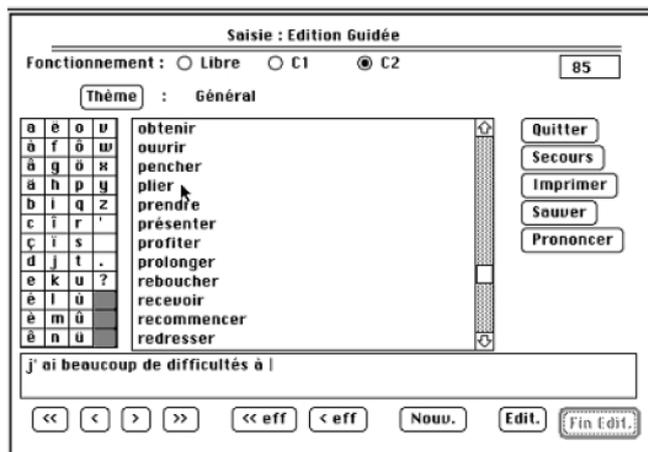


Figure 11. L'interface utilisateur du système KOMBE

L'utilisation d'un dictionnaire revêt néanmoins les mêmes faiblesses que celles entrevues avec la prédiction de lettres : ne pas considérer l'historique du discours (mots précédents) limite la focalisation de la prédiction. Les premiers systèmes qui ont considéré un contexte de prédiction plus étendu l'ont fait dans une approche descendante (au sens des travaux de l'époque en intelligence artificielle) : l'idée

était de partir d'un scénario de communication et de guider l'utilisateur dans la composition des phrases. C'est par exemple le cas du système *Kombe* (Guenther *et al.*, 1992 ; Richardet, 1998) d'aide à la communication en français et en allemand pour des patients atteints en particulier de SLA (Sclérose Latérale Amyotrophique). L'utilisateur compose pas à pas le message en sélectionnant des continuations possibles (mots ou expressions) produites par le système en fonction du thème de discussion choisi (santé, nourriture, loisir...), de la syntaxe et du sens de la phrase en cours de construction. Par exemple (figure 11), si ce qui a été composé jusque-là est « *J'ai beaucoup de difficultés à...* », la suite syntaxique possible est, par exemple, une négation (*ne pas*), un pronom (*te, le, lui, ...*) ou un ensemble de verbes. Si l'utilisateur sélectionne *plier*, *Kombe* se livrera à un calcul conceptuel pour afficher les mots et les expressions désignant les parties du corps qui peuvent être pliées. *Kombe* est une des premières applications du logiciel générique *Illico* (Pasero et Sabatier 1994, 1995) qui, sur la base d'un ensemble de connaissances (lexiques, règles syntaxiques, règles de composition sémantique, modèle conceptuel, etc.) permet à la fois d'analyser et de produire des phrases, et si nécessaire de guider et de corriger l'utilisateur dans la composition de ses énoncés. Dans le même esprit, le système *CHAT* repose sur l'utilisation de schémas prédéfinis (Alm *et al.*, 1987 ; Brophy *et al.*, 1991). (Copestake, 1997) propose de son côté une cogénération basée sur l'utilisation de schémas prédéfinis que l'utilisateur va compléter tout en étant aidé par le système. À cette fin, ce dernier utilise des données statistiques sur les collocations de mots, des grammaires locales et l'utilisation d'ontologies sémantiques analogues à *Wordnet*. Plus original enfin, le système *Talksback* cherche à retrouver dans une base de phrases préenregistrées, celle qui pourrait aller avec le contexte courant. L'utilisateur doit sélectionner le sujet de conversation, le type de phrase et si possible la situation (Broumley *et al.*, 1990).

La composition assistée permet une saisie très rapide, mais elle se limite à une communication finalisée, orientée vers un but précis et où le libre arbitre de l'utilisateur est le plus souvent restreint. En ce sens, elle ne peut tenir lieu de solution universelle pour l'aide à la communication. Cette approche permet toutefois de mettre en avant un besoin récurrent en matière de communication alternative : celui de la rédaction de messages d'urgence, tels que « *je suis mal installé sur mon fauteuil* », « *je veux aller aux toilettes* », etc. Tout système d'aide à la communication se doit de proposer une méthode de saisie rapide d'un certain nombre de messages importants pour l'utilisateur. Ainsi, le système *Sibylle* permet à l'utilisateur de définir seize messages préenregistrés. La composition assistée peut être vue comme une amélioration de ces possibilités de communication d'urgence.

Si l'on vise au contraire une aide à la communication plus générale, il paraît naturel de se baser sur la prise en considération des structures syntaxiques de la

langue⁶. De ce point de vue, la prédiction de mots pour la communication palliative a suivi dans une certaine mesure l'évolution historique du TAL. Jusqu'au début des années 1990, les approches à base de connaissances sont ainsi restées prédominantes (Vandykke *et al.*, 1992 ; Swiffin *et al.*, 1987). Elles consistent le plus souvent à faire l'analyse syntaxique de la phrase en cours de saisie pour prédire le mot suivant, ou sa partie du discours. Par exemple, le système *HandiAS* considère des grammaires locales qui décrivent les séquences de mots ou parties du discours autorisées dans la langue. Ces grammaires sont en fait décrites sous la forme de transducteurs qui peuvent facilement être utilisés en prédiction (Maurel *et al.*, 2000).

Deux problèmes principaux se posent face aux systèmes à base de connaissances. Tout d'abord, la prédiction n'est utilisable que si l'on sait classer les différentes hypothèses. Soit parce qu'il ne faut conserver qu'une seule proposition (complétion intégrée), soit parce qu'il faut choisir les n termes à afficher dans la liste de prédiction⁷. Pour répondre à cet impératif, on a recours à des systèmes hybrides combinant analyse syntaxique symbolique et calcul de fréquences. C'est, entre autres, le cas de *HandiAS* (Le Pévédic, 1998) et du système *SyntaxPAL* (Wright, 1994). Tous les deux combinent grammaires locales et probabilités.

Le second problème est plus profond : il concerne les difficultés que rencontrent ces systèmes en cas d'énoncés agrammaticaux. Il n'existe pas d'incompatibilité fondamentale entre robustesse d'analyse et systèmes à base de connaissances. Le TAL robuste (Ejerhed, 1993), qui se fonde sur les principes du *shallow parsing* et de l'analyse incrémentale (Aït-Moktar *et al.*, 2003) est là pour le rappeler, en particulier par ses applications sur la parole spontanée (Antoine *et al.*, 2003). Le problème qui se pose ici n'est donc pas celui de la robustesse, mais de sa gestion du point de vue de l'utilisateur. Lorsqu'un début d'énoncé est agrammatical, le système ne peut plus effectuer aucune prédiction, alors qu'on aurait besoin d'une détérioration graduelle des performances. Cette question est très sensible dans le cas de l'aide au handicap où les erreurs de saisie sont fréquentes et où la maîtrise de la langue est parfois imparfaite (enfants en cours d'apprentissage, troubles langagiers associés...). Ces approches ne sont donc pas utilisables en pratique pour l'aide à la communication et aucun système commercial ne les emploie. Elles retrouvent en revanche une utilité dans la perspective d'une aide à l'apprentissage ou à la rééducation. Dans ce cas, il est très important que le système n'accepte que des énoncés syntaxiquement corrects. C'est dans cet objectif qu'une version d'*HandiAS* a été couplée au système *Sibylle* d'aide à la communication.

