

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
CONCENTRATION PERSONNALISÉE

PAR
Patrick TREMBLAY

CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN LOGICIEL DE SOUTIEN PHONÉTIQUE
AUTOMATISÉ ET DÉGRESSIF POUR LES PERSONNES DYSLEXIQUES,
ALLOPHONES OU PRÉSENTANT DES INCAPACITÉS INTELLECTUELLES

MONTREAL, LE 30 AVRIL 2015



Patrick Tremblay, 2015

Dans cet ouvrage, le genre masculin est utilisé dans le but d'alléger le texte.



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Pierre Bourque, directeur de recherche
Doyen des études à l'École de technologie supérieure

M. Jacques Langevin, codirecteur de recherche
Faculté des sciences de l'éducation à l'Université de Montréal

M. Luc Duong, président du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

Mme Sylvie Ratté, membre du jury
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 23 MARS 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je remercie les professeurs Pierre Bourque et Jacques Langevin pour avoir respectivement dirigé et codirigé mes activités de recherche, ainsi que ma conjointe, Judith Gauthier, pour son inestimable soutien au cours de la route qui m'a mené au terme de cette recherche.

CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN LOGICIEL DE SOUTIEN PHONÉTIQUE AUTOMATISÉ ET DÉGRESSIF POUR LES PERSONNES DYSLEXIQUES, ALLOPHONES OU PRÉSENTANT DES INCAPACITÉS INTELLECTUELLES

Patrick TREMBLAY

RÉSUMÉ

La littératie est essentielle à l'engagement citoyen et à la participation sociale. Or, une proportion significative de citoyens canadiens francophones est analphabète, ou éprouve de grandes difficultés à comprendre le français écrit. Que ce soit en raison d'une langue maternelle qui diffère de celle du milieu de vie, d'un trouble d'apprentissage ou d'une incapacité intellectuelle, il se présente des obstacles de taille contre l'accessibilité à la lecture et à l'information pour ces groupes de personnes. En effet, lire le français nécessite les habiletés à interpréter un nombre significatif de correspondances instables entre des graphèmes et des phonèmes.

En raison des caractéristiques de l'orthographe française, dans laquelle la prononciation d'un mot repose sur la capacité à effectuer l'association des graphèmes aux phonèmes, un grand nombre de personnes sont alors placées en situation de handicap dans leur milieu scolaire ou professionnel.

Ainsi, héritée d'une méthode développée par l'enseignante Dominique Rolland, le Groupe DÉFI Accessibilité (GDA) a proposé une modalité d'adaptation de texte : le soutien phonétique. À l'instar des roues d'appoint installées sur le vélo de l'enfant qui débute ses premières balades, le soutien phonétique est un mécanisme permettant de diminuer la complexité de la lecture du français. Il s'agit de superposer des archigraphèmes (la plus simple expression écrite d'un son) au-dessus des graphèmes susceptibles de poser de plus grands défis d'interprétation pour le lecteur, le plaçant ainsi potentiellement en situation de handicap. Par exemple, l'archigraphème « o » serait inscrit au-dessus des graphèmes « eau » et « ault ». De plus, les lettres muettes sont estompées en gris.

Diminuant la complexité de l'interprétation des graphèmes complexes du français écrit pour ces personnes, cette modalité d'adaptation de textes facilite la tâche, et permet alors à certains groupes de personnes d'acquérir les habiletés alphabètes en vue de devenir autonomes.

Or, le traitement manuel d'ajout du soutien phonétique aux documents de format Microsoft Word demande un temps considérable. Dans un contexte où le Groupe Défi Accessibilité souhaite produire des manuels scolaires adaptés avec le soutien phonétique, cet effort est trop coûteux pour assurer la viabilité de ce projet : 416 heures pour adapter un manuel scolaire.

Cette recherche vise subséquemment à déterminer s'il est possible d'automatiser cette tâche avec un taux d'erreur de moins de 10%. Parallèlement, la recherche doit établir si un système de gestion de dossiers pourrait permettre de rendre l'ajout de soutien phonétique

dégressif, afin de réduire la densité du soutien phonétique ajouté aux textes en fonction des habiletés de la personne à associer les graphèmes aux phonèmes.

En utilisant un corpus d'entraînement de dix textes du manuel scolaire Signet 3e année, adaptés au soutien phonétique par le GDA dans le cadre de la thèse de Mme Judith Beaulieu, les règles d'interprétation d'un moteur phonétique et de différentes composantes d'un système ont été raffinées et adaptées. C'est ensuite un second corpus de sept textes, aussi tirés du manuel scolaire Signet (3^e année), et fournis par Mme Judith Beaulieu, qui ont été utilisés pour valider le taux et les catégories d'erreurs du modèle d'interprétation phonétique du logiciel.

Les disciplines du génie du logiciel et les outils de conception d'architecture de systèmes ont permis de bâtir un prototype intégré dans un nouveau module d'extension du logiciel Word, de Microsoft. Les résultats indiquent que le soutien phonétique peut être automatiquement ajouté avec un taux de 2,56% d'erreur, tout en optimisant le temps de l'opération, car la durée du traitement manuel conventionnel est estimée à 15 minutes par page.

Mots-clés : logiciel, automate, apprentissage, phonétique, lecture, graphèmes, phonèmes

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AUTOMATED AND DEGRESSIVE PHONETIC SUPPORT SOFTWARE FOR DYSLEXIC, ALLOPHONE OR INTELLECTUALLY DISABLED PEOPLE

Patrick TREMBLAY

ABSTRACT

Literacy is essential for civic engagement and social participation. Yet a significant proportion of French-speaking Canadian citizens are illiterate or experience great difficulty in understanding written French. Whether it is because their native language differs from the one used in their living environment, or because of a learning or intellectual disability, major hurdles exist in gaining access to reading and to information for these groups of people. Indeed, reading French requires skills in interpreting a significant number of unstable correspondences between graphemes and phonemes.

Due to the specificities of French spelling, in which the pronunciation of a word is based on the ability to associate graphemes with phonemes, a large number of people find themselves at a disadvantage in their educational or professional setting.

Thus, from a method initially developed by the teacher Dominique Rolland, the *Groupe DÉFI Accessibilité (GDA)* has put forward a method for textual adaptation: phonetic support. Just as training wheels are mounted on a child's bicycle for his or her first rides, phonetic support is a mechanism that helps reduce the complexity of reading in French. It entails superimposing archigraphemes (the simplest written form of a sound) above the graphemes that the reader has difficulty associating to the phonemes and which potentially place them at a disadvantage. For example, the archigrapheme "o" would be written above the graphemes "eau" and "ault". In addition, silent letters are faded to grey.

By easing the interpretation of complex graphemes of written French, this adaptation method simplifies the task and allows certain groups of people to acquire the literacy skills needed to become autonomous.

Yet, the manual process of adding phonetic support to documents in Microsoft Word format requires considerable effort. Considering that the *Groupe Défi Accessibilité* wishes to produce educational textbooks adapted with phonetic support, such effort is too costly to ensure the viability of the project: 416 hours to adapt a textbook.

Consequently, this research aims to determine if it is possible to automate this task with an error rate below 10%. Furthermore, this research must establish whether a file management system can allow for the inclusion of degressive phonetic support, which would decrease the density of phonetic support included in the texts according to the person's skills in associating graphemes to phonemes.

By using a training corpus comprised of ten texts from the grade 3 textbook *Signet*, adapted with phonetic support by the *GDA* as part of Mrs. Judith Beaulieu's thesis, the rules of interpretation of a phonetic engine and of different components of a system have been refined and adapted. A second corpus of seven texts, also drawn from the *Signet* textbook (grade 3) and supplied by Mrs. Judith Beaulieu, was then utilized to validate the error rate and the categories of the software's phonetic interpretation model.

Software engineering and system architecture design tools have made it possible to build a prototype integrated into a new Microsoft Word plug-in module. The results indicate that phonetic support can be added automatically with an error rate of 2.56%, all the while optimising the operation time, since conventional manual processing time is estimated at 15 minutes per page.

Keywords : Software, automation, learning, phonetics, reading, grapheme, phonemes

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	3
Pertinence de la recherche	3
Objectifs de la recherche.....	4
Limites	4
Hypothèses.....	5
 CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	 7
1.1 Le modèle mésosystémique : une vision élargie de la problématique.....	7
1.2 Genèse de la complexification du français	10
1.3 Cadre législatif provincial, chartes et droits	11
1.4 Accessibilité universelle et designs universels	12
1.5 Typologie pédagogique.....	15
1.6 Modalités d'adaptation de textes et soutien phonétique	16
1.7 Revue de méthodes d'apprentissage de la lecture.....	19
1.8 Analyse langagière computationnelle.....	21
 CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	 25
 CHAPITRE 3 DÉMARCHE DE CONCEPTION DU LOGICIEL.....	 31
3.1 Méthodologie « Feature-driven development ».....	31
3.2 Problématiques de conception	34
3.2.1 Processus d'analyse des besoins et des exigences système	34
3.2.2 Soutien phonétique automatisé : modélisation d'une architecture	36
3.2.3 Recherche d'un moteur phonétique	43
3.2.4 Intégration d'un moteur phonétique (JAVA) à une plateforme C++ sous MS Word.....	49
3.2.5 Serveur UDP/IP : interface et services offerts	56
3.2.6 Adaptation du moteur phonétique au service du serveur UDP/IP	61
3.2.7 Interface personne-système sous Word: analyses et options	67
3.2.8 Conception d'un module d'extension de Word : algorithmes et naissance d'un prototype.....	72
3.2.9 Analyse de viabilité du module d'extension de Word	77
3.2.10 Conception de l'aspect dégressif du SPhone	80
3.2.11 Laboratoire et processus de conception de logiciels.....	86
3.3 Processus d'optimisation des règles du moteur phonétique	90
3.3.1 Premier exemple : le mot « fait » prononcé « f é », au lieu de « f ê »	91
3.3.2 Second exemple : la prononciation du phonème "ch" (mot "chez").....	92
3.3.3 Troisième exemple : les liaisons phonétiques.....	93
 CHAPITRE 4 DÉMARCHE EMPIRIQUE.....	 97
4.1 Conception de la démarche empirique.....	97

4.2	Exécution de l'expérience.....	98
CHAPITRE 5 RÉSULTATS		99
5.1	Présentation des résultats	99
5.2	Analyse et interprétation des résultats	100
5.3	Discussion des résultats	106
CONCLUSION 109		
RECOMMANDATIONS		111
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		139

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 Le design universel dans l’optique de l’accessibilité universelle. Tiré de Langevin et Rocque (Langevin et al., 2011a).....	13
Tableau 2 Extrait de la table de transposition proposée par le GDA. Tiré de Langevin (Langevin J., 2014).....	18
Tableau 3 Gabarit de la grille d’évaluation du SPhone	27
Tableau 4 Évaluation des moteurs phonétiques.....	47
Tableau 5 Résultats de la mise à l’essai.....	99
Tableau 6 Erreurs du SPhone dans le processus de validation formelle.....	100
Tableau 7 Erreurs observées dans les textes de référence du corpus d’entraînement	104
Tableau 8 Erreurs observées dans les textes de référence du corpus de validation finale.....	105

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 Modèle systémique de la situation pédagogique Tiré de Legendre (Legendre, 1993).....	8
Figure 2 Cycle des méthodes Agiles Tirée de (Vickoff, 2014)	25
Figure 3 Processus du "feature-driven development" Tiré de (Steve R. Palmer et Felsing, 2002), adapté par (Ramsin et Paige, 2008).....	31
Figure 4 Ajout du guide phonétique de Word 2013	38
Figure 5 Couche de service phonétique ajoutée à Word.....	44
Figure 6 Architecture du module d'extension et son interface avec le moteur phonétique	50
Figure 7 Serveur UDP/IP placé à l'interface entre le module d'extension de Word et le moteur phonétique	52
Figure 8 Diagramme de séquence simplifié du SPhone	54
Figure 9 Serveur UDP/IP	57
Figure 10 Diagramme de séquence simplifié de la solution envisagée	59
Figure 11 Phonétisation du mot "faim" par interaction avec le serveur UDP/IP.....	61
Figure 12 Module d'extension de Word.....	62
Figure 13 Liste partielle des classes du moteur phonétique	63
Figure 14 Diagramme UML sommaire des classes du moteur phonétique	66
Figure 15 Guide phonétique de Microsoft Word.....	67
Figure 16 Exemple de champ d'équation utilisé pour le guide phonétique	70
Figure 17 Positionnement du module d'extension de Word (plug-in) dans l'architecture	73
Figure 18 Processus d'ajout du soutien phonétique aux documents Word	75
Figure 19 Bouton d'action du module d'extension de Word.....	79
Figure 20 Vue statique du module de gestion du dossier des apprenants intégré dans l'architecture du SPhone	82

XVIII

Figure 21 Intégration de la gestion du dossier des apprenants dans Word	84
Figure 22 Composantes de l'environnement de laboratoire	88
Figure 23 Erreur phonétique avec le mot "fait"	91
Figure 24 Correction du phonème associé au mot "fait"	91
Figure 25 Erreur phonétique avec le mot "chez"	92
Figure 26 Correction du phonème associé au mot "chez"	93
Figure 27 Erreur phonétique avec la liaison entre "les" et "amis"	93
Figure 28 Correction de la liaison entre "les" et "amis"	95
Figure 29 Histogramme de la répartition des erreurs du SPhone par catégorie.....	102
Figure 30 Table de transposition Version 4.5 (Langevin J., 2015).....	131

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

FDD :	Feature-driven development
ÉTS :	École de technologie supérieure
GDA :	Groupe DÉFI Accessibilité
IES :	Intervention éducationnelle et sociale
II :	Incapacité intellectuelle
OA :	Orthographe alternative. S'écrit : « ortograp altêrnativ ».
OC :	Orthographe conventionnelle
LSA :	« <i>Latent Semantic Analysis</i> »
SPhone :	Nom du logiciel de génération du soutien phonétique dégressif conçu et réalisé dans cette recherche.
SRS :	Software requirement specifications
SWEBOK:	Software engineering body of knowledge
TS :	Texte simplifié
UdM :	Université de Montréal
UDP/IP :	User Datagram Protocol / Internet Protocol
VS :	Version sonore

LISTE DES DÉFINITIONS

Archigraphème: « graphème fondamental, représentant d'un ensemble de graphèmes correspondant au même phonème ou au même archiphonème (ex. O pour o, ô, au, eau, etc.). » (Catach, 2009)

Graphème :

1. La « plus petite unité distinctive d'un système d'écriture. » (Druide informatique, 2012)
2. La « plus petite unité distinctive et/ou significative de la chaîne écrite, composée d'une lettre, d'un groupe de lettres (digramme, trigramme), d'une lettre accentuée ou pourvue d'un signe auxiliaire, ayant une référence phonique et/ou sémique dans la chaîne parlée. Ex. : p, ou, r, ch, a, ss, er, dans pourchasser. » (Catach, 2009)
3. Simple/complex : le graphème est dit complexe s'il est composé de plus d'une lettre (ex. : « eau », « eault »). Autrement, s'il n'est composé que d'une seule lettre, il sera qualifié de simple.

Morphème :

« La plus petite unité significative de la chaîne orale. Ex. : pour, chass, er, dans pourchasser. », (Catach, 2009)

Phonème :

1. La « plus petite unité dépourvue de sens que l'on puisse délimiter dans la chaîne parlée. », (Druide informatique, 2012)
2. On décrit aussi le phonème comme étant « la plus petite unité distinctive de la chaîne orale, le son. Ex. : s, o, c dans soc », (Catach, 2009)

Soutien phonétique dégressif: Le soutien phonétique est qualifié de dégressif, lorsqu'il fait partie d'un processus dans lequel les archigraphèmes sont ajoutés de moins en moins fréquemment, suivant l'évolution de l'apprentissage de l'élève.

SPh: Soutien phonétique. À l'instar des roues d'appoint installées sur le vélo de l'enfant qui débute ses premières balades, le SPh désigne un mécanisme permettant de diminuer la complexité de la lecture du français. Il s'agit de superposer des archigraphèmes au-dessus des graphèmes dont l'association au phonème est difficile pour le lecteur, le plaçant ainsi en situation de handicap.

INTRODUCTION

Pertinence de la recherche

Plusieurs groupes de personnes éprouvent de grandes difficultés à lire le français écrit en raison de la complexité à effectuer l'association des graphèmes aux phonèmes.

Ces difficultés amènent notamment des retards significatifs d'apprentissage chez les enfants des deux premières années du primaire (Beaulieu, 2013), en plus de causer de sérieux soucis aux parents et professeurs d'enfants incapables de lire à partir de la troisième année. Des défis similaires se présentent, par exemple, aux personnes immigrantes allophones qui apprennent le français à leur arrivée. (Armand, 2005)

Ainsi, le Groupe DÉFI Accessibilité (GDA) a proposé une modalité d'adaptation de texte pour les élèves : le soutien phonétique. Conçue par Madame Dominique Rolland, une enseignante française qui voulait aider ses étudiants ayant des incapacités intellectuelles légères (Viens J. et al., 2012), cette modalité permet de faciliter l'interprétation des graphèmes complexes du français écrit pour ces personnes :

Le bate^oau blanc avance^s sur l'^oeau.

Le potentiel de cette recherche est de considérablement diminuer les coûts de l'adaptation, car l'ajout de soutien phonétique aux documents de format Microsoft Word demande un effort considérable, soit environ 15 minutes¹ par page. C'est donc une opération fastidieuse et coûteuse, car il en coûterait au moins 5 200\$ (416 heures) pour adapter un manuel scolaire.².

¹ Selon une estimation préliminaire d'une assistante de recherche du Groupe DÉFI Accessibilité de l'Université de Montréal.

² Viens J., Langevin J., M. Saint-Pierre et Rocque S. 2012. *Pour des technologies accessibles aux élèves handicapés ou en difficulté d'apprentissage ou d'adaptation*. Montréal, Québec: Éditions Nouvelles. Éditions Nouvelles.

Cette recherche est en ligne avec la perspective de l'objectif ultime du Groupe Défi Accessibilité : créer des manuels scolaires adaptés pour tous les niveaux d'éducation au Québec, de l'âge primaire à 18 ans.

Objectifs de la recherche

Ce projet de recherche vise à concevoir et à réaliser un logiciel qui ajoute le soutien phonétique aux documents francophones, de format Word, avec un taux d'erreur de moins de 10%.

Ce projet vise aussi à concevoir ce logiciel de façon à rendre l'ajout de soutien phonétique dégressif et personnalisé pour chaque élève. Ainsi, un orthopédagogue pourrait s'intéresser à réduire la densité de soutien phonétique ajouté à un texte, à mesure que les habiletés de l'apprenant progressent. Ce qui est donc décrit comme « ajout de soutien phonétique dégressif ».

Un modèle systémique, présenté dans la prochaine section, propose une vue d'ensemble situant ce projet de recherche dans un contexte élargi.

Limites

Cette recherche se circonscrit avec ces limites (Lx) :

L1 : Elle se limite à la langue française

L2 : Le logiciel proposé ajouterait le soutien phonétique aux textes dans le logiciel Word, de Microsoft, conjointement au système d'exploitation Windows. Les autres systèmes d'exploitation sont donc exclus de la portée de cette recherche.

L3 : Le texte, candidat au SPh, est préalablement simplifié. À noter que la simplification de texte est décrite à la section 1.6 - Modalités d'adaptation de textes et soutien phonétique.

L4 : Le rôle de l'apprenant est de lire le texte produit en extrant par le logiciel, mais il n'est pas l'utilisateur du logiciel, ni destiné à le configurer.

Hypothèses

Les hypothèses (Hx) suivantes sont émises :

H1 : Un logiciel, moteur de génération de soutien phonétique, serait en mesure d'automatiser le traitement manuel que font les chercheurs du GDA de l'UdM pour ajouter le soutien phonétique et pour estomper les lettres muettes.

H2 : Le taux d'erreur qu'effectuerait le logiciel, en ajoutant le soutien phonétique, serait inférieur à 10%.

H3 : Le logiciel permettrait de tenir un dossier, pour chaque étudiant, afin d'adapter les règles appliquées en fonction de ses apprentissages. Il s'agit de l'aspect dégressif de l'ajout du soutien phonétique.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

D'entrée de jeu, la revue de la littérature présente une mise en contexte du soutien phonétique, par le biais de l'analyse mésosystémique : les relations pédagogiques entre le Sujet, l'Agent et l'Objet, dans leur milieu, sont ainsi identifiées. En puisant dans l'histoire du français avec les recherches de Nina Catach, la genèse de la complexification des règles du français écrit est ensuite exposée. La présentation du cadre législatif provincial, des chartes et des droits des personnes handicapées mène ensuite à introduire les concepts d'accessibilité et de designs universels. Enfin, quelques types de pédagogie et quatre modalités d'adaptation de textes, parmi lesquelles l'accent est mis sur le soutien phonétique, sont présentés.

1.1 Le modèle mésosystémique : une vision élargie de la problématique

Le logiciel de gestion de soutien phonétique dégressif (SPhone) proposé dans cette recherche concerne toute personne qui éprouve des difficultés à lire le français. Favoriser l'éducation, donner accès à l'information et à la participation citoyenne : telles sont les visées sous-jacentes.

Afin de mieux situer les enjeux liés à ce logiciel, il importe de le situer dans un ensemble élargi, proposant l'identification des Sujets, Agents et Objets et de leur interaction dans leur milieu. Le modèle systémique de base se présente ainsi :

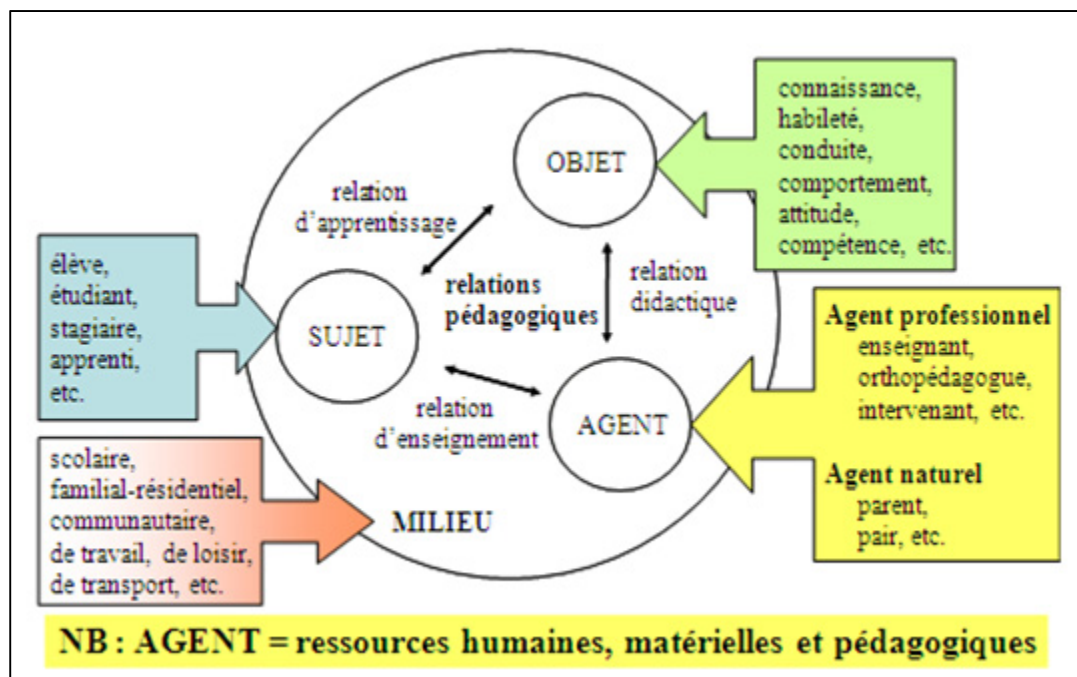


Figure 1 Modèle systémique de la situation pédagogique
Tirée de Legendre (Legendre, 1993)

L'**Objet** réfère à la littératie. Il s'agit ici de « l'ensemble des connaissances en lecture et en écriture permettant à une personne d'être fonctionnelle en société. » (Druide informatique, 2012).

