
Aide à la communication avec Sibylle

Aspects ergonomiques et linguistiques

Jean-Yves Antoine¹, Tonio Wandmacher^{1,2}, Igor Schadle^{1,3}, Jean-Paul Departe⁴, Franck Poirier⁵

(1) *Université François Rabelais Tours, Laboratoire d'Informatique, Blois, France*

(2) *CEA/LIST, Fontenay-aux-Roses, France*

(3) *Néo-Soft, Rennes, France*

(4) **CMRRF** de Kerpape, Ploemeur, France

(5) *Université Européenne de Bretagne, VALORIA, Vannes, France*

Contact : Jean-Yves.Antoine@univ-tours.fr

Résumé – Cet article est consacré à une description complète du système SIBYLLE d'aide à la communication. Il article décrit les module de prédiction linguistique (prédiction de lettre et de mot) qui reposent sur des modèles de langage avancés avec adaptation au locuteur et au contexte sémantique du discours. Il présente également l'interface utilisateur, dont les multiples possibilités de reconfiguration permettent de prendre en compte les besoins réels des utilisateurs. Les performances du système de prédiction sont présentées, de même que des retours d'usage auprès d'utilisateurs du centre de Kerpape.

Abstract – This paper describes the AAC system SIBYLLE. It presents the letter and word prediction modules of SIBYLLE, which is based on an advanced language model (user adaptation and discourse context adaptation), but also its user interface, which presents a high configurability. The most significant performances of the prediction module are presented. Finally, we give some results concerning the daily use of SIBYLLE with patients in the rehabilitation centre of Kerpape.

1. Aide à la communication: limites linguistiques, cognitives et ergonomiques

Les communicateurs, ou systèmes de communication palliative (AAC pour *Alternative and Augmentative Communication* en anglais) ont pour objectif de restaurer les capacités de communication de personnes souffrant d'un handicap moteur très sévère (Infirmités Motrices Cérébrales, Scléroses Latérales Amyotrophiques, syndrome d'enfermement,...) se traduisant par une tétraplégie ou une athétose accompagnée d'une perte de l'usage de la parole. La communication est alors privée de son support oral habituel, de même que les capacités très limitées de contrôle physique de l'environnement par la personne handicapée empêchent toute saisie directe de message sur un clavier d'ordinateur.

Ces systèmes reposent généralement sur l'écriture de phrases à l'aide d'un clavier virtuel affiché à l'écran¹ (figure 1). Dans le cadre de clavier à défilement linéaire, un curseur se déplace caractère par caractère, le long du clavier. L'intervention de la personne handicapée se limite à la désignation des symboles lorsque le curseur est sur la touche ou le caractère désiré. Cette sélection est réalisée à l'aide d'un dispositif physique qui remplace le périphérique d'entrée de l'ordinateur. Cette interface matérielle dépend des capacités motrices de l'utilisateur. Il peut s'agir d'un joystick, d'une commande oculaire, d'une commande par souffle, d'un simple bouton poussoir, etc. (figure 2). Une caractéristique importante est le degré de liberté qu'elle permet pour manipuler l'ordinateur. Le plus souvent, le patient n'a plus que la possibilité de réaliser l'équivalent d'un simple clic (commande de l'environnement de type « tout ou rien »). Une fois le message saisi, il peut être vocalisé par l'intermédiaire d'une synthèse de parole artificielle (*text-to-speech synthesis*).

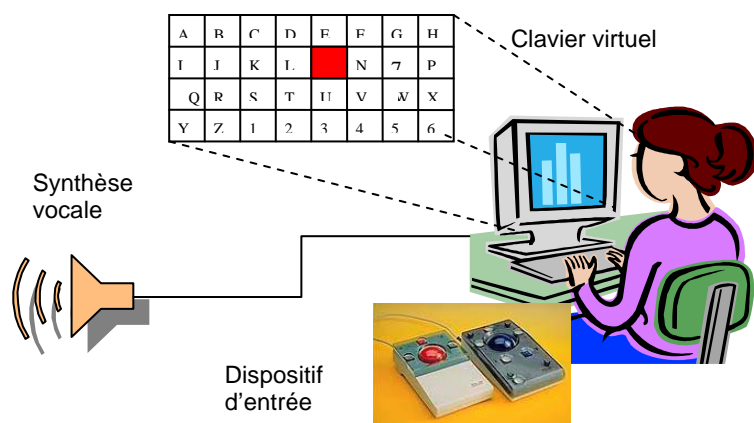


Figure 1. Système d'aide à la communication pour personnes handicapées

¹ Certains systèmes, développés pour des personnes ne maîtrisant pas l'usage de la langue, reposent sur une entrée de type pictographique (Baker 1982, Abraham 2000, Abraham 2006).



Figure 2. Deux exemples de dispositifs d'entrée. À gauche, détecteur de souffle. À droite, détecteur de mouvements de têtes

Ainsi constitué, un système AAC permet à un patient lourdement handicapé de communiquer avec son entourage par écrit ou par oral. Il existe à l'heure actuelle une grande diversité de systèmes (pour un état de l'art exhaustif : Antoine et Maurel 2007) laissant un choix assez large à la personne handicapée pour choisir au mieux l'assistance qui lui semble la plus adaptée. Néanmoins, le problème majeur de ces systèmes de suppléance réside dans tous les cas dans la lenteur de la composition des messages. La tâche de saisie est généralement longue (1 à 5 mots par minute en moyenne) et extrêmement fatigante pour les patients.

Pour accélérer la composition des messages, deux approches complémentaires sont envisageables. Tout d'abord, on peut chercher à optimiser la sélection sur le clavier virtuel, avec pour objectif de limiter le nombre des défilements du curseur, celui des appuis sur le contacteur ou encore les déplacements de la souris lorsque la personne handicapée peut encore déplacer le curseur sur l'interface. Cette question concerne la disposition des touches sur le clavier (Cantegrit & Toulotte, 2001 ; Vella & Vigouroux, 2006) et relève donc plus globalement de l'ergonomie de l'interface. Mais nous verrons dans cet article qu'elle peut être également abordée du point de vue linguistique en reposant sur un module de prédiction de lettres (clavier virtuel dynamique). Pour l'heure, notons simplement que l'optimisation proposée par les systèmes commerciaux actuels reposent généralement sur une organisation statique du clavier et un mode de sélection de type ligne/colonne : alors que dans le cas du défilement linéaire, un curseur balaie successivement sur toutes touches du clavier virtuel, en mode ligne/colonne, l'utilisateur doit au contraire effectuer deux appuis : tout d'abord, le clavier est balayé ligne par ligne par un curseur horizontal. Une fois sélectionnée la ligne où se trouve le symbole recherché, le curseur balaie cette dernière jusqu'à atteindre la touche correspondante. Le gain de temps ainsi obtenu est appréciable, mais à pour contrepartie la nécessité de faire deux appuis. Une personne ayant du mal à contrôler temporellement son geste pourra préférer un mode de balayage linéaire afin de limiter les erreurs d'appuis.

En dépit de ces optimisations, la composition d'un message symbole après symbole reste très pénible. D'où l'intérêt de la seconde solution envisageable : la complétion automatique du message afin d'éviter à l'utilisateur la saisie de certains caractères. Une économie de saisie appréciable peut déjà être obtenue par l'utilisation d'abréviation (Ricco, 2001 ; McCoy, 1995). Dans la pratique, une autre

approche (complémentaire par ailleurs à la désabréviation) est très étudiée depuis maintenant plusieurs années. Elle consiste à prédire les mots (ou groupes de mots) à venir en fonction de ceux déjà saisis. Nous sommes donc ici en présence d'une aide linguistique même si, comme nous le verrons dans nos analyses d'usage du système SIBYLLE, des considérations ergonomiques ne doivent pas être ignorées.

Le système SIBYLLE que nous allons présenter intègre un ensemble d'aides qui reposent aussi bien sur des considérations ergonomiques que sur une modélisation linguistique. Dans un premier temps, nous présenterons l'interface utilisateur du système en soulignant en particulier l'importance du paramétrage pour faciliter l'adaptation du système à chaque utilisateur (*flexibilité* en ergonomie des interfaces homme-machine). Nous étudierons ensuite plus précisément nos modules de prédiction de lettres et de mots. Des études expérimentales nous permettront d'évaluer l'apport de la prédiction en termes de temps d'accès au caractère recherché et d'économie de saisie. Enfin, un retour d'expérience sur l'utilisation quotidienne de SIBYLLE au centre de Kerpape montrera que l'apport de la prédiction linguistique pourrait être optimisé par une meilleure conception ergonomique de l'interface.

2. Interface utilisateur du système SIBYLLE

2.1. Description générale de l'interface

La figure 3 (page suivante) présente l'interface utilisateur tenant lieu de clavier virtuel du système SIBYLLE. Bien qu'utilisable avec une souris, SIBYLLE s'adresse en premier lieu à des personnes lourdement handicapées qui peuvent, dans les cas les plus sévères, n'actionner qu'un simple contacteur. En mode défilement, le système est utilisable avec un balayage ligne/colonne (clavier statique) ou linéaire (clavier dynamique). SIBYLLE existe en versions française, allemande et anglaise.

L'interface de l'application regroupe plusieurs sous-claviers qui permettent de sélectionner respectivement des caractères, des nombres, des mots mais aussi des messages préenregistrés pour une communication d'urgence liée le plus souvent aux besoins vitaux de l'utilisateur. Des touches de saut permettent de naviguer d'un sous-clavier à un autre suivant les besoins de la saisie. La figure 3 permet de distinguer les différents sous-claviers de l'interface :

- le **clavier de lettres**, au centre, est utilisé pour composer les messages caractère par caractère. Il ne comprend que des caractères alphabétiques avec leurs diacritiques, ainsi que l'espace comme marque de fin de mot. Les caractères de ponctuation, donc l'occurrence est difficilement prévisible, sont situés dans un sous-clavier à part (cf. infra). Cette organisation, que l'on retrouve sur les claviers physiques classiques, est dictée par le caractère dynamique du sous-clavier lorsqu'on se trouve en mode de défilement linéaire (cf § 3). Lorsque le mode de balayage choisi est statique (défilement ligne/colonne), les caractères du clavier sont simplement disposés suivant leur fréquence d'apparition moyenne dans la langue considérée.

- la **liste de mots**, sur la gauche de l'interface, correspond aux prédictions lexicales données par SIBYLLE en fonction du message déjà composé (cf § 4). Lorsque l'utilisateur sélectionne un des mots prédits, le message est alors automatiquement complété, évitant ainsi la saisie des caractères correspondants. Suivant les préférences de l'utilisateur, cette liste de prédiction peut-être affichée verticalement (comme sur la figure 3) ou horizontalement sous la barre horizontale présentant l'ensemble des touches de fonction. La configuration présentée ici est la configuration par défaut. Des travaux antérieurs ont en effet montré qu'une présentation verticale était généralement mieux acceptée (Garay-Vitoria et Abascal, 2006).