⁶ La prise en considération de la sémantique serait, bien entendu, également bienvenue. Elle se heurte toutefois aux limites actuelles du TAL dans le domaine. Nous présenterons aux § 4.3 et 4.4. quelques travaux allant dans cette direction.

⁷ En effet, en pratique, un grand nombre de mots sont susceptibles de survenir dans le texte à un moment donné. Sans classement, l'utilisateur doit saisir plus de lettres afin de réduire le nombre d'hypothèses à une valeur acceptable.

Comme la quasi-totalité des systèmes de prédiction actuels, le système *Sibylle* repose sur un modèle stochastique de type N-grammaire. À la base, *Sibylle* utilise un modèle quadrigramme. C'est-à-dire qu'il estime (à partir d'un apprentissage sur grand corpus) la probabilité d'occurrence de chaque mot, connaissant les trois derniers mots saisis. D'autres modèles combinent une N-grammaire avec un modèle de classe, c'est-à-dire un modèle markovien portant sur les parties du discours de mots. Par exemple, les systèmes *Profet* (Carlberger *et al.*, 1997) et *Fasty* (Trost *et al.*, 2005) reposent sur l'interpolation d'un bigramme avec un tri-classe. On sait que les modèles de classe sont sous-optimaux d'un point de vue statistique. Leurs performances sont toutefois supérieures à celles des modèles de mots lorsque la taille du corpus d'apprentissage est insuffisante au regard de la dimension du modèle utilisé. Quel que soit le modèle utilisé, le système de suppléance ne considère que les hypothèses qui sont cohérentes avec les lettres déjà saisies du mot courant.

Les limitations des N-grammaires en termes de gestion des dépendances à longue distance sont bien connues. Dans le cas de la prédiction de mots, cette insuffisance est relativement peu pénalisante. Elle ne saurait obérer l'intérêt que représente la détérioration très graduelle des performances des modèles statistiques en présence d'énoncés non normés. Certains auteurs ont cependant cherché à utiliser des modèles stochastiques plus avancés. La première version du système *Sibylle* (Schadle *et al.*, 2004) utilisait, par exemple, un modèle structural (Chelba, Jelinek, 2000) basé sur la segmentation de l'énoncé en segments minimaux non récursifs (*chunks*). Cette approche permet d'étendre le contexte de prédiction sans augmenter le nombre de paramètres du modèle. Le module orthographique de la plateforme *PCA*, qui est présenté dans ce numéro (Blache et Rauzy, 2007), utilise, quant à lui, le modèle des patrons (Ron *et al.*, 2006). Cette sous-classe des modèles de Markov cachés considère des états pouvant correspondre à des séquences de longueurs variables et non plus des items uniques comme dans le cas des N-grammaires. La phase d'apprentissage sur corpus permet de sélectionner les séquences optimales pour la tâche de prédiction. Comme les modèles multigrammes (Deline et Bimbot, 1995), cette approche permet également d'atteindre des contextes de prédiction plus longs.

4.4. Prédiction de mots : adaptation à l'utilisateur et au discours

Comme l'ont montré de nombreuses expériences, les systèmes de prédiction de mots ont la capacité d'éviter à l'utilisateur entre 40 % et 60 % de saisies. Ces évaluations ont cependant été réalisées sur des corpus artificiels (généralement des corpus journalistiques) et l'on constate en pratique que les performances baissent de manière très sensible sur des corpus plus écologiques (Wandmacher et Antoine, 2006 ; Trnka et McCoy, 2007). C'est pourquoi un système d'aide à la communication ne sera utilisable que s'il dispose de capacités réelles d'adaptation à l'utilisateur.

Étant donné que les patients répondent à des tableaux cliniques très variés, mais également qu'ils vont utiliser le système pour des usages variés relevant de registres différents (communication écrite ou orale, rédaction de documents écrits, voire d'œuvres littéraires), l'aide à la communication doit faire face à des demandes très fortes d'adaptation multifactorielle. Au niveau de l'interface utilisateur, elle se traduit par une demande d'un paramétrage le plus étendu possible du système : par exemple, configuration des différentes fonctions sur le clavier, durée des appuis de sélection, vitesse de défilement du balayage, etc. Lorsque l'on considère la prédiction, l'important est que le moteur linguistique prenne en compte la manière de s'exprimer de l'utilisateur. C'est-à-dire que le système doit considérer dans ses prédictions :

- le **vocabulaire de l'utilisateur**, qu'il s'agisse des entités nommées, des noms communs, voire des abréviations. Cette question pose bien entendu le problème classique en TAL des mots hors vocabulaire, mais peut concerner, tout simplement, la fréquence d'usages des mots spécifiques aux productions de l'utilisateur ;

- le **style de langage propre à l'utilisateur** qui, là encore, ne se traduira pas tant par l'utilisation de structures syntaxiques spécifiques, mais plutôt par des fréquences d'usages différentes de celles du corpus d'apprentissage.

En pratique, les modules de prédiction les moins évolués se contentent de créer un dictionnaire propre à l'utilisateur. Il est préférable que ce lexique spécifique soit nourri à la volée lors des saisies de l'utilisateur. Lorsque la prédiction classe les propositions de mots suivant leurs probabilités d'occurrence, il est nécessaire de combiner fréquences globales et fréquences utilisateur. Dans le cas d'un système de prédiction hybride, cette combinaison est le plus souvent confiée à une heuristique *ad hoc*. Plus original, le système PCA orthographique, présenté dans ce numéro, mémorise toutes les phrases produites par l'utilisateur sous forme d'arbre (Blache et Rauzy, 2007), pondéré par les fréquences d'utilisation des énoncés. Cette adaptation va donc au-delà de la simple création d'un dictionnaire utilisateur. Le calcul final des probabilités du système est, là encore, obtenu à l'aide d'une heuristique *ad hoc* avec seuil maximal d'influence du modèle utilisateur.

À l'opposé, l'adaptation des modèles de langages stochastiques est une problématique bien définie d'un point de vue mathématique : on interpole un modèle de langue général, entraîné sur un grand corpus, avec un modèle spécifique appris sur les saisies de l'utilisateur (Trost *et al.*, 2005). Le coefficient d'interpolation entre les deux modèles est donné par un algorithme qui assure de l'optimalité de la solution pour un critère statistique choisi. L'algorithme d'interpolation le plus fréquemment retenu est certainement l'algorithme EM, qui cherche à maximiser l'entropie globale du modèle interpolé (Jelinek, 1990). Il est intéressant de noter que le coefficient d'interpolation évolue au cours de l'adaptation afin de refléter au mieux l'apport des saisies de l'utilisateur (Wandmacher et Antoine, 2007 : 10).

En utilisant une procédure incrémentale d'évaluation (Boissière *et al.*, 2007), on peut montrer que les effets de l'adaptation utilisateur sont assez rapides. Ainsi, on peut déjà détecter une amélioration des performances après la saisie de quelques milliers de mots (Wandmacher *et al.*, 2007), (figure 5). Les expériences qui ont été conduites montrent que l'adaptation se traduit initialement par une nette réduction du taux de mots hors vocabulaire (Boissière *et al.*, 2007). Les améliorations ultérieures, plus limitées en importance, semblent être plutôt dues à une adaptation aux structures de phrases utilisées de manière privilégiées par l'utilisateur.