Le groupe des **Sujets** réfère à toute personne éprouvant des difficultés à associer les graphèmes aux phonèmes de la langue française. À la base, il s'agit de toute personne ayant acquis et appris à maîtriser les archigraphèmes (o, an, etc.), et donc, ayant une conscience phonétique.

Ce groupe inclus par exemple :

- Tous ceux pour qui le français est une langue étrangère: allophones et anglophones;
- Les personnes présentant une incapacité intellectuelle légère;
- Les personnes ayant des troubles d'apprentissage (en raison d'une dyslexie, par exemple);

- Certains élèves du primaire.

Le groupe des **Agents** réfère aux personnes susceptibles d'être utilisateurs du prototype de logiciel qui sera conçu aux fins de cette recherche :

- enseignants (primaire, secondaire, éducation aux adultes);
- enseignants du français langue seconde pour le groupe des personnes allophones;
- orthopédagogues et orthophonistes;
- chercheurs en éducation (orthopédagogie);
- parents;
- éditeurs de manuels scolaires;
- organismes publics ou communautaires qui veulent que leurs textes soient accessibles à tous les citoyens, y compris ceux qui ont du mal à lire.

Le **Milieu** est l'endroit de vie où se déroule une situation pédagogique. Pour l'apprentissage ou l'utilisation de la lecture, ce sera souvent l'école ou la maison.

Issue du modèle systémique de base, une ébauche d'analyse fonctionnelle pourrait ainsi se décrire : le logiciel de gestion de soutien phonétique dégressif (SPhone) doit permettre à l'Agent de l'utiliser dans le milieu dans lequel le Sujet évolue. Ainsi, le logiciel doit pouvoir être utilisé, et le dossier de l'étudiant doit pouvoir être accessible aux consultations et aux mises à jour dans les environnements résidentiels et professionnels de l'Agent (Milieu scolaire, Centres de santé et de services sociaux (CSSS), gouvernement, Bureau de consultation en orthophonie).

Le logiciel, créé dans le cadre de cette recherche, aurait donc un impact sur la relation didactique Agent-Objet. En effet, en automatisant l'ajout du soutien phonétique aux documents Word, il offrirait un moyen à l'Agent de sauver du temps pour préparer l'Objet en adaptant rapidement des textes selon le niveau de maîtrise des correspondances graphèmes-phonèmes du Sujet et selon sa capacité à identifier les lettres à ne pas prononcer.

1.2 Genèse de la complexification du français

Madame Nina Catach, éminente spécialiste de la langue française et auteure du livre « L'Orthographe » (Catach, 2009), a documenté l'histoire et les différentes réformes qu'a subies l'orthographe française. Et ce, avec une rigueur exemplaire.

L'orthographe signifie : « écrire correctement » (Catach, 2009). Étant donné que le système scolaire actuel doit faire face à l'enseignement de la lourdeur des règles de cette orthographe, il est d'intérêt de mieux comprendre notre histoire.

En fait, nous sommes devant une écriture à deux niveaux, car « *Il y a certaines lettres qui ne se prononcent point, et qui ainsi sont inutiles quant au son, lesquelles ne laissent pas de nous servir pour l'intelligence de ce que les mots signifient...* ». (Catach, 2009)

Historiquement, notre orthographe actuelle est d'origine latine. Au départ, le français et le latin formaient une belle symbiose. Arriva ensuite une séparation des deux langues, qui influença la destinée du français, à travers toutes les éditions du Dictionnaire que cette langue aura vécu.

À travers les dix derniers siècles, l'influence des nobles et des bourgeois, des imprimeurs, des universités et des écrivains, mène à maintenir un niveau de complexité de la langue écrite; complexité surnoisement désirée. Et ainsi se complexifiaient les règles de l'orthographe, l'évolution des graphèmes et de leur interprétation phonétique.

L'héritage du français que nous avons actuellement démontre une série de décisions ayant été prises par les gens au pouvoir. Par des personnes bien éloignées des idées d'équité et d'accommodement valorisées par les Lois et chartes de notre époque, si nous rappelons cette décision historique, de la Première édition de l'Académie en 1694 : « *La Compagnie (...) déclare qu'elle désire suivre l'ancienne orthographe qui distingue les gens de lettres d'avec les ignorants et les simples femmes.* » (Catach, 2009)

Au regard des réflexions qu'elle entretient au sujet de la pédagogie, Mme Nina Catach avait déclaré que : « *l'orthographe du français est une orthographe difficile, et elle le restera.* » (Catach, 2009). Puis, au moment d'écrire ces lignes, le Soutien phonétique amène déjà une piste de solution afin de diminuer le niveau de complexité de la lecture du français, réduisant ainsi le facteur d'obstacle, et le handicap de la personne, face à la tâche de lecture d'un texte rédigé en français.

1.3 Cadre législatif provincial, chartes et droits

L'article 234 de la Loi sur l'instruction publique (Québec (Province), À jour au 1er novembre 2014b), du Gouvernement du Québec stipule que « *La commission scolaire doit (...) adapter les services éducatifs à l'élève handicapé ou en difficulté d'adaptation ou d'apprentissage selon ses besoins.* ». Au regard de l'accessibilité universelle et de cette loi, le Groupe DÉFI Apprentissage juge raisonnable, pour les personnes en situation de handicap, l'utilisation d'un accommodement comme le Soutien phonétique, dans une perspective d'inclusion scolaire.(Langevin et al., 2012)

La Concertation sur la refondation de l'école de la République, du Ministère de l'éducation nationale de France (Ministère de l'éducation nationale de France, 2012), décrit la volonté des pays membres de l'Union Européenne de « *promouvoir l'intégration des enfants handicapés dans l'enseignement général, (...) en apportant tous les moyens nécessaires à la mise en œuvre de ce mode de scolarisation* ». Le soutien phonétique, en tant que modalité d'adaptation de textes, est donc favorisé dans cette perspective.

À l'échelle de la ville de Montréal, le concept d'Accessibilité universelle est : « *l'accès à tous les bâtiments, à tous les services, à tous les programmes et toutes les informations pour tout le monde.* » (Ville de Montréal, 2010). Pour faciliter l'accès simplifié à l'information, la Ville de Montréal publie ainsi le site Accès simple (Ville de Montréal, 2014), qui utilise en outre l'ortographe alternatif (OA). L'OA est « *un outil spécialement conçu et enseigné à des personnes qui ont des limitations intellectuelles importantes* ». Le soutien phonétique, en

tant que modalité d'adaptation de textes comme l'**ortographe altérnative** l'est, se voit alors elle aussi favorisée.

Enfin, le Gouvernement du Québec a aussi adopté la Loi assurant l'exercice des droits des personnes handicapées en vue de leur intégration scolaire, professionnelle et sociale. En forçant toutes les municipalités de plus de 15 000 habitants à adopter « *un plan d'action identifiant les obstacles à l'intégration des personnes handicapées* » (Québec (Province), À jour au 1er novembre 2014a), le soutien phonétique devient ainsi un moyen de réduction de la complexité du français dans les publications des municipalités.

1.4 Accessibilité universelle et designs universels

Dans le Rapport de recherche pour les milieux associatifs de Montréal, Accessibilité universelle et designs contributifs, le GDA propose une définition formelle de ce concept :

L'accessibilité universelle est le caractère d'un produit de l'environnement (objet, espace et bâtiments publics, service, programme, information, signalisation, technologies ,etc.) qui, dans une optique inclusive, offre des facilitateurs ou qui ne présente pas d'obstacle à tous les utilisateurs, notamment à ceux qui, autrement, éprouveraient des limitations pour obtenir une satisfaction ou une utilisation dont le résultat est comparable à celui obtenu par les personnes qui ne sont pas susceptibles de subir de telles limitations. (Langevin et al., 2011b)

Voici comment le projet de conception d'un logiciel de gestion du soutien phonétique dégressif (SPhone) se situe par rapport à ces caractéristiques du design universel :

- « Optique inclusive » : Il est important de considérer les textes avec soutien phonétique ajouté par le logiciel comme un nouveau moyen pour maintenir en classe ordinaire des élèves en grandes difficultés, au lieu de les refouler en classe spéciale.
- En effet, ces textes adaptés par le logiciel pourront être utilisés par ces élèves sans que leurs pairs qui lisent bien n'en soient affectés. De même, dans cette optique inclusive, la disponibilité de textes ainsi adaptés réduira la surcharge de travail de

l'enseignant pour préparer la différenciation pédagogique rendue nécessaire par la présence d'un élève en grandes difficultés de lecture.

- «Résultat équivalent» : En simplifiant l'interprétation phonétique du texte, le logiciel aidera l'élève en difficulté à s'approcher du niveau de lecture de ses pairs «bons lecteurs», du moins au plan du décodage. La simplification du sens, ou du contenu du texte, demeure hors de la portée de ce logiciel. Toutefois, en décodant plus facilement les correspondances graphèmes-phonèmes, il est permis de penser que l'élève pourra concentrer davantage ses énergies à la compréhension du texte.

Ainsi, afin de pouvoir contribuer à l'accessibilité universelle à la lecture par le logiciel de ce projet, il est primordial d'opter pour le Design universel, car il s'agit d'un: « *Processus de conception de produits de l'environnement (objet, espace et bâtiments publics, service, programme, information, signalisation, etc.) devant satisfaire au caractère d'accessibilité universelle pour tous les utilisateurs dans une optique inclusive.* » (GDA, 2011).

Tableau 1 Le design universel dans l'optique de l'accessibilité universelle
Tiré de Langevin et Rocque (Langevin et al., 2011a)

Visée	Processus de design universel	Résultante
Accessibilité universelle	 ➤ Design élargi Design qui vise la conception d'adaptations ou d'aménagements en tenant compte d'un vaste ensemble de caractéristiques d'utilisateurs dans une optique inclusive. ➤ Design d'interfaces Design qui vise l'intégration harmonieuse d'adaptations spécifiques au design élargi dans une perspective inclusive. ➤ Design spécifique Design qui vise la conception d'adaptions ou d'aménagements à l'usage d'utilisateurs aux caractéristiques particulières.	Accessibilité universelle

Comme l'accessibilité universelle émerge du design universel, qui lui, regroupe trois types de design illustrés avec le Tableau 1, il est primordial d'en étudier soigneusement les concepts. (Langevin et al., 2011c)

- Le design spécifique vise la conception d'adaptations pour des utilisateurs aux caractéristiques particulières. En s'inspirant de l'ortographe alternatif, Madame Dominique Rolland a conçu le soutien phonétique dégressif, une modalité d'adaptation de textes pour lecteurs en difficulté.
- Le design d'interface vise l'intégration harmonieuse d'adaptations spécifiques au design élargi dans une perspective inclusive, *« s'ajoutant aux mesures communes conçues par design élargi, à l'usage d'utilisateurs dont les limitations exigent des adaptations ou aménagements supplémentaires pour atteindre un résultat comparable à celui obtenu par les personnes sans limitation. »* (GDA, 2011). Le SPhone s'inscrit dans le monde du design d'interface en intégrant harmonieusement l'ajout automatique de l'adaptation conçue par Madame Rolland dans les fonctionnalités du logiciel Word qui comprennent déjà des mesures communes pouvant satisfaire différents utilisateurs (ex. taille variable des lettres, zoom, fonction vocale, traducteur, etc.) dans une optique d'accessibilité universelle. C'est donc dans un effort de design d'interface que se situe le présent projet.
- Design élargi : *« design d'un produit de l'environnement qui comprend des mesures communes offrant des facilitateurs ou ne présentant pas d'obstacle au plus grand nombre d'utilisateurs possible dans une optique inclusive. »* (Groupe DÉFI Accessibilité, 2010). Lorsque le SPhone sera disponible, des concepteurs de manuels ou de site web pourront y recourir pour rendre leurs textes accessibles à un plus grand nombre d'utilisateurs. Par exemple, les textes d'*Accès Simple*, la section adaptée du site de la Ville de Montréal, sont déjà offerts en trois modalités : texte simplifié, orthographe alternatif et version sonore. Le SPhone rendra possible l'ajout du soutien phonétique aux textes simplifiés et ce, à peu de frais. Cette nouvelle modalité

répondra mieux aux besoins des citoyens qui, tout en éprouvant des difficultés à lire du texte simplifié, n'ont pas besoin d'une mesure aussi extrême que l'ortographe altérnatif.

1.5 Typologie pédagogique

Le Groupe DÉFI Apprentissage, dans son ouvrage *Trois pédagogies adaptées* (Langevin et Rocque, 2010), présente les différenciateurs conceptuels entre ces types de pédagogie. Afin de bien comprendre comment le soutien phonétique s'insère en milieu scolaire, les voici présentées :

- La pédagogie individualisée : ce type de pédagogie indiquerait, par exemple, une série de mesures générales à prendre pour accueillir des élèves partageant des caractéristiques similaires, au plan des incapacités. On pourrait par exemple proposer des manuels scolaires adaptés pour différents groupes, selon le niveau d'incapacité intellectuelle ou de trouble d'apprentissage. On pourrait ainsi proposer le texte simplifié, le soutien phonétique, ou l'ortographe altérnatif, selon les caractéristiques des élèves en difficulté.
- La pédagogie personnalisée : basée sur la pédagogie individualisée, cette pédagogie spécifiera des adaptations supplémentaires pour mieux répondre aux besoins d'un élève en particulier. Ici, la dimension «dégressive» du soutien phonétique pourrait jouer un rôle majeur en variant l'ajout phonétique aux besoins de chacun et en le réduisant selon les progrès observés.
- La pédagogie différenciée : cette pédagogie « *tient compte des différences individuelles pour y adapter une diversité de situations pédagogiques dans le but de permettre à chacun des élèves la meilleure réussite de ses apprentissages.* » (Langevin et Rocque, 2010). Ainsi, dans une même classe, une majorité d'élèves pourraient utiliser la version originale d'un texte tandis que les autres pourraient bénéficier de différentes mesures d'adaptation selon le type et la sévérité des

limitations à pallier : texte simplifié, texte simplifié avec plus ou moins de soutien phonétique, texte simplifié transposé en orthographe alternatif.

1.6 Modalités d'adaptation de textes et soutien phonétique

Le soutien phonétique est une modalité d'adaptation de textes. À ce sujet, le Programme de recherche et innovation 2010-2014 du Groupe DÉFI Accessibilité (GDA, 2009) indique que :

Beaucoup d'élèves éprouvent des difficultés à apprendre à lire, ce qui entraîne un retard scolaire grandissant à l'école primaire et un décrochage massif au secondaire. À l'âge adulte, des difficultés de lecture réduisent l'accessibilité à l'information, ce qui limite la participation citoyenne. [...] Au cœur des travaux du Groupe DÉFI Accessibilité (GDA), l'accessibilité à la lecture et à l'information se traduit par quatre modalités d'adaptation de texte, à choisir selon la sévérité des limitations cognitives. (GDA, 2009)

Ces modalités se présentent ainsi :

1. Texte simplifié (TS). Le texte simplifié permet d'augmenter l'accessibilité des textes. Ainsi, les livres pour enfants seraient résumés à un minimum (1-2) de phrases par page. Par ailleurs, le site web Accès Simple (Ville de Montréal, 2014) de la Ville de Montréal, résume les idées des phrases en ne conservant que l'information essentielle.

Dans le cadre de ses travaux au doctorat, Judith Beaulieu (Beaulieu, 2013) a évalué la productivité de l'utilisation de manuels scolaires avec textes simplifiés adaptés auprès d'élèves qui accusaient deux années de retard en lecture en début de 3^e année primaire. À cette fin, le manuel Signet (3^e année du primaire) a été adapté : même page couverture, mêmes thèmes, mêmes titres, mêmes illustrations aux mêmes pages, mais les textes sont simplifiés (plus faciles à lire et à comprendre). Après six mois d'utilisation, ces élèves ont progressé de six mois dans l'échelle d'apprentissage de la lecture.

2. **Ortograf altêrnativ (OA) :** Cette modalité est une mesure extrême de lisibilité pouvant être proposée à l'usage des élèves ou personnes qui ont des incapacités intellectuelles moyennes à sévères. Sauf exceptions, ces personnes demeurent généralement analphabètes après 16 ans d'éducation scolaire. Selon le professeur Jacques Langevin, dans le Didacticiel pour l'apprentissage de l'ortograf altêrnativ publié sur le web :

À 21 ans, après 16 ans dans nos écoles, ces personnes sont pour la plupart analphabètes. L'orthographe du français comporte plusieurs correspondances entre ce qui est écrit et ce qui est entendu. Par exemple, les lettres e-a-u, a-u et ô se prononcent toutes o. L'ortograf altêrnativ décomplexifie beaucoup la langue française écrite, le son o s'écrit toujours o. L'ortograf altêrnativ est un compromis, comme le braille. (GDA, À jour au 1er novembre 2014)

L'orthographe conventionnelle du français comprend quelques 150 correspondances instables entre des graphèmes et des phonèmes. En OA, il n'y en a que 35 et elles sont stables. De plus, les lettres muettes sont éliminées. À titre d'exemple, la phrase : « mon chat est noir » se transpose ainsi en OA :

« mon cha ê nouar ».

3. **Version sonore (VS) :** Texte préenregistré au format audio. Il peut être entendu, sur demande, par l'utilisateur d'un site web ou d'une application d'une tablette électronique, par exemple. La VS peut être combinée aux trois autres modalités.
4. **Soutien phonétique (SPh) :** Cette modalité laisse intact le texte en orthographe conventionnelle, tout en fournissant au lecteur hésitant des clés de décodage. Elle consiste à ajouter les archigraphèmes de l'ortograf altêrnativ au-dessus des graphèmes complexes de l'orthographe conventionnelle, et à estomper en gris les lettres muettes. Le soutien phonétique est une aide technique temporaire pour ceux qui éprouvent de grandes difficultés de lecture. Par exemple, la phrase « le bateau blanc avance sur l'eau. », serait transposée ainsi avec le soutien phonétique :

« Le bate^o blanc avance^s sur l'^oeau. ».

Un exemple de texte simplifié avec ajout du soutien phonétique est présenté à l'ANNEXE IV. Il faut donc évaluer si chaque graphème dans le texte est exprimé à sa forme phonique la plus simple. Les graphèmes sont, par exemple "p, ou, r, ch, a, ss, er, dans pourchasser. », (Catach, 2009). Si un graphème n'est pas exprimé à sa forme phonique la plus simple, comme dans le cas de « eau » qui peut être simplifié avec l'archigraphème « o », alors on superpose ce « o ». C'est donc la Table de transposition (Langevin J., 2014), dont un extrait est présenté au Tableau 2, qui propose cette normalisation des simplifications phonétiques. À noter que l'ensemble des trente-cinq graphèmes de base est présenté à l'ANNEXE III. La colonne « orthographe alternatif », de la ligne 5b du tableau fait donc état de la simplification du graphème « eau » avec l'archigraphème « o ».

Tableau 2 Extrait de la table de transposition proposée par le GDA,iré de Langevin (Langevin J., 2014)

no	phonèmes	graphèmes	orthographe conventionnelle	orthographe alternatif
1	[i]	i	il, épi, lyre	il, épi, lir
2	[e]	é	blé, aller, chez, épée, j'ai	blé, alé, ché, épé, j'é
3	[ɛ]	ê	lait, merci, fête	lê, mersi, fêt
4a	[a]	a	ami, patte	ami, pat
4b	[ɑ]	ɑ	pas, pâte	pa, pat
5a	[ɔ]	o	fort, donner, sol	for, doné, sol
5b	[ə]	o	mot, dôme, eau, saule, zone	mo, dom, o, sol, zone
6	[u]	ou	genou, roue	jenou, rou
7	[y] = [ɥ]	u	rue, vêtu, huile	ru, vêtu, uil
8a	[ø]	eu	peu, deux	peu, deu
8b	[œ] = [ɶ]	ø	peur, meuble	pør, mèbl
9	[ɐ]	e	premier	premié
10	[ɛ̃]	in	brin, plein, bain	brin, pilin, bin
11	[ɑ̃]	an	sans, vent	san, van
12	[ɔ̃]	on	ton, ombre, bonté	ton, onbr, bonté
13	[ɑ̃]	un	lundi, brun, parfum	lundì, brun, parfun

D'autres règles encadrent l'ajout du soutien phonétique ; elles sont décrites dans le document Extraits de l'orthographe alternatif (Langevin J., 2014), et sont sommairement présentées ici :

- **Liaisons** : « Chaque liaison est écrite selon sa valeur phonétique et est reliée au mot à l'aide de l'apostrophe. », car « tout ce qui se prononce s'écrit ». Par exemple, en n'utilisant que la base de trente-cinq archigraphèmes de l'OA (Langevin J., 2014), la liaison contenue dans l'expression « les avions » serait transposée par : « lè z'avion ».
- **Grammaire** : « La grammaire est limitée à ses manifestations prononcées dans la langue orale. ». Ainsi, la phrase « l'oie blanche avance sur l'eau » s'adapte ainsi avec l'OA : « l'oua blanch avans sur l' o ». L'application de cette règle se traduit donc par l'absence de la lettre « e » dans le mot « avance » de la phrase écrite avec l'orthographe standard, car elle demeure muette lors de la lecture du mot.

De plus, ces règles s'appliquent aussi pour l'ajout de soutien phonétique :

- Tous les graphèmes complexes des voyelles et leur soutien phonétique doivent être inscrits en rouge.
- Les lettres muettes doivent être estompées en gris.

Cette recherche vise donc à concevoir, à réaliser et à évaluer l'automatisation des opérations d'ajout de soutien phonétique aux textes de document Word, en respectant ces règles. Dans ce contexte, la prochaine section s'intéresse à placer cette technique selon la perspective d'un ensemble d'autres méthodes d'apprentissage de la lecture.

1.7 Revue de méthodes d'apprentissage de la lecture

La littérature indique que le développement de la conscience phonétique, dès l'âge préscolaire, favorise largement la performance en lecture-écriture des apprenants, à leur arrivée à l'âge scolaire. En ce sens, les auteurs d'une étude (Green, Peterson et Lewis, 2006) soulignent que dès le préscolaire, l'activité d'association du nom des lettres à leur correspondance phonétique favorise l'apprentissage de la lecture.

À la maternelle, des chercheurs ont aussi noté que certaines techniques d'écriture se sont avérées avoir un impact positif sur l'apprentissage de la lecture (Rieben et al., 2005): citons notamment la pratique « *d'écriture inventée* » (orthographe approchées), la pratique de copie de mots et la pratique d'écriture inventée avec rétroaction de l'adulte. C'est l'application de la technique d'écriture inventée, avec rétroaction de l'adulte, qui favorise « *l'obtention de scores significativement plus élevés pour l'écriture et la lecture de mots* » (Morin M.-F., Prévost et Archambault, 2009). L'élève est ainsi invité à laisser libre cours à sa pensée à l'écrit. Puis, l'apprentissage se développe en comparant son travail à la norme orthographique à l'occasion d'une révision en groupe. Le soutien phonétique, quant à lui, propose plutôt d'enseigner la correspondance des graphèmes aux phonèmes dans un texte existant, et ce, phrase par phrase.

Une autre étude mettait en lumière « *Les effets des entraînements phonologiques et multisensoriels destinés à favoriser l'apprentissage de la lecture chez les jeunes enfants* » (Bara, Gentaz et Colé, 2004). La comparaison de l'efficacité de l'utilisation de modalités d'apprentissage intégrant le toucher (apprentissage haptique), pour le développement de la conscience phonétique, distingue cette étude. En effet, deux méthodes ont été évaluées : « *HVAM (modalités haptique, visuelle, auditive et métaphonologique)* » et « *VAM (modalités visuelle, auditive et métaphonologique)* ». Avec l'ajout de la sollicitation du toucher de lettres en relief tridimensionnel, chez l'enfant, la méthode HVAM a obtenu de meilleurs scores que la méthode VAM, où le toucher n'intervenait pas. Le soutien phonétique ne sollicitant pas le toucher, quant à lui, se rapproche ainsi de l'approche « VAM » de cette étude.