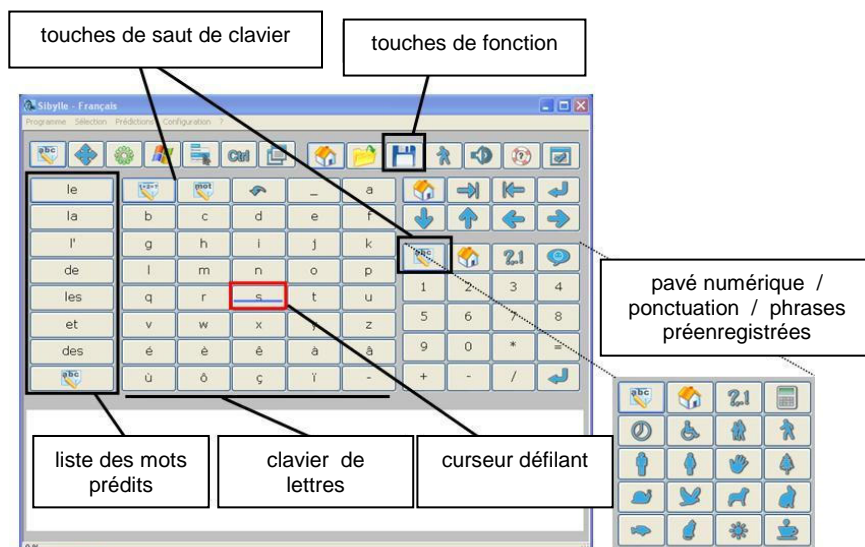


Figure 3. Interface utilisateur du système SIBYLLE (version française 3.8)

- la barre horizontale de **touches fonctions**, en haut de l'interface, permet le pilotage complet de l'ordinateur. Les versions antérieures du système SIBYLLE ne comprenaient qu'un éditeur de texte intégré. Le système émule désormais intégralement le clavier physique de l'ordinateur et est donc utilisable pour piloter toute application Windows. Cela permet à l'utilisateur d'utiliser Sibylle pour écrire des textes mais également des courriers électroniques, de communiquer à « l'oral » (synthèse de parole) avec son entourage, de naviguer sur la Toile, etc. Afin de faciliter ce pilotage intégral de l'ordinateur, ce sous-clavier présente des touches de fonction réalisant des actions diverses telles que la sauvegarde d'un fichier, l'appel à la synthèse de parole ou encore l'appel du menu *Démarrer* de Windows ;
- comme sur un clavier ordinaire, le **pavé numérique** présente plusieurs modes d'utilisation qui s'affichent alternativement à la demande. Il sert à saisir des chiffres, mais permet également l'insertion de signes de ponctuation. Enfin, un

dernier mode associe chaque touche du sous-clavier à la composition immédiate de messages prédéfinis. Ces messages peuvent être composés par l'utilisateur lui-même. La figure 4 montre le rendu de ce sous-clavier suivant le mode sélectionné. Les messages préenregistrés peuvent être représentés par un petit icône ou par le début du texte du message.

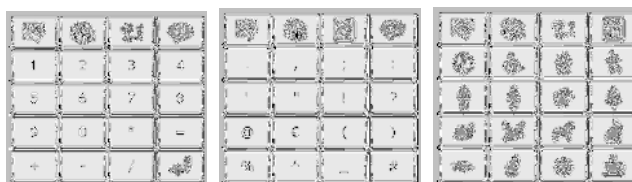


Figure 4. Interface utilisateur du système SIBYLLE : le sous-clavier pavé numérique/ponctuation/messages préenregistrés (version française 3.8)

- Les commandes de déplacement sont indispensables non seulement pour naviguer au sein d'un éditeur de texte mais aussi pour se déplacer dans une arborescence de répertoires ou dans une page Web. Le sous-clavier déplacement comprend les touches de déplacement gauche, droite, haut et bas, la touche Tab, la touche début et la touche fin.

2.2. Flexibilité de l'interface : paramétrage utilisateur

On notera que l'interface utilisateur est largement paramétrable pour répondre au mieux aux besoins du patient. Comme nous l'avons déjà dit, ce dernier peut choisir son mode de sélection (souris, ligne/colonne, linéaire), la vitesse de défilement du curseur, les durées minimales et maximales autorisées pour un appui. Ces derniers paramètres sont essentiels pour distinguer les appuis volontaires des actions non maîtrisées. De même, SIBYLLE distingue des clics courts et des clics longs qu'il est possible d'associer à des actions prédéfinies (effacement, mise en majuscule, aller en début de clavier...). Lorsqu'une certaine durée d'appui est atteinte, le curseur change de couleur afin d'informer l'utilisateur que le système est passé en mode clic long. A la fin de l'appui, ou bout d'un certain temps sans réaction de la part de l'utilisateur (appui prolongé pour une raison quelconque), le système revient en mode clic court (figure 5).



Figure 5. Clic long et clic très long (version 3.8)

La configuration de ces actions peut être très fine, puisque l'utilisateur a la possibilité de donner une sémantique différente à ces clics suivant le sous-clavier où se trouve le curseur. Ce type d'adaptation se définit sous l'interface de paramétrage

du système. La simple utilisation d'un tel clic long améliore considérablement l'utilisabilité? du système. Elle est malheureusement réservée aux personnes qui peuvent contrôler la durée de leurs appuis.

D'une manière générale, les possibilités de paramétrage de SIBYLLE sont très larges afin de permettre à l'utilisateur ou au personnel soignant d'adapter au mieux le système au tableau clinique de la personne. Peuvent ainsi être définis à souhait :

- Le **rendu visuel du clavier** : il est possible de modifier les couleurs utilisés dans l'interface, ainsi que la police et la taille des caractères. Il ne faut pas oublier que de nombreux utilisateurs présentent des troubles perceptifs associés rendant crucial ce type de paramétrage.
- **Paramètres de sélection** : mode de défilement, vitesse de défilement du curseur, longueur des appuis et définition de la sémantique associé aux appuis longs.
- **Organisation du clavier** : taille et position de chaque sous-clavier, ainsi que disposition horizontale ou verticale.
- **Prédiction linguistique** : l'utilisateur peut gérer ici son vocabulaire personnel de même que ses abréviations, puisque notre système permet une désabréviation.

Les figures 6 et 7 montrent trois onglets du panneau de configuration du système.

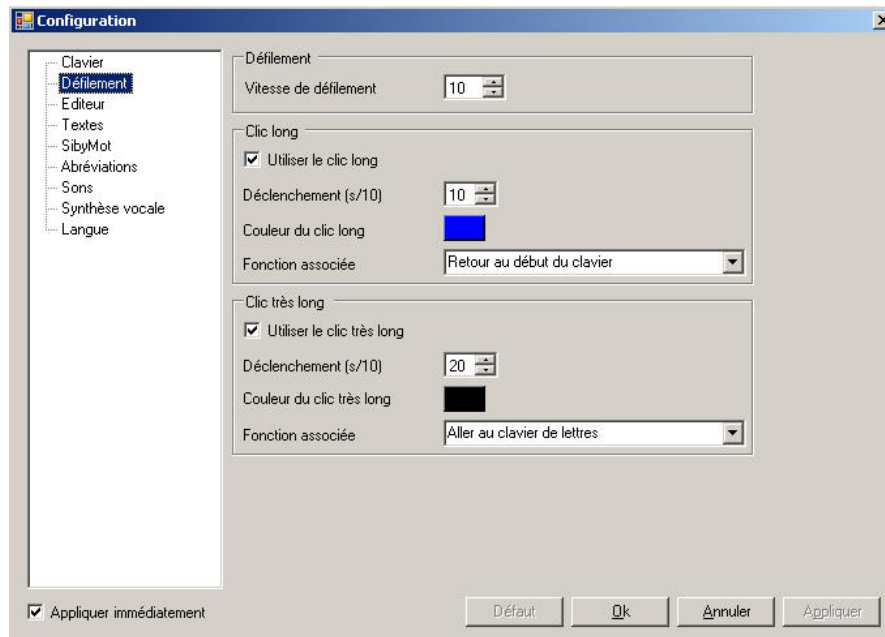


Figure 6. Panneau de configuration du système (version française 3.8.) : paramétrage des vitesses de défilement et de sélection.

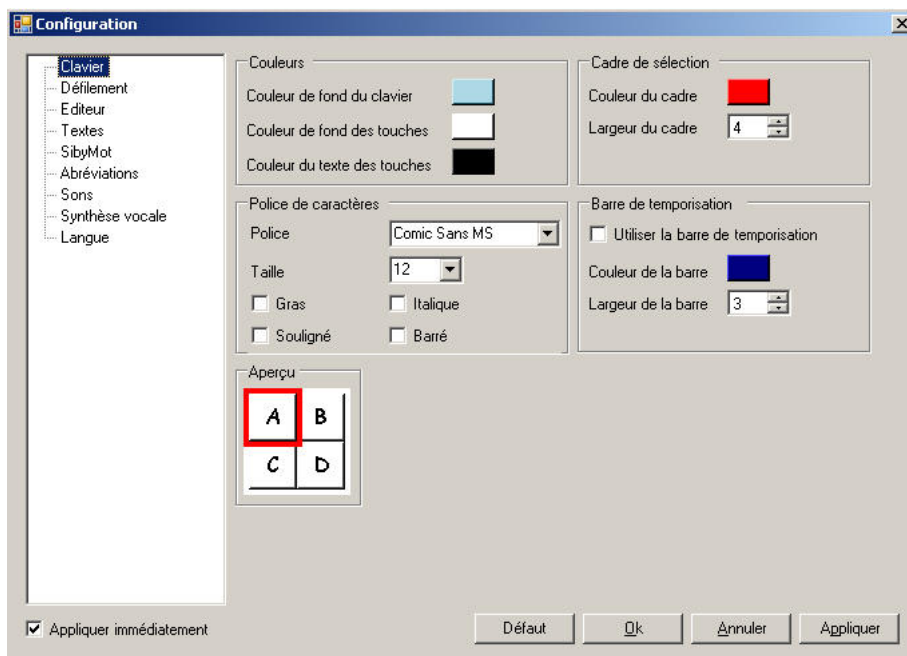


Figure 7. *Panneau de configuration du système. En arrière-plan, paramétrage du rendu des claviers (version française 3.8.). En premier-plan en bas à droite, interface de gestion des abréviations (version anglaise 3.7).*

Enfin, les utilisateurs ont souvent du mal à anticiper les sauts du curseur d'une touche à l'autre. Ils sélectionnent ainsi fréquemment la touche qui précède ou qui suit celle recherchée. Afin de réduire la fréquence de ces erreurs très pénalisantes, nous avons ajouté une barre de temporisation qui glisse doucement du haut au bas du curseur lors de chaque saut (figure 8). Ce feedback dynamique permet à l'utilisateur de paramétrer temporellement ses actions. Nos expérimentations au centre de rééducation de Kerpape (Mutualité du Morbihan) montrent qu'il permet une baisse significative des erreurs de sélection. La vitesse de défilement du curseur glissant, de même que son masquage si nécessaire, sont également paramétrables.