Les différentes méthodes d'adaptation que nous venons de présenter permettent une amélioration significative des performances qui est nécessaire à l'utilisation en pratique de la prédiction de mots. Elles ne permettent néanmoins qu'une adaptation à long terme du système, alors qu'une focalisation à court terme de la prédiction sur le thème courant du discours serait également très utile. Cette focalisation est bien entendu fondatrice pour les systèmes de cogénération finalisée que nous avons évoqués plus haut (Copestake, 1997 ; Richardet, 1998). Elle a également été étudiée par quelques systèmes de suppléance à portée générale. Ainsi, le système *PAL* (Wright, 1994) estime la probabilité d'occurrence de chaque mot en pondérant sa fréquence d'usage générale dans la langue par sa fréquence d'utilisation récente (fenêtre de contexte) par l'utilisateur. L'idée est qu'un mot qui est apparu récemment est susceptible d'être réutilisé à nouveau dans un avenir très proche, puisque appartenant au thème courant du discours. Cette idée est la base du modèle cache qui consiste à garder les n derniers mots qui ont été composés et à augmenter leur probabilité d'un facteur p constant (Kuhn et De Mori, 1990) ou décroissant dans le temps (Clarkson et Robinson, 1997). Le modèle cache est très utilisé pour l'adaptation à court terme des modèles de langage stochastique. L'amélioration des performances qui en résulte est constante, mais assez limitée dans l'absolu. Une autre approche, le modèle *trigger* ne considère pas les mots isolément, mais utilise des collocations. Dans ce modèle un mot déclencheur augmente (dès qu'il est utilisé) la probabilité d'autres mots associés (Rosenfeld, 1996 ; Matiasek et Baroni, 2003). Là encore, les gains observés sont réels mais limités.

La faiblesse (relative) de ces approches est aisément compréhensible. S'ils sont robustes, les modèles cache et *trigger* ne donnent en effet qu'une vision très limitée du thème courant du discours. L'idéal serait de caractériser explicitement quelques grands thèmes de discours, de détecter le thème courant et de focaliser la prédiction sur le modèle correspondant. Le manque de robustesse actuel de méthodes de détection automatique de thème du discours (Bigi *et al.*, 2001) obère cependant leur application directe dans le domaine de la communication assistée. (Trnka *et al.*, 2005) résolvent ce hiatus d'une manière séduisante : plutôt que de caractériser un thème courant unique, ils estiment la probabilité qu'a le discours de se trouver dans chacun des grands thèmes connus du système. La prédiction est alors réalisée par l'interpolation de plusieurs modèles de langage spécifiques à chaque thème, les coefficients d'interpolation correspondant aux probabilités de se trouver dans le thème considéré.

Une dernière approche consiste à ne pas caractériser explicitement le thème du discours, mais à tenter de circonscrire son champ sémantique. Le système *Sibylle* utilise ainsi l'analyse sémantique latente, ou LSA (Deerwester *et al.*, 1990), pour représenter la sémantique de chaque mot ou texte dans un espace vectoriel. Un calcul de proximité dans cet espace vectoriel permet d'estimer la probabilité d'occurrence d'un mot compte tenu du champ sémantique du thème du discours, défini par les N derniers mots composés par l'utilisateur. Cette prédiction sémantique est alors interpolée avec un modèle de langage traditionnel. Cette approche conduit à des gains modérés dans l'absolu, mais déjà dix fois plus importants que ceux obtenus avec un modèle cache (Antoine et Wandmacher, 2006).

5. Communiquer sans langage verbal

Les systèmes de suppléance que nous avons étudiés jusqu'à présent s'adressent à des utilisateurs ayant une maîtrise correcte de la langue. Bien souvent, le patient souffre pourtant de troubles langagiers associés, ou n'a encore atteint qu'un stade intermédiaire dans l'apprentissage de la langue. Dans ces situations, il est nécessaire de développer une interface de saisie adaptée aux capacités langagières de l'utilisateur.

5.1. Troubles du langage et dysorthographies

Les troubles langagiers associés à des pathologies telles que l'infirmité motrice cérébrale se traduisent généralement par une dysorthographie plus ou moins prononcée. Peu de travaux se sont penchés sur ces problèmes jusqu'à une date récente. *VITIPi*, qui a été pionnier en la matière (Boissière et Dours, 1996), ne gère ainsi que des problèmes de paraphasie littérale (Boissière *et al.*, 2007) assez limités (inversion de lettres, par exemple). Ces travaux, comme ceux de (Spooner, 1998) ou de (Pedler, 2001), peuvent être considérés comme l'adaptation de correcteurs orthographiques aux erreurs spécifiques aux troubles considérés.

Ces approches ne sont efficaces que si les dysorthographies restent internes au mot. Malheureusement, ces erreurs perturbent le plus souvent la segmentation de l'énoncé en mots, ce qui limite drastiquement l'utilité de ces correcteurs orthographiques (James et Draffan, 2004). Les travaux de (Sitbon, Bellot et Blache, 2007, 2007b), publiés dans ce numéro spécial, constituent au contraire une réponse assez globale et élégante à la prise en compte de la dyslexie et des dysorthographies. Partant de l'analyse des troubles langagiers considérés (Ramus *et al.*, 2003), elle consiste à compenser les déficits du module phonologique cognitif en réutilisant des techniques développées initialement par les industries de la parole. Le système propose en effet de réécrire les énoncés dysorthographiés en deux étapes : après avoir été repris par un correcteur orthographique, l'énoncé est tout d'abord phonétisé (reprise d'un module utilisé en synthèse de la parole), puis transcrit par un module adapté de reconnaissance de la parole.

Si le recours à une transcription phonétique est utile dans le cas de la dyslexie, c'est également un passage souvent obligé lors de l'apprentissage de la langue. Ainsi, les enfants infirmes moteurs cérébraux, qui atteignent un premier stade d'apprentissage symbolique de la langue, utilisent fréquemment un alphabet phonétique en compagnie de leur orthophoniste. Des systèmes comme *SYNTHE4* ou *CLAPOTI* (Vella *et al.*, 2003) sont alors là pour assister la communication.

5.2. Aphasies et communication sans support verbal

Mais lorsque le patient est aphasique où n'a encore aucune maîtrise de la langue, le support de la communication est nécessairement iconique. On se retrouve alors face à un problème de génération de texte : traduire sous forme de message textuel compréhensible une suite de pictogrammes représentant en règle générale chacun un concept. La communication assistée à support non verbal est souvent identifiée à l'utilisation de *BLISS* (Bliss, 1965). Très utilisé, *BLISS* n'est pas un simple code iconique mais un véritable langage conceptuel avec des règles de composition permettant de créer de nouveaux concepts à partir de 3 000 symboles de base (figure 12). Cette caractéristique permet à *BLISS* d'atteindre une grande richesse d'expression. Elle nécessite en contrepartie des capacités cognitives que n'ont pas tous les patients et n'offre pas de solutions triviales pour la transcription directe et automatique d'une séquence *BLISS* en langage écrit. *Minspeak* (Baker, 1982), qui offre des possibilités analogues, présente les mêmes limitations.