À l'égard de l'aspect dégressif du soutien phonétique, adapté en fonction du dossier de progression de l'apprenant, une étude a documenté l'utilisation de la méthode de « *conservation des traces et réutilisation des mots* » (Charron, Montésinos-Gelet et Morin, 2009). Cette technique amène le professeur à conserver des traces des écrits des enfants avec un « *scrapbook* », ou un « *portfolio* », afin « *d'offrir des contextes qui permettent de réutiliser les mots écrits en orthographe approchées* » dans les exercices ultérieurs. Tout

en se rapprochant du concept de tenue de dossier de l'apprenant qu'intègre le SPhone, cette méthode se distingue par la tenue d'exercices basés sur l'évaluation des écrits des apprenants. Le dossier des apprenants du SPhone, quant à lui, est plutôt adapté en fonction de l'évaluation orale de l'apprenant qui lit le texte adapté avec le soutien phonétique.

En somme, les éléments de la technique d'ajout de soutien phonétique, proposée par Madame Dominique Rolland, sont donc complémentaires à de nombreuses autres méthodes utilisées par les enseignants auxquels ces études font référence. Tout en pouvant aussi rehausser la motivation des élèves avec l'utilisation de cette technique appliquée à des textes de la littérature jeunesse, elle se caractérise par l'exercice de l'apprentissage des correspondances graphèmes-phonèmes, de phrases complètes, en interpellant les modalités d'apprentissage visuelles et auditives.

L'automatisation de l'ajout du soutien phonétique mène à présenter, dans la prochaine section, un ensemble d'éléments théoriques de l'aspect computationnel de l'analyse langagière.

1.8 Analyse langagière computationnelle

Les algorithmes et méthodes d'analyse de texte sont largement utilisés, que ce soit notamment pour la correction de textes (Antidote³), la création de sommaires de textes (Text Analyst⁴), la traduction (Systran⁵), le texte à la parole, la reconnaissance de la parole, la recherche sémantique et le traitement naturel du langage (« *natural language processing* »). L'existence de ce vaste éventail de technologies langagières mène à situer les présents travaux au regard de perspectives théoriques.

³ <http://www.antidote.info/>

⁴ <http://megaputer.com/site/textanalyst.php/>

⁵ <http://www.systran.fr/produits-de-traduction/>

À l'égard de la correction ou de la traduction de textes, la littérature réfère à l'analyse sémantique latente (LSA : « *latent semantic analysis* »). À la base, ce type d'analyse implique la construction d'une matrice où des racines de mots sont associées à des concepts, puis à des documents. En tenant compte de la fréquence des occurrences de mots, et donc, de concepts, il est donc possible, par inférence, de classer et de trier des documents par ordre de pertinence. Sans toutefois tenir compte de la signification multiple d'un mot, cette technique a une large collection d'applications, notamment pour la recherche contextuelle, la recherche de documents, de synonymes, de cooccurrences ou pour la construction de sommaires de textes. Les travaux de Florence Reeder, « *Measuring MT Adequacy Using Latent Semantic Analysis* » (Reeder, 2006) illustre une application où la fidélité de la traduction d'un document est mesurée avec la méthode LSA. En effet, c'est l'analyse de l'équivalence sémantique entre deux documents qui permet de quantifier la fidélité de la traduction. Dans le domaine éducationnel, les travaux de (Landauer et Psotha, 2000) « *Simulating text understanding for educational applications with Latent Semantic Analysis: Introduction to LSA* » illustrent aussi une application où l'évaluation de la qualité d'un texte produit, par un étudiant, est effectuée en comparant son travail à une banque de données de références littéraires via la méthode LSA. Dans le contexte de l'apprentissage des correspondances graphèmes-phonèmes, avec le soutien phonétique, il serait alors envisageable d'utiliser une variation de l'algorithme LSA pour classer des documents en fonction du nombre d'occurrences d'un groupe de phonèmes donnés, pour offrir des contextes d'apprentissage spécifiques pour un apprenant.

Le groupe "The Stanford Natural Language Processing Group", de l'université Stanford, a publié le livre "Speech and Language Processing - Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition" (Manning, Raghavan et Schütze, 2008). Cet ouvrage fait notamment état de théories formelles, reconnues pour le traitement du langage naturel et de l'apprentissage machine, dont celle de la classification. De manière générale, les algorithmes de classification trient des éléments d'un corpus de textes en fonction d'un entraînement basé sur des règles. La classification pouvant typiquement être implémentée sous forme d'arbres décisionnels ou de régression logistique

(modèle de régression binomiale), les exemples d'applications sont nombreux : filtre de courriels indésirables, reconnaissance de la parole, correction de l'épellation de mots, détection de fraude ou reconnaissance du visage. Dans le domaine du traitement de la parole, les signaux acoustiques peuvent alors être associés à des patrons phonétiques, et ainsi être transposés sous forme de texte. Par ailleurs, Mesdames Sylvie Ratté et Luana Batista, dans le cadre des travaux du Laboratoire d'ingénierie cognitive et sémantique (LiNCS) de l'École de technologie supérieure, ont publié une recherche (Batista et Ratte, 2012) où un système d'algorithmes de classificateurs a analysé les sentiments dégagés par les messages Twitter à l'égard de l'opinion politique d'électeurs. Le jeu de données, en intrant, a été tiré de la base de données de messages Twitter de l'Université de Stanford. L'étude a démontré que ce système, composé de trois types de classificateurs, a obtenu des résultats comparables à celui d'un sondage d'opinion publique.

Dans le contexte de ce mémoire, un logiciel d'ajout de soutien phonétique automatisé pourrait justement tirer profit d'une méthode de classification. En disposant d'un ensemble de règles, structurées dans un arbre décisionnel, le découpage de chaque mot d'un texte en une séquence de phonèmes pourrait ainsi être effectué, par le biais d'un algorithme de parcours en profondeur. Au cœur des travaux de ce mémoire, l'utilisation d'un arbre décisionnel serait donc appropriée pour le traitement de l'association des graphèmes aux phonèmes d'une séquence de mots dans un texte.

La prochaine section présente la méthodologie utilisée, dans le cadre des présents travaux.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie de cette recherche est divisée en deux parties. D'une part, la conception du logiciel de gestion de soutien phonétique dégressif est basée sur une méthodologie utilisée en ingénierie. Elle se nomme : « *feature-driven development* » (Ramsin et Paige, 2008). Il s'agit d'une méthode de développement par cycles itératifs et incrémentaux, dite Agile. La Figure 2 (Vickoff, 2014), illustre cette notion de cycles. La méthodologie Agile *feature-driven development*, plus spécifiquement, permet de livrer un logiciel en planifiant les itérations de conception, de construction et de validation en se basant sur les caractéristiques souhaitées dans le logiciel. Ces caractéristiques sont documentées aux ANNEXE I et ANNEXE II.

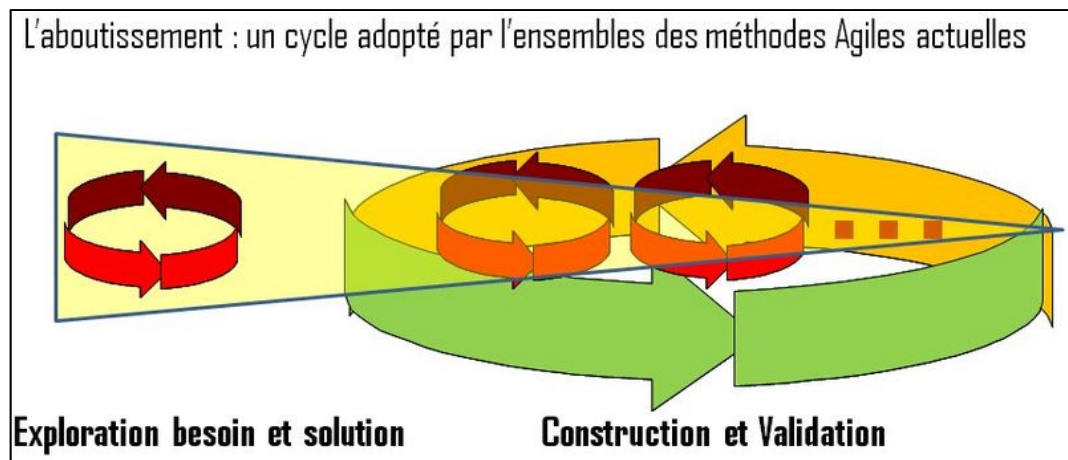


Figure 2 Cycle des méthodes Agiles
Tirée de (Vickoff, 2014)

D'autre part, la méthodologie d'optimisation et de validation du logiciel se divise en deux volets :

1. Optimisation des règles phonétiques du logiciel à l'aide d'un corpus de dix (10) textes (documents Word), fournis par le Groupe DÉFI Accessibilité. Ces textes, dont l'un d'eux est présenté à ANNEXE V, sont accompagnés de leur version préalablement adaptée avec le soutien phonétique.

- a. Pour chaque texte non adapté avec le SPh, en format Word, exécuter le traitement d'ajout de soutien phonétique avec le logiciel conçu dans le cadre de cette recherche.
 - b. En comparant le texte « solution », fourni par le GDA, au texte produit par le logiciel, identifier et catégoriser les erreurs commises par le logiciel. Ces catégories d'erreurs sont :
 - i. Absence du soutien phonétique;
 - ii. Mauvais choix de soutien phonétique;
 - iii. Mauvais alignement du soutien phonétique;
 - iv. Erreur de marquage (gris estompé) d'une syllabe muette;
 - v. Erreur de marquage (rouge) d'une voyelle;
 - vi. Erreur de marquage de liaison (« z' », « n' » ou « t' »).
 - c. Pour chaque erreur, identifier la source fautive dans le logiciel, et y apporter la correction. La source de l'erreur provient de l'un de ces trois modules :
 - i. Serveur phonétique : module d'interprétation des règles phonétiques générales (mots, verbes, liaisons phonétiques);
 - ii. Serveur de requêtes phonétiques: normalisation de l'extrait du moteur phonétique selon les trente-cinq archigraphèmes de la table de transposition de l'ANNEXE III;
 - iii. Module d'extension de Word : post-traitement des règles pour les adapter et les formater dans Word (alignement, couleurs, traitement spécifique du formatage des liaisons, etc.).
 - d. Tester le logiciel avec les modifications en validant que l'erreur identifiée est corrigée, puis, recommencer ce processus d'optimisation avec le prochain texte du corpus.
2. Mesure du taux d'erreur, à l'aide d'un second corpus de sept (7) textes fournis par le GDA, accompagnés de leur version adaptée avec le soutien phonétique. Le *taux d'erreur* correspond au nombre d'erreurs divisé par le nombre d'opérations

automatisées qu'effectue le logiciel, en ajoutant le soutien phonétique. Les erreurs sont réparties en ces six catégories :

- A. Absence du soutien phonétique;
- B. Mauvais choix de soutien phonétique;
- C. Mauvais alignement du soutien phonétique;
- D. Erreur de marquage (gris estompé) d'une syllabe muette;
- E. Erreur de marquage (rouge) d'une voyelle;
- F. Erreur de marquage de liaison (« z' », « n' » ou « t' »).

Une grille d'évaluation est utilisée. Cette grille, une fois remplie pour chacun des sept textes du corpus, est compilée pour calculer le taux d'erreur (le nombre d'erreurs divisé par le nombre d'opérations automatisées). Les résultats obtenus sont présentés au CHAPITRE 5.

Tableau 3 Gabarit de la grille d'évaluation du SPhone

Id	Nom du document	Durée automatisée (sec)	Nb de mots	Nb opérations automatisées	Nb erreurs	Taux d'erreur
1	SPH_2c_A_P1_tdm_p129					
2	SPH_A_P1_T1_p130-131					
3	SPH_A_P1_T2_p132-133					
4	SPH_A_P1_T3_p134					
5	SPH_A_P1_T4_p135-137					
6	SPH_A_P1_T5_p138-139					
7	SPH_A_P1_T6_p140-142					

	TOTAUX:					
--	---------	--	--	--	--	--

Préalablement à cette recherche, une collaboration multidisciplinaire a été établie avec la Faculté des sciences de l'éducation de l'Université de Montréal. Ainsi, dans le but de mieux comprendre le contexte et les visées de leurs travaux, les activités académiques spécialisées dans le domaine de l'Intervention éducationnelle et sociale (IES) ont été réalisées. Il s'agit du cours PPA6429, offert à l'UdM (Langevin J., 2008).

Ce cours, offert par le Groupe DÉFI Accessibilité (GDA) inscrit au sein de cette Faculté de l'UdM, vise la présentation d'un large spectre de thèmes:

- Clarification du domaine de l'intervention éducationnelle et sociale auprès des personnes qui présentent des incapacités intellectuelles.
- Structuration de la recherche.
- Société, droits des personnes handicapées, lois et chartes québécoises, canadiennes et internationales; valeurs et orientations.
- Cadres conceptuels, théoriques, technologique et méthodologique;
- Cycle de l'intervention éducationnelle et sociale :
 - Finalité, buts et objectifs.
 - Processus d'intervention, processus de réduction des dépendances.
 - Concept de compromis optimal.
- Caractéristiques cognitives et non cognitives associées aux incapacités intellectuelles : âge mental vs âge chronologique; définition du retard mental. Retard du développement intellectuel.
- Définition des concepts de déficience, incapacité, facteur d'obstacle et situation de handicap. En outre, on y définit qu'une personne se retrouve en situation de handicap, lorsque la tâche qui lui est prescrite n'est pas réalisable, considérant les caractéristiques de sa personne (incapacité physique, intellectuelle) en interaction avec son milieu. L'exemple de la personne paralysée (incapacité physique) en fauteuil roulant qui veut se rendre à une porte (tâche prescrite) en haut d'un escalier (milieu) est une implémentation de cette théorie de la personne placée en situation de handicap. L'ajout d'une pente, à côté de l'escalier, est un exemple d'adaptation qui réduit le facteur d'obstacle et élimine le handicap (l'incapacité) de la personne par rapport à la tâche de se rendre à cette porte.

Dans ce cours, le professeur Jacques Langevin a présenté les défis de la communication écrite pour les personnes qui ont des incapacités intellectuelles, ainsi que les différentes modalités d'adaptation de textes visant à diminuer la complexité de la lecture du français

pour ces personnes. Ces modalités d'adaptation de texte, visant à diminuer le facteur de complexité de la tâche de la lecture du français, sont les suivantes :

- Le texte simplifié (TS);
- Le soutien phonétique dégressif (objet du présent mémoire);
- L'ortographe alternatif (OA).

Une fois l'acquisition de ces connaissances terminée, il incombait de préparer le cadre des outils et connaissances théoriques nécessaires à la réalisation des travaux de recherche présentés dans ce mémoire. L'activité *Lectures dirigées* (PPA6010), supervisée par le professeur Jacques Langevin, a donc été suivie. Le chapitre de Revue de la littérature a conséquemment été créé de là.

Puis, au cœur de cette revue, les règles du soutien phonétique (Langevin J., 2014) ont été étudiées. En se basant sur ces règles, l'analyse des exigences du système a été faite, avec les perspectives Sujet (élève), Agent (orthopédagogue, professeur, parent) et Objet (texte). (Legendre, 2005). Ainsi, avec l'apport de la mise en contexte des visées de la recherche et du soutien phonétique, il devenait possible de démarrer la conception d'un logiciel qui permettrait de prendre des mesures pouvant être comparées aux objectifs. La démarche de conception du logiciel et ses défis, quant à eux, sont présentés au prochain chapitre.

CHAPITRE 3

DÉMARCHE DE CONCEPTION DU LOGICIEL

3.1 Méthodologie « Feature-driven development »

La méthodologie « feature-driven development » (FDD) est une méthode Agile, qui permet de développer et de livrer un logiciel, en utilisant des cycles itératifs et incrémentaux. Le processus FDD, illustré à la Figure 3, est réalisé en fonction des caractéristiques (« *features* ») jugées les plus importantes aux yeux du client.

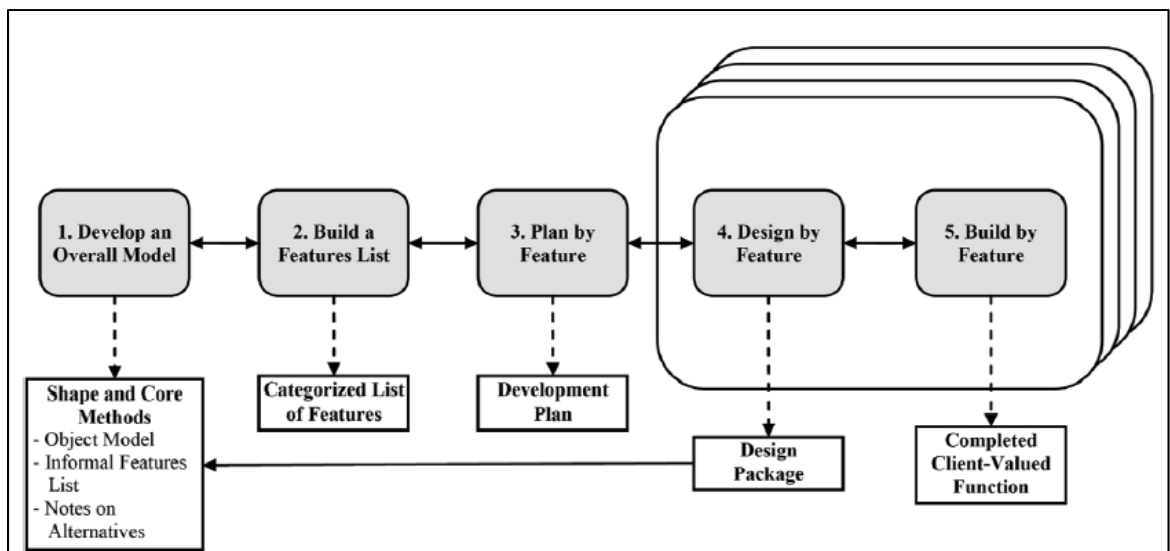


Figure 3 Processus du "feature-driven development"
Tiré de (Steve R. Palmer et Felsing, 2002), adapté par (Ramsin et Paige, 2008)

Cette méthodologie propose un ensemble d'activités ainsi implémentées :

1. Développement d'un modèle du domaine

Dans le contexte de cette recherche, ce sont des rencontres ayant eu lieu avec le professeur Jacques Langevin, de l'UdM, qui ont permis de dresser un portrait juste du domaine. À ce stade-ci, le concept du soutien phonétique et le portrait des utilisateurs du logiciel (professeurs, orthopédagogues, parents) ont été définis. La rédaction d'un Document de vision, présenté à l'ANNEXE I, a servi à documenter et à structurer ces informations.

2. Définition d'une liste des caractéristiques

Ces rencontres avec le professeur Langevin ont ensuite permis de définir une liste des priorités à l'égard des caractéristiques souhaitées. Alors que certaines caractéristiques étaient critiques (i.e. ajouter et aligner le soutien phonétique aux documents Word, estomper les lettres muettes, etc.), certaines étaient jugées importantes (i.e. ajout du soutien phonétique dégressif en fonction du dossier de progression de chaque élève), tandis que d'autres étaient plutôt « envisageables » (i.e. entendre un segment de texte sélectionné). L'ANNEXE II présente le détail de cette liste de caractéristiques définies sous forme d'analyse fonctionnelle.

3. Planification en fonction des caractéristiques

Du point de vue de la planification, il devenait évident que l'axe central du travail de design allait débiter par la résolution de la problématique de l'interprétation phonétique d'un texte, des mots, des liaisons et des verbes avec l'ensemble de toutes leurs formes conjuguées.

L'intégration d'un plug-in dans Word, compatible avec toutes les versions de Word et de Windows, devait ensuite prendre place. L'interaction de Word avec différentes couches de services phonétiques (conception d'un serveur UDP/IP, recherche et intégration d'un moteur phonétique) devaient ensuite être pris en compte. L'algorithme de traitement phonétique des textes devait ensuite être intégré dans un nouveau plug-in de Word.

Enfin, la conception d'un système de gestion des dossiers des étudiants était planifiée. En effet, les utilisateurs du système devaient pouvoir augmenter le niveau de difficulté de la lecture du texte, en retirant le soutien phonétique, en fonction des habiletés nouvellement acquises par les élèves.

4. Conception et construction

Pour chaque itération de développement planifiée, une conception plus détaillée est effectuée. Le logiciel Enterprise Architect est utilisé pour la modélisation, tandis que les langages C++ (.net) et Java sont utilisés pour la construction. Les tests unitaires, quant à eux, sont effectués à l'aide de ces éléments de référence :

- Le guide des règles de l'ortographe alternatif (Langevin J., 2014)
- La table de transposition (Langevin J., 2011), présentée à l'ANNEXE III

Afin de concevoir un logiciel de génération de soutien phonétique dégressif (SPhone), la recherche a été parsemée de plusieurs défis. Ces derniers font l'objet d'une analyse détaillée dans cette section, et sont structurés en termes de problème, besoins, et de caractéristiques de solutions envisagées. Voici la liste des problématiques rencontrées, dont l'analyse fait suite :

1. Processus d'analyse des besoins et des exigences système
2. Soutien phonétique automatisé : modélisation d'une architecture
3. Recherche d'un moteur phonétique
4. Intégration d'un moteur phonétique (JAVA) à une plateforme C++ sous MS Word
5. Serveur UDP/IP : interface et services offerts
6. Adaptation du moteur phonétique au service du serveur UDP/IP

7. Interface personne-système sous Word: analyses et options
8. Conception d'un module d'extension de Word : algorithmes et naissance d'un prototype
9. Analyse de viabilité du module d'extension de Word
10. Conception de l'aspect dégressif du SPhone
11. Laboratoire et processus de conception de logiciels

3.2 Problématiques de conception

La conception du logiciel a présenté plusieurs défis majeurs. Au cours de chacun de ces défis, un processus de résolution a été suivi afin de les résoudre. Cette section vise à les présenter, successivement.

3.2.1 Processus d'analyse des besoins et des exigences système

Le concept de base de ce travail de recherche est d'automatiser la tâche d'ajout de soutien phonétique aux documents francophones, de format Word, avec un taux d'erreur de moins de 10%. Afin d'analyser les besoins et les exigences du logiciel de gestion de soutien phonétique dégressif, il a été indiqué de définir un processus permettant :

- D'obtenir un accord sur le problème central et les besoins qui en découlent;
- D'établir la liste des parties prenantes intéressées en cette question;
- De définir les caractéristiques d'une solution idéale;
- D'obtenir un accord sur les priorités de ces caractéristiques;
- D'effectuer la transposition des caractéristiques priorisées vers les exigences systèmes.

Dans le contexte de ces travaux de recherche, le Document de Vision a été choisi pour documenter et structurer ce processus. Il est présenté à l'ANNEXE I. Le professeur Jacques Langevin, responsable du Groupe DÉFI Accessibilité, aura été la personne représentante des parties prenantes et de leurs besoins. Que ce soit pour représenter des auxiliaires de

recherche, des orthophonistes, des orthopédagogues, des parents ou des enseignants, le professeur Langevin aura été la source principale des besoins et des exigences du logiciel de gestion de soutien phonétique dégressif (SPhone).

Les caractéristiques du système ont été établies en fonction des perspectives Sujet et Agent, telles que présentées à la Figure 1 - Modèle systémique de base :

- La perspective « Sujet » représente la personne, ou le groupe de personnes ciblées pour lire les textes traités par le logiciel. Par exemple, le sujet pourrait être un élève qui présente une incapacité intellectuelle légère.
- La perspective « Agent », quant à elle, représente la personne, ou le groupe de personnes identifiées pour utiliser le logiciel de gestion de soutien phonétique dégressif : auxiliaires de recherche, parents ou enseignants, par exemple.

Une fois le Document de Vision rédigé, l'analyse fonctionnelle a été effectuée, et révisée par le biais de multiples itérations. Cette analyse est présentée à l'ANNEXE II. La conception de l'architecture du SPhone pouvait maintenant débiter.