Figure 8. *Curseur avec barre glissante de tempor*



3. Accélérer l'accès au caractère: clavier dynamique et prédiction de lettres

3.1. Modèle de prédiction

Dans le système SIBYLLE, nous avons essayé de dépasser les performances du défilement ligne/colonne à l'aide d'un défilement linéaire dynamique. L'idée est la suivante : après chaque saisie d'une lettre, on va reconfigurer le clavier pour afficher en premier (dans l'ordre de défilement) les caractères les plus probables, compte tenu de ceux qui viennent d'être déjà saisis (figure 9). On dispose pour cela d'un moteur de prédiction de lettres basé sur un modèle de Markov. Plus précisément, on utilise ici un pentagramme qui estime la probabilité d'occurrence de chaque lettre compte tenu des quatre dernières lettres saisies, espace et caractères de ponctuation compris : $P(c_i) \approx P(c_i | c_{i-1}, \dots, c_{i-4})$.

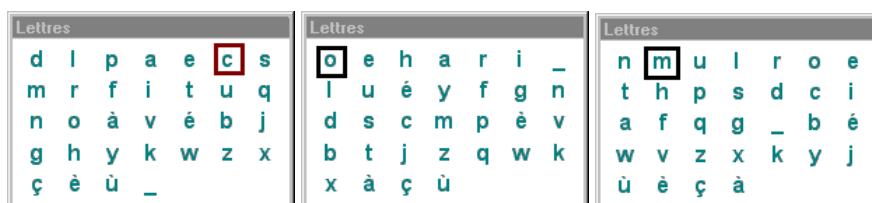


Figure 9. Principe du clavier dynamique : exemple (simulé) de réorganisation sur la saisie du mot COMP...TER

L'estimation de cette probabilité est effectuée sur de grands corpus. Par exemple, la version française du système a donné lieu à un apprentissage sur 5 années du journal Le Monde, ce qui représente 600 millions de mots environ.

Cette approche nous permet de prédire la lettre recherchée en moyenne dans les trois premières lettres affichées (précisément : 2,9 pour le français et 3,0 pour l'allemand). C'est un gain très appréciable par rapport au défilement ligne-colonne, qui nécessite 9 défilements en moyenne pour un clavier standard (tableau 1). Rappelons par ailleurs qu'un défilement ligne/colonne nécessite deux appuis. Outre la fatigue motrice qu'il peut en résulter, cela double les risques d'erreur de sélection pour un caractère donné. Notons enfin que l'approche markovienne utilisée ici ne dépend pas de l'utilisation d'un dictionnaire. Nous évitons donc le problème des mots hors vocabulaire mais aussi des fautes de saisie ou d'orthographe, très fréquentes avec les systèmes AAC.

Mode de défilement	Linéaire Azerty	Ligne/Colonne Azerty	SIBYLLE Français	SIBYLLE Allemand
Défilements / caractère	33	9	2,9	3,0

Tableau 1 : Nombre moyen de défilements nécessaire pour la saisie d'un caractère. Test réalisé sur des extraits de corpus journalistiques (Le Monde, TageZeitung)

3.2. *Evaluation expérimentale*

Le clavier virtuel du système SIBYLLE est utilisé depuis maintenant plus de 7 ans par des enfants et des adultes au centre de rééducation et de ~~réhabilitation~~ **réadaptation** fonctionnelle de Kerpape. La plupart des utilisateurs n'ont plus la possibilité de piloter le clavier à la souris. Ils utilisent donc SIBYLLE en mode de défilement linéaire. La plupart des utilisateurs ont accueilli très favorablement le logiciel avec le clavier dynamique. Rares sont les patients qui préfèrent retourner à un mode de sélection statique et leur choix est généralement lié à leur tableau clinique. En particulier, certains patients souffrent de problèmes de poursuite oculaire, ce qui rend l'aspect dynamique du clavier très perturbant.

Dans les autres cas, les résultats sont très positifs. La phase d'apprentissage est simple et rapide. Le principe du saut de touche, du saut de clavier et du clic long n'ont pas posé de problème particulier. Le gain apporté par SIBYLLE est essentiellement apprécié en termes de « confort », le défilement linéaire et son unique validation est particulièrement apprécié. Nous reviendrons plus longuement en fin d'article sur ces retours d'expérience en provenance du centre de Kerpape. Retenons simplement que le caractère dynamique du clavier ne semble pas troubler l'utilisateur. Il semble que le focus d'attention de l'utilisateur étant surtout centré sur le curseur de défilement, l'organisation globale du clavier de lettres n'influe pas sur son utilisabilité. Dans un autre contexte d'utilisation, cette observation peut être rapprochée de certaines configurations du système *The Grid*, commercialisé par la société *Sensory Software* : pilotable à la souris, ce clavier virtuel a la particularité de présenter ses prédictions lexicales non pas dans une zone spécifique du clavier, mais à l'endroit où se trouve le pointeur souris, focus supposé d'attention.

Si le système SIBYLLE n'est pas destiné en priorité à un pilotage clavier, il utilise lui aussi la puissance de la prédiction de mots. Nous avons en effet développé un moteur de prédiction lexicale originale, que nous allons maintenant présenter.

4. Eviter des appuis à l'utilisateur : prédiction de mots

4.1. *Prédiction de mots : modèle de base*

Quelque soit la technique d'optimisation du clavier de lettres utilisée, la saisie de messages caractère par caractère n'en reste pas moins pénible et fatigante. C'est pourquoi le cœur d'un communicateur réside dans sa capacité à éviter le maximum de saisies à l'utilisateur. Cette économie de saisie est le plus souvent réalisée par un module de prédiction de mots qui consiste à prédire le mot courant en fonction des précédents déjà saisis et, éventuellement de ses premières lettres. Après chaque saisie, une liste de prédictions lexicales est présentée dans un sous-clavier spécifique (voir figure 3). Si l'utilisateur retient une de ces propositions (la sélection d'une touche spécifique permet le basculement du défilement d'un sous-clavier à un autre), le texte est automatiquement complété, ce qui évite la saisie des dernières lettres du mot.

Le prédicteur de SIBYLLE repose sur un modèle de langage markovien de type quadrigramme qui estime la probabilité d'occurrence des termes qui peuvent suivre les trois derniers mots saisis : $P(w_i | (w_{i-1} w_{i-2} w_{i-3}))$. Construit sur le toolkit du SRI (Stolcke, 2002) avec un vocabulaire contrôlé, il utilise un lissage de *Kneser-Ney modifié* (Goodman, 2001) et la technique de pruning proposée par (Stolcke, 1998). Après chaque saisie, SIBYLLE affiche la liste des hypothèses de plus hautes probabilités. Dans le cas d'une prédiction à large vocabulaire, le nombre d'hypothèses qui peuvent compléter une suite de trois mots est généralement important. Considérons l'énoncé suivant :

(1) *Je pense que ...*

Les mots les plus probables avec ce contexte de prédiction sont selon SIBYLLE : *les, le, c'(est), nous, la*. Chaque proposition est cohérente, mais bien d'autres complétions pourraient être imaginées. C'est pourquoi l'utilisateur doit souvent saisir la ou les premières lettres du mot recherché pour que la complétion soit envisageable. Supposons que l'utilisateur saisisse les lettres *n* et *o* :

(2) *Je pense que no ...*

SIBYLLE filtre alors les prédictions pour ne garder que les mots commençant par ces lettres. Les trois hypothèses restantes les plus probables sont : *nous, notre, non*.. Ces propositions sont cohérentes, comme le montrent les exemples ci-dessous :

(3) *Je pense que nous allons gagner.*
Je pense que notre équipe à toutes ses chances.
Je pense que non.

Le filtrage peut être étendu en supposant que les mots prédits non choisis à un moment donné ne répondent pas aux attentes de l'utilisateur. Les propositions délaissées sont donc effacées lors de la saisie suivante, même si elles restent valides dans ce nouveau contexte. Cette stratégie de filtrage est adoptée par défaut par le système SIBYLLE. Il s'agit là encore d'un paramétrage qui peut être modifié.

4.2 Méthodologie d'évaluation et premiers résultats

La mesure de vitesse de saisie (*WPM* pour *Word Per Minute* en anglais), souci principal des systèmes d'aide à la communication, est fortement liée aux performances motrices des utilisateurs et donc à leur tableau clinique. Pour cette raison, une métrique telle que la *WPM*, très utilisée dans les recherches sur la saisie de texte sur interfaces limitées (saisie sur téléphone mobile par exemple), n'est pas réellement applicable dans le monde du handicap. On lui préfère la mesure d'un taux d'économie de saisie observé (*KSR* pour *Keystroke Saving Rate* en anglais) :

$$(a) \quad KSR_n = \left(1 - \frac{k_p}{k_a}\right) \cdot 100$$

où k_p est le nombre d'appuis effectivement réalisés par l'utilisateur lors de la saisie

d'un message, k_a le nombre d'appuis qui auraient été nécessaires sans aide à la composition de mots et n est la taille de la liste de prédiction.

L'économie de saisie dépend de l'aide à la composition implémentée, mais également de l'interface utilisateur avec laquelle elle communique. Afin d'évaluer les performances pures de l'aide linguistique, on utilise une norme standard de comptage des appuis. Dans le cas d'une aide par prédiction de mots, qui nous intéresse ici, nous supposons comme (Trost *et al.*, 2005) et (Trnka *et al.*, 2005) que nous travaillons avec une liste de 5 mots prédits (KSR_5), qu'un unique appui supplémentaire est nécessaire pour accéder à la liste des mots, et enfin qu'un espace additionnel est automatiquement inséré en fin de mots. Les résultats que nous présentons dans cet article répondront par ailleurs tous à la stratégie de filtrage des hypothèses non sélectionnées que nous avons présentée au paragraphe précédent.

Dans cet article, nous étudierons uniquement les performances de la version française du système SIBYLLE. Celle-ci a été apprise sur deux années (1998-1999) du journal Le Monde, ce qui correspond à un corpus d'apprentissage de 44 millions de mots et un vocabulaire de 141078 formes fléchies. Il ne nous a pas paru nécessaire d'augmenter la taille de ce corpus d'apprentissage. Comme nous le verrons plus loin, le langage journalistique est éloigné des saisies usuelles des utilisateurs. Ce modèle de base n'est donc là que pour représenter un background linguistique général qui sera ensuite adapté à chaque utilisateur.

Dans ces conditions, le modèle quadrigramme présente des performances déjà intéressantes. Le KSR_5 observée pour le français est ainsi de 57,8 % sur un corpus de test journalistique (autre extrait du journal *L'Humanité*, cf. tableau 2). Cela montre qu'en théorie, plus d'un appui sur deux peut-être évité à l'utilisateur.

Corpus/Langue	Description	Nb. Mots
<i>Journalistique</i>	F Journal <i>L'Humanité</i> (extrait : janvier 1999)	58 457
<i>Scientifique</i>	F Articles scientifiques (références comprises)	8 766
<i>Littéraire</i>	F Extrait de <i>Germinal</i> d'Emile Zola	50 251
<i>Parole</i>	F Transcription du corpus de dialogue oral OTG (Antoine <i>et al.</i> , 2002) : énoncés oraux prononcés par l'hôtesse d'accueil d'un office de tourisme	15 435
<i>Courriel</i>	F Ensemble de courriels personnels des auteurs ; en-têtes et réponses attachées filtrées.	44 946

Tableau 2. *Corpus de test des versions française et allemande du système SIBYLLE*

Cette mesure correspond toutefois à un KSR théorique dans le cas où le style de langage de l'utilisateur correspondrait idéalement à celui du corpus d'apprentissage. Afin de nous rapprocher des conditions réelles d'utilisation du système, nous avons testé SIBYLLE sur des corpus correspondant à cinq genres langagiers différents : journal, prose (roman), parole conversationnelle, courrier électronique et rédaction scientifique (tableau 2). La figure 10 présente alors les performances du modèle.