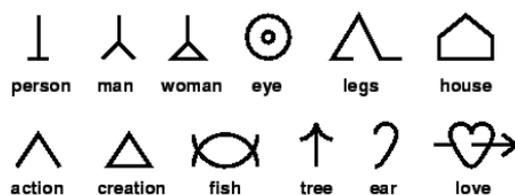


Figure 12. Quelques exemples d'icônes *BLISS*

D'autres approches ont donc été envisagées, dont l'objectif est de viser une correspondance simple, non compositionnelle, entre lexique et langage. Dans ce cadre, chaque pictogramme représente un mot de la langue, et la tâche du système est de reformuler une séquence télégraphique de mots, d'une manière un peu analogue au projet *Compansion* (McCoy *et al.*, 1997 ; McCoy, 1997) d'écriture télégraphique. Par exemple :

je / non / avoir mal / tête reformulé en *je n'ai pas mal à la tête*

La question de l'affordance de la base de pictogrammes retenue est essentielle. L'utilisation d'icônes animés dans le système *Axelia* (Abraham, 2000) est très intéressante de ce point de vue.

La principale question posée par l'aide à la communication non verbale réside toutefois dans le statut linguistique des pictogrammes utilisés et dans la reformulation orthographique de la séquence d'icônes sélectionnés. Pour répondre à cette question, le projet *PVI* (Vaillant, 1997) adopte une démarche très ambitieuse puisqu'il autorise la définition d'icônes ambigus pouvant correspondre à plusieurs termes. Par exemple, l'image d'un verre peut représenter dans *PVI* aussi bien cet objet que toute boisson ou l'action de boire. À chaque icône est associé un ensemble de sèmes, au sens de la sémantique structurale (Rastier, 1987). La reformulation sous forme orthographique suppose une désambiguïsation par propagation isotopique des sèmes. Cette approche souffre d'une trop grande surgénéritivité qui empêche son utilisation pratique.

Pour réduire l'ambiguïté, il est préférable d'associer au minimum une catégorie grammaticale aux pictogrammes, ce qui facilite également l'attribution d'une fonction syntaxique à chaque icône de l'énoncé lors du processus de reformulation. C'est cette démarche qui est suivie par la version non verbale de la PCA (Blache et Rauzy, 2006) et par le système *Axelia* (Abraham, 2000, 2006). *Axelia* et *PCA* utilisent des catégories syntaxiques élémentaires (figure 13) afin, d'une part, de faciliter leur appréhension par l'utilisateur, mais également de permettre à ce dernier d'ajouter aisément de nouveaux pictogrammes et de les associer à une catégorie.

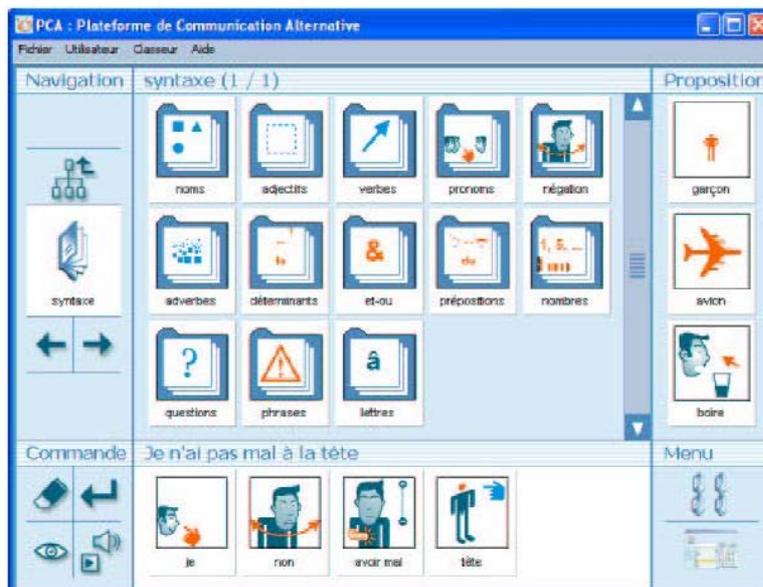


Figure 13. L'interface de la Plateforme de Communication Assistée (PCA) en mode iconique de saisie (Blache et Rauzy, 2006). On remarque qu'outre la reformulation des énoncés, le système met en œuvre une prédiction de mots/concepts (droite de l'interface)

Dans la *PCA*, la reformulation est basée sur une grammaire d'arbres adjoints (TAG), dont les arbres sont surspécifiés. Par exemple, l'arbre lexical associé à un pictogramme représentant un nom commun porte une seconde feuille lexicale qui spécifie son déterminant : celui-ci est en effet le plus souvent omis en écriture pictographique.

Dans *Axelia*, la reformulation se fonde sur l'application d'une grammaire applicative et cognitive. *Axelia* insiste sur la traduction explicite par les icônes des marques de flexions et autres traces grammaticales. C'est également la raison pour laquelle les prépositions, les articles⁸ et autres mots grammaticaux doivent être explicitement écrits. Si l'on reprend l'exemple « *je n'ai pas mal à la tête* », on écrira ainsi sous *Axelia* :

je neg avoir mal à tête

Les couleurs représentent les catégories grammaticales des mots (figure 14) et *neg* est le pictogramme du discordantiel représentant la négation.

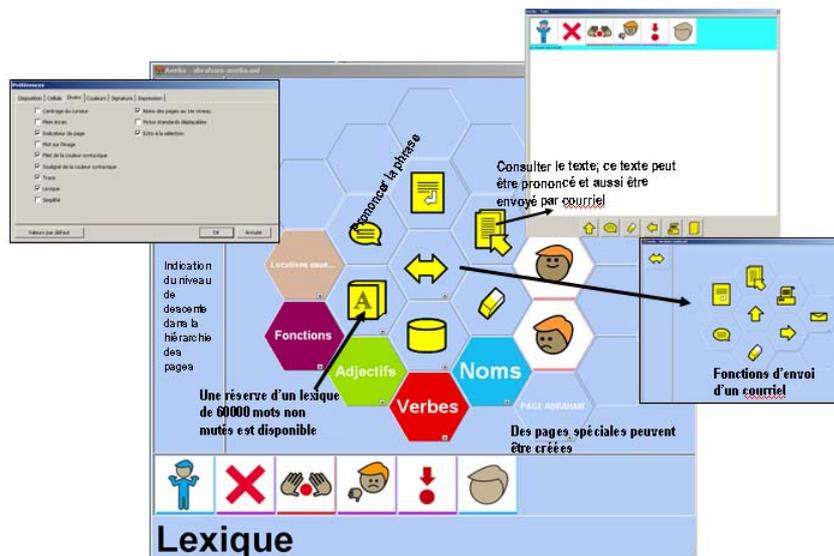


Figure 14. L'interface du système Axelia montrant l'organisation du lexique. On remarque la forme hexagonale des touches virtuelle et les codes couleurs associés à chaque catégorie grammaticale de mots

⁸ Par défaut, l'article défini est engendré ; les autres articles doivent être écrits explicitement.