3.2.2 Soutien phonétique automatisé : modélisation d'une architecture

Contexte

Le soutien phonétique est l'une de trois modalités d'adaptation de texte faisant partie des travaux de recherche du Groupe DÉFI Accessibilité : elle s'adresse à des groupes de personnes éprouvant des difficultés à lire le français. Que ce soit parce qu'elles sont allophones, qu'elles ont une incapacité intellectuelle ou un trouble dyslexique, ces personnes se retrouvent en situation de handicap face à l'exercice de la lecture du français écrit.

Problème

Le Groupe DÉFI Accessibilité planifiait produire des manuels scolaires adaptés avec le soutien phonétique, par l'intermédiaire de certains outils, tel que celui offert par le logiciel Microsoft Word. Or, ajouter le soutien phonétique, à un texte de format Word, représente une lourde tâche à accomplir manuellement. En effet, cet effort se quantifie : quinze minutes par page de texte à traiter, en moyenne, sont requises pour la réaliser (Beaulieu, 2012a).

Besoins

L'objectif de cette recherche étant d'étudier la possibilité d'automatiser la tâche d'ajout de soutien phonétique aux documents francophones, de format Word, avec un taux d'erreur de moins de 10%, il incombe subséquemment d'analyser ce qui compose cette tâche. Ce faisant, certains choix de composantes d'une architecture de logiciel pouvant être une solution seront évalués.

Par ailleurs, cette activité de design de la solution s'inscrit dans ce repère qu'indique le guide SWEBOK : « *IEEE definition [IEEE 610.12-90], design is both “the process of defining the architecture, components, interfaces, and other characteristics of a system or component and the result for [that] process.”* (P. Bourque, R.E. Fairley et eds., 2014). Ainsi, ce processus de définition de l'architecture, de ses composantes et des interfaces entre elles passe par l'analyse fonctionnelle de la tâche, ainsi que par l'analyse des règles qui guident le traitement du soutien phonétique.

Analyse fonctionnelle et des règles du soutien phonétique

D'entrée de jeu, afin d'initier un processus de réflexion concernant la modélisation des composantes d'un logiciel solution, des questions de nature fonctionnelle sont analysées. Elles se présentent ainsi :

1. Comment se décompose la tâche qui consiste à ajouter le soutien phonétique, aux textes rédigés en français ?

La prononciation du français, à l'oral, repose sur une base de trente-cinq phonèmes. Sous la forme écrite, ils sont donc représentés par un ensemble de trente-cinq archigraphèmes, normalisés dans la Table de transposition vers l'ortographe alternatif (Langevin J., 2011), présentée à l'ANNEXE III.

La tâche consiste donc, pour chaque graphème complexe du texte, à utiliser l'outil Guide Phonétique de Word pour manuellement indiquer quel archigraphème (phonème prononcé) y est associé. Il est à noter que le graphème est qualifié de « complexe » lorsqu'une interprétation est nécessaire pour effectuer une correspondance avec un phonème (i.e. un son). La troisième colonne de l'ANNEXE III présente l'expression la plus simple de chaque son : ce sont les archigraphèmes.

L'outil « Guide phonétique », du logiciel Word, existe par défaut. Il suffit simplement d'ajouter un bouton personnalisé. La section « toutes les commandes » propose la sélection « Guide phonétique ». La Figure 4 présente la façon d'activer cette option dans Word 2013. La méthode est similaire pour les versions antérieures :

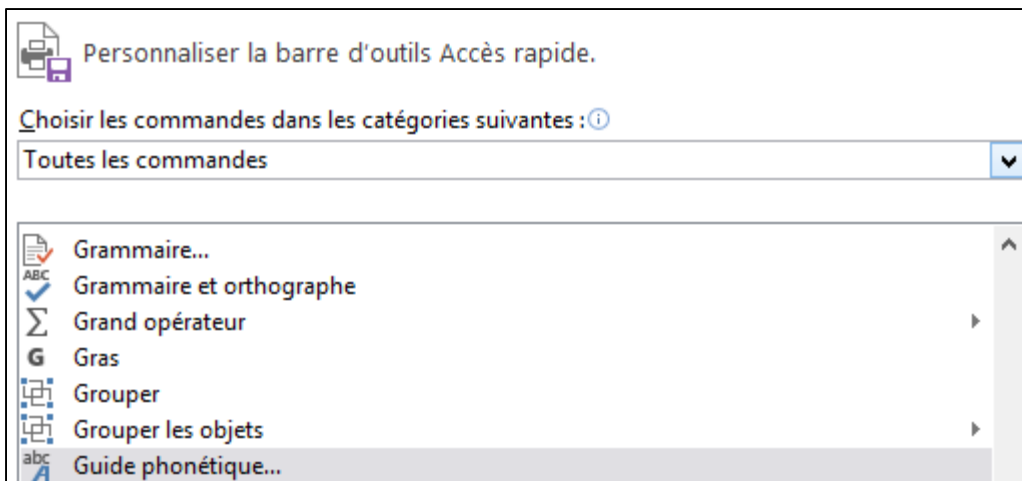


Figure 4 Ajout du guide phonétique de Word 2013

L'utilisation du guide phonétique est présentée à la Figure 15 de la section 3.2.7. L'exemple qui suit présente l'analyse du soutien phonétique qui serait ajouté à l'expression « Ces voitures » :

ê oua
Ces v oi tures.

En premier lieu, la prononciation du graphème « es », du mot « ces », est représentée par l'archigraphème « ê », le distinguant aussi d'une potentielle ambiguïté de prononciation que serait « esse ». Par la suite, la prononciation du graphème « oi », du mot « voitures », est précisée par l'ajout des archigraphèmes « ou » et « a ». Les graphèmes « u » et « r » ne présentant aucune ambiguïté, aucun soutien phonétique n'est ajouté. Enfin, comme le graphème final « es » demeure silencieux à la prononciation, il se voit estompé en gris, la même logique s'applique.

Ainsi, dans l'expression : « les bateaux », l'utilisateur doit sélectionner, tour à tour, le « es » de « les », puis le « eau » de « bateaux » afin d'y ajouter le soutien phonétique manuellement. Après avoir changé la couleur en rouge pour ces deux éléments (« es » et « eau »), l'utilisateur doit indiquer, via le Guide phonétique de Word, que l'archigraphème « ê » est associé à « es », tandis que l'archigraphème « o » est associé à « eau ». Puisqu'il est

muet, le « x » doit ensuite être estompé en gris. Par ailleurs, si des liaisons phonétiques existaient entre les mots, l'utilisateur devrait aussi les ajouter manuellement. La tâche devient rapidement lourde lorsqu'il s'agit d'adapter un manuel scolaire complet.

De plus, l'utilisateur doit aussi n'ajouter que le soutien phonétique requis, en fonction du niveau d'habileté du lecteur. De là l'utilité de l'exigence qui indique que « le logiciel doit permettre à l'Agent de tenir un dossier distinct pour chaque Sujet », citée dans le tableau des caractéristiques de l'ANNEXE II. L'utilisateur ajoute donc le soutien phonétique en fonction du niveau d'habileté d'un lecteur cible, lui offrant ainsi une pédagogie individualisée.

2. Des règles dictent-elles la méthode d'ajout de soutien phonétique ?

En effet, les règles qui guident cette tâche reposent largement sur les règles de transposition de l'orthographe conventionnelle (OC) vers l'ortographe alternatif (OA), cette dernière n'étant réservée qu'aux élèves ayant des incapacités intellectuelles moyennes à sévères. Le document Extraits de l'ortographe alternatif (Langevin J., 2011) présente trois règles (numéros 1, 8 et 9) qui s'appliquent à la tâche d'ajout de soutien phonétique à un texte. Pour des raisons de clarté, elles sont numérotées 1, 2 et 3 ici :

Règle 1. De la transcription phonétique à la transposition en OA : « La transposition de l'orthographe conventionnelle (OC) à l'ortographe alternatif (OA) passe par la transcription phonétique des mots, telle que fournie dans un dictionnaire, et par une «table de transposition» des phonèmes en graphèmes propres à l'OA. ».

Cette première règle mène à se demander comment un logiciel serait en mesure de découper des mots en sons (phonèmes). À première vue, le dictionnaire de la langue française semble proposer un élément de solution, car une transcription phonétique de chacun des mots y est clairement exposée. Cette ressource est-elle suffisante pour accomplir la tâche ? L'analyse des règles huit et neuf validera cette question.

Règle 2. Liaisons : « Chaque liaison est écrite selon sa valeur phonétique et est reliée au mot à l'aide de l'apostrophe. », car « tout ce qui se prononce s'écrit ». Par exemple, en n'utilisant que la base de trente-cinq archigraphèmes de l'OA (Langevin J., 2006-2011b), la liaison contenue dans l'expression « les avions » serait transposée par : « lè z'avion ».

Cette seconde règle mène au besoin d'identifier toutes les règles qui sous-tendent les liaisons, prononcées à l'oral.

Ces règles ne faisant pas partie du dictionnaire de la langue française, cette contrainte mène à imaginer d'autres pistes de solutions qui dépassent la seule considération du dictionnaire.

Règle 3. Grammaire : « La grammaire est limitée à ses manifestations prononcées dans la langue orale. ».

Ainsi, un logiciel devrait savoir distinguer, selon le contexte, les graphèmes qui doivent se prononcer de ceux qui ne doivent pas l'être.

Par exemple, le graphème « es », peut se retrouver dans l'expression : « tu es », ou « tu aimes ». Dans le premier cas, « es » se prononce « ê », alors qu'il demeure muet dans le second cas. Comment distinguer l'ensemble de ces cas de la langue française ?

Puis, à ces trois règles s'ajoute aussi la dimension de tous les verbes et de leurs formes conjuguées. Le dictionnaire ne présentant que les verbes à la forme infinitive, un autre dictionnaire devrait alors s'ajouter : celui de toutes les formes de conjugaisons de tous les verbes, incluant leur transcription phonétique.

Choix de conception de l'architecture envisagée

Étant donné que les règles de prononciation sont définies par le dictionnaire des mots, le dictionnaire des verbes et d'autres règles de liaisons, différentes options de conception doivent être considérées :

1. Première option : intégrer une base de données phonétique de tous les mots (dictionnaire de la langue) et de leurs flexions (i.e. genou, genoux), à un algorithme de traitement des règles de conjugaison de tous les types de verbes conjugués à tous les temps (Bescherelle), auxquels une analyse approfondie de la conception d'un module de traitement des règles de liaisons est ajoutée. Cette option exige de mettre la main sur de tels dictionnaires, en format électronique, offrant toutes les transcriptions phonétiques et les règles de liaison entre les mots. Or, les recherches effectuées n'ont pas démontré l'accessibilité de tels ouvrages, en format électronique. Et s'ils existaient, un doute subsiste au sujet du coût des licences de tels documents. Un automate, qui prendrait en charge l'ensemble des règles de liaisons, devrait aussi être conçu.
2. Seconde option : concevoir un moteur phonétique à partir d'une feuille blanche, en étudiant toutes les règles de prononciation existant dans la langue française. Cette option présente certains avantages, au niveau de la flexibilité du logiciel, mais présente toutefois un sérieux inconvénient : le temps d'analyse requis pour le concevoir dépasse la portée d'un projet de maîtrise, dont l'objet de recherche ne vise pas directement un tel objectif.
3. Troisième option : la culture de consommation de produits issus des technologies d'information et de télécommunications a fortement poussé l'émergence de la recherche et du développement de logiciels de traitement de la parole. Connus sous le nom anglophone de technologie « text to speech », elle se retrouve un peu partout, dans bons nombres d'applications. Que ce soit dans le GPS pour la voiture, ou

directement intégrée dans le téléphone cellulaire, elle fait partie du quotidien de la population.

Ainsi, même si les algorithmes de traitement du texte et de synthèse de la parole demeurent imparfaits, l'hypothèse se pose : si différentes technologies permettant d'interpréter un texte, sous forme écrite, ont été produites afin de permettre de synthétiser une voix artificielle, c'est donc affirmer qu'elles pourraient potentiellement être intégrées et adaptées aux fins d'ajout de soutien phonétique à un texte.

Est-il possible d'intégrer de telles technologies à une éventuelle application intégrée sous les fonctionnalités de Microsoft Word ? Sont-elles accessibles, du point de vue du coût des licences et de l'interface logicielle qu'elles offrent ?

Dans tous les cas, considérer concevoir un logiciel de synthèse de la parole représente un défi de taille qui dépasse lui aussi la portée d'un projet de maîtrise visant un autre objectif. Cette option est donc écartée, ouvrant alors la porte à l'analyse de ce qui existe sur les marchés commerciaux, et du logiciel libre (« open source »).

Face à ces options, des questions émergent :

1. Est-ce qu'un tel logiciel existe, pour agir à titre de moteur phonétique ?
2. Le découpage de mots en graphèmes et syllabes serait-il un service offert par ce moteur phonétique, ou par une autre couche de service ?
3. Le service de traitement des liaisons entre les mots serait-il traité par le moteur phonétique, ou par le module d'extension (« plug-in ») ajouté à Word ?
4. Est-il possible de personnaliser le logiciel Word, pour y ajouter une couche de service de traitement phonétique qui n'est pas offerte dans ce produit ?
5. Si oui, est-il possible de définir une interface communication entre Word et un éventuel moteur de traitement phonétique ?
6. Comment modifier un document Word pour y ajouter le soutien phonétique ?

7. Comment rendre ce système, composé d'une application Word et d'un moteur phonétique, compatible aux différentes versions de Word et de systèmes d'exploitation ? À cet égard, un choix a été fait : c'est Windows qui supporterait ce logiciel, dans le cadre de ces travaux de recherche. En effet, créer un système compatible à Microsoft Windows et Mac OS aurait doublé les efforts de conception et de développement, ralentissant substantiellement l'atteinte de l'objectif principal de cette recherche.

Les prochaines sections présentent les processus d'analyse et des réponses à ces questions.

3.2.3 Recherche d'un moteur phonétique

Contexte et problèmes

Concevoir un logiciel permettant d'automatiser l'ajout de soutien phonétique à un texte nécessite que les règles de prononciation de chaque syllabe, de chaque mot et de chaque liaison entre eux puissent être traitées. Non seulement doivent-elles être traitées, elles doivent aussi l'être avec un taux d'erreur minimum.

Dans le contexte où un logiciel permettant l'automatisation de l'ajout de soutien phonétique serait conçu et ajouté aux fonctionnalités de base de Microsoft Word, la recherche d'un moteur de traitement phonétique de type « text to speech » devient une question centrale à ce problème.

Ici, la logique est la suivante : si un logiciel existant permet de synthétiser la parole à partir du texte, c'est donc affirmer que les algorithmes de traitement phonétique de toutes les syllabes et de toutes les liaisons d'une langue écrite existent aussi.

Existe-t-il un logiciel synthèse de parole, de type « text to speech », qui ouvre la porte à sa logique interne ? Ainsi, tel un chirurgien branche un moniteur cardiaque ou de pression artérielle sur une personne, il deviendrait possible de se brancher sur la logique interne du

découpage de chaque phonème d'un texte, juste avant que ceux-ci ne soient traités par le module de synthèse vocale.

Exprimé du point de vue de l'ingénierie du logiciel, le défi devient donc celui de l'intégration des interfaces de deux systèmes hétérogènes, soit un nouveau logiciel « plug-in » conçu pour Word, et un logiciel de synthèse de la parole. L'existence ou la possibilité de créer une interface de communication entre ces systèmes devient alors un enjeu critique à la réussite de ce défi. La Figure 5 présente ce concept :

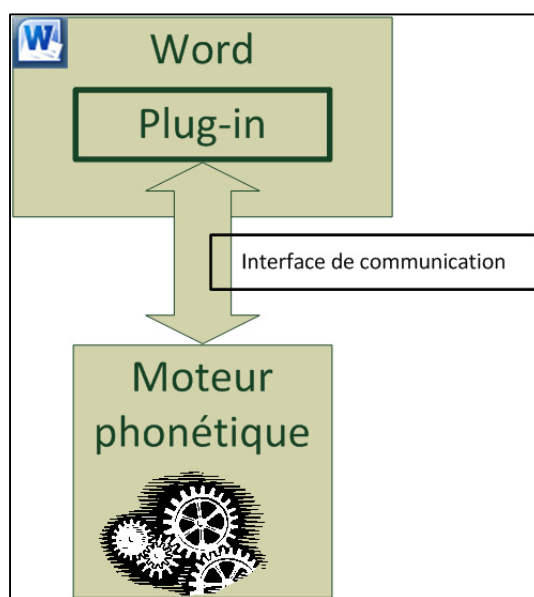


Figure 5 Couche de service phonétique ajoutée à Word

Méthodologie et critères de recherche

Le moteur de traitement phonétique recherché est du domaine de la synthèse de la parole à partir d'un texte, connu sous le nom anglophone « text-to-speech ».

La méthodologie de la recherche de ce moteur phonétique repose sur une grille d'analyse décisionnelle. En premier lieu, un ensemble de critères de sélection ont été définis. Puis, pour chacun des logiciels trouvés, une évaluation de chaque critère a été effectuée. La sélection finale a donc été guidée par le logiciel ayant obtenu le score le plus élevé. Il est à

noter que la cote a été jugée par l'auteur du mémoire, en fonction des exigences fonctionnelles et non-fonctionnelles auxquelles le SPhone devait satisfaire.

Tout d'abord, tous les critères de recherche sont décrits. Le tableau des résultats d'évaluation de chaque logiciel trouvé sera ensuite présenté, pour terminer avec le raisonnement de la sélection finale retenue.

Critères de sélection

1. **Langue** : le logiciel doit traiter les textes rédigés en français.
2. **Coût** : chaque licence doit être idéalement gratuite, ou inférieure à 20\$. Le maximum de points est accordé à ce critère, si la licence est gratuite.
3. **Interface logicielle** : capacité de l'interface logicielle de permettre au synthétiseur texte-parole (moteur phonétique) de s'intégrer comme composante du SPhone. Elle doit donc permettre une visibilité sur la représentation interne du texte, sur le découpage des mots en unités sonores (graphèmes), et sur la codification des phonèmes associés à ces graphèmes.
4. Une option est favorisée si le code source du logiciel est disponible.
5. S'il n'est pas disponible, alors le fabricant doit proposer une interface logicielle par le biais d'un Software Development Kit (SDK) bien documenté.
6. **Traitement des liaisons entre les mots**: un maximum de points est accordé au logiciel si ce traitement est fait convenablement. Par exemple, la phrase « Les oiseaux s'envolent. » devrait s'entendre « les zoiseaux s'envolent. Aucun point n'est accordé si les liaisons ne sont pas entendues, alors qu'elles devraient l'être.
7. **Qualité de la voix de synthèse** : un logiciel offrant une belle qualité de voix synthétisée se voit aussi favorisé. En effet, une voix de synthèse de bonne qualité peut être offerte comme caractéristique complémentaire à une version ultérieure d'un logiciel. Le maximum de points est accordé à une sonorité naturelle.

La prochaine section présente le résultat des évaluations des moteurs phonétiques qui ont été trouvés, en fonction de ces critères de sélection.

Tableau des évaluations de moteurs phonétiques

Afin de concevoir l'intégration d'un moteur phonétique au sein de l'architecture du SPhone envisagé, le tableau d'évaluation (Tableau 4) a permis de converger vers un choix raisonné et optimal. Tous les logiciels évalués supportaient le traitement du français écrit.

Tableau 4 Évaluation des moteurs phonétiques

Logiciels	Acapela	Nuance	
	Évaluation	Évaluation	
Coût	3/10	0/10	
Adaptabilité de l'interface	7/10	7/10	
Traitement des liaisons	10/10	6/10	
Qualité de la voix	9/10	8/10	
TOTAL	65,00%	52,50%	
Évaluations	Le coût d'un SDK est de 2000 euros. La licence « runtime » coûte quant à elle 200 €. Quoique la qualité de la voix soit excellente, et que celle de la documentation du SDK le soit aussi, le coût n'est pas acceptable.	Coût: 10 000\$ pour démarrer un contrat. Ajoutant 15\$ à 50\$ par licence, selon le volume, le coût n'est pas acceptable.	
	eSpeak	IBM ViaVoice	S.I. VOX / Vocalyze
	Évaluation	Évaluation	Évaluation
Coût	10/10	3/10	10/10
Adaptabilité de l'interface	8/10	9/10	10/10
Traitement des liaisons	4/10	5/10	7/10
Qualité de la voix	5/10	5/10	6/10
TOTAL	67,50%	55,00%	82,50%
Évaluations	Ce logiciel est « open source », mais il ne traite pas les liaisons convenablement. De plus, les règles phonétiques francophones ne sont pas encore de bonne qualité, par rapport à S.I. VOX / Vocalyze.	Instabilité des résultats fournis. Quoique moins dispendieux que pour ses concurrents évalués, le coût par licence est trop élevé.	Ce logiciel est aussi « open source ». Il supporte bien les liaisons. Conçu en Java, et malgré l'immaturité de l'interface logicielle, elle a la potentiel de bien s'adapter avec un effort de conception.

Le logiciel Acapela était remarquable, en ce sens où le caractère de la voix était d'une sonorité naturelle. D'ailleurs, un prototype de logiciel concernant les Habiletés Numériques Initiales (HNI) avait déjà été produit avec cette voix pour le Groupe DÉFI Accessibilité, en raison de sa sonorité naturelle. Ce prototype interactif, conçu par l'auteur de ce mémoire, est disponible sur ce site aux fins d'évaluation de cette voix de synthèse: <http://www.ptremblay.com/HNI> . De plus, la qualité de la documentation du SDK du

fabricant en faisait une solution de choix. Toutefois, le coût de l'accès au SDK (2000 €), ainsi que le coût par licence (200 €) étaient trop élevés : cette option a donc été rejetée.

La suite de logiciels de l'entreprise Nuance, quant à elle, présentait aussi une bonne réputation et un bon SDK. L'entreprise visant les marchés de grande distribution (ex. : mise en marché de GPS grand public pour la voiture), le coût de démarrage d'un contrat (10 000\$) a toutefois aussi mené au rejet de cette option.

Le logiciel ViaVoice, du fabricant IBM, était une option intéressante au préalable, car ce logiciel avait été utilisé dans le cadre d'un projet de fin d'études au baccalauréat (2006) de l'auteur de ce mémoire. L'objectif étant de démontrer la faisabilité de la transposition du français écrit, de l'orthographe conventionnelle (OC) à l'ortographe alternatif (OA). Par contre, l'instabilité des résultats phonétiques traités, le caractère fermé du code source (non modifiable), le manque de support du fabricant et le coût par licence rendaient cette option moins intéressante que les autres ayant été évaluées.

Le logiciel open-source eSpeak, quant à lui, était attrayant par son caractère gratuit et adaptable. Par contre, l'immaturité de sa capacité à traiter les règles phonétiques du français l'aura placé derrière d'un autre logiciel open-source s'étant montré plus mature, comme S.I. VOX / Vocalyze.

Ainsi, le logiciel S.I. VOX / Vocalyze (H. Collavizza et al., 2005)⁶ s'est révélé être une option de premier choix. En effet, même si l'aspect naturel de la voix de synthèse se situe derrière celle d'Acapela, la haute qualité du traitement des règles phonétiques du français et des liaisons entre les mots l'ont démarqué de ses concurrents évalués. Incluant le fait que son code source, écrit en Java, le rendait adaptable en vue de réaliser une interface avec le SPhone, peu importe le système d'exploitation cible, cette option a remporté l'évaluation avec l'honorable score de 82,5%.

⁶ http://users.polytech.unice.fr/~helen/SERVER_SI_VOX/pages/index.php?page=Accueil

Il est toutefois à noter que tous les moteurs phonétiques évalués éprouvaient des difficultés avec les règles de liaison entre les mots. Même un GPS, commercialisé récemment (2013) pour les voitures, disait encore des phrases telles que : « tournez à gauche sur la rue Bord de « l' » apostrophe eau ».

Le moteur phonétique optimal ayant été sélectionné, le défi est maintenant celui de l'intégrer à un module d'extension (« plug-in »), spécialement conçu et intégré sur Word. La prochaine section décrit cette problématique d'intégration, accompagnée de sa résolution.