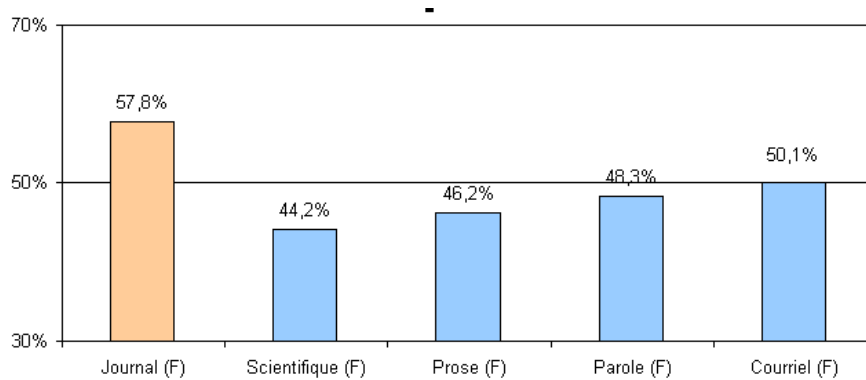


Figure 10. KSR_5 du modèle quadrigramme de prédiction sur différents corpus correspondant à différents registres de langue (F = français)

On observe une dégradation sensible de l'aide réellement apportée par le système. Le KSR chute ainsi à 44,2 % sur le corpus scientifique. Deux facteurs principaux peuvent être invoqués pour expliquer cette baisse de performances :

- la présence de mots hors vocabulaire, particulièrement sensible dans le cas du corpus scientifique (termes techniques) ;
- l'utilisation d'un style de langage différent de celui du corpus d'apprentissage, particulièrement visible dans le cas de la parole conversationnelle.

C'est pour répondre à ces limitations que nous avons élaboré un modèle de prédiction plus complexe, qui vise une double adaptation à l'utilisateur (vocabulaire et registre de langue) et au domaine sémantique du thème courant du discours.

5. Adaptation à l'utilisateur

5.1 Modèle utilisateur

L'adaptation à l'utilisateur du modèle général consiste à apprendre un nouveau modèle, cette fois sur les textes saisis par l'utilisateur. Ainsi, nous maximiserons nos chances que la prédiction se rapproche du style de langage et du vocabulaire préféré de ce dernier. Bien entendu, ce modèle utilisateur ne peut suffire à lui seul : il faudrait qu'énormément de textes aient déjà été saisis pour que le modèle couvre le langage de l'utilisateur. Le modèle général, appris sur le journal *Le Monde*, est là pour couvrir les « trous » de couverture du modèle utilisateur.

D'un point de vue formel, notre démarche est de ce point vue classique : nous interpolons linéairement le modèle général avec le modèle utilisateur. On a :

$$(b) \quad P_{global}(w_i) = \lambda_u \cdot P_{utilisateur}(w_i) + (1 - \lambda_u) \cdot P_{général}(w_i)$$

où le paramètre d'interpolation λ_u est estimé par l'algorithme EM (Jelinek, 1990). Le modèle utilisateur est un quadrigramme identique au modèle général. Il est mis à jour à la fin de chaque session d'utilisateur, si le patient (ou son thérapeute) choisit de conserver les messages courants comme données supplémentaires d'adaptation.

Les données utilisateurs resteront toujours limitées, du fait de la lenteur de la saisie sur les systèmes AAC. C'est pourquoi nous avons cherché à évaluer la masse de données utilisateur suffisante pour atteindre une adaptation satisfaisante. Nous avons procédé à une évaluation incrémentale suivant un paradigme déjà utilisé dans (Boissière *et al*, 2006). L'idée est la suivante : le corpus de test est divisé en un nombre n de sous-corpus. Initialement, on mesure le KSR du système général sur le premier sous-corpus. Ce corpus est alors utilisé comme donnée d'apprentissage par le modèle utilisateur ainsi que pour l'adaptation du coefficient d'interpolation par l'algorithme EM. Le modèle adapté qui en résulte est ensuite évalué sur le second sous-corpus. L'évaluation se poursuit ainsi de manière incrémentale, le modèle adaptatif appris sur les n premiers sous-corpus étant évalué sur le $(n+1)$ -ième sous-corpus. Nous simulons ainsi l'évolution du modèle au fil des saisies utilisateurs.

Cette étude a été menée sur trois corpus : courriel, prose et parole conversationnelle. La figure 11 décrit l'évolution du facteur d'interpolation au cours de l'apprentissage. L'adaptation est manifeste : au bout de 10 000 mots saisis, la part prise par le modèle utilisateur dans l'estimation des probabilités dépasse déjà 20 % dans tous les cas. Le modèle utilisateur prend même une part majoritaire avec le corpus de dialogue oral ($\lambda_u \approx 0,7$). Cette extrême rapidité d'adaptation résulte de la spécificité de la parole conversationnelle par rapport à l'écrit. À l'opposé, le modèle de langue général reste prédominant dans les deux autres cas ($\lambda_u \approx 0,3$).

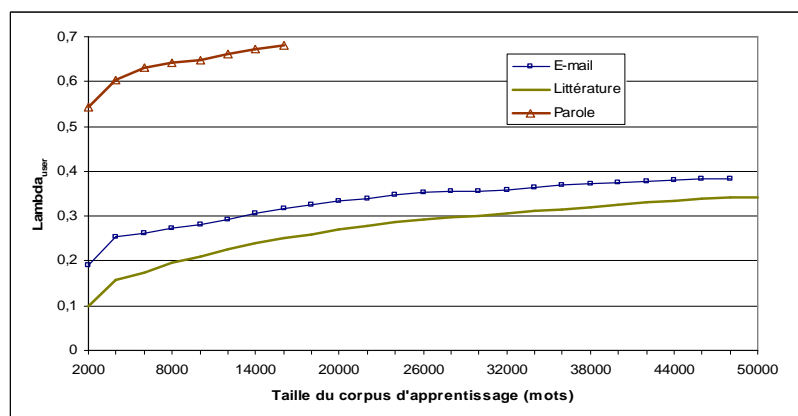


Figure 11. Apprentissage incrémental du module de prédiction de mots avec adaptation utilisateur : évolution du coefficient d'interpolation

La figure 12 présente précisément l'évolution du KSR au fil de l'apprentissage. Plusieurs observations peuvent être faites. Tout d'abord, l'influence du modèle

utilisateur est significative rapidement, ce qui avait déjà été observé avec le système VITIPI (Boissière *et al.*, 2007): avec seulement 2 000 mots de données d'adaptation, on relève déjà une amélioration du KSR d'au moins 2 %. Ce gain atteint ensuite 5% au bout de 25 000 mots d'apprentissage dans le pire cas. C'est sur la parole conversationnelle que l'amélioration est maximale. Cela est dû à la spécificité de la parole spontanée, mais également au fait que l'interaction est finalisée (tâche de renseignement touristique). La communication se focalise donc sur un lexique relevant d'un champ sémantique bien défini.

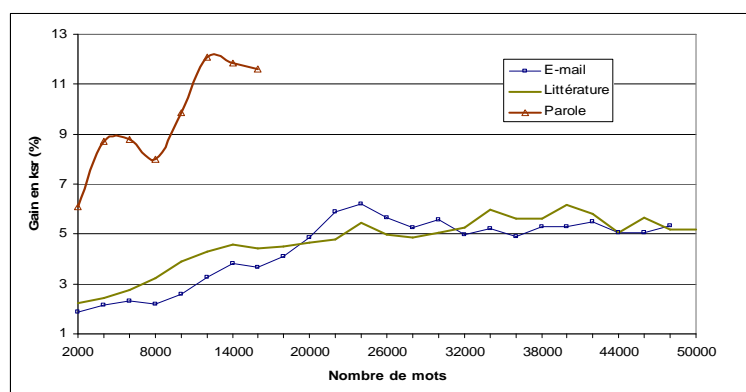


Figure 12. Apprentissage incrémental de la prédiction de mots avec adaptation utilisateur : évolution du gain en KSR_5 sur trois corpus différents

Le paragraphe suivant étudiera précisément l'intérêt d'une adaptation au contexte sémantique. Pour le moment, notons que l'ajout d'un modèle utilisateur permet un gain significatif en KSR . Le tableau 3 compare les résultats globaux² avec ou sans adaptation utilisateur. Avec adaptation, le KSR_5 est supérieur à 50 % sur tous les corpus. Cette amélioration est particulièrement sensible lorsque la communication fait appel à un vocabulaire très spécifique (scientifique) et/ou à des structures linguistiques particulières (dialogue oral).

Modèle	Journal (F)	Sciences (F)	Prose (F)	Parole (F)	Courriel (F)
4-gramme seul	57,9 %	44,2 %	46,0 %	48,3 %	48,6 %
4-gramme+MU	58,5 %	52,4 %	50,6 %	57,7 %	53,0 %
Gain KSR_5	+ 0,6 %	+ 8,2 %	+ 4,6 %	+ 9,4 %	+ 4,4 %

Tableau 3. Performances du 4-gramme interpolé avec un modèle utilisateur (MU)

En première approximation, l'adaptation à l'utilisateur semble d'autant plus

² Les gains globaux présentés sont inférieurs à ceux observés en figure 12, puisqu'ils incluent les tests sur le début des corpus, là où l'adaptation utilisateur n'est pas encore optimale.

bénéfique que le *KSR* initial est faible. Nous nous sommes demandé où cette adaptation jouait le plus : correspond-elle à une amélioration générale des performances, ou opère-t-elle plus fortement sur des textes où le *KSR* est faible ?

	Ensemble du corpus		15 derniers sous-corpus	
	Prose (F)	Courriel (F)	Prose (F)	Courriel (F)
<i>4-gramme seul</i>	$\sigma = 1,44\%$	$\sigma = 8,38\%$	$\sigma = 1,95\%$	$\sigma = 7,34\%$
<i>4-gramme+MU</i>	$\sigma = 1,28\%$	$\sigma = 5,05\%$	$\sigma = 0,78\%$	$\sigma = 4,48\%$

Tableau 4. Analyse distributionnelle du *KSR*₅ sur les corpus français : variance

Le tableau 4 donne la variance de taux d'économie de saisie observé sur les corpus *Prose* et *Courriel*. Les résultats montrent que l'ajout du modèle utilisateur limite de manière significative la dispersion des performances. Le gain en *KSR* est donc modéré pour les passages déjà bien prédits et supérieur pour les textes difficiles. C'est sans doute cette capacité à limiter les situations où la prédiction se comporte mal qui fait que le modèle adaptatif est apprécié des utilisateurs.