6. Évaluation

L'évaluation des systèmes de communication assistée revêt une importance cruciale du fait de leur visée applicative directe. Comme pour tout logiciel interactif, elle peut concerner le système dans sa globalité ou chacun de ses composants (*black box* ou *glass box methodology*) et peut mettre en œuvre des paradigmes de tests objectifs ou subjectifs. Sa mise en œuvre et son exploitation sont cependant compliquées par différents facteurs :

- **manque de généralité** : du fait de l'extrême diversité des handicaps et des tableaux cliniques des patients, il est impossible de conduire des expérimentations sur un panel d'utilisateurs représentatifs ;
- **manque de données de tests** : compte tenu de la lenteur de composition des messages, le recueil d'un corpus de tests écologiques se heurte à une limitation de la taille des données ;
- **manque de naturalité des données** : on ne peut recueillir de corpus de tests réels qu'à partir de sessions d'utilisation sur un système de communication assistée. Or, on sait que tout système de suppléance influe sur les productions des utilisateurs. Par exemple, il a été montré que les utilisateurs du système *Sibylle* faisaient moins d'erreurs qu'avec le système qu'ils utilisaient auparavant au centre de Kerpape. Il y a donc un biais dû au système utilisé pour le recueil des données ;
- **absence de comparaison directe** : l'adaptation à un nouveau système de suppléance représente un effort très lourd pour une personne fortement handicapée. Il n'est donc pas envisageable de demander à une personne d'utiliser plusieurs systèmes concurrents afin de comparer directement ces différents outils.

Cet ensemble de contraintes limite donc fortement la représentativité des évaluations conduites. On peut trouver dans la littérature des tests en conditions réelles où l'on observe le gain en termes de vitesse de saisie (voire son évolution au cours de l'adaptation au système) autorisée par un système donné. Il faut toutefois s'interroger pour savoir si ces résultats sont généralisables à d'autres utilisateurs. C'est pourquoi la plupart des évaluations se résument au test d'un composant particulier du système sur des données souvent bien artificielles. En particulier, si quelques auteurs ont cherché à évaluer leur système sur différents registres de langue (Trnka et Mc Coy, 2007 ; Wandmacher et Antoine 2006), voire sur des productions de personnes handicapées, la majorité des résultats actuels ont été obtenus sur des corpus journalistiques bien éloignés des besoins réels des utilisateurs finaux.

6.1. Évaluation de la rapidité et de la pénibilité de saisie d'une lettre

Lorsque l'on s'intéresse à la composante TAL de la communication assistée, différentes métriques objectives peuvent être employées en fonction de la finalité du composant testé, en rappelant que les attentes de l'utilisateur sont triples *a priori* :

communiquer plus rapidement, mais également avec moins d'effort (physique et/ou cognitif) et éventuellement en produisant moins d'erreurs.

Si l'objectif est d'accélérer la sélection des touches (cf. § 3), la métrique la plus utilisée est le **nombre moyen de défilements** nécessaire pour atteindre une lettre. On peut estimer la pénibilité du processus par le **nombre moyen d'appuis par sélection** (*KSPC : Keystroke Per Character*). La vitesse de balayage choisie par l'utilisateur permet par ailleurs une estimation des vitesses moyennes de composition de message. Dans le cas où le patient peut encore utiliser un dispositif de pointage, la mesure la plus importante est la distance moyenne des déplacements entre chaque sélection. Dans ce cas, des modèles psychomoteurs sur les temps de pointage (Fitts, 1954 ; MacKenzie, 1992 ; Soukoreff et MacKenzie, 1995) ou de recherche visuelle (Hick, 1952 ; Hyman, 1953) donnent une estimation de la vitesse de composition de messages.

Lorsque l'on utilise un clavier ambigu, l'objectif central est de limiter le nombre d'appuis nécessaire pour désambiguïser la sélection. Les claviers ambigus les plus efficaces sont à même d'atteindre des KPC théoriques très proches de un. Le KPC constituera donc une bonne estimation des performances du système. (Soukoreff et MacKenzie, 2003) le considèrent également comme un bon indicateur du taux d'erreurs faites par l'utilisateur. Bien entendu, on n'intercepte ainsi que les erreurs qui donnent lieu à correction par l'utilisateur.

6.2. Évaluation de la prédiction de mots

L'objectif de la prédiction de mots est d'éviter à l'utilisateur le maximum de saisies. Les métriques qui sont utilisées pour son évaluation peuvent concerner directement cet objectif ou s'en remettre à l'estimation de la qualité intrinsèque des prédictions. Les deux approches sont, bien entendu, corrélées. On distingue en particulier (Fasly et Hirst, 2003) :

- le **taux d'économie de saisie** (KSR pour *Keystroke Saving Rate*) exprime le pourcentage moyen d'appuis qui sont évités grâce à la prédiction. Il est calculé pour une taille de liste de prédictions donnée. Les performances des systèmes actuels tournent autour des 50 %, ce qui signifie qu'un appui sur deux est évité en moyenne. Certains travaux ont cherché à estimer la valeur maximum du KSR qu'il est possible d'atteindre en théorie (Copestake, 1997). Ce seuil est généralement situé autour de 60 %, mais certains systèmes tel *Sibylle* sont à même de l'atteindre sur certains corpus de test, ce qui relativise la portée de ces réflexions. Il est toutefois évident que les gains que l'on peut encore espérer à ce niveau de performance sont marginaux. Notons enfin que le KSR concerne les appuis et non pas les lettres non saisies. En effet, la stratégie de complétion peut nécessiter des appuis supplémentaires, par exemple pour atteindre la liste de prédictions. Cette métrique n'évalue donc pas la prédiction intrinsèque, mais l'association prédiction/interface/utilisateur.

– le **taux de prédictions correctes** (HR pour *Hit Rate*) évalue le pourcentage de fois où le mot recherché est proposé dans la liste de prédictions. Ce taux dépend, là encore, de la taille de la liste de prédictions, et ne dépend pas de la stratégie de complétion mise en œuvre par l'interface utilisateur. Une mesure complémentaire, quoique moins répandue, est le **nombre moyen d'appuis avant la complétion**. (KuC pour *Keystrokes until Completion*). Elle donne indirectement une idée du nombre moyen de lettres qui doivent être saisies dans le mot avant que la prédiction ne vienne aider l'utilisateur.

Notons que les métriques classiques en modélisation du langage sont rarement utilisées dans le domaine de la communication assistée. Même si on a pu observer une corrélation entre la perplexité ou l'entropie du modèle et la KSR qu'il permet d'atteindre (Wandmacher et Antoine, 2007b), ces métriques issues de la théorie de l'information ne constituent pas des indicateurs explicites de l'aide fournie par la prédiction (Copestake, 1997).

S'ils donnent des indications sur l'efficacité de l'aide à la communication, ces paradigmes d'évaluation sont condamnés à rester à l'écart des usages réels. Une seule expérience suffira à montrer les limites de l'évaluation dans ce domaine de recherche (Biard *et al.*, 2006). En analysant l'utilisation du système commercial DIALO par dix patients qui présentaient des pathologies variées (IMC, SLA, anoxie cérébrale, LIS), les auteurs ont constaté que la prédiction de mots était peu utilisée et que l'accélération de la composition qu'elle autorisait n'était pas statistiquement significative. Si le système DIALO présente des imperfections, d'autres études en arrivent à une conclusion analogue (Anson, 1993 ; Horstmann *et al.*, 1994 ; Neijmeijer, 2005).

Ce décalage avec l'estimation des performances de la prédiction ne doit pas remettre pas en cause l'utilité des métriques utilisées. Ce qu'il faut comprendre, c'est que ce genre d'évaluation n'indique que la capacité maximale qu'à un moteur de prédiction à aider l'utilisateur. Partant de là, toute une réflexion doit être menée sur l'intégration de la prédiction et de la complétion dans l'interface utilisateur du système de suppléance. Au vu des performances intrinsèques des systèmes de prédiction actuels, nous pensons que ces considérations ergonomiques doivent devenir une des priorités de recherche à venir en communication augmentée.