3.2.4 Intégration d'un moteur phonétique (JAVA) à une plateforme C++ sous MS Word

Problèmes

Alors que l'extension de Word (plug-in) devant être conçue et ajoutée sous Word est construite avec le langage orienté-objet C++, le moteur phonétique S.I. VOX / Vocalyze est pour sa part codé en langage Java. Étant donné que Word est une propriété de l'entreprise Microsoft, mais que le langage Java n'est pas supporté par cette dernière, alors ce langage ne peut pas être utilisé pour concevoir un nouveau module d'extension de Word.

Ainsi, telle une personne native de Chine désirant établir une communication téléphonique avec une personne unilingue francophone, l'idée de concevoir une interface pour adapter la communication bidirectionnelle prend tout son sens, comme le montre cette architecture envisagée. Le défi est alors celui de pouvoir intégrer la composante « moteur phonétique », écrite en langage Java, avec le Plug-in de Word écrit en C++ :

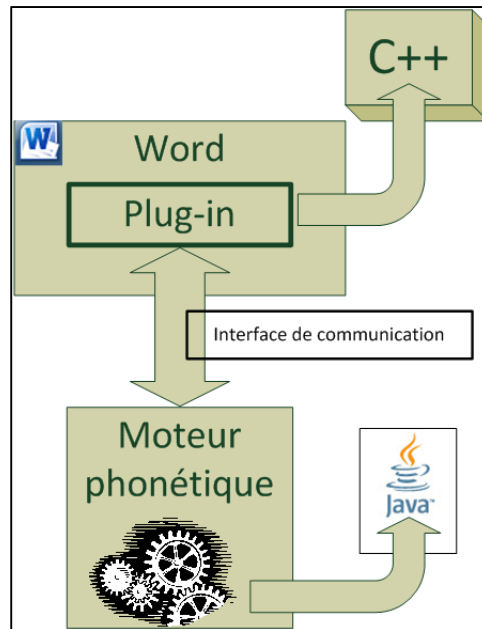


Figure 6 Architecture du module d'extension et son interface avec le moteur phonétique

Besoins

Imaginant une solution où un nouveau bouton, sous Word, permettrait d'ajouter automatiquement le soutien phonétique au texte d'un document, il faut :

1. D'une part, concevoir un nouveau logiciel, intégré sous forme de module d'extension sous Word;
2. D'autre part, établir une interface de communication avec un moteur phonétique pouvant traiter toutes les caractéristiques de la langue française écrite.

Comment un module d'extension de Word, écrit en langage orienté-objet C++, peut-il s'interfacer avec un moteur phonétique écrit en langage Java ?

Même s'ils sont tous deux orientés-objets, ils ne sont pas conçus pour s'intégrer l'un à l'autre sans mesures d'adaptations. Existe-t-il une façon de leur permettre de s'assembler ? La prochaine section présente ce processus de recherche, et une évaluation de deux solutions.

Solutions envisagées

En premier lieu, c'est Java Native Interface (JNI) qui a été considéré pour permettre à la composante Java de s'intégrer au module d'extension de Word, écrit en langage C++.

En effet, JNI est « *une bibliothèque logicielle d'interfaçage, intégrée nativement au JDK de Java, qui permet au code Java s'exécutant à l'intérieur de la machine virtuelle Java (JVM) d'appeler et d'être appelé par des applications natives (c'est-à-dire des programmes spécifiques au matériel et au système d'exploitation de la plate-forme concernée), ou avec des bibliothèques logicielles basées sur d'autres langages (C, C++, assembleur, etc.)* ».⁷

Ainsi, il était donc envisageable de considérer la possibilité d'interagir avec des méthodes de classes du moteur phonétique Java à partir du module d'extension C++ ajouté à Word.

Par contre, l'utilisation de JNI pour connecter deux langages de programmation fait perdre le caractère portable de Java. Cette contrainte retire la possibilité de déployer le SPhone sur une plateforme Mac OS, par exemple.

De plus, une architecture pour relier le plug-in de Word au moteur phonétique utilisant les services de JNI implique que les deux processus soient exécutés par le même système d'exploitation. Or, cette option laisse moins de flexibilité pour le cas où le moteur phonétique serait déployé sur un serveur accessible sur le réseau internet.

Le potentiel d'évolution du logiciel, à long terme, doit être considéré. Ces deux désavantages étant significativement contraignants en vue de l'adaptabilité du SPhone vers une architecture client-serveur sur internet, ou pour utilisation sur d'autres systèmes d'exploitation que Windows, d'autres options doivent être considérées.

Corollairement, en second lieu, c'est une solution de communication basée sur un protocole réseau qui a été imaginée. En effet, des requêtes phonétiques de format texte pouvant être

⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Java_Native_Interface

envoyées à un processus serveur, ce dernier, connecté au moteur phonétique, pourrait ainsi l'interroger, puis encoder et renvoyer une réponse au client. Cette figure présente cette option architecturale :

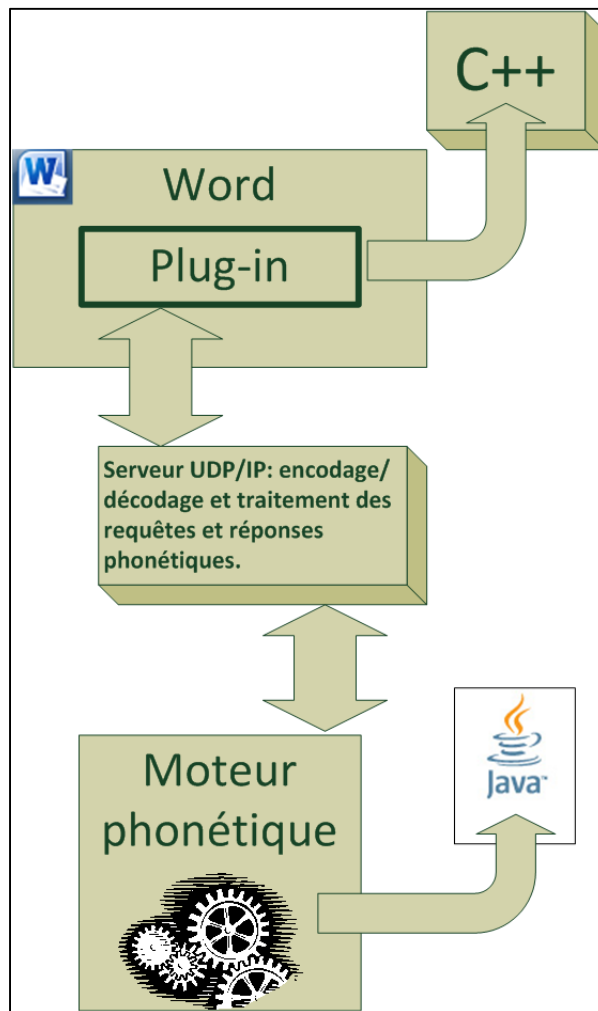


Figure 7 Serveur UDP/IP placé à l'interface entre le module d'extension de Word et le moteur phonétique

Les caractéristiques des communications entre le processus client, greffé au plug-in de Word, et au processus serveur, greffé au moteur phonétique, doivent donc être définies. Elles se présentent ainsi :

- Les règles de communication doivent être indépendantes du système d'exploitation.

- Les communications doivent être adaptables, peu importe si le client et le serveur résident sur un même ordinateur, ou si le serveur est déployé sur un serveur distant.

Conséquemment, une solution envisagée est l'utilisation de l'encapsulation des requêtes et réponses sous le *Internet Protocol* (IP). Ce dernier définissant les adresses IP source et destination, il est encapsulé sous un protocole de la couche de transport. Ainsi :

- Si la solution client/serveur est déployée sur le même ordinateur, alors l'encapsulation du message IP se ferait sous le protocole UDP (*User Datagram Protocol*).
- Si le serveur était sur internet, le protocole TCP (*Transmission Control Protocol*) serait encapsulé, pour assurer la fiabilité de la livraison des messages.

Favorisant la légèreté et la performance par rapport à TCP/IP, le protocole UDP/IP est donc choisi pour faire l'interface entre le module d'extension Word et le moteur phonétique pour les premiers prototypes. Profitant ainsi de l'absence de la nécessité de connexion préalable au transport de paquets de données comme dans le cas de TCP, il devient possible d'optimiser la performance du traitement des données transportées entre deux processus gouvernés par un même système d'exploitation.

La prochaine figure présente le diagramme de séquence des interactions entre le module d'extension de Word (C++), le service UDP/IP et le moteur phonétique (Java).

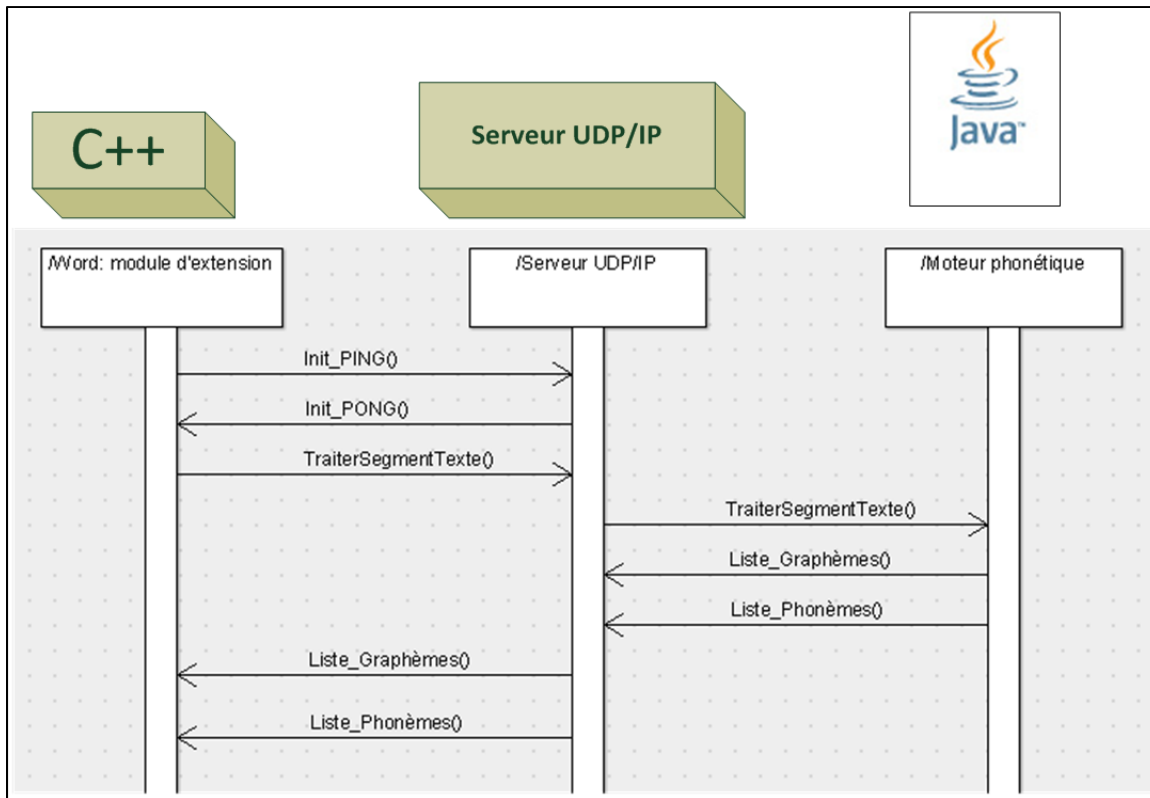


Figure 8 Diagramme de séquence simplifié du SPhone

1. La première interaction, de type « ping-pong », consiste à valider l'existence du serveur UDP/IP. L'extension de Word, écrite en langage C++, lance la requête « PING ». Si le serveur est à l'écoute, il renvoie la chaîne de caractères « PONG ». Dans le cas contraire, un message d'erreur est envoyé à l'utilisateur.
2. Le module d'extension de Word est responsable de segmenter le texte, phrase par phrase. Chaque segment de texte est envoyé au serveur UDP/IP, par la requête nommée « TraiterSegmentTexte() », dans cet exemple.
3. Le serveur UDP/IP reçoit alors le segment de texte. Il est responsable de créer une instance de moteur phonétique, si elle n'existe pas encore, et de lui lancer le segment de texte à phonétiser. Le moteur phonétique, à l'aide de plusieurs classes, règles et algorithmes, traite le segment de texte.
4. Le moteur phonétique a été adapté pour renvoyer deux listes distinctes au serveur UDP/IP, soit une liste de graphèmes et une liste de phonèmes. Les items de ces deux

listes correspondent les uns aux autres, dans la même séquence : chaque item graphème est associé à son item phonème.

5. Le serveur est alors responsable d'encoder ces listes au format du protocole UDP/IP, puis, de les acheminer au module d'extension de Word qui les décodera à son tour.
6. Le module d'extension de Word est alors responsable de traiter les règles d'ajout et d'affichage du soutien phonétique au-dessus du segment de texte en cours de traitement, puis de traiter les prochains segments de texte.

Raisonnement de la solution retenue

Profitant de la simplicité et de la flexibilité de messages pouvant être échangés et encodés entre deux processus avec le protocole UDP/IP, l'absence de messages de connexion propres aux règles du protocole TCP favorise ainsi la performance. En effet, alors que le plug-in sous Word traite deux messages de communication (envoi/réception) pour chaque segment/phrasedu texte, le temps de traitement total d'un texte s'en voit ainsi légèrement optimisé.

De plus, le fait d'encoder des messages échangés sous les règles du protocole UDP/IP facilite le passage à l'encodage sous TCP/IP. Cette voie pouvant alors être envisagée dans le cas où le moteur phonétique était mis en service sur un serveur accessible sur le réseau internet. Cette considération laisse ainsi la possibilité à plusieurs ordinateurs « clients » d'interroger un seul serveur phonétique, sans égard à la concurrence d'accès.

Alors que le problème de l'interface de communication entre le plug-in sous Word et le moteur phonétique est résolu, la prochaine section présente les difficultés liées à l'utilisation de Word comme interface utilisateur principale, par rapport à d'autres options envisagées.

3.2.5 Serveur UDP/IP : interface et services offerts

Problème et besoins

Afin d'automatiser la tâche d'ajout de soutien phonétique aux documents francophones, de format Word, avec un taux d'erreur de moins de 10%, le module d'extension de Word a besoin de connaître l'identité des phonèmes associés à l'interprétation orale (phonétique) des segments de textes du document chargé en mémoire.

Or, entre les chaînes de caractères que composent le texte et leur interprétation phonétique, il existe toute une série de stages de traitement que Word n'est pas en mesure d'exécuter par les fonctionnalités standards qu'il offre. Étant donné que le moteur phonétique hérite de la capacité d'interpréter phonétiquement les segments de texte qui lui sont fournis grâce à ses algorithmes « *text-to-speech* », un module d'extension ajouté à Word doit pouvoir interagir avec ces services.

La Figure 9 indique où se situe cette interface dont il est question.

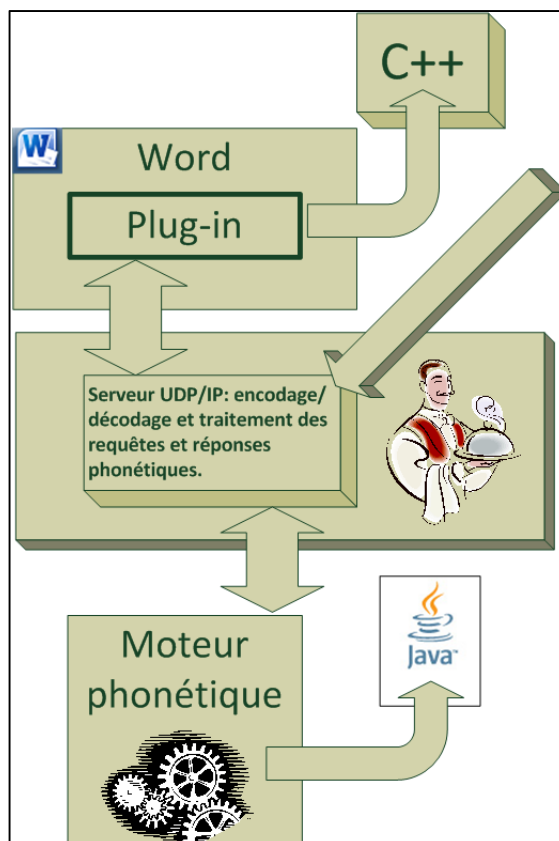


Figure 9 Serveur UDP/IP

Caractéristiques

Le module d'extension de Word, écrit en langage C++, doit avoir accès à certains services critiques de la part du moteur phonétique, écrit en langage Java. C'est par l'intermédiaire de ces services que les algorithmes du module d'extension Word sont en mesure de traiter un texte, et d'ajouter le soutien phonétique en fonction des règles prescrites.

Le serveur UDP/IP, faisant l'interface de communication entre ces deux composantes, doit être en mesure de fournir ces services :

1. Être un processus latent à l'écoute de requêtes UDP/IP, et prêt à y répondre.
2. Valider le statut de la connexion et le statut du moteur phonétique.

3. Permettre au module d'extension de Word de soumettre un segment de texte aux fins d'analyse phonétique par le moteur phonétique.
4. Décapsuler les messages UDP/IP qui lui sont fournis.
5. Créer et instancier les composantes du moteur phonétique.
6. Soumettre un segment de texte au moteur phonétique, par l'intermédiaire des références aux instances créées.
7. Obtenir, du moteur phonétique, les listes de phonèmes et de graphèmes issues de l'interprétation du segment de texte fourni.
8. Encapsuler et renvoyer ces listes au module d'extension de Word, selon les règles des protocoles UDP/IP.

Solution envisagée

Le serveur phonétique est, techniquement, écrit en langage Java⁸. La classe principale est un fil d'exécution (*thread*) à l'écoute des clients requérant les données (i.e. module d'extension de Word). Pour ce faire, c'est donc l'implémentation de l'interface Java « Runnable » qui permet de créer ce fil d'exécution sous le système d'exploitation : « public class myThread implements Runnable ». Les activités 1 (new UDPSever()) et 2 (new StartThread()), du diagramme de séquence simplifié illustré à la Figure 10, présentent ces fils d'exécution.

⁸ Le code source du serveur UDP/IP pour le SPhone est adapté de <http://www.roseindia.net/java/example/java/net/udp/udp-erver.shtml>

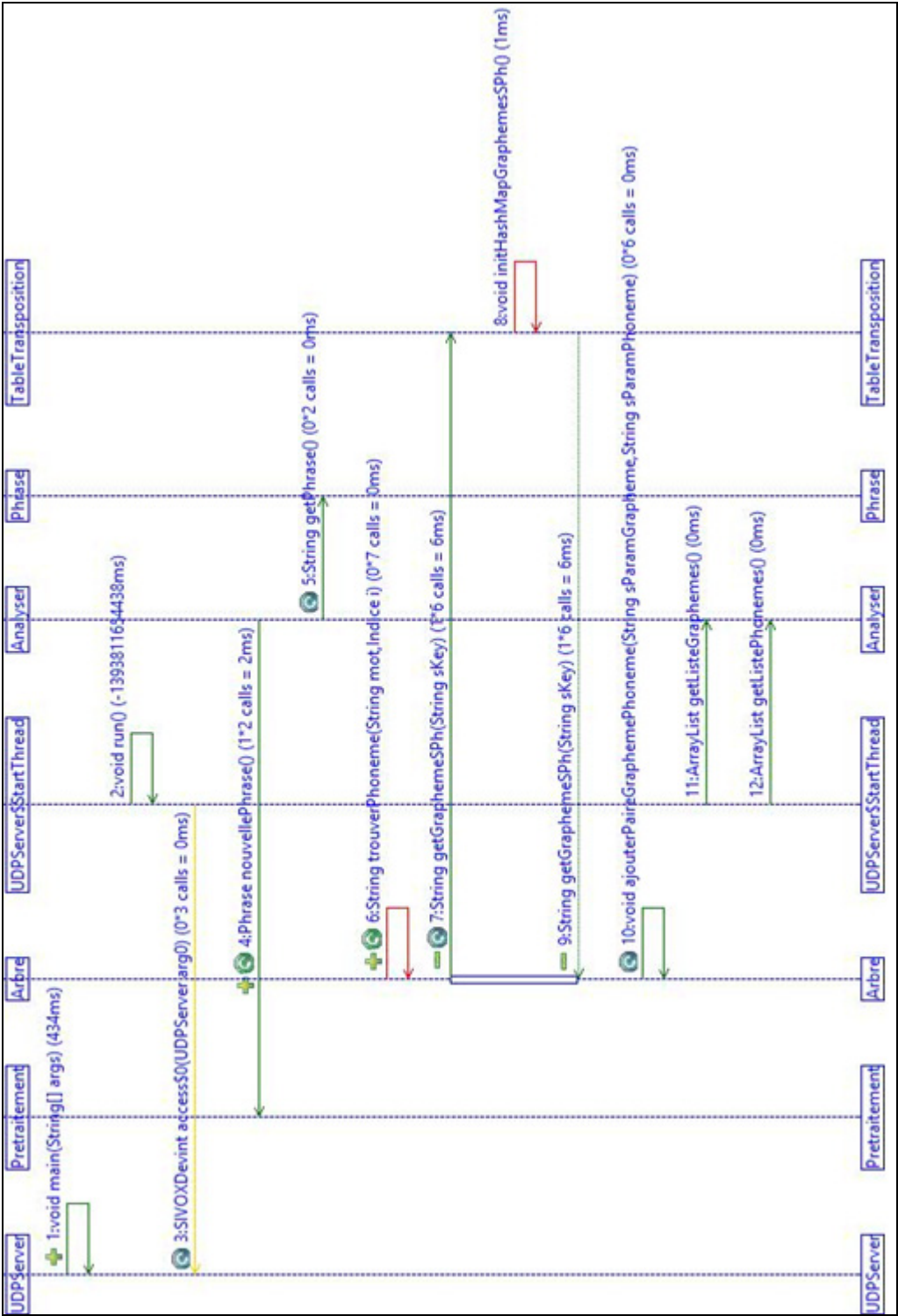


Figure 10 Diagramme de séquence simplifié de la solution envisagée

Le moteur phonétique, quant à lui, prend donc existence en mémoire lorsque l'instance de la classe `SIVOXDevint` est créée : « `private SIVOXDevint moteurPhonétique = new SIVOXDevint()` ». L'activité 3, du diagramme de séquence représente cette instantiation.

Le moteur phonétique étant instancié en mémoire, il est prêt à traiter le segment de texte, que le Serveur UDP/IP lui fait parvenir. Les activités 4 (`Phrase nouvellePhrase()`) et 5 (`String getPhrase()`), effectuent un prétraitement du segment de texte : découpage en phrases et en mots.

La 6^{ième} activité, « `trouverPhoneme` », est une méthode récursive qui permettra alors de découper les mots en unités phonétiques, en se basant sur des règles qui guident cet automate (fichier « `regles.txt` »). Par exemple, la correspondance du graphème « `au` » au phonème « `o` » y est définie de cette façon : `[[ au ]] -> o`.

Les 7^{ième} et 8^{ième} activités, « `Arbre getGraphemeSPh(String sKey)` » et « `TableTransposition initHashMapGraphemesSph()` », préparent la référence à la table de hachage de la classe `TableTransposition`. Cette dernière adapte le langage d'automate du Moteur phonétique au langage de la table de transposition (Langevin J., 2011) du GDA. Par exemple, si cette règle `[[ aim ]] (C|T) -> e~` du moteur phonétique détermine qu'une unité phonétique d'un mot correspond à « `e~` », comme dans le cas du mot « `faim` », alors la table de transposition du GDA dictera que c'est l'archigraphème « `in` » qui doit y être associé.