5.2 Adaptation au contexte courant du discours : analyse sémantique latente.

En dépit de sa rapidité d'entrée en action (2 000 mots d'apprentissage, soit tout de même une dizaine d'heures de saisie pour une personne handicapée), le modèle utilisateur ne permet qu'une adaptation à moyen et long terme. Une adaptation à court terme peut également être intéressante. En effet, lorsque la communication se focalise sur un thème précis, les mots qui appartiennent au champ sémantique du discours ont plus de chance d'apparaître (Leshner *et al.*, 2002).

Dans un contexte autre que l'aide au handicap, plusieurs approches ont déjà été explorées pour réaliser ces adaptations contextuelles. Une première idée consiste à détecter automatiquement le thème du discours (Bigi *et al.* 2001) et à ensuite focaliser la prédiction sur ce dernier. De son côté, le modèle *trigger* (Rosenfeld 1996 ; Matiassek & Baroni 2003) utilise des collocations pour s'adapter implicitement au thème. Dans ce modèle un mot déclencheur augmente (dès qu'il est utilisé) la probabilité d'autres mots associés. L'analyse de l'état de l'art montre toutefois que les gains apportés par ces modèles restent limités.

Aussi avons-nous proposé un nouveau modèle d'adaptation thématique adapté de l'analyse sémantique latente (LSA pour *Latent Semantic Analysis*). Le modèle LSA (Deerwester *et al.*, 1990), qui répond à des motivations cognitives (Landauer *et al.* 1997) peut être vu comme une technique qui rend compte de relations lexicales sémantiques à partir de la distribution des cooccurrences de mots dans un contexte prédéfini. La LSA peut ainsi prédire des mots lexicaux à partir de termes qui lui sont reliés sémantiquement. Dans un premier temps, un corpus de textes est représenté sous la forme d'une matrice (terme \times contexte) où quelques milliers de termes d'indexation ont été préalablement choisis et où le contexte peut être aussi bien un document, un paragraphe, ou toute autre fenêtre contextuelle suivant l'application.

Chaque élément de la matrice comptabilise la fréquence normalisée (*td.idf*, par exemple) d'occurrence d'un terme d'indexation dans le contexte considéré. L'apport de la LSA consiste à transposer la matrice obtenue dans un espace de dimension réduite. Pour cela, on décompose la matrice en valeurs singulières et on ne conserve que les k principales valeurs singulières obtenues (typiquement, k est compris entre 100 et 300). Chaque mot est représenté par un vecteur de k dimensions dans ce nouvel espace. Il est alors possible de comparer ces vecteurs par une mesure de distance ordinaire, le cosinus de l'angle entre les vecteurs étant le plus souvent utilisé. On montre que cette distance constitue, jusqu'à un certain point (Wandmacher, 2005), une bonne mesure de similarité sémantique.

Dans le cadre de la prédiction de mots, notre objectif est d'estimer la probabilité d'occurrence d'un mot en fonction du thème du discours. Dans l'espace LSA, la somme de plusieurs vecteurs représente la sémantique globale des éléments considérés. Nous faisons l'hypothèse que le champ sémantique correspondant au thème courant peut se décrire par un vecteur de contexte correspondant aux derniers mots déjà saisis :

$$(c) \quad \vec{h} = \sum_{i=1}^m \vec{w}_i$$

où (w_1, \dots, w_m) sont les mots du contexte courant.

On estime alors la (pseudo-) probabilité sémantique d'occurrence d'un mot à partir du cosinus de l'angle que fait sa représentation vectorielle avec le vecteur contexte :

$$(d) \quad P_{LSA}(w_i|h) = \frac{(\cos(\vec{w}_i, \vec{h}) - \cos_{\min}(\vec{h}))^\gamma}{\sum_k (\cos(\vec{w}_k, \vec{h}) - \cos_{\min}(\vec{h}))^\gamma} \quad P_{LSA}(w_i|h) = \frac{(\cos(\vec{w}_i, \vec{h}) - \cos_{\min}(\vec{h}))^\gamma}{\sum_k (\cos(\vec{w}_k, \vec{h}) - \cos_{\min}(\vec{h}))^\gamma}$$

On observe que la distribution de ces pseudo-probabilités est très plate. Suivant (Coccaro et Jurafsky, 1998), nous leur appliquons donc un facteur de température γ pour augmenter le contraste entre les différentes prédictions.

Notre modèle sémantique est ainsi supposé prédire des mots sémantiquement cohérents avec le contexte courant de discours. Considérons l'énoncé suivant :

(4) *Mon père était professeur en mathématiques et je pense que...*

Le tableau 5 donne la liste des dix mots qui, selon le modèle, sont les plus appropriés pour poursuivre la saisie. Ces propositions relèvent bien toutes des thématiques (*famille, enseignement, sciences*) initiées dans le discours.

Rang	Mot	P_{LSA}	Rang	Mot	P_{LSA}
1	<i>professeur</i>	0,0117	6	<i>père</i>	0,0046
2	<i>mathématiques</i>	0,0109	7	<i>mathématiques</i>	0,0045
3	<i>enseigné</i>	0,0083	8	<i>grand-père</i>	0,0043
4	<i>enseignait</i>	0,0053	9	<i>sciences</i>	0,0036
5	<i>mathématicien</i>	0,0049	10	<i>enseignant</i>	0,0032

Tableau 5. Mots de probabilités maximales selon le modèle LSA pour l'énoncé (4)

Cet exemple est également révélateur des limites d'une prédiction purement sémantique : les prédictions sont cohérentes mais ne respectent pas la syntaxe du français. En particulier, la LSA ne peut prédire l'apparition de mots grammaticaux. C'est pourquoi il faut coupler cette prédiction sémantique avec le modèle de langage que nous avons présenté précédemment (Bellegarda, 1997 ; Coccaro & Jurafsky, 1998). Dans SIBYLLE, nous la réalisons par interpolation géométrique du modèle sémantique et du modèle n-gramme adaptatif :

$$(e) \quad P_{global}(w_i) = \frac{P_{base}(w_i)^{\lambda_i} \cdot P_{LSA}(w_i)^{(1-\lambda_i)}}{\sum_{j=1}^n P_{base}(w_j)^{\lambda_i} \cdot P_{LSA}(w_j)^{(1-\lambda_i)}}$$

avec n , nombre de termes du vocabulaire. L'interpolation géométrique impose que les deux modèles soient en accord pour assigner une probabilité élevée à un mot. Nos études (Wandmacher & Antoine, 2007) ont montré la supériorité de cette interpolation dans une tâche de prédiction (gain en *KSR* de 0,6 %).

Cependant, l'efficacité de la prédiction sémantique dépend fortement du mot considéré. (Wandmacher, 2005) a ainsi montré qu'il existait une certaine corrélation entre le nombre de termes sémantiquement reliés à un mot et la densité de ses plus proches voisins dans l'espace LSA. Cette observation est assez intuitive : plus les voisins d'un terme sont proches, plus on a de chance que ceux-ci lui soient réellement liés sémantiquement. On définit comme suit la densité des voisins d'un terme w_i :

$$(f) \quad D_m(w_i) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \cos(\vec{w}_i, NN_j(\vec{w}_i)) \quad (f)$$

où les $NN_j(\vec{w}_i)$ sont les vecteurs w_j les plus proches de w_i . La densité est utilisée pour adapter le facteur d'interpolation du modèle global suivant la formule :

$$(g) \quad \lambda_i = \beta \cdot D(w_i) \text{ si } D(w_i) > 0 \text{ et } \lambda_i = 0 \text{ sinon}$$

avec β constante de pondération fixée à 0,4 après étude expérimentale. Cela signifie que l'influence du modèle LSA sur le prédicteur global est comprise entre 0 et 40 %.

En pratique, le module sémantique a été entraîné sur sept années du journal *Le Monde* (1996-2002, 101 millions de mots) à l'aide du toolkit *InfoMap*³. Nous avons utilisé 3000 termes d'indexation et un vocabulaire contrôlé de 80 000 mots lexicaux. Le contexte de cooccurrence qui a été retenu a été une fenêtre de ± 100 mots. Enfin, nos études nous ont conduits à choisir une valeur de $k = 150$ dimensions pour la réduction par décomposition en valeurs singulières.

L'apport de la focalisation sémantique a été évalué sur les différents corpus déjà présentés. Le tableau 6 compare les résultats obtenus par les modèles suivants :

- modèle 4-gramme seul (base) ;
- modèle 4-gramme + modèle utilisateur (rappel de résultats déjà présentés) ;

³ Infomap Project: <http://infomap-nlp.sourceforge.net>

- modèle 4-gramme + LSA mais sans modèle utilisateur ;
- SIBYLLE : modèle 4-gramme + modèle utilisateur + LSA avec pondération.

Modèle	Journal (F)	Sciences (F)	Prose (F)	Parole (F)	Courriel (F)
Base	57,9 %	44,2 %	46,0 %	48,3 %	48,6 %
Base + MU	58,5 %	52,4 %	50,6 %	57,7 %	53,0 %
Base + LSA	58,9 %	45,6 %	47,7 %	49,9 %	50,2 %
SIBYSEM	59,4 %	52,9 %	52,0 %	58,8 %	53,7 %
<i>Gain en KSR</i>	<i>+ 1,5 %</i>	<i>+ 8,7 %</i>	<i>+ 6,0 %</i>	<i>+ 10,5 %</i>	<i>+ 5,1 %</i>

Tableau 6. Performances (KSR_5) des différents modèles de prédiction

Globalement, la LSA permet de nouveaux gains dans toutes les situations : son apport est donc complémentaire de celui du modèle utilisateur. Les gains cumulés permettent d'atteindre des valeurs de KSR très satisfaisantes (entre 52 % et 59 % suivant le genre testé). Ces améliorations peuvent parfois sembler assez limitées. Elles sont cependant statistiquement significatives (seuil de significativité $p < 0,001$). Pour prendre la mesure de ces résultats, il faut comprendre qu'un KSR_5 de base de plus de 50 % constitue déjà une excellente performance. Les autres méthodes d'adaptation contextuelle que nous avons implémenté (modèle cache ou trigger) donnent des résultats nettement inférieurs (Wandmacher & Antoine, 2007)

En l'absence de données de référence en français, il est difficile de comparer ces résultats avec d'autres. VITIPI (Boissière *et al.*, 2006) présente un KSR_5 de l'ordre de 35 % sur un corpus de courriels tandis que le système PCA atteint un KSR_5 de 49 % sur un corpus de type récit biographique (Blache & Rauzy, 2007). Enfin, la version française du système FASTY approche les 50 % de KSR_5 sur du texte journalistique (Beck *et al.*, 2004).

6. Prédiction de mots et communication assistée : vers les usages réels

Les tests que nous avons présentés jusqu'ici ont cherché à montrer la pertinence générale de notre modèle en présentant des résultats en termes d'économie de saisie (KSR) qui doivent être considérés comme l'apport maximal idéal de notre module de **prédiction**. Si l'on s'intéresse à une application réelle, l'efficacité de la prédiction dépend néanmoins de son adéquation avec l'interface utilisateur réalisée. Cela signifie qu'un soin particulier doit être apporté à l'étude ergonomique de la comptabilité entre l'interface, le module de prédiction ... et le tableau clinique de l'utilisateur. Ce point sera abordé dans le paragraphe suivant concernant le retour d'expérience de plus de sept ans d'utilisation du système SIBYLLE. Ici, nous nous attarderons simplement sur plusieurs expériences qui montrent quels peuvent être les facteurs d'adaptation de la prédiction à l'interface utilisateur, et leurs conséquences sur l'économie de saisie.