7. Conclusion

Tout au long de cette synthèse, nous avons cherché à dresser un tableau aussi complet que possible des techniques TAL utilisées dans le domaine de la communication augmentée. Un des constats que l'on peut dresser de cet état de l'art est que l'aide à la communication se nourrit, mais également irrigue une large palette de problématiques relevant de l'ingénierie des langues. Cette conclusion en amène une autre qui est bien ancrée parmi les acteurs du domaine : on peut observer que la plupart des résultats obtenus dans le domaine de l'aide technique pour personnes handicapées, ont finalement conduit au développement d'outils utiles à

l'ensemble de la population. Les exemples de valorisation de ce type sont très nombreux et valident le concept de *design for all* qui est cher aux personnes handicapées. C'est pourquoi ce numéro spécial est également une invitation à tous les chercheurs en ingénierie linguistique à s'intéresser à la problématique exigeante, mais enrichissante, de l'aide à la communication.

Remerciements

Les auteurs remercient Maryvonne Abraham, Franck Poirier et Paul Sabatier pour leurs remarques et propositions d'améliorations sur ce texte.

8. Bibliographie

- Abney S., « Parsing by chunks », In. Berwick, Abney, Tenny (Eds.) *Principle-based parsing*. Kluwer Academic Publishers. Amsterdam, NL. 1991.
- Aït-Mokhtar S., Chanod J.-P., Roux C., « Robustness beyond shallowness : incremental deep parsing ». *Natural Language Engineering*. Vol. 8 (3-2). 2003.
- Abraham M., « Reconstruction de phrases oralisées à partir d'une écriture pictographique ». *Actes Handicap'2000. European Journal of Automation*, 34(6-7). p. 803-901. 2000.
- Abraham M., « Alterations de la communication dialogique : le statut de la langue dans la palliation des troubles de la parole ». *Actes Handicap'2006*, Paris, France. 2006.
- Alm N., Arnott J.L., Newell J.F., Prediction and conversational momentum in an augmentative communication system. *Communications of the ACM*, 35(5). 46-57. 1992.
- Alm N., Newell A., Arnott J., « A communication aid which models conversational patterns ». In Steele R., Gerrey W. (Eds.) Proc. 10th Annual Conference on Rehabilitation Technology. Resna, Washington DC. p. 127-129. 1987.
- Anson D., « The effect of word prediction on typing speed ». *American Journal of Occupational Therapy*, 47 (11), p. 1039-1042. 1993.
- Antoine J.-Y., Goulian J., Villaneau J., « Quand le TAL robuste s'attaque au langage parlé : analyse incrémentale pour la compréhension de la parole spontanée ». *Actes TALN'2003*. Batz-sur-Mer, France, p. 25-34. 2003.
- Archambault D., Stöger B., Batusic M., Fahrenguber C., Miesenberger K., « A software model to support collaborative mathematical work between Braille and sighted users ». Proc. 9th ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, ASSETS'07. Tempe, AZ. 2007. p. 115-123.
- Baker. B.R. « Minspeak, A semantic compaction system that makes self-expression easier for communicatively disabled individuals ». *Byte*, 7(9), p. 186-2002. 1982.
- Baretto A.B., Scargle S.D., Adjouadi M., « A practical EMG-based Human Computer Interface for users with motor disabilities ». *Journal of Rehabilitation Research and Development*. 37(1). 2000. p. 53-63.
- Belatar M., Poirier F., « UniGlyph : une méthode universelle pour la saisie de texte sur dispositifs mobiles », *Actes IHM'2007*, Paris, France, p. 111-118. 2007.

- Bliss C. K., « Semantography (Blissymbolics) ». Semantography Press, Sidney, Australie. 1965.
- Biard N., Dumas C., Bouteille J., Pozzi D., Lofaso F., Laffont I., « Apports de l'évaluation en situation de vie à partir d'une étude sur l'intérêt de la prédiction de mots auprès d'utilisateurs de synthèse vocale ». Actes *Handicap 2006*, Paris. p. 145-148. 2006.
- Bigi, B. ; Brun, A. ; Haton, J. ; Smaili, K. & Zitouni, I., « Dynamic Topic Identification : Towards Combination of Methods », Actes *Recent Advances in Natural Language Processing workshop, RANLP'2001*, p. 255-257. 2001.
- Blache Ph., Rauzy S., « Le module de reformulation iconique de la Plateforme de Communication Alternative ». Actes *TALN'2007*, atelier « Reconstruire la langue », Toulouse, France. vol 2, p. 517-528. 2007.
- Blache Ph., Rauzy S., « Le moteur de prédiction de mots de la Plateforme de Communication Alternative », *Traitement Automatique des Langues, TAL*, vol. 48 n° 2. 2007.
- Boissière Ph., Bouraoui J.-L., Vella F., Lagarrigue A., Mojahid M., Vigouroux N., Nespoulous J.-L., « Méthodologie d'annotation des erreurs en production écrite. Principe et résultats préliminaires ». Actes *TALN'2007*, atelier « Reconstruire la langue », Toulouse, France. vol. 2, p. 529-538. 2007.
- Boissière Ph., Dours D., « VITIPI : versatile interpretation of text input by persons with impairments ». Proc. *5th International Conference on Computers for Handicapped Persons*, ICCHP'1996. Linz, Autriche. p. 165-173. 1996.
- Boissière Ph., Dours D., « VITIPI : Comment un système d'assistance à l'écriture pour les personnes handicapées peut offrir des propriétés intéressantes pour le TALN ? » Actes *TALN'2001, atelier TALN et Handicap*, Tours. Vol. 2, p. 183-192. 2001.
- Boissière Ph., Schadle I, Antoine J-Y. « A methodological framework for writing assistance systems : applications to Sybille and VITIPI systems », *AMSE Journal on Modelling, Measurement & Control*, Série C., Barcelona, Spain. Vol. 67, p. 167-176. 2006
- Brophy M., Alm N., Newell A., Arnott J., « The effect of a predictive communication aid employing speech acts on the conversation of non-vocal speakers », *Speech Therapy in Practise*, 162, p. 46-57. 1991.
- Broumley L., Cairns A., Arnott J., « A Case study in applying artificial intelligence in personalised communication aid ». Proc. *1st ECART Conference*. 1990.
- Carlberger A., Carlberger J., Magnuson T., Hunnicutt M.S., Palazuelos-Cagigas S., Navarro S.A., « Profet, a new generation of word prediction : an evaluation study ». Proc. *Natural Language Processing for Communication Aids, NLPCA'1997*. Madrid, Spain. p. 23-28. 1997.
- Chelba C., Jelinek F., « Structured language modelling ». *Computer Speech and Language*, 14(4), p. 283-332. 2000.
- Clarkson, P.R., Robinson, A.J., « Language Model Adaptation using Mixtures and an Exponentially Decaying Cache », Proc. *IEEE ICASSP-97*, Munich, Allemagne. p. 799-802. 1997.

Commentaire : On cite le numéro en cours : Pourrais-tu ajouter les pages?