Les activités 10, 11 et 12, qui débutent avec « `Arbre ajouterPaireGraphemePhoneme(...)` », préparent ainsi la chaîne de paires graphèmes-phonèmes, afin que le Serveur UDP/IP retourne l'information au module d'extension conçu pour Word. Dans l'exemple du mot « `faim` », le soutien phonétique « `in` » serait alors ajouté au-dessus du graphème « `aim` » du mot « `faim` ». Dans ce design, à l'instar du stéthoscope utilisé pour écouter le battement cardiaque sous une cage thoracique, le moteur phonétique a été adapté pour offrir une vue interne de la mécanique des algorithmes « `text-to-speech` », juste avant que le texte ne soit synthétisé en parole. Les données sont maintenant injectées, sur le plan des graphèmes et des

phonèmes, à l'intérieur de vecteurs dynamiques prévus : listeGraphemes et listePhonemes. Puis, ils sont retournés à Word via le serveur UDP/IP, comme en témoigne la Figure 11.

```
Phonétisation du segment: faim
Retour du segment phonétisé (listeGraphemes): _~f~aim~_~
Retour du segment phonétisé (listePhonemes): \~f~in~\~
```

Figure 11 Phonétisation du mot "faim" par interaction avec le serveur UDP/IP

À noter que tous les graphèmes et phonèmes sont séparés du caractère « ~ », avant d'être renvoyés au client (Word add-in). C'est donc grâce à cette nouvelle mécanique que le module d'extension de Word C++ peut appeler aux services du moteur phonétique Java.

La prochaine section, pour sa part, décrit un autre défi : comment le moteur phonétique, composé de soixante et onze (71) classes initialement conçues et assemblées pour des fins de synthèse vocale, a pu être adapté pour se connecter à cette interface.

3.2.6 Adaptation du moteur phonétique au service du serveur UDP/IP

Problème et besoins

Afin que le module d'extension de Word puisse automatiser l'ajout de soutien phonétique, il doit avoir accès à des services d'un moteur d'interprétation phonétique. Étant donné que ces services doivent passer par une interface UDP/IP, ce moteur phonétique doit y être adapté.

La Figure 12, présente la situation de cette composante qui doit fournir les services d'interprétation phonétique au serveur UDP/IP :

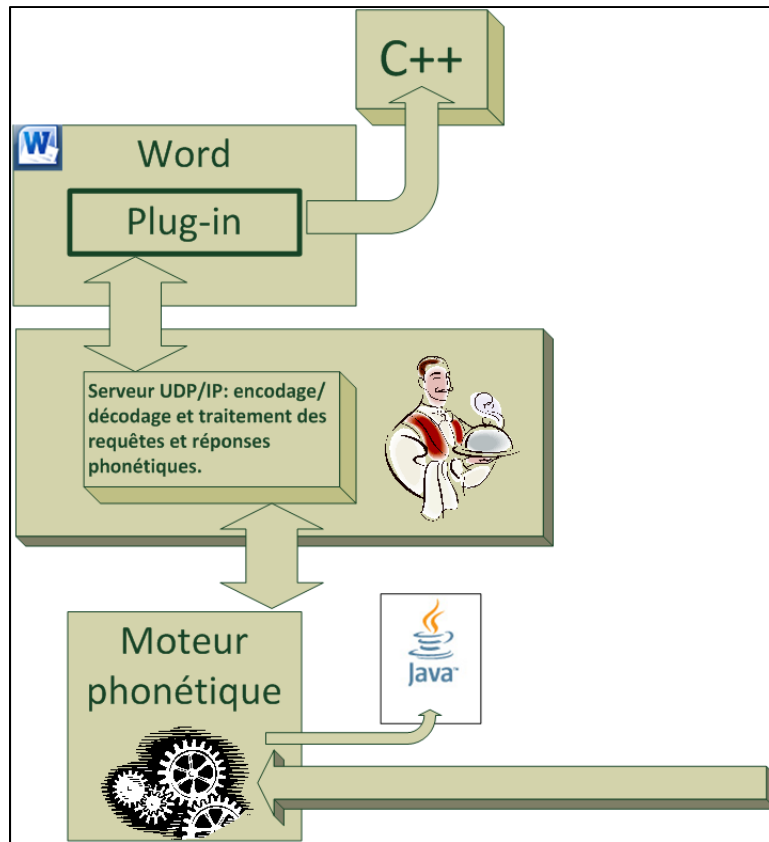


Figure 12 Module d'extension de Word

Le moteur phonétique S.I. VOX / Vocalyze, sélectionné pour être intégré à l'architecture, contient soixante et onze (71) classes Java. Afin d'offrir les services requis par le module d'extension Word, il est nécessaire que le serveur UDP/IP puisse instancier et accéder à des services spécifiques du moteur phonétique. La Figure 13 présente la liste partielle des classes qui ont dû faire l'objet d'une analyse aux fins d'élagage.

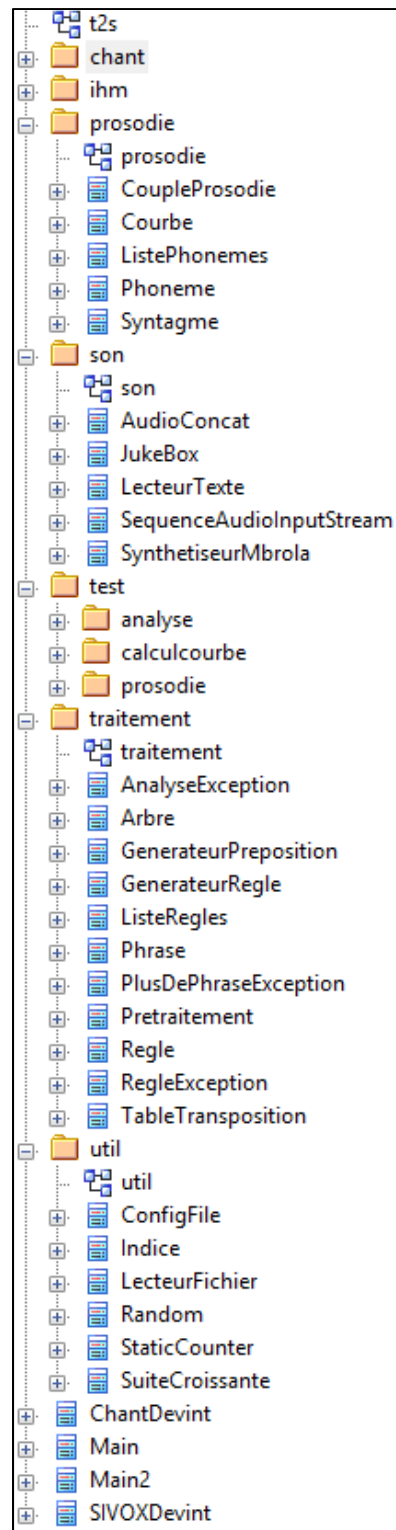


Figure 13 Liste partielle des classes du moteur phonétique

Le moteur phonétique devant pouvoir fournir la correspondance parlée (phonème) de chaque unité de son écrite (graphème) qui lui était fournie, comment les algorithmes de traitement phonétique étaient-ils conçus dans cet engin « text-to-speech » ? Comment ces algorithmes pouvaient-ils offrir l'information spécifiquement requise pour se connecter à l'interface du serveur UDP/IP ?

Analyse

L'objectif de cette analyse est de déterminer quelles classes peuvent fournir l'information au regard d'une chaîne phonétique parlée, afin qu'une liste de graphèmes et qu'une liste de phonèmes soient envoyées au serveur UDP/IP.

C'est en cheminant à travers le modèle objet, les classes et les méthodes qu'il a été possible d'élaguer, et de circonscrire le traitement autour de trois classes principales :

1. La classe SIVOXDevint sert de nœud de traitement principal, en ce sens où elle permet de lancer et d'arrêter le traitement phonétique de chaînes de caractères de texte rédigé en langue française.
2. Basée sur des règles définies par des fichiers, une structure de données sous forme d'arbre est utilisée pour scinder les phrases en mots, puis en racines phonétiques.
3. La structure de données Arbre, ChaîneArbre, FileArbre effectue l'analyse des chaînes phonétiques en fonction de GenerateurRegles, ListeRegles et Regle.
4. La classe Analyser, qui lance l'analyse phonétique basée sur ces règles, a donc logiquement été choisie pour entreposer la liste des graphèmes et des phonèmes que compose chaque segment de texte. Les méthodes getListePhonemes() et getListeGraphemes, encadrées dans la Figure 14 - Diagramme UML sommaire des classes du moteur phonétique, sont utilisées pour implémenter ce service du serveur UDP/IP.
5. Il est à noter que la classe TableTransposition a été ajoutée. Par le biais d'une table de hachage, elle permet d'associer les unités sonores écrites (graphèmes) aux

archigraphèmes; ces-dernières étant les équivalences standardisées par le Groupe DÉFI Accessibilité.(Langevin J., 2006-2011b).

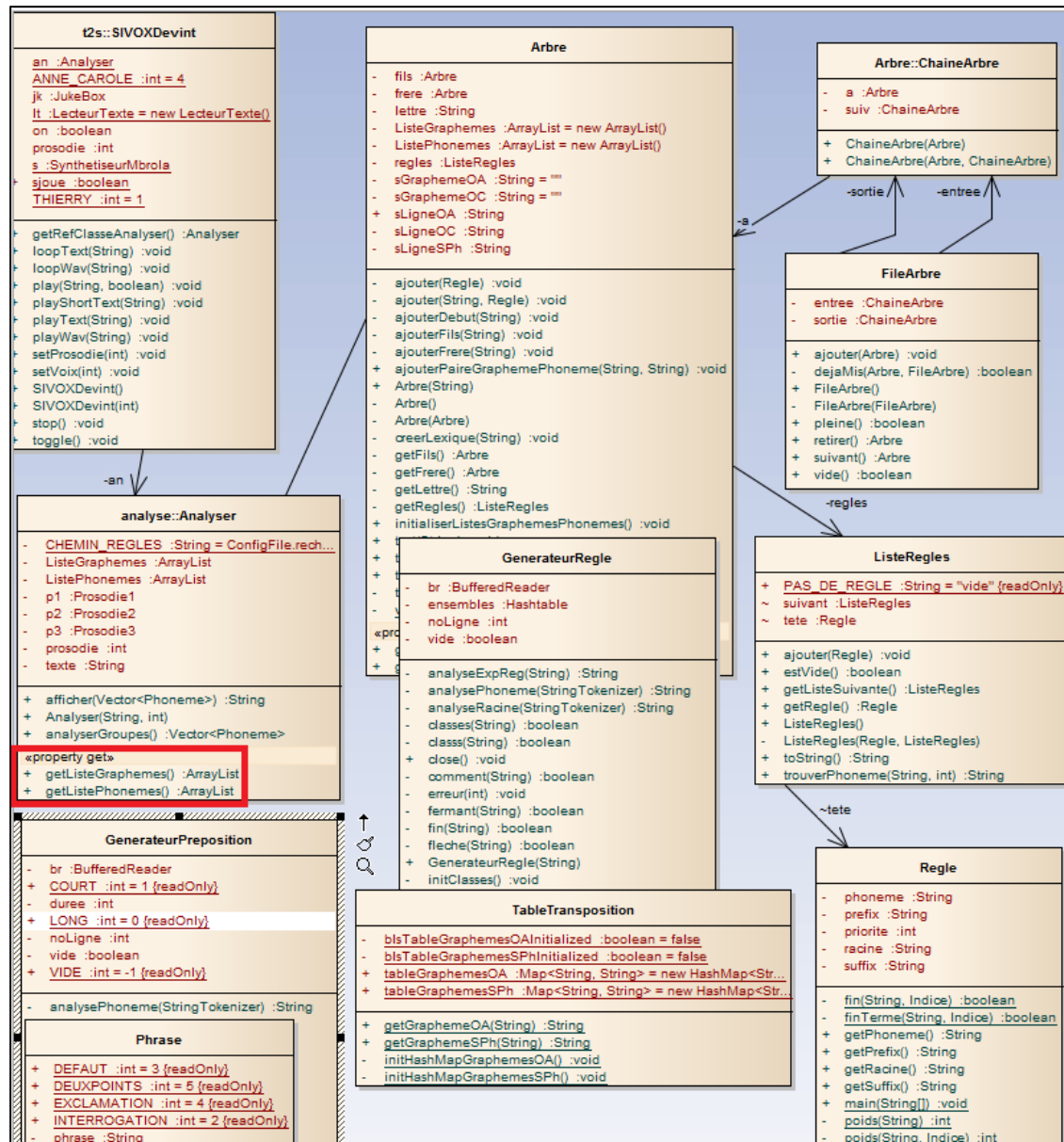


Figure 14 Diagramme UML sommaire des classes du moteur phonétique

C'est donc avec ces modifications apportées au moteur phonétique choisi que le moteur UDP/IP peut retourner les informations demandées par le module d'extension de Word. La prochaine section, quant à elle, présente les défis, analyses et solutions proposées concernant l'utilisation de l'interface personne-système actuelle dans Word. Le module d'extension étant conçu et ajouté à cette composante architecturale, l'analyse des besoins et caractéristiques de la nouvelle interface proposée devient alors essentielle.

3.2.7 Interface personne-système sous Word: analyses et options

Contexte et problème

Afin d'ajouter le soutien phonétique aux textes, les chercheurs du Groupe DÉFI Accessibilité utilisaient le module « Guide phonétique », de Word. Chaque archigraphème étant manuellement écrit dans ce module, c'est donc Word qui se chargeait d'en faire l'alignement centré au-dessus des graphèmes.

Par exemple, pour ajouter le soutien phonétique au mot « beau », il s'agissait en premier lieu de sélectionner le graphème « eau ». Puis, en activant le module « Guide phonétique », l'utilisateur était invité à spécifier l'archigraphème à être superposé :

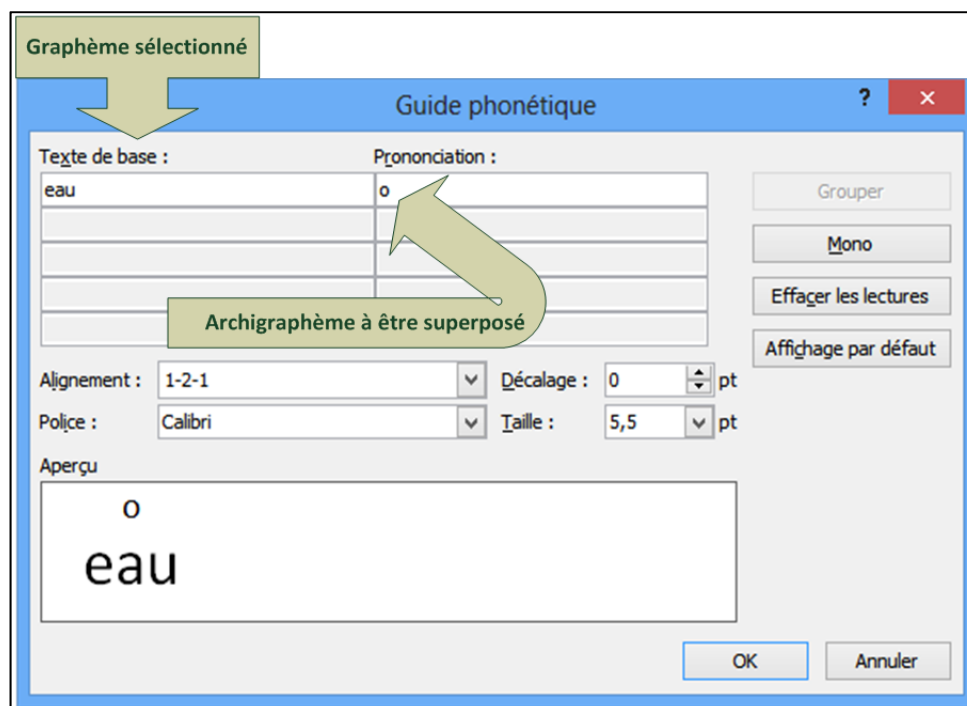


Figure 15 Guide phonétique de Microsoft Word

Word affichait ensuite le résultat final : « beau », l'archigraphème « o » étant parfaitement centré au-dessus du graphème « eau ».

Analyse des besoins et caractéristiques

À partir d'un document Word, l'objectif est d'automatiser l'ajout de soutien phonétique au texte, tout en minimisant le taux d'erreur, afin de réduire le temps de traitement manuel avec le Guide phonétique. Or, comment découper automatiquement le texte en segments de texte et les mots en graphèmes ? Comment associer les graphèmes aux archigraphèmes (unités sonores), les formater (taille/police) et les aligner au-dessus des graphèmes ?

Les solutions envisagées, pour chacun de ces besoins, étaient les suivantes :

- Le découpage du texte en segments de texte a été conçu avec les marqueurs suivants : le retour de chariot (« *carriage return* »), le point (« . »), le point d'exclamation (« ! »), le guillemet (« »), la virgule (« , ») et le point-virgule (« ; ») et le deux-points (« : »).
- Le traitement phonétique de chaque mot, chaque syllabe et des liaisons entre les mots a été conçu par l'interrogation du moteur phonétique, par le biais de l'interface créée par le serveur phonétique.
- Le protocole de communication devait prévoir le découpage de chaque unité sonore: c'était critique. De là l'utilisation de deux listes distinctes : l'une de graphèmes, et l'autre de phonèmes.
- L'alignement (centrage) de chaque archigraphème au-dessus des graphèmes pour lesquels le soutien phonétique doit être ajouté a fait l'objet de plusieurs idées. Étant donné que le soutien phonétique est superposé, en petits caractères d'une autre police au-dessus des mots du texte original, ces options ont été considérées :
 - a. Générer un format de sortie avec le langage HTML. Ce langage, à la base, est utilisé pour la création de pages web. Sa flexibilité permettait de créer des tableaux, dont les colonnes invisibles pouvaient être découpées pour séparer chaque graphème du texte. Les balises HTML, par ailleurs, auraient bien permis de gérer les polices et tailles de caractères ainsi que le centrage. Or, cette option n'ajoutait pas le soutien phonétique directement dans le texte original, mais plutôt dans un document externe. Et comme ce document

généralisé n'était pas non plus modifiable directement dans le document contenant le texte original, cette option n'a pas été placée à l'avant-plan.

- b. Générer un format de sortie de type « Word », mais dans un texte en paires de doubles interlignes : la ligne supérieure contiendrait le soutien phonétique, dans son propre format, tandis que la ligne inférieure de la paire contiendrait le texte original du document. Le défi de cette option était celui de l'alignement. La création d'un algorithme tenant en compte la taille des caractères pour le centrage aurait été nécessaire. Étant donné que l'interface (SDK) de Word ne permet pas la programmation d'une telle solution aussi aisément qu'il est de la décrire, une troisième option devait être envisagée.
- c. Cette troisième option consistait à analyser comment le module Guide phonétique, intégré à Word, pouvait superposer et centrer les archigraphèmes au-dessus des graphèmes complexes. Les recherches effectuées ont permis de mettre en lumière quel principe permettait au Guide phonétique d'effectuer ce travail. C'est une page web de Microsoft⁹ qui indiquait que l'éditeur d'équations mathématiques servait en fait à formater le texte, au service du guide phonétique. Par exemple pour afficher "eau", c'est ce champ d'équation mathématique qui est utilisé :

⁹ <http://support.microsoft.com/kb/210858/fr>

```
{EQ \* jc2 \* "Font:Calibri" \* hps11 \o\ad(\s\up 10(°);eau)}
```

Figure 16 Exemple de champ d'équation
utilisé pour le guide phonétique

Avec l'analyse rigoureuse de ce que chaque élément du champ d'équation contenait, il devenait ainsi possible de concevoir une solution pour un premier prototype. En effet, le moteur phonétique fournissant la liste des graphèmes et unités sonores sous formes de listes, il aurait été possible de concevoir un algorithme générant des champs, au format d'équation mathématiques, pour reproduire ce que le guide phonétique fournissait comme service. Par exemple, le mot “eau” et son soutien phonétique sont représentés par cette équation (« EQ field ») sous Word : EQ * jc0 * "Font:Calibri" * hps18 \o(\s\up 15(°);eau).

Les premiers prototypes permettaient en effet d'ajouter le soutien phonétique pour un segment de texte (une phrase) complet dans le texte. Toutefois, l'équation « EQ field » étant elle-même une chaîne de caractères, la segmentation du texte, sous Word, devenait impossible. En effet, les fonctions du SDK de Word confondaient parfois le nombre de caractères d'un mot (i.e. « eau » = trois lettres) avec le nombre de caractères du « EQ field » qui représente le mot « eau » avec son soutien phonétique (“eau”). De fait, cet exemple (“eau”), est construit grâce à un champ « EQ field » d'une longueur de 57 caractères. Il en résultait alors des difficultés majeures à aligner les mots et leur soutien phonétique avec cette méthode.

En continuant les recherches à propos de la résolution de ce défi d'alignement du soutien phonétique au-dessus des graphèmes du texte, l'idée d'étudier le SDK de Word a émergé. C'est ainsi que la méthode PhoneticGuide, applicable à une instance d'objet de type « Range », a été découverte. Dans le contexte de Word, une instance de « Range » désigne un segment de texte, délimité par un caractère de début et un caractère de fin.

La méthode `PhoneticGuide`, quant à elle, permettait alors de spécifier les paramètres souhaités en vue de l'ajout du soutien phonétique : type et taille de la police de caractères, type d'alignement (gauche, centre, droite), espacement vertical :

```
void PhoneticGuide(
    string Text,
    WdPhoneticGuideAlignmentType Alignment,
    int Raise,
    int FontSize,
    string FontName
)10
```

Même si découverte après toutes les autres, cette méthode s'adapte bien pour formater le soutien phonétique avec l'application Word. Les autres méthodes pouvant être utiles dans le cadre du formatage de soutien phonétique avec d'autres types de logiciels de traitement de textes que Word. À la lumière de l'analyse de ces quatre solutions envisagées, c'est donc la quatrième qui a été retenue.

À ce stade, bien qu'une solution de formatage du soutien phonétique devienne possible à intégrer dans un module d'extension sous Word, il restait à concevoir ce module et à outrepasser les contraintes de déploiement et de maintenance à travers différentes versions de Word et de systèmes d'exploitation. La prochaine section traite de ce sujet.

¹⁰ Bibliothèque de référence Microsoft, [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/microsoft.office.interop.word.range.phoneticguide\(v=office.14\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/microsoft.office.interop.word.range.phoneticguide(v=office.14).aspx).

3.2.8 Conception d'un module d'extension de Word : algorithmes et naissance d'un prototype

Contexte et problèmes

L'objectif de cette recherche est de valider s'il est possible d'automatiser la tâche d'ajout de soutien phonétique aux documents francophones, de format Word, avec un taux d'erreur de moins de 10%.

L'évaluation d'engins de traitement phonétique a mené à la sélection de S.I. VOX / Vocalyze, composé de soixante et onze (71) classes écrites en langage Java. Étant donné qu'il a été prévu que le module d'extension de Word serait conçu en langage C++, ce moteur phonétique a donc été épuré et certaines classes adaptées ou ajoutées pour implémenter les règles de l'interface du serveur UDP/IP placé à la frontière de ces deux composantes architecturales.

Le problème, à ce stade-ci, est de concevoir un autre logiciel dont le rôle est d'adapter Word pour y ajouter une interface usager permettant à l'utilisateur d'ajouter le soutien phonétique en traitant et en segmentant le texte en unités phonétiques. Ce processus permettant ainsi de transformer le document afin d'y ajouter le soutien phonétique au-dessus des graphèmes complexes dont le texte est composé.

La Figure 17 présente la position de ce module d'extension de Word dans l'architecture des composantes du SPhone.