Une première expérience concerne la taille de la liste de prédiction présentée à l'utilisateur. Plus cette liste est importante, plus on a une chance d'y trouver le mot recherché. En contrepartie, une liste longue occupe plus d'espace sur l'écran, et son parcours visuel peut s'avérer fatigant. L'économie de saisie est généralement mesurée avec une liste de cinq mots. Afin de chercher une taille optimale, nous avons, quant à nous, étudié l'évolution du *KSR* en fonction du nombre d'hypothèses présentées (corpus de test : *Humanité*).

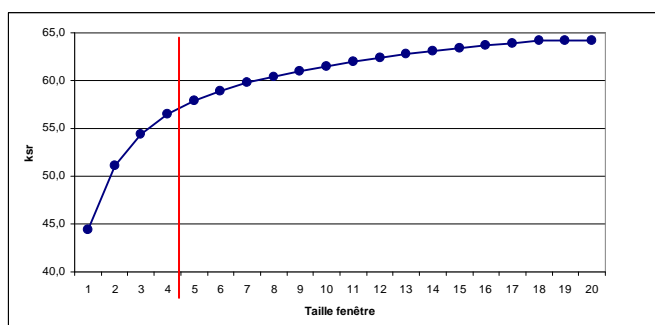


Figure 13. *KSR de SIBYSEM en fonction de la taille de la liste de mots affichés*

Comme le montre la figure 13, le gain marginal que l'on peut espérer gagner en augmentant la taille de la liste de prédiction décroît rapidement avec celle-ci. Une liste de cinq mots constitue un choix d'affichage assez optimal puisque c'est vers cette taille que l'aplatissement de la courbe du *KSR* commence à se manifester. Cette étude montre également qu'on atteint une économie de saisie appréciable avec une liste de un ou deux mots. Cette observation ouvre la porte à des stratégies évitant l'appui nécessaire au changement de clavier :

- complétion intégrée : la meilleure hypothèse est affichée comme unique proposition directement en complétion dans le texte (Boissière & Dours, 2001)
- intégration d'une ou deux hypothèses lexicales au début du clavier de lettres dynamique. Nous réfléchissons à une telle approche pour SIBYLLE, le nombre de mots intégrés pouvant dépendre d'un seuil de probabilité.

Une autre expérience illustre l'interdépendance du moteur de prédiction avec l'interface utilisateur. Comme nous l'avons dit (§ 3.1.), le système SIBYLLE filtre les hypothèses lexicales qui n'ont pas été sélectionnées à un moment donné. Cette approche suppose que l'utilisateur parcourt toujours visuellement l'intégralité de la liste pour sélectionner toute proposition correcte. Or, les études que nous avons menées avec des patients Infirmes Moteurs Cérébraux (IMC) du centre de Kerpape montrent que cette stratégie n'est jamais suivie de manière systématique. Aussi avons-nous étudié l'influence du filtrage sur l'économie de saisie. Cette étude a été menée sur le corpus de test *L'Humanité* avec une liste de cinq mots de prédiction.

Le tableau 9 résume les résultats obtenus avec un 4-gramme couplé ou non avec l'adaptation sémantique. Dans les deux cas, la stratégie de filtrage permet des gains

comparables en matière de *KSR* ($\approx 0,9\%$). Ce gain n'est pas négligeable. Il est au contraire équivalent à celui qu'apporte l'ajout du module LSA. Cela montre, là encore, l'importance de l'interface utilisateur dans l'aide apportée par un communicateur.

	<i>KSR</i> ₅ (sans filtrage)	<i>KSR</i> ₅ (avec filtrage)	Grain <i>KSR</i> ₅
4-gramme seul	56,90 %	57,87 %	+ 0,97 %
4-gramme+LSA	58,01 %	58,92 %	+ 0,91 %

Tableau 9. *Influence du filtrage sur l'économie de saisie (corpus Humanité)*

En revanche, ces résultats ne nous permettent pas de choisir une stratégie optimale d'affichage. Comme toujours dans le monde du handicap, tout dépendra du profil de l'utilisateur. Le choix de la stratégie la plus adaptée pour une personne donnée résulte d'un compromis entre le gain de *KSR* théorique et l'usage effectif que fait l'utilisateur de la liste de mots. Cette stratégie de filtrage peut donc être activée ou non dans le panneau de configuration pilotant la prédiction.

9. Utilisation du système SIBYLLE : retour d'usages au centre de Kerpape

Au fil de sept ans d'utilisation quotidienne au centre de Kerpape, plusieurs dizaines de patients IMC ont pu découvrir SIBYLLE et l'ont conservé comme outil d'aide à la communication. De nombreux enfants en séjour long utilisent SIBYLLE pour leurs activités pédagogiques au sein de l'école adaptée du centre. SIBYLLE est ainsi un outil précieux dans les activités d'apprentissage de la langue mais également en ergothérapie. Les enseignants ont constaté que les enfants composent plus de textes et font moins de fautes d'orthographe lorsqu'ils sont équipés du système. On peut donc affirmer que SIBYLLE, dont l'interface a été conçue avec Jean-Paul Départe (laboratoire d'informatique de Kerpape), répond aux besoins des utilisateurs. La phase d'apprentissage à cette nouvelle aide est simple et rapide, même pour des personnes lourdement handicapées. Le principe du saut de touche, du saut de clavier, voire du clic long pour ceux qui le maîtrisent, n'ont pas posé de problème particulier. Du point de vue des utilisateurs, SIBYLLE est essentiellement apprécié en termes de « confort », le défilement linéaire et son unique validation retenant leur attention. L'aspect dynamique du clavier de lettres n'a jamais posé de problème, contrairement à nos craintes initiales. Les seules personnes qui ne l'ont pas accepté souffraient en effet de problèmes de poursuite oculaire.

Un des points forts de l'interface utilisateur de SIBYLLE réside dans ses multiples possibilités de paramétrage. Lorsqu'un patient arrive au centre de Kerpape, il rencontre tout un ensemble de praticiens qui va conduire de multiples expériences pour déterminer ses besoins spécifiques. Les orthophonistes vont étudier les capacités linguistiques du patient pour déterminer le type de système d'aide à la communication le plus approprié (entrée iconique, phonétique ou alphabétique). Les ergothérapeutes déterminent les capacités motrices et fonctionnelles de la personne, en particulier pour définir l'interface d'entrée la plus appropriée ainsi que le mode de sélection le plus adapté sur le clavier virtuel. Dans les deux cas, ils définiront également des spécifications pour le paramétrage du dispositif (par exemple, vitesse de clic ou de durée d'appui). Les orthoptistes vont enfin analyser les capacités

visuelles du patient pour s'assurer que tous les éléments de l'interface seront clairement perceptibles. Quand toutes ces contraintes ont été définies, le personnel technique du centre (laboratoire d'informatique) va configurer le système. En collaboration avec le patient, on va ensuite chercher à affiner la configuration du système pour l'adapter le plus finement possible à la situation rencontrée.

Une telle adaptation représente un processus long et fastidieux. Dans le cas de handicaps mettant en jeu des atteintes visuelles sérieuses, il peut se passer plusieurs mois d'aller et retours avant qu'une configuration réellement satisfaisante soit trouvée. En conséquence, le communicateur doit :

- présenter des possibilités étendues de paramétrage,
- faire en sorte que ce paramétrage puisse être défini autant que possible par le personnel soignant, sans faire appel au personnel technique.

Le système SIBYLLE présente de ce point de vue des possibilités de reconfiguration qui sont particulièrement appréciés des praticiens du centre de Kerpape. Ce paramétrage concerne tous les éléments du système. Nous nous limiterons ici à montrer comment il peut influencer sur le rendu du clavier virtuel (cf § 2.2). Les figures des pages suivantes présentent différentes déclinaisons de SIBYLLE qui ont été adaptées pour des utilisateurs aux tableaux cliniques variés⁴ :

- *Sylvie* : Infirmière Motrice Cérébrale (IMC) de 22 ans, sans possibilité de vocaliser. Très peu de motricité (fauteuil manuel), utilisation de SIBYLLE et de l'ordinateur en mode par défilement. Utilise un ordinateur portable avec écran de 15" (car problème de vue) installé sur tablette. Un gros travail a été réalisé avec l'orthoptiste sur les couleurs et placement des sous-claviers.

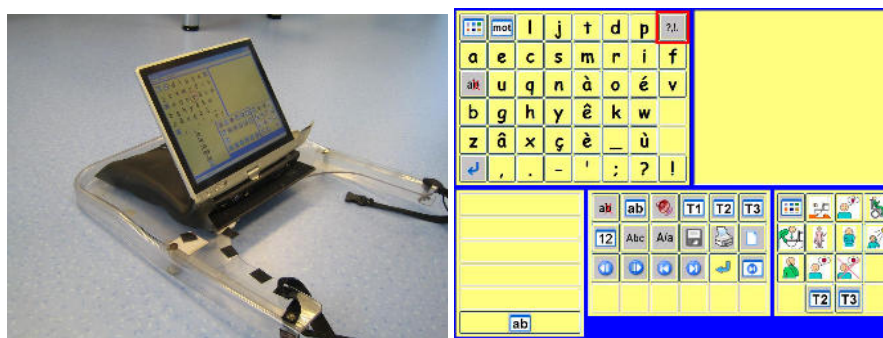


Figure 14. Configuration du système SIBYLLE pour Sylvie

- *Emilie* : Infirmière Motrice Cérébrale (IMC) 17 ans, sans possibilité de vocaliser. Conserve une certaine motricité à la tête (fauteuil électrique : joystick au menton), pilote son ordinateur par joystick (celui du fauteuil) au menton. Utilise pour le moment SIBYLLE en défilement **mais** devrait bientôt essayer un pilotage

⁴ Le nom des personnes concernées a été modifié

au joystick. Utilise un UMPC ASUS C avec écran de 8" (pas de problème visuel) installé sur le fauteuil électrique



Figure 15. Installation de SIBYLLE pour Emilie sur un UMPC Asus

- *Madame Bernard* : 60 ans, atteinte de sclérose latérale amyotrophique (SLA). Vocalise encore mais est de moins en moins compréhensible, marche encore un peu mais devra utiliser un fauteuil sous peu. Utilise encore SIBYLLE au clavier même s'il est prévisible qu'il faudra à l'avenir passer en balayage **linéaire**. Utilise un Netbook ASUS EeePC avec un écran de 10"1 (autonomie de 8 heures)



Figure 16. Installation de SIBYLLE pour Madame Bernard

Madame Louis : 35 ans, souffre d'un problème neurologique (désormais stabilisé) suite à un problème à l'accouchement. Sans possibilité de vocaliser, conserve une motricité aux membres supérieurs (fauteuil électrique). Utilisation de SIBYLLE par l'écran tactile d'un netbook EeePC ASUS écran 8"1 (autonomie de 5 heures). Plusieurs configurations de Sibylle ont été tentées, en particulier pour placer les différents sous-claviers de l'interface.