- Cantegrit, B., Toulotte J.M., « Réflexions sur l'aide à la communication des personnes présentant un handicap moteur », actes *atelier Ingénierie de la langue et handicap, TALN'2001*, Tours, France. 2001. pp 193-202.
- Ann Copestake., « Augmented and alternative NLP techniques for augmentative and alternative communication ». Proc. *ACL workshop on Natural Language Processing for Communication Aids*, Madrid, Espagne, p. 37-42. 1997.
- Cunningham H., « A definition and short history of Language Engineering », *Natural Language Engineering*, 5(1). 1999. p. 1-16.
- Deerwester, S. C., Dumais, S., Landauer, T., Furnas, G. and Harshman, R., « Indexing by Latent Semantic Analysis », *Journal of the American Society for Information Science, JASIS* 41(6), p. 391-407. 1990.
- Deligne S., Bimbot F., « Language modeling by variable length sequences : theoretical formulation and evaluation of multigrams ». Proc. *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'1995*, Detroit, MI, p. 172-175. 1995
- Dvorak A., Merrick N.L., Dealey W.L., Ford G.C. *Typewriting behaviour*, American Book Company. New-York, NJ. 1936.
- Ejerhed E., « Nouveaux courants en analyse syntaxique ». *TAL*, 34(1), p. 61-82. 2003.
- Fazly, A., Hirst, G., « Testing the efficacy of part-of-speech information in word completion », Proc. *Workshop on Language Modeling for Text Entry Methods, EACL'2003*. Budapest, Hongrie. 2003.
- Felzer T., Nordmann R., « Alternative text entry using different input methods ». Proc. *8th ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, ASSETS'06*. Portland, OR. 2006. p. 10-17.
- Fillmore C.J., « The case for case », in E. Bach, R.T. Harms, « *Universal in linguistic theory* » Holt, Rinehalt and Winston, New-York, NJ, p. 1-90. 1968.
- Fitts P.M., « The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement ». *Journal of Experimental Psychology*. Vol. 47. p. 381-391. 1954.
- Froehlich J., Wobbrock J.O., Kane S. K. « Barrier pointing : using physical edges to assist target acquisition on mobile device touch screen ». Proc. *9th ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, ASSETS'07*. Tempe, AZ. 2007. p. 19-26.
- Guenthner F., Krüger-Thielmann K., Pasero R., Sabatier P. « Communications Aids for ALS Patients », Proc. *Third International Conference on Computers for Handicapped Persons, ICCHP'92*, p. 303-307. 1992.
- Harbusch K., Kühn M. « An evaluation study of two-button scanning with ambiguous keyboards ». Actes *7th Conference for the Advancement of Assistive Technology in Europe, AATE'2003*. Dublin, Ireland. 2003
- Harbusch K., Kühn M. « Towards an adaptive communication aid with text input from ambiguous keyboards ». Proc. *10th Conference of the European Chapter of the ACL, EACL'2003*. 2003b.

- Hick W., « On the rate of gain of information » *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. Vol. 4, p. 11-36. 1952.
- Hockey B.A., Miller D.P., « A demonstration of a conversationally guided smart wheelchair ». Proc. 9th *International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, ASSETS'2007*. Phoenix, AZ. 2007. p. 243-244.
- Horstmann K.H., Levine S.P. « Modeling the speed of text entry with word prediction interface », *IEEE Transactions on rehabilitation engineering*, 2(3). p. 177-187. 1994.
- Hyman R., « Stimulus information as a determinant of reaction time » *Journal of Experimental Psychology*. Vol. 45, p. 188-196. 1953.
- James A., Draffan E., « The accuracy of electronic spell checkers for dyslexic learners ». *PATOSS bulletin*. 2004.
- Jelinek, F., « Self-organized Language Models for Speech Recognition ». In Waibel A., Lee K.-F., *Readings in Speech Recognition*, Morgan Kaufman Publ. p. 450-506. 1990.
- Karshmer A.I., Gupta G., Pontelli E., Miesenberger K., Ammalai N., Gopal D., Batusic M., Stöger B., Palmer B., Guo H.F., « UMA : a system for universal mathematics accessibility. » Proc. *ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. ACM Press, Atlanta. GA. 2004. p. 55-62.
- Kuhn, R. and De Mori, R., « A Cache-Based Natural Language Model for Speech Reproduction » *IEEE Trans. PAMI*, 12 (6), p. 570-583. 1990.
- Kühn M., Garbe J., « Predictive and highly ambiguous typing for a severely speech and motion impaired user. In Stephanidis C. (Ed.) *Universal access in Human-Computer Interaction*. Lawrence Erlbaum, Mahwah, NJ. 2001. p. 933-937.
- Kushler C., « AAC using a reduced keyboard », Proc. *CSUN Conference on Technology for Persons with Disabilities*. CSUN'98. California State University, Nortridge, CA. 1998.
- Le Pévédic B., « Prédiction morphosyntaxique évolutive dans un système d'aide à la saisie de textes pour les personnes handicapées physiques ». Doctorat Université de Nantes, France. 1997.
- Le Pévédic B., « Les niveaux syntaxiques dans le système HandiAS ». Actes *TALN'1998*, Paris, France. p. 132-141. 1998.
- Lesh G.W., Moulton B.J., « A method for optimizing single-finger keyboards ». Proc. Of *RESNA'2000 Annual Conference*. 2000. 91-93.
- MacKenzie I.S., « Fitt's law as a research and design tool ». *Human-Computer Interaction*. Vol. 7. p. 91-139. 1992.
- MacKenzie I.S., Zhang S.Z., « The design and evaluation of a high performance soft keyboard », *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '99*. New-York, NJ. 1999. p. 25-31.
- Matiassek, H. and Baroni, M., « Exploiting long distance collocational relations in predictive typing » Actes *EACL'03 Workshop on Language Modeling for Text Entry Methods*, Budapest. 2003.

- Maurel D., Fourche B., Briffaut S., « Aider la communication en favorisant la saisie rapide de texte ». Actes *Handicap'2000*, IFRATH, Paris, France. p. 87-92. 2000.
- McCoy K.F., Demasco P., « Some applications of natural language processing to the field of augmentative and alternative communication » Actes *IJCAI'95 Workshop on Developing AI Applications for Disabled People*, Montreal, Canada. p. 97-112. 1995.
- McCoy K.F., Demasco P.W., Pennington C.A., Luberdorff Badman A. « Some interface issues in developing intelligent communication aids for people with disabilities ». Proc. *Intelligent User Interfaces, IUI'1997*. 1997. p. 97-110.
- McCoy K.F., « Simple NLP techniques for expanding telegraphic sentences ». Proc. *workshop on NLP for Communication Aids, ACL/EACL'97*, Madrid, Espagne. 1997.
- Ménier G., Poirier F., « Système adaptatif de prédiction de texte ». Actes *TALN'2001, atelier Handicap et Ingénierie des langues*. Tours, France. Vol. 2. p. 213-222. 2001.
- Niejmeijer D., « In memoriam of Christian Bérard : striving for effort reduction through on-screen keyboard word prediction ». Proc. *AAATE'2005*, Lille, France. 2005
- Pasero R., Sabatier P., « Composition de phrases assistée : principes, outils, applications ». Actes *TALN'94*, Marseille, France. p. 51-74. 1994.
- Pasero P., Sabatier P., « Guided sentences composition : some problems, solutions and applications ». Proc. *NLULP'95*, Lisboa, Portugal. p. 97-110. 1995.
- Pedler J., « The detection and correction of real-word spelling errors in dyslexic text ». Proc. *4th Annual CLUK Colloquium*. p. 115-119. 2001.
- Raghavendra P., Rosengren E., Hunnicut S., « An investigation of different degrees of dysarthric speech as input to speaker-adaptive and speaker-dependant recognition systems. *Augmentative and Alternative Communication (AAC)*. 17(4). 2001. p. 265-275.
- Ramus F., Rosen S., Dakin S., Day B., White S., « Theories of developmental dyslexia : insights from a multiple cas study of dyslexic adults », *Brain*, vol. 126. p. 841-865. 2003.
- Rastier.F., *Sémantique interprétative*, PUF, Paris. 1987.
- Raynal M., Vigouroux N., « Genetic Algorithm to Generate Optimized Soft Keyboard ». Proc. *Human Factors in Computing Systems Conference, CHI'2005*, Portland.USA. 2005. p. 1729-1732.
- Raynal M., Vigouroux N., « KeyGlasses : semi-transparent keys to optimize text input on a virtual keyboard. » Proc. *AAATE'2005*. p. 713-717. Lille, France.
- Richard P., Gaucher P., Maurel D., « Projet CNHL : Chambre Nomade pour Handicapés Lourds » Actes *Handicap'2000*, Paris, France. 2000. p. 101-107.
- Richardet N., « Composition de phrases assistée : un système d'aide à la communication pour handicapés ». Thèse de Doctorat Université de la Méditerranée, Marseille, France. 1998.
- Ricco, X., Dutoit T., « Vers un logiciel multilingue et gratuit pour l'aide aux personnes handicapées de la parole : HOOK ». Actes *TALN'2001, atelier Ingénierie des Langues et Handicap*, Tours, France. 2001. Vol 2, p. 223-232.