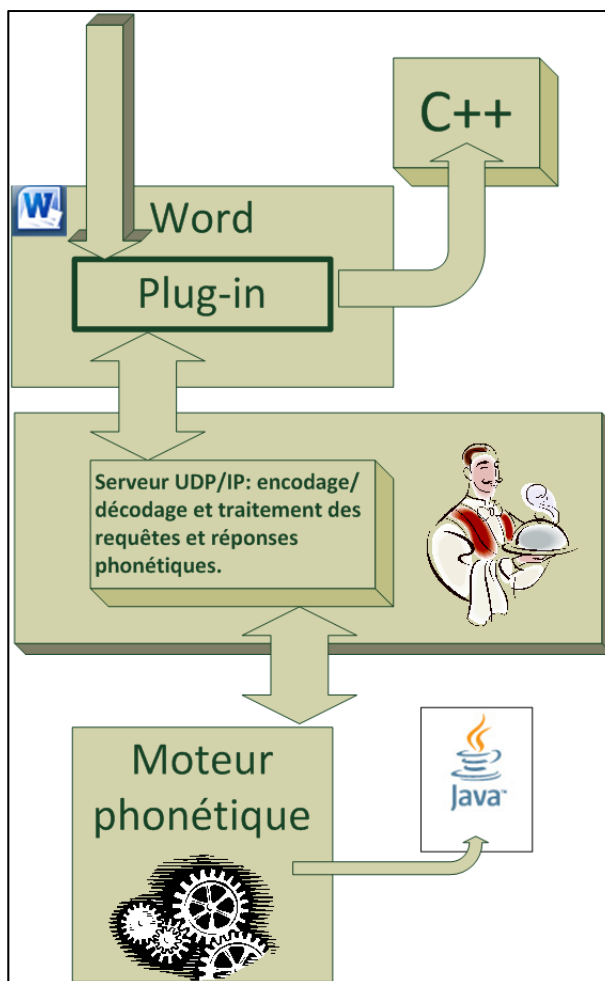


Figure 17 Positionnement du module d'extension de Word (plug-in) dans l'architecture

Algorithme et méthode de traitement créés dans le plug-in de Word

L'algorithme de traitement se divise en ces grands blocs de traitement:

- Prétraitement et segmentation des phrases dans Word;
- Requête de traitement phonétique d'un segment de texte, via le serveur UDP/IP;
- Traitement du segment de texte par le moteur phonétique, découpage en unités phonétiques, transposition des phonèmes au format de la table de transposition (Langevin J., 2011) du GDA, et retour des informations (liste de graphèmes et liste de phonèmes) au serveur.

- Retour des listes de graphèmes et de phonèmes dans Word, et alignement des archigraphèmes au-dessus des graphèmes complexes (i.e. des graphèmes, d'une ou de plusieurs lettres, qui ne sont pas des archigraphèmes ni des lettres muettes, comme « eau », par exemple).

La Figure 18 présente ce processus d'ajout du soutien phonétique dans Word. Les activités de ce processus sont ensuite détaillées.

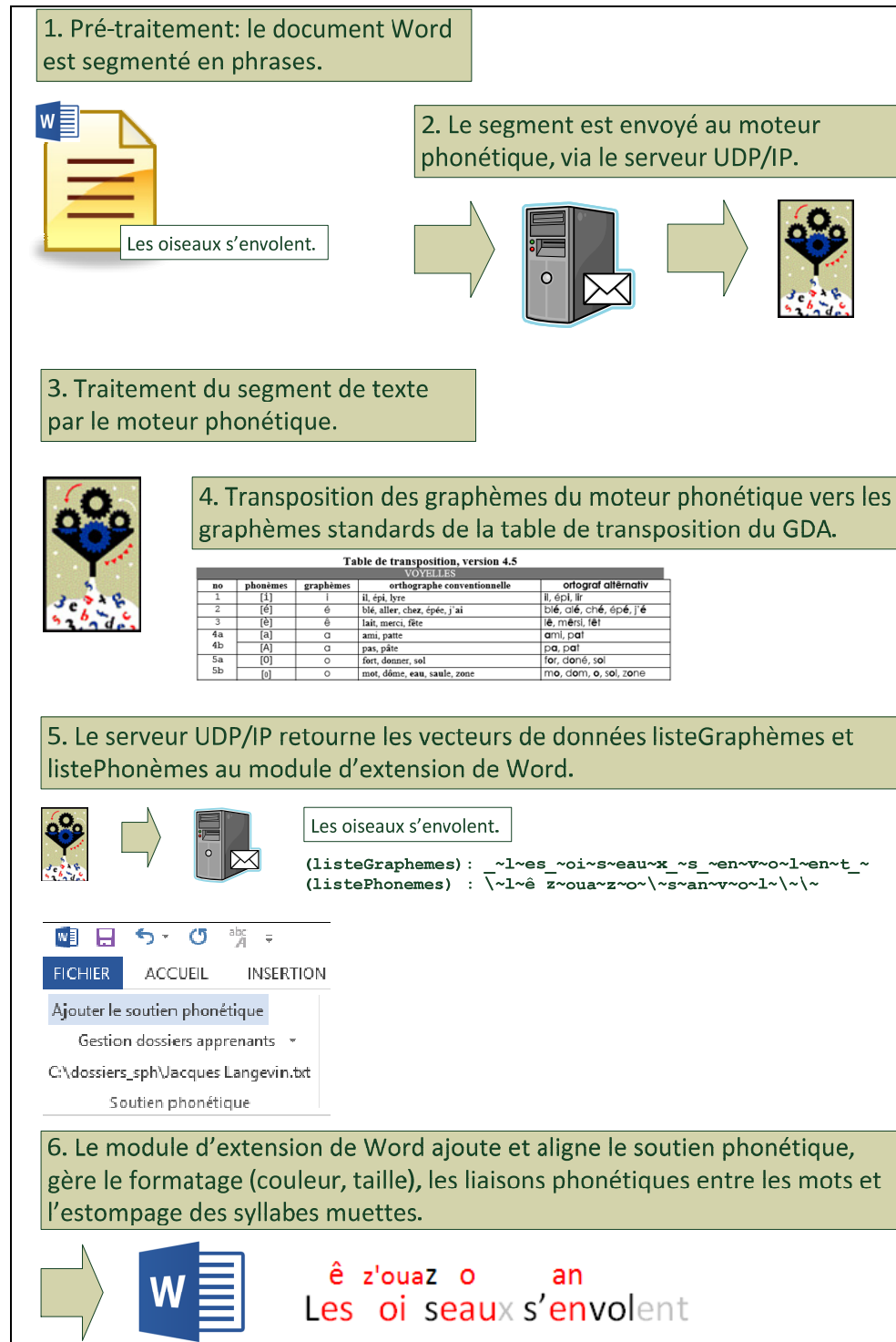


Figure 18 Processus d'ajout du soutien phonétique aux documents Word

Les six activités de l'algorithme de la Figure 18 se détaillent ainsi :

1. Prétraitement : découpage du texte de Word en segments de textes. Des délimiteurs de textes ont été établis pour définir ces segments : les points, les points-virgules, les points de suspension, les deux points (:), par exemple.
2. L'envoi du segment de texte, via le serveur UDP/IP, au moteur phonétique.
3. Le traitement phonétique du segment de texte, par le moteur phonétique. Ce dernier utilise une technique de dissection du texte à la recherche d'unités sonores. Des règles décrivant les unités sonores sont décrites dans les tables de règles externes (fichiers textes), alors que la recherche de correspondances se fait à l'aide d'une structure de données en arbre. Une recherche récursive est ensuite lancée sur le segment de texte, à la recherche de correspondances. Lorsque la correspondance est trouvée entre la chaîne écrite et la chaîne parlée (le son), une modification du logiciel a été effectuée afin que cette paire de correspondances soit mémorisée dans deux vecteurs distincts : listeGraphemes, et listePhonemes.
4. Avant que les chaînes sonores (phonèmes) ne soient mémorisées dans listePhonemes, il faut toutefois les adapter au standard de simplification phonétique produit par le Groupe DÉFI Accessibilité. Il y a donc une table de hachage qui permet de faire cette adaptation vers les archigraphèmes.
5. Ce sont ensuite ces deux vecteurs qui sont renvoyés au module d'extension de Word, par l'intermédiaire du serveur UDP/IP.
6. Le module d'extension de Word ayant donc en main un segment de texte à être traité, une liste de graphèmes et une liste de phonèmes, un algorithme traite ensuite chaque syllabe du segment de texte pour y superposer les archigraphèmes. Chaque syllabe non-muette a nécessairement un élément superposé : l'élément sera un espacement (alignement) ou un groupe d'espacements si aucune unité sonore simplifiée n'y correspondait, ou l'élément sera l'archigraphème si un son y correspondait. Par exemple, « o » serait ajouté au-dessus du « eau » de « bateau », alors qu'un espace serait ajouté au-dessus du « b » et du « a », puisqu'il n'existe pas de simplification sonore possible pour « b » ou pour « a ». Dans le cas d'une syllabe muette, elle sera

estompée en gris si le moteur phonétique n'y associe aucun phonème, comme dans le cas de la lettre « e » du mot « arbre » ou de « avance ».

L'algorithme d'ajout du soutien phonétique étant expliqué, la prochaine section présente le processus de conception du module d'extension dans Word.

3.2.9 Analyse de viabilité du module d'extension de Word

Problèmes et besoins

En 2006, un prototype de module d'extension Word avait été créé par l'auteur de ce mémoire (Patrick Tremblay, 2006, collaboration GDA) pour transposer l'orthographe conventionnelle vers l'ortographe alternatif. Or, il s'est avéré que ce logiciel éprouvait un important problème de compatibilité, selon l'environnement dans lequel il était déployé.

En effet, que ce soit en raison de la version du système d'exploitation Windows ou de celle du logiciel Word, de Microsoft, il arrivait fréquemment de se rendre à l'évidence qu'il était impossible de déployer la solution sur l'ordinateur cible.

Fort de cette expérience, le niveau de succès du déploiement du SPhone devait être notablement plus grand.

Caractéristiques

Ainsi, dans le contexte de ce projet d'innovation, le module d'extension conçu en langage C++ sous Word, ainsi que le moteur phonétique avec lequel il interagit :

1. Doivent être compatibles avec différentes versions de Windows et de Word (Office 2007-2013).
2. Doivent permettre une facilité d'adaptation aux changements, à mesure que les années passent.

Une solution devait donc être mise en œuvre en ce sens.

Solutions envisagées

Créer un module d'extension (i.e. « plug-in »), sous Word, peut être fait de différentes façons.

La première est une solution native offerte par le fabricant de Word, en créant un projet de type « add-in ». Ainsi, le code source Visual Basic peut faire une certaine part d'automatisation de tâches simples, mais il n'est pas aussi puissant ni aussi flexible qu'un langage orienté-objet comme le C++. D'autre part, comme chaque projet « add-in » sous Word demeure souvent spécifique à une version de Word ou du système d'exploitation, son entretien et sa stabilité s'en voyaient compromis.

Une seconde voie est celle de VSTO (Visual Studio Tools for Office). L'avantage de cette option est le support d'un langage orienté-objet notablement plus avancé et flexible que Visual Basic, comme C#, par exemple. Par contre, il existe différentes versions de VSTO, et elles ne sont pas compatibles à toutes les versions de Word.¹¹ Cela nécessite donc plus de travail au niveau de la maintenance et du déploiement des logiciels, sachant qu'il faut personnaliser l'environnement VSTO selon l'ordinateur cible. Sans être totalement écartée pour un logiciel en phase de prototypage, cette option ne s'avérerait pas la meilleure à long terme.

¹¹ <http://en.wikipedia.org/wiki/VSTO>

Ainsi, la poursuite des recherches a mené vers un site web d'un produit commercial, nommé « Add-In Express ». Ce produit permet de créer des modules d'extension pour toute la suite de logiciels de la suite Office de Microsoft, incluant toutes les versions de Word (Office 2007-2013). Il garantit donc la stabilité, la facilité d'entretien et la compatibilité avec Word. Un coût d'un peu moins de deux cents dollars pour les mises à jour annuelles, et un excellent support de l'équipe de ce fabricant ont mené au choix de ce produit de développement de module d'extension dans Word. La prochaine figure présente l'interface modifiée de Word, présentée à l'utilisateur pour ajouter le soutien phonétique.

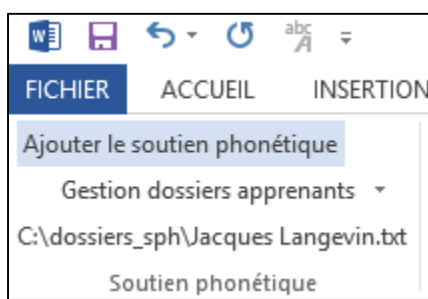


Figure 19 Bouton d'action du module d'extension de Word

L'utilisation du cadriciel « Add-in Express » devenait donc l'option la plus logique pour produire un prototype, puis un logiciel dont l'installation devenait fiable pour les différentes parties prenantes : membres du Groupe DÉFI Accessibilité, orthopédagogues, enseignants et parents, notamment.

3.2.10 Conception de l'aspect dégressif du SPhone

Problèmes, besoins et méthode de conception

Afin de favoriser l'apprentissage et l'autonomie des apprenants avec la lecture du français, le SPhone doit pouvoir fournir à l'utilisateur (l'agent) la possibilité de retirer graduellement le soutien phonétique ajouté aux textes. Il s'agit de l'aspect dégressif du logiciel.

Afin de concevoir l'intégration d'une solution à l'architecture actuelle, quelques notions de base de l'*Architecture Tradeoff Analysis Method* (ATAM) (Kazman R., 2000) sont utilisées, à partir des caractéristiques qui doivent être présentes dans la solution optimale. Les risques et compromis sont ainsi identifiés pour l'architecture-solution retenue.

Caractéristiques des solutions envisagées

Par le biais de l'étape « Present Business Drivers », l'*Architecture Tradeoff Analysis Method* (ATAM) permet de dresser le portrait d'un système de gestion de dossiers au plus bas coût, pour chaque apprenant, dans lequel l'agent (professeur, parent, orthopédagogue) peut indiquer quel archigraphème doit être ajouté, et lequel ne doit pas l'être. De plus, le dossier pourrait aussi permettre de configurer l'affichage ou le non-affichage en rouge du graphème et de son soutien phonétique lorsque le phonème est une voyelle, ou des syllabes muettes en gris estompé. Cette liste de caractéristiques est document à l'ANNEXE II.

En troisième et quatrième étapes de l'ATAM, l'architecture et ses approches (moyens pour atteindre les résultats attendus) sont définies à un haut niveau de détails. À cet effet, étant donné qu'un module d'extension est déjà conçu dans Word pour ajouter le soutien phonétique, la solution pour cette gestion de la dégressivité pourrait s'y greffer. Que ce soit avec un lien vers un portail web, ou directement intégré à l'ordinateur de l'utilisateur. La Figure 20 illustre une vue de ces options.

La cinquième étape de l'ATAM concerne la génération de la description de l'arbre des attributs de qualités (exigences non-fonctionnelles). Aux fins de recherche de la solution

optimale, deux options sont évaluées au regard du meilleur compromis entre les « business drivers », les attributs de qualité et les risques.

Option 1 : Au point de vue de la portabilité, de l’extensibilité et de l’utilisabilité, une application web (i.e. PHP / MySQL, par exemple) est optimale. Par contre, en plus d’obliger l’accès à une connexion internet pour l’utilisateur, cette solution implique aussi des coûts d’hébergement mensuels (serveur web, serveur de base de données) qui compromettent l’optimisation des coûts d’utilisation du logiciel. Il subsiste alors un risque que l’utilisateur ne soit pas intéressé par cette option en raison des coûts, ou encore, qu’il ne puisse pas accéder aux dossiers si la connexion à internet est impossible.

Option 2 : Une seconde solution envisageable est une base de données locale, dans l’ordinateur de l’utilisateur. Ce dernier a ainsi accès aux bénéfices de l’utilisation d’un dossier pour chaque apprenant, en plus de ne pas comporter de coûts d’hébergements mensuels. En contrepartie, l’utilisateur devient responsable des copies de sécurité et du transport des données sur chaque ordinateur avec lequel il travaille (i.e. maison, bureau). La recherche du coût optimal étant placée au premier plan des « *business drivers* », la décision va en faveur de prototyper cette option, dont l’intégration à l’architecture du SPhone est illustrée à la Figure 20.

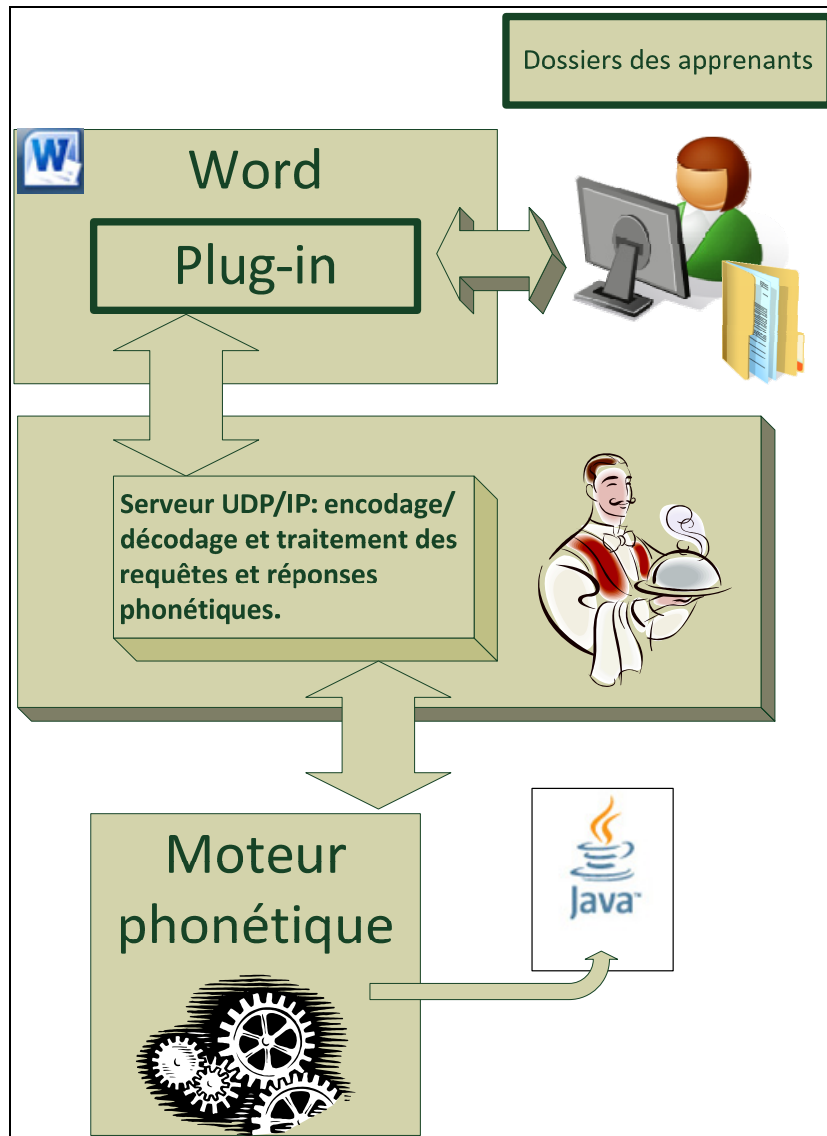


Figure 20 Vue statique du module de gestion du dossier des apprenants intégré dans l'architecture du SPhone

La conception de la caractéristique dégressive du SPhone permet donc à l'utilisateur (i.e. professeur, orthopédagogue, etc.) de configurer, pour chacun des dossiers, la fréquence d'apparition du soutien phonétique (100%, 50%, 0%), de chaque archigraphème. Le dossier des apprenants propose ainsi, pour chacun des archigraphèmes listés, de spécifier l'une de ces trois options d'affichage :

- oui: Le Sph est toujours affiché (i.e. 100%).
- dégressif: Le Sph n'est affiché qu'une fois sur deux (i.e. 50%).
- non: Le Sph n'est jamais affiché (i.e. 0%).

Par exemple, le dossier d'un apprenant donné pourrait spécifier :

- (an) : non
- (o) : dégressif
- (oua) : oui
- (z') : dégressif // Liaison en 's', comme dans le cas de "les oiseaux".

L'ANNEXE VI présente un gabarit de dossier d'apprenant. Voici un exemple de variation des fréquences d'affichage de l'archigraphème « o » :

- **(o) :Oui.** Le Sph est toujours ajouté, comme ici :

^s Ce beau ^o bateau ^o est ^ê dans ^o l'eau, sous le ^j nuage ^o là haut.

- **(o) :Dégressif.** Le Sph n'est ajouté que pour la moitié des occurrences rencontrées. Dans ce cas-ci, le dossier de l'apprenant a été configuré pour activer le niveau d'affichage dégressif pour l'archigraphème « o » . Pour un total de quatre occurrences, dans cet exemple, il n'apparaît donc que pour une seule occurrence sur deux, en étant initialisé de façon à ne pas afficher l'archigraphème lors de la première occurrence:

^s Ce beau ^o bateau ^ê est dans l'eau, sous le ^j nuage ^o là haut.

- **(o) :Non.** Le Sph « o » n'est jamais ajouté, tandis que les autres archigraphèmes le sont toujours, car ils sont configurés ainsi.

^s Ce beau ^ê bateau est dans l'eau, sous le ^j nuage là haut.

Prototype

Le prototype permet à l'utilisateur de créer, charger, consulter et modifier l'ensemble des dossiers des apprenants contenus dans son ordinateur, tout en affichant le dossier présentement chargé en mémoire. Si aucun dossier n'est chargé, le prototype active toutes les règles du soutien phonétique.

Le module d'extension de Word est ainsi adapté pour permettre ces fonctionnalités, tel que le montre la Figure 21.

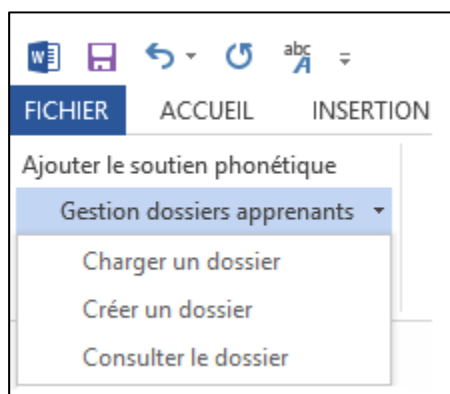


Figure 21 Intégration de la gestion du dossier des apprenants dans Word

Lorsque l'utilisateur crée un dossier, la configuration du dossier par défaut active toutes les règles du soutien phonétique. Par la suite, l'utilisateur peut utiliser la fonction « Consulter un dossier » afin d'en adapter la configuration en fonction des besoins spécifiques d'un apprenant.

Dans le cas de cette phrase, l'utilisateur a ajouté le soutien phonétique avec un dossier dont toutes les règles sont activées. Ainsi, un « o » est au-dessus du « eau » de « bateau » et de « eau », tandis que le « g » est au-dessus du « gu » de « vogue » et le « e » apparaît en gris estompé pour le mot « vogue » :

Le bate^oau vog^ge sur l'^oeau.

L'agent observant une progression des habiletés de l'apprenant, il peut alors configurer le dossier afin que le soutien phonétique « o » ne soit plus ajouté, en indiquant « non » à côté de « (o) » dans le dossier : « (o) : non ». Lorsque l'agent demande au logiciel d'ajouter le soutien phonétique sur cette même phrase, elle est maintenant affichée ainsi, sans le soutien phonétique « o » au-dessus de « eau » :

g
Le bateau vogue sur l'eau

Il en va de même lorsque l'agent désactive l'affichage en rouge du graphème et de son soutien phonétique lorsque le phonème est une voyelle : l'affichage normalement rouge pour « eau » apparaît maintenant en noir :

g
Le bateau vogue sur l'eau

Si l'agent désactive l'affichage des syllabes muettes en gris estompé, le SPhone rétablit alors la couleur de la lettre « e » du mot « vogue » en noir foncé :

g
Le bateau vogue sur l'eau

Ce prototype de gestion de l'aspect dégressif de l'ajout du soutien phonétique permet ainsi à l'agent d'offrir une pédagogie individualisée, pour chaque apprenant.

À ce stade-ci, l'interconnexion de toutes les composantes de l'architecture et de la composante de gestion de dossiers des apprenants est faisable. La production d'une série d'itérations de prototypes demandait maintenant une réflexion au sujet de la mise en place d'un laboratoire et d'un processus pour la conception de ces logiciels. La prochaine section présente les réflexions au sujet de cette importante étape.

3.2.11 Laboratoire et processus de conception de logiciels

Contexte et besoins

La conception d'un système d'ajout de soutien phonétique automatisé et dégressif aux documents Word, avec ses logiciels interagissant les uns avec les autres (Word, module d'extension de Word, serveur UDP/IP, moteur phonétique), nécessite un processus de développement, et un environnement de laboratoire avec certaines caractéristiques essentielles. Cette section traite de la définition des caractéristiques du processus, ainsi que des choix au regard des composantes du laboratoire de développement.

Caractéristiques

D'entrée de jeu, le choix des composantes du laboratoire de conception repose d'une part sur les bonnes pratiques du développement de logiciels. D'autre part, ce choix prend aussi en compte le type de technologies devant être intégrées les unes aux autres.

Au sujet des bonnes pratiques de développement de logiciels, le spectre est large. En effet, certains modèles décrivent les pratiques et processus selon le niveau de maturité recherché, comme le Capability Maturity Model Integrated (CMMI) (CMMI-Institute, 2014), alors que certains guides réfèrent à un ensemble de pratiques généralement reconnues et acceptées mondialement. Le guide du Software Engineering Body of Knowledge (SWEBOK) (IEEE, 2014)) en est un exemple. D'autre part, plusieurs processus de développement de logiciels existent. Sur le marché de l'industrie du logiciel, les processus Agiles sont répandus : Scrum, Feature-driven development, Behaviour-driven development et Test-driven development, par exemple.

Face à ces éventails d'options, le résumé des choix se présente ainsi : les composantes du laboratoire de développement ont été choisies en fonction des technologies utilisées (langages orientés-objets Java et C++), de la nécessité de la modélisation visuelle, de la gestion de configuration du code source, et du fait que la méthodologie serait de type Feature-driven development, un dérivé itératif et incrémental de la famille de processus

Agiles. Cette méthodologie repose sur la conception des caractéristiques du logiciel, priorisée en fonction de la valeur qu'elles ont aux yeux du client.

Ainsi, ces choix ont mené à la composition d'un laboratoire de conception de logiciels, présenté à la Figure 22.

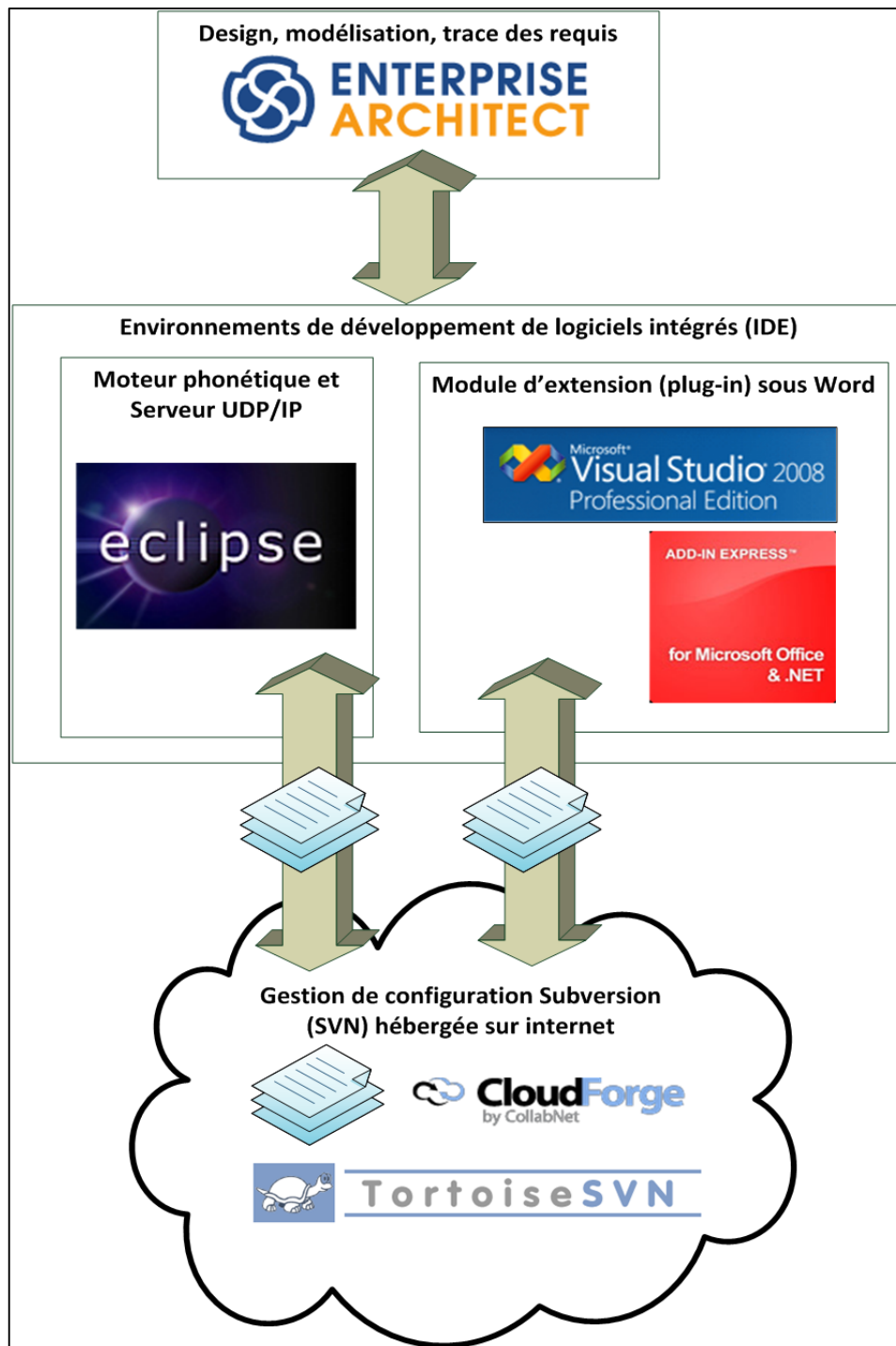


Figure 22 Composantes de l'environnement de laboratoire

Le laboratoire de développement se décompose ainsi :

1. La trace des exigences systèmes, le design et la modélisation visuelle de haut niveau ont été faits par l'entremise du logiciel Enterprise Architect, de Sparx Systems.
2. Le moteur phonétique choisi étant conçu en langage Java, et le choix de conception du serveur UDP/IP reposant sur ce même langage, c'est la plateforme intégrée de développement (Integrated Development Environment (IDE)) Eclipse qui a été choisie.
3. Le module d'extension à être conçu sur la plateforme de Microsoft Word, quant à lui, a été créé avec le langage C++. La plateforme intégrée de développement Visual Studio 2008 a été choisie, conjointement avec le cadriciel (*framework*) fourni par l'entreprise Add-In Express. Ce cadriciel a été intégré dans le développement pour des raisons de facilité de maintenance, d'installation et d'interopérabilité du module d'extension. Ainsi, à l'instar du moteur phonétique et du serveur UDP/IP conçus en Java, le déploiement du module d'extension de Word sur plusieurs systèmes d'exploitation Windows, et plusieurs versions de Word, devenait possible.
4. Toutes les composantes logicielles conçues et produites avec Enterprise Architect, Eclipse et Visual Studio ont été placées sous gestion de configuration par l'entremise de Subversion (SVN). Pour des raisons de sécurité des données en cas de panne de composantes informatiques au laboratoire de développement, le service de gestion de configuration était hébergé sur un serveur externe, en Europe (Pays-Bas). Bien que de nombreuses entreprises offrent ce service, c'est l'entreprise CloudForge qui a été choisie.

Une fois le laboratoire mis en place, et le SPhone assez mature pour ajouter le soutien phonétique dans Word, en interaction avec le moteur phonétique, il importait d'améliorer les règles de traitement phonétique. La prochaine section présente ce processus.

3.3 Processus d'optimisation des règles du moteur phonétique

Afin de présenter ce processus d'optimisation des règles, il importe de bien comprendre les rôles et responsabilités des différentes composantes du SPhone à cet égard. La Figure 17 présente une perspective de ces composantes.

Le moteur phonétique du SPhone contient un ensemble de trois cent quatre-vingt (380) règles d'interprétation phonétique, contenues dans le fichier « règles.txt ». Le soutien phonétique, quant à lui, ne se réfère qu'à un ensemble de 35 archigraphèmes, selon la table de transposition produite par le GDA (Langevin J., 2006-2011a). Ces règles de transposition sont implémentées dans une table de hachage de la classe « TableTransposition » (Java). Toutes les règles de segmentation de texte dans Word, de formatage du soutien phonétique et des liaisons phonétiques sont implémentées dans le module d'extension (« plug-in ») ajouté à Word.

Afin d'optimiser les règles du moteur phonétique, dix textes de référence ont été utilisés. Il s'agit de textes du manuel Signet (3^e année du primaire), adaptés en soutien phonétique par le GDA. Ces textes adaptés sont « *à première vue, identiques à la version originale Signet (3^e année), mêmes thèmes, mêmes titres, mêmes numéros de pages, mêmes illustrations et mêmes réponses aux deux premières questions de chaque page, mais les textes sont simplifiés afin de permettre la lecture à l'élève de 3^e année qui a deux ans de retard dans cette matière.* » (Beaulieu, 2013)

Ainsi, pour chacun de ces textes, le SPhone était utilisé pour ajouter le soutien phonétique. Le résultat du produit du logiciel était ensuite comparé aux textes de référence, adapté en soutien phonétique par le GDA. Lorsque des erreurs étaient rencontrées, un processus d'optimisation était appliqué. Voici quelques exemples d'erreurs, et la méthode de résolution.

3.3.1 Premier exemple : le mot « fait » prononcé « f é », au lieu de « f ê »

Dans ce cas présenté à la Figure 23, l'archigraphème « é » est ajouté, alors que c'est plutôt l'archigraphème « ê » qui est attendu.

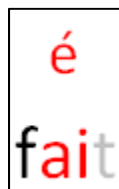


Figure 23 Erreur phonétique
avec le mot "fait"

Ce problème peut être résolu en intervenant avec le fichier de règles du moteur phonétique. En effet, une règle indique que le graphème "ai" est associé au phonème "é" :

```
[[ ai ]] -> é
```

La correction se fait simplement en modifiant « é » par « ê » :

```
[[ ai ]] -> ê
```

Ainsi, le soutien phonétique « ê » se voit correctement associé au graphème « ai » du mot « fait », comme en témoigne cet extrait du manuel de lecture Signet (Dulude et Maisonneuve, 2001):

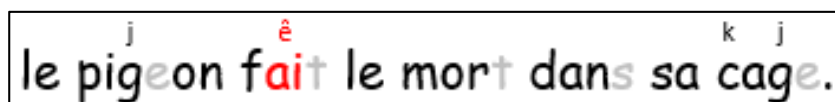


Figure 24 Correction du phonème associé au mot "fait"

3.3.2 Second exemple : la prononciation du phonème "ch" (mot "chez")

Cette prononciation est codifiée avec la lettre "S" majuscule, dans le fichier "regles.txt" du moteur phonétique :

```
[[ ch ]] -> S
```

La prochaine figure illustre bien l'erreur générée :

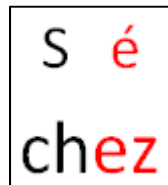


Figure 25 Erreur phonétique
avec le mot "chez"

Dans ce cas, c'est la Table de transposition du serveur UDP/IP qui centralise la standardisation de l'association des graphèmes aux archigraphèmes. On se sert donc de TableTransposition.java pour effectuer cette transposition avec l'archigraphème "ch", avec une nouvelle entrée comme celle-ci:

```
tableGraphemesSPh.put( "S", new String( "ch" ) )
```

Il est à noter que la référence « tableGraphemes » représente une forme de table de hachage :

```
public static Map<String, String> tableGraphemesSPh = new HashMap<String, String>();
```

Plus spécifiquement, elle effectue une correspondance ("map") entre deux chaînes de caractères: une première chaîne renvoyée par le moteur phonétique, et une seconde qui représente l'équivalent simplifié. Cette équivalence est ensuite retournée au « plug-in » ajouté à Word, aux fins de formatage (ajout du soutien phonétique). La Figure 25 présente le résultat de ce changement. Fait intéressant, l'interprétation phonétique maintenant corrigée, le soutien phonétique « ch » n'est pas ajouté au-dessus de « ch », car le graphème n'a plus

besoin de support d'interprétation. C'est en effet la règle vingt-quatre (24), de la table de transposition de l'ANNEXE III, qui réfère à « ch ».

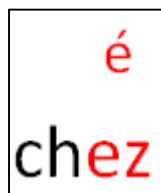


Figure 26 Correction du phonème associé au mot "chez"

3.3.3 Troisième exemple : les liaisons phonétiques

Cet exemple présente comment l'aspect de liaisons phonétiques, entre deux mots, est implémenté entre les règles phonétiques ("regles.txt"), la table de transposition "TableTransposition.java" et les modules internes du module d'extension de Word.

À titre de référence, c'est la huitième règle du document Extraits de l'ortographe alternatif (Langevin J., 2014) qui indique cette règle au chapitre des liaisons : « *Chaque liaison est écrite selon sa valeur phonétique et est reliée au mot à l'aide de l'apostrophe.* », car « *tout ce qui se prononce s'écrit* ».

Ainsi, dans la phrase "Les amis se rencontrent", il existe une liaison phonétique. Elle est entendue à l'oral, entre "les" et "amis". La Figure 27 montre un exemple où cette liaison phonétique est manquante dans le support phonétique ajouté par le SPhone :

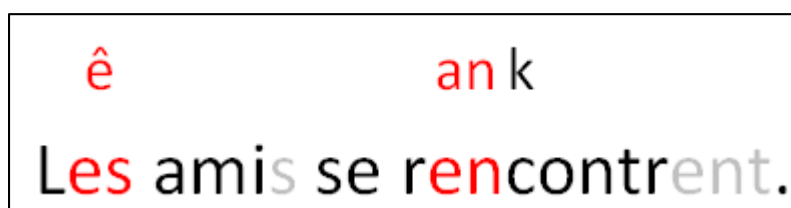


Figure 27 Erreur phonétique avec la liaison entre "les" et "amis"

Les étapes pour corriger cette erreur se présentent ainsi :

- Spécification de cette règle du moteur phonétique, dans le fichier « regles.txt » :

```
TC [[ es_ ]] (V|h) -> ê s
```

Tel un automate, le moteur phonétique associera « ê s » seulement si ces règles sont respectées : (H. Collavizza et al., 2005)

- « TC » : il faut que « es » soit précédé par un caractère « terminal » (début de mot), et par une consonne. Les mots « ces », « les » et « des », dans une phrase, obéissent à la règle « TC ».
 - o CLASS T [] # terminal
 - o CLASS C [bcçdfghjklmnñpqrstvwxyz] # consonnes
- « (V|h) » : il faut que le mot soit suivi d'une lettre de la classe « voyelles », ou de la lettre « h ». À noter que le symbole « | » est interprété comme un « ou » logique, au même titre que le langage C le fait.
 - o CLASS V [aeiouââèèêêîîôôûûü] # voyelles

Le mot « les », dans l'expression « les amis » fait ainsi réagir l'automate en passant "ê s" dans la Table de transposition, implémentée dans le serveur UDP/IP. La table de transposition, à son tour, associe "ê z" à "ê s".

```
tableGraphemesSPh.put( "ê s", new String( "ê z" ));
```

C'est alors "ê z" qui est retourné du module d'extension de Word.

Le module d'extension de Word, quant à lui, a été conçu pour interpréter le " z" de "ê z", comme étant une liaison avec le prochain mot. Lorsque « ê z » est lu dans ce module, le booléen "bLiaison_Z" est alors activé (booléen *true*). Lorsque le prochain mot (« amis », dans ce cas-ci) est interprété, la liaison en "z" est alors ajoutée à la première syllabe. Au final, la liaison apparaît maintenant, comme le présente la Figure 28 :

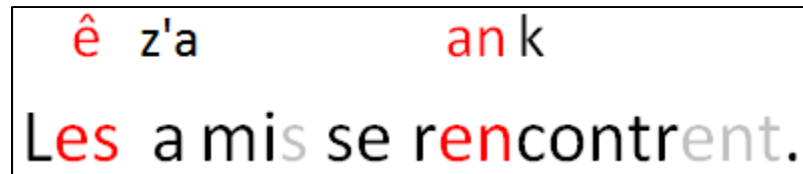


Figure 28 Correction de la liaison entre "les" et "amis"

La table de transposition est aussi utilisée pour stabiliser l'interprétation phonétique du moteur phonétique. Par exemple, si interprétée par un synthétiseur vocal, le phonème "e" pourrait produire une voix numérisée différente, selon l'accent régional ("eu" vs "e"):

```
Tr [[ e ]] ss -> 2      ## ressembler
(c|g) [[ ueil ]] T -> 9 j  ## orgueil
```

Afin de stabiliser l'interprétation phonétique, on fait alors correspondre les codes "2" (r"eu"ssembler, dans certaines régions) et "9" avec le phonème "e" :

```
tableGraphemesSPh.put( "2", new String( "e" )); // comme 'meuble'
```


CHAPITRE 4

DÉMARCHE EMPIRIQUE

4.1 Conception de la démarche empirique

La démarche empirique de cette recherche consiste à mettre en place les outils et processus pour mesurer la performance du SPhone.

Basé sur une mesure du taux d'erreur, l'objectif est un taux inférieur à 10%. Les catégories d'erreurs évaluées sont :

- a. Absence du soutien phonétique;
- b. Mauvais choix de soutien phonétique;
- c. Mauvais alignement du soutien phonétique;
- d. Erreur de marquage (gris estompé) d'une syllabe muette;
- e. Erreur de marquage (rouge) d'une voyelle;
- f. Erreur de marquage de liaison (« z' », « n' » ou « t' »).

La mesure de performance est évaluée sur un corpus de sept (7) textes tirés d'un manuel scolaire de troisième année du primaire (Dulude et Maisonneuve, 2001). Puisque ces textes ont déjà été adaptés avec le soutien phonétique pour les études doctorales (Beaulieu, 2013) de Mme Judith Beaulieu, ils deviennent alors la référence pour mesurer le taux d'erreur du SPhone. Afin d'établir cette mesure, une copie de ces textes est créée, et tous les éléments de soutien phonétique y sont préalablement retirés.

4.2 Exécution de l'expérience

L'exécution de l'expérience se fait en retirant préalablement tous les éléments du soutien phonétique contenus dans le corpus de sept (7) textes fournis par Judith Beaulieu. Par la suite, tour à tour, chacun des textes est chargé dans Word. La fonction d'ajout du soutien phonétique est ensuite enclenchée.

- Lorsque le traitement du SPhone est terminé, les données quant à la durée du traitement, au nombre de mots et au nombre d'opérations automatisées sont prises en note dans la grille d'évaluation.
- Puis, en comparant le document produit par le logiciel au texte de référence qui contient le soutien phonétique déjà ajouté par le GDA, l'identification et le décompte du nombre d'erreurs d'interprétations phonétiques uniques sont faites. Par exemple, dans un même texte, si le logiciel a fait deux fois erreur en ajoutant « au » au-dessus de « eau », alors que « o » était attendu, il s'agit de la même règle d'interprétation phonétique qui est en cause dans le modèle du logiciel. Ce faisant, une seule erreur est ajoutée au total.

Les données recueillies sont présentées au Tableau 5 du CHAPITRE 5.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS

5.1 Présentation des résultats

Le Tableau 5 présente les résultats de cette mise à l'essai.

Tableau 5 Résultats de la mise à l'essai

#	Nom du document	Durée (s)	Nb de mots	Nb d'opérations	Nb d'erreurs	Taux d'erreur
1	SPH_2c_A_P1_tdm_p129	1	33	24	0	0,0%
2	SPH_A_P1_T1_p130-131	4	50	101	1	1,0%
3	SPH_A_P1_T2_p132-133	3	57	49	2	4,1%
4	SPH_A_P1_T3_p134	0	26	46	2	4,3%
5	SPH_A_P1_T4_p135-137	6	68	92	1	1,1%
6	SPH_A_P1_T5_p138-139	3	46	56	3	5,4%
7	SPH_A_P1_T6_p140-142	7	71	140	4	5,0%
	TOTAUX:	24 secondes	351 mots	508 opérations	13 erreurs	2,56%

Le taux d'erreur de 2,56% confirme l'hypothèse avancée dans le cadre théorique : le processus d'ajout de soutien phonétique automatisé avec le SPhone, dans Word, génère un taux de moins de 10% d'erreur. Les résultats indiquent aussi que le SPhone a pu effectuer les opérations de soutien phonétique à un rythme moyen de 0.047s par opération (24s / 508 opérations automatisées).

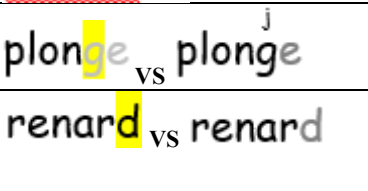
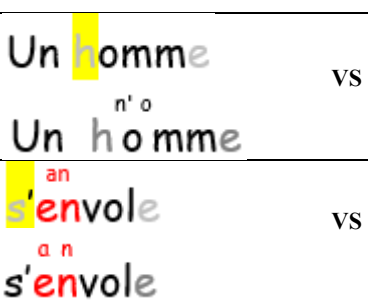
La prochaine section présente l'analyse des résultats, au regard de la méthode utilisée.

5.2 Analyse et interprétation des résultats

La validation officielle du taux d'erreurs effectuées par le SPhone a fait l'objet d'une documentation quant à l'identification et à la nature de ces erreurs. Le Tableau 6 présente ces données. Les catégories d'erreurs sont :

- A. Absence du soutien phonétique;
- B. Mauvais choix de soutien phonétique;
- C. Mauvais alignement du soutien phonétique;
- D. Erreur de marquage (gris estompé) d'une syllabe muette;
- E. Erreur de marquage (rouge) d'une voyelle;
- F. Erreur de marquage de liaison (« z' », « n' » ou « t' »).

Tableau 6 Erreurs du SPhone dans le processus de validation formelle

Id	Texte de référence	Nb d'err.	SPhone versus Texte de référence	Catégorie d'erreurs
1	SPH_2c_A_P1_t dm_p129	0	n/a	n/a
2	SPH_A_P1_T1_ p130-131	1		Catégorie D : absence de marquage de la lettre muette « n ».
3	SPH_A_P1_T2_ p132-133	2		Catégorie A : SPh « j » manquant au-dessus du "g". Catégorie D : absence de marquage de la lettre muette « d ».
4	SPH_A_P1_T3_ p134	2		Catégorie F : Liaison manquante avant le « h » muet. Catégorie D : la lettre « s » a improprement été estompée en gris. Note : l'espace entre « a »

				et « n » n'est pas compté comme une erreur de la catégorie B, puisqu'il s'agit du bon choix d'archigraphème.
5	SPH_A_P1_T4_p135-137	1	^{oua} loin vs ^{ou} loin	Catégorie B: mauvais choix de soutien phonétique. Le "oi" est associé à "oua" plutôt que « o » associé à « ou ».
6	SPH_A_P1_T5_p138-139	3	^{z'} dans un grand arbre vs ^{z' un} ^{t' a} dans un grand arbre.	Catégorie F : absence d'un marqueur de liaison au-dessus de « un ».
			Idem	Catégorie F : absence d'un marqueur de liaison entre « grand » et « arbre ».
			^è serpent vs ^è ^{a n} serpent	Catégorie A : Sph « an » manquant au-dessus de « en ».
7	SPH_A_P1_T6_p140-142	4	^è ^{z'ch} ^e ^{z'} des chasseurs arrivent vs ^è ^e des chasseurs arrivent	Catégorie F : Ajout erroné de soutien phonétique pour le « ch » de chasseurs. Catégorie F : La liaison « z' » ne doit pas être ajoutée entre « chasseurs » et « arrivent ». Puisqu'il s'agit de la même erreur de modèle, en conformité avec la description de l'expérience de la section 4.2, une seule erreur est comptée.
			^è vers vs ^è vers	Catégorie B: mauvais choix de soutien phonétique. Plus précisément, « è » représente le bon choix de Sph, mais le graphème aurait dû être « e », non pas « ers ».

			k commencent vs k a n s commencent	Catégorie A: SPh « s » manquant au-dessus du « c ». Espacement ignoré dans « an » puisque