Figure 17. Installation de SIBYLLE pour Madame Louis. A gauche : première configuration essayée. A droite : configuration finalement retenue

Ces différents exemples montrent les facilités d'adaptation qu'offre SIBYLLE. Plusieurs remarques peuvent être faites à ce sujet :

- Le système peut être installé sur des équipements assez variés. En particulier, on remarquera qu'il peut fonctionner sur les dispositifs mobiles de type **Pocket UMPC ou Netbook ou PC** qui sont de plus en plus utilisés par les patients. La seule limitation ici concerne la puissance de calcul du matériel concerné : dans certains cas limites, il semble nécessaire de ne pas utiliser l'adaptation sémantique⁵, très gourmande en ressources. Cette activation/désactivation se définit d'un clic dans le panneau de configuration de la prédiction.
- Si la liste de prédiction de mots est généralement limitée à 5 hypothèses lexicales, on remarquera que certains patients sont à même de gérer un affichage de 10 mots simultanément (cas de Madame Bernard),
- Dans les trois premiers exemples, la liste de prédiction de mots est disposée verticalement. En règle générale, c'est en fait la disposition horizontale qui est préférée. L'exemple de Madame Louis montre qu'il est en tous cas facile au personnel soignant de définir, par tâtonnements, la disposition la mieux adaptée à un patient
- S'il est possible d'adapter le système aux besoins de chaque utilisateur, on remarquera également qu'une configuration donnée peut également convenir à des utilisateurs différents. C'est ainsi le cas de Sylvie et Emilie, qui présentent pourtant des tableaux cliniques différents. Une adaptation réussie peut donc servir de guide pour d'autres situations futures
- Enfin, certaines similitudes se retrouvent dans toutes les implémentations. Citons par exemple le choix d'un affichage bleu profond sur fond jaune clair (car facilitant la visibilité), de même que la reprise d'icônes identiques pour le sous-clavier dédié aux messages d'urgence préenregistrés.

On remarquera que le centre de Kerpape a fait le choix de toujours afficher le sous-clavier d'affichage des messages d'urgence, contrairement à notre configuration par défaut (sous-clavier caché sous le pavé numérique). Il n'est pas inutile de

⁵ Ou si on préfère, de piloter finement l'utilisation de la mémoire vive du système par le logiciel. Dans ce cas, le recours à un spécialiste informatique est nécessaire.

préciser que le positionnement et le rendu des sous-claviers s'effectue graphiquement à l'aide d'une petite interface permettant de générer automatiquement un fichier de configuration XML qui est ensuite chargé par SIBYLLE.

Dans ses différentes versions successives, le système SIBYLLE a déjà été utilisé par plusieurs dizaines de patients au centre de Kerpape. Ces utilisateurs étaient aussi bien des adultes que des enfants. Une école primaire et un collège adaptés sont intégrés au centre. De ce fait, c'est sur la population enfant et adolescent que nous disposons d'un retour d'usage longitudinal le plus significatif. A titre d'illustration, **le tableau** 10 ci-dessous présente le tableau clinique de huit enfants qui ont été équipés de la dernière version de SIBYLLE sur une période de 2 ans.

Patient	Age	Handicap	Tableau clinique
Q	19	IMC	Quadriplégie dystonique, anarthrie
H	15	Encéphalite	Quadriplégie dyskénétique, dysarthrie + troubles visuels associés
P	15	IMC	Quadriplégie dystonique, anarthrie
M	15	IMC	Quadriplégie spastique + amblyopie
E	14	IMC	Quadriplégie dystonique, anarthrie
G	19	IMC	Quadriplégie dystonique, anarthrie
S	23	IMC	Quadriplégie dystonique, anarthrie
Y	21	IMC	Quadriplégie dystonique, anarthrie

Tableau 13. *Quelques utilisateurs adolescents du système SIBYLLE*

A ce jour, le système a toujours été très bien accueilli par les utilisateurs. Parmi les personnes utilisant SIBYLLE avec un défilement linéaire, seuls deux utilisateurs ont été gênés par le réarrangement dynamique du clavier : ils souffraient de troubles visuels associés et utilisent donc SIBYLLE avec un clavier optimisé statique.

Cette optimisation concerne de fait tous les utilisateurs de SIBYLLE. Ses facilités de reconfiguration, que ce soit au niveau de l'interface ou des modules linguistiques, font que le système peut-être amené à évoluer avec les capacités de l'utilisateur (et non l'inverse comme bien souvent !). Du point de vue de l'aide linguistique, un utilisateur peut commencer à utiliser une configuration relativement simple, puis rajouter progressivement des fonctionnalités plus avancées pour accélérer sa vitesse de communication, sans que l'interface générale n'ait à évoluer de manière sensible. A titre d'exemple, il est possible de paramétrer la prédiction de mots afin qu'elle ne considère que les mots les plus fréquents de la langue.

Par exemple, sur la figure 18, je peux choisir de ne conserver que les 500 formes flechées les plus courantes de la langue, ce qui correspond à un vocabulaire d'apprenant d'environ mille mots. A chaque fois que l'utilisateur atteint un nouveau stade de développement langagier, on peut ensuite augmenter la richesse du lexique de manière totalement transparente. Cette évolution sera conduite par l'orthophoniste ou l'enseignant en charge du patient.

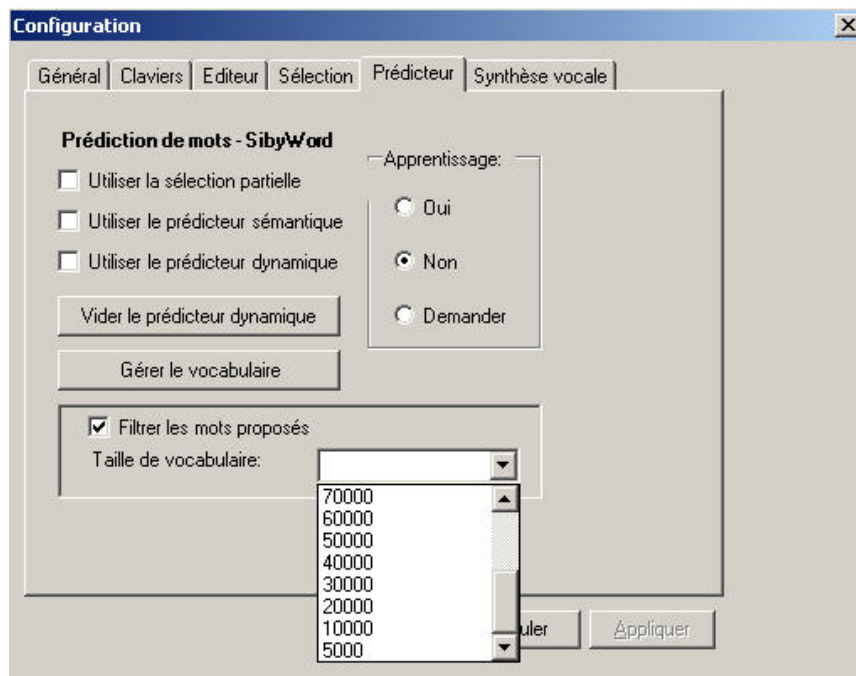


Figure 18. Paramétrage du moteur de prédiction : taille du vocabulaire

Globalement, les enseignants de Kerpape ont pu observer que l'arrivée de SIBYLLE s'est traduite par une augmentation significative des textes composés par les enfants, en comparaison avec les systèmes d'assistance utilisés auparavant. Ils ont également observé que les enfants étaient à même de participer à acceptaient des sessions de travail plus longues, ce qui quand à montrer que l'utilisation de SIBYLLE induit une fatigue physique et cognitive moins importante. A nos yeux, cette réduction de la fatigue d'usage est une amélioration aussi importante que la vitesse de communication (Berard and Neimeijer, 2004).

Enfin, les enseignants ont observé une réduction significative des erreurs grammaticales et orthographiques dans les productions des enfants grâce aux prédictions linguistiques, comme cela a déjà été relevé par d'autres auteurs (Morris et al. 1992 ; Carlberger et al., 1997). A notre connaissance, aucune étude n'a par contre cherché à évaluer si cette amélioration correspondait à une compétence acquise (apprentissage implicite via les propositions de la prédiction) ou était la simple conséquence de la correction des propositions faites par le système.

Ces résultats très positifs ne doivent toutefois pas masquer une légère déception. Nos observations montrent en effet que les patients ignorent souvent les propositions de la prédiction, même lorsque le mot attendu se trouve dans la liste des hypothèses lexicales. D'une manière analogue, dans une étude portant sur le système commercial DIALO, Biard *et al.* (2006) ont observé que les utilisateurs n'avaient utilisé que 2300

fois la prédiction de mots dans un texte d'environ 16500 mots. Nos échanges avec les utilisateurs de SIBYLLE ainsi que le personnel soignant tendent à montrer que cette situation est dû à un problème cognitif déjà relevé par d'autres études (Koester, Levine, 1994; Horstmann, Levine 1991): les utilisateurs ont des difficultés à rédiger un message (activité en sortie) et lire une liste de mots (activité en entrée) de manière simultanée. Nos études longitudinales montrent qu'avec l'expérience, les utilisateurs font toutefois un usage de plus en plus fréquent de la prédiction de mot. Le cas de Madame Louis, qui choisit ainsi une taille de liste d'hypothèses de 10 mots, et de ce point de vue éclairant. Il semble donc que pour les utilisateurs, le moteur de prédiction de SIBYLLE fournit une aide indéniablement appréciable. Nous pensons toutefois qu'une réflexion ergonomique approfondie sur l'intégration de la prédiction dans l'interface pourrait limiter la charge cognitive des patients et renforcer son usage régulier.

10. Aide à la communication et troubles langagiers associés

Une autre piste d'amélioration relève spécifiquement de la modélisation linguistique. Elle concerne la prédiction de mots pour des patients présentant, en plus de leur infirmité motrice, d'autres troubles cognitifs (retard d'apprentissage de la langue, dyslexie, aphasie...). S'il semble difficile d'encre encore améliorer notre prédiction de mots sur des énoncés bien formés, cette question redevient d'actualité pour des utilisateurs souffrant de troubles langagiers associés. Elle n'a malheureusement été que rarement étudiée par les chercheurs du domaine. On sait pourtant que la prévalence de ces troubles langagiers est loin d'être négligeable. Voici un énoncé composé par un jeune adulte IMC ayant une maîtrise imparfaite de la langue :

*(5) tu a vu quil ya des famille qui porte plinte acose l'handicap de leur fils .
j'ai pas tous de suite compris les tenen les abouticen mais papa ma espliqué.
je pences si on fait tous ça les génécologue serai derier les baros souven.*

Translittération : *tu as vu qu'il y a des familles qui portent plainte à cause (de) l'handicap de leur fils. Je n'ai pas tout de suite compris les tenants et les aboutissants, mais papa m'a expliqué. Je pense (que) si on fait tous ça, les gynécologues seraient derrière les barreaux souvent*

Cet exemple est représentatif des difficultés qui se posent à la prédiction : fautes d'orthographe, mais surtout écriture phonétique (*pences, baros, abouticen*) et regroupement incorrect de graphèmes. Nous avons dit plus haut que la liste de mots prédits représente une aide orthographique appréciable pour l'utilisateur, et que les personnes IMC faisaient moins de fautes lorsqu'elles utilisaient SIBYLLE. Il faut toutefois noter que l'énoncé (6), très perturbé, a été composé avec ce système ! L'utilisateur n'a pas sélectionné le mot recherché dans la liste de prédiction, alors qu'il était souvent présent (*plainte, pense, famille, aboutissants, gynécologue...*) Il est donc illusoire de croire qu'une prédiction de mots, même parfaite, influencera suffisamment l'utilisateur pour lui permettre de composer des énoncés sans fautes. Nos systèmes doivent donc gérer les principales erreurs présentes dans ces énoncés.