- Ron D., Singer Y., Tishby N., « The power of amnesia : learning probabilistic automata with variable memory length », *Machine Learning*, 25, p. 117-149. 1986.
- Rosenfeld, R., « A maximum entropy approach to adaptive statistical language modelling ». Actes *Computer Speech and Language*, 10 (1), p. 187-228. 1996.
- Schadle I., Antoine J.-Y., Le Pévedic B., Poirier F., « Sibylettré : prédiction de lettre pour la communication assistée ». *Revue d'Interaction Homme-Machine, RIHM*, vol. 3, n° 2. 2002. p. 115-133.
- Schadle I., Antoine J.-Y., Le Pévedic B., Poirier F., « SibyMots : modélisation stochastique du langage intégrant la notion de chunks ». Actes *TALN'2004*, Fès, Maroc. 2004.
- Sibert L.E., Jacob R.J., « Evaluation of Eye Gaze Interaction ». Proc. *Human Factors in Computing Systems Conference, CHI'2000*. 2000. p. 281-288.
- Sitbon L., Bellot P., Blache Ph., « Traitements phrastiques phonétiques pour la réécriture de phrases dysorthographiées », Actes *TALN'2007*, Toulouse. Vol. 1, p. 263-272. 2007.
- Sitbon L., Bellot P., Blache Ph., « Éléments d'adaptation de la recherche d'information pour des dyslexiques », *TAL*, 48(2). 2007.
- Soukoreff, R. W., & MacKenzie, I. S., « Metrics for text entry research : An evaluation of MSD and KSPC, and a new unified error metric ». Proc. *ACM Conference on Human Factors in Computing Systems – CHI 2003*, New-York, NJ. p. 113-120. 2003.
- Soukoreff R.W., MacKenzie I.S., « Theoretical upper and lower bounds on typing speed using a stylus and soft keyboard » *Behaviour & Information Technology*. Vol. 14. p. 370-379. 1995.
- Spooner R., « A spelling checker for dyslexic users : user modelling for error recovery ». PhD thesis. University of York, Heslington. 1998.
- Swiffin A.L., Arnott J., Newell A.F., « The use of syntax in a predictive communication aid for the physically impaired ». In Steele R., Gerrey W. (Eds.) Proc. *10th Annual Conference on Rehabilitation Technology*. Resna, Washington DC. p. 124-126. 1987.
- Tanaka-Ishii K., Inutsuka Y., Takeichi M., « Entering text with a four-button device. Proc. *19th International Conference on Computational Linguistics*. 2002. p. 988-944.
- Tounsi N., Dutoit T., Pagel V., Bagein M., Wynsberghe D., Ruelle A., Malfrère F., « Vers un logiciel multilingue et gratuit pour l'aide aux personnes handicapées de la parole : le projet W », Actes *Handicap'2000*, Paris, France. 2000. p. 109-111.
- Trnka K., McCoy K.F., « Corpus studies in word prediction » Proc. *International ACM Conference on Assistive Technologies, ASSETS'2007*, Phoenix, AZ. p. 195-202. 2007.
- Trnka K., Yarrington D., McCoy K.F., Pennington C., « Topic Modeling in Fringe word prediction for AAC » Proc. *International Conference on Intelligent User Interfaces*, Sydney, Australie. p. 276-278. 2006.
- Trost H., Matiasek J., Baroni, M., « The Language Component of the FASTY Text Prediction System ». *Applied Artificial Intelligence*, 19(8), p. 743-781. 2005
- Vaillant P., « Interaction entre modalités sémiotiques : de l'icône à la langue ». Thèse de l'université Paris XI, Orsay, France. 1997.

- Vandyke J., McCoy K., Demasco P., « Using syntactic knowledge for word prediction ». Proc. ISAAC'92. Published in *Augmentative and Alternative Communication*, 8. p. 163-170. 1992.
- Vella F., Vigouroux N., Truillet Ph., « CLAPOTI : CLavier PhOnétique d'aide à la communication orale ». Actes SETIT'2003 (*Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunication*), Sousse, Tunisie. CD-ROM. 2003
- Wandmacher T., Antoine J.-Y., « Training language models without appropriate language resources : experiments with an AAC system for disabled people ». Proc. 5th European Conference on Language Resource and Evaluation, LREC'2006. Genova. Italie. 2006.
- Wandmacher T., Antoine J.-Y., Poirier F., « Sibylle : a system for alternative communication adapting to the context and its user ». Proc. *International ACM Conference on Assistive Technologies, ASSETS'2007*, Phoenix, AZ, p. 203-210. 2007.
- Wandmacher T., Antoine J.-Y., « Modèle adaptatif pour la prédiction de mots : adaptation à l'utilisateur et au contexte dans le cadre de la communication assistée pour personnes handicapées ». *TAL*. 28(3). ATALA, France. 2007.
- Wandmacher T., Antoine J.-Y., « Methods to integrate a language model with semantic information for a word prediction component » Actes *EMNLP-CoNLL'07*, Prague, Tchéquie. p. 506-513. 2007b.
- Ward D.J., Blackwell A. F., McKay D. J. C., « A data-entry interface using continuous gestures and language models ». Proc. *13th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST'2000*. 2000.
- Ward D.J., McKay D. J. C., « Fast Hands-free Writing by Gaze Direction ». *Nature*. 418 (6900). p. 838. 2002.
- Wolpaw J.R., Birbaumer N., Heetderks W.J., McFarland D.J., Peckham P.H., Schalk G., Donchin E., Quatrano L.A., Robinson C.J., Vaughan T.M., « Brain-computer interface technology : a review of the first international meeting », *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 8(2), p. 164-173. 2000.
- Wright J., Jones G., Lloyd-Thomas H., « A robust language model incorporating a substring parser and extended N-grams. Proc. *ICASSP'94*. Adelaide, Australia. p. 361-364. 1994.