Corpus	Description	Nb. Mots
<i>Courrier</i>	courriers rédigés par des IMC de 12 à 20 avec SIBYLLE. Motricité Fonctionnelle Globale : niveau V (Palisano <i>et al.</i> , 1997) ; élocution : anarthrie ou dysarthrie sévère.	1416
<i>Parole</i>	énoncés rédigés sur SIBYLLE par des IMC lors de groupes de discussion. Tableaux cliniques inconnus.	855

Tableau 14. *Corpus francophones de communication assistée recueillis à Kerpape*

Afin d'estimer la dégradation résultante des performances, nous avons étudié deux corpus de productions d'adolescents et de jeunes adultes IMC du centre de Kerpape (tableau 14). Enregistrés dans le cadre du projet ESAC_IMC avec SIBYLLE, ces corpus sont de taille restreinte du fait de la lenteur de composition des messages. Ils constituent toutefois une des premières tentatives d'étude des usages langagiers réels de personnes IMC avec ou sans troubles langagiers associés.

Modèle / Corpus	Courrier	Parole	Ensemble
<i>KSR₅ 4-gramme seul</i>	31,8 %	50,9 %	38,9 %
<i>KSR₅ 4-gramme + MU</i>	36,6 %	59,6 %	44,8 %
<i>KSR₅ 4-gramme + MU + LSA (SIBYLLE)</i>	37,2 %	60,2 %	45,1 %
% mots hors vocabulaire	20,6 %	3,0 %	14,2 %

Tableau 15. *KSR₅ sur des corpus d'énoncé composés par des patients IMC*

Les résultats obtenus sur ces corpus sont synthétisés dans le tableau 15. Ils sont contrastés : on observe une dégradation très sensible des performances sur le corpus *courrier* (*KSR₅* de 37,2 % pour SIBYLLE), alors que celles-ci restent satisfaisantes sur le corpus *parole*. En l'absence de tableau clinique pour certains sujets, seule l'étude de leurs productions langagière peut nous aider à expliquer ces différences :

- le corpus *parole* se caractérise par de forts agrammatismes : les verbes n'y sont ainsi que rarement conjugués (exemple : *pourquoi je être handicapé*), mais les mots sont le plus souvent orthographiés correctement. Au final, la proportion de mots hors du vocabulaire de l'application est limitée (3 %) ;
- le corpus *courrier*, dont est extrait l'énoncé (5), témoigne au contraire d'une bonne maîtrise des structures de la langue mais d'une écriture qui est purement phonétique, avec de nombreux cas d'agglutinations. D'où un taux très élevé de mots hors vocabulaire (20,6 %).

La prédiction semble donc avant tout affectée par les mots hors vocabulaire, ce qui suggère que les pistes majeures d'amélioration se situent au niveau du lexique.

Par ailleurs, l'adaptation utilisateur ou la LSA opèrent toujours sur ces énoncés perturbés (gain en *KSR₅* de 5,4 % à 9,3 %). En particulier, les erreurs commises répondent à des régularités qui sont apprises par le modèle utilisateur. Cette capacité d'apprentissage pose une question sur les objectifs de la communication assistée. Doit-elle s'adapter au maximum aux productions de l'utilisateur afin de faciliter la communication ? Ou doit-elle viser en priorité sa rééducation langagière en ne proposant que des hypothèses linguistiquement correctes ? Nos discussions avec les

thérapeutes et les enseignants de Kerpape montrent que ce débat ne peut être tranché : chaque contexte d'utilisation répond en effet à des objectifs différents. C'est pourquoi nous nous orientons vers la réalisation d'un système mixte pouvant, suivant le paramétrage choisi, être utilisé en rééducation ou en aide à la communication. Selon l'objectif visé, les techniques mises en jeu différeront : méthodes de correction (voir par exemple celles du système VITPI) ou au contraire tolérance aux erreurs.

11. Conclusion

En guise de conclusion, les études expérimentales que nous avons menées, de même que les retours d'usages provenant du centre de rééducation de Kerpape nous montrent que l'aide à la communication apportée par système SIBYLLE est très appréciée des utilisateurs comme du personnel soignant ou enseignant. La qualité de sa prédiction, de même que sa grande reconfigurabilité sont régulièrement cités comme les points forts du système. Il n'en reste pas moins que l'usage de la prédiction linguistique peut encore être amélioré. Cette amélioration ne passe pas par une meilleure modélisation linguistique (de ce point de vue, SIBYLLE semble avoir atteint des performances difficilement dépassables) mais :

- par une meilleure intégration ergonomique de la prédiction, en particulier au niveau de la présentation de la liste de mots et de la sélection d'hypothèses,
- par une adaptation à l'utilisateur et au contexte encore renforcée : création de modèles utilisateurs par type d'application, facteurs d'interpolation adaptatifs évoluant avec les capacités de l'utilisateur.

Les évolutions futures de Sibylle passeront donc toujours par une réflexion pluridisciplinaire associant interaction homme machine (ergonomie) et traitement automatique des langues (linguistique)

11. Bibliographie

- 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., « Altérations de la communication dialogique : le statut de la langue dans la palliation des troubles de la parole ». Actes *Handicap'2006*, Paris, France. 2006.
- Antoine J.-Y., Maurel D. (2007) 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. *Traitement Automatique des Langues, TAL*, vol. 48, n° 2., 9-46
- Antoine J.-Y., Letellier-Zarshenas S., Schadle I., Nicolas P., Caelen J. « Corpus OTG et ECOLE_MASSY : vers la constitution d'une collection de corpus francophones de dialogue oral diffusés librement ». Actes *TALN'2002*, Nancy, France. p. 319-324. 2002.
- Baker B., Minspeak. *Byte*. 9. 186-202. 1982.

- Beck C., Seisenbacher G., Edelmayer G., Zagler W.L. «First user test results with the predictive typing system FASTY ». *Actes ICCHP'04*. Paris. LNCS 3118. Springer. 2004.
- Bellegarda J. « A Latent Semantic Analysis framework for large-span language modeling », *Actes Eurospeech 97*, Rhodes, Grèce. 1997.
- Bérard C., Neimeijer D. «Evaluating effort reduction through different word prediction systems ». *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, La Haye NL. Vol. 3, 2658-2663. 2004
- 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 moteur de prédiction de mots de la Plateforme de Communication Alternative », *Traitement Automatique des Langues, TAL*, vol. 48 n° 3. 2007 (à paraître)
- Boissière P., 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.
- Boissiere Ph., Schadle I., Antoine J.-Y. « A methodological framework for writing assistance systems: applications to sibylle and VITIPI systems », *AMSE Journal on Modelling, Measurement & Control, Série C.*, Barcelone, Espagne, Vol 67, p. 167-176. 2006.
- Cantegrit B., Toulotte J.-M. « Réflexions sur l'aide à la communication des personnes présentant un handicap moteur ». *Actes TALN'2001, atelier Ingénierie des Langues et Handicap*, Tours, France, juillet 2001. Vol. 2, p. 193-202.
- Carlberger, A., Carlberger, J., Magnuson, T., Hunnicutt, M.S., Palazuelos-Cagigas, S., and Navarro, S. A. « Profet, a new generation of word prediction: an evaluation study ». *Proceedings of NLP'97*. Madrid, Spain. 23-28. 1997.
- Coccaro, N. and Jurafsky, D. « Towards better integration of semantic predictors in statistical language modelling », *Actes ICSLP-98*, Sydney. 1998.
- 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.
- Goodman J. « A Bit of Progress in Language Modeling », Extended Version, *Microsoft Research Technical Report MSR-TR-2001-72*. 2001.
- Horstmann, H.M., and Levine, S.P. « The Effectiveness of Word Prediction ». *Proceedings of 14th RESNA Conference.*, 100-102. 1991.
- Jelinek, F. « Self-organized Language Models for Speech Recognition ». In Waibel A., Lee K.-F, *Redings in Speech Recognition*, Morgan Kaufman Publ. p. 450-506. 1990.
- Koester, H., Levine, P. « Modelling the speed of text entry with a word prediction interface. » *IEEE Trans. Rehab. Eng.* 2(3). 177-187. 1994.

- Landauer, T. K., Laham, D., Rehder, B. and Schreiner, M. E. « How well can passage meaning be derived without using word order? A comparison of LSA and humans ». *Actes 19th meeting of the Cognitive Science Society*. Mahwah, NJ. p. 412-417, 1997.
- Leshner, G. W., Moulton, B. J., Higginbotham, D. and Alsofrom, B. « Limits of human word prediction performance. » *Actes CSUN 2002*, California State U., Northridge. 2002.
- 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.
- Matiasek, 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.
- Morris, C., Newell, A., Booth, L., Ricketts, I., and Arnott, J. « Syntax PAL: A System to Improve the Written Syntax of Language-Impaired Users » *Assistive Technology*, vol. 4, no. 2, 51-59. 1992.
- Palisano R. Rosenbaum P., Walter S., Russel D., Wood E., Galuppi B. « Development and reliability of a system to classify gross motor function in children with IMC ». *Dev. Med. Child Neurol.*, 39, p. 214-223. 1997.
- Rosenfeld, R. « A maximum entropy approach to adaptive statistical language modelling ». *Actes Computer Speech and Language*, 10 (1), p. 187-228. 1996.
- 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, juillet 2001, Vol 2, p. 223-232.
- Salton G., McGill M. « Introduction to modern information retrieval » McGraw-Hill, New-York, NJ. 1983.
- Stolcke, A. « Entropy-based pruning of backoff language models ». *Actes DARPA Broadcast News Transcription and Understanding Workshop*, 1998.
- Stolcke, A. « SRILM - An Extensible Language Modeling Toolkit », *Actes International Conference on Spoken Language Processing, ICSLP'02*, Denver, Colorado, 2002.
- Trnka K., Yarrington D., McCoy K.F., Pennington C. « Topic Modeling in Fringe word prediction for AAC » *Actes 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.
- Vella F., Vigouroux N., « Disposition spatiale des touches/caractères des claviers logiciels et fatigue motrice: résultats expérimentaux », *Actes Handicap'2006*, Paris. 2006.
- GARAY-VITORIA, N., and ABASCAL, J. 2006. Text prediction systems : a survey. *Univ. Access. Inf. Society*. Vol. 4. 188-203.
- Wandmacher T. « How semantic is Latent Semantic Analysis », *Actes RECITAL'2005*, Dourdan, France. 2005.

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. 506-513. Juin 2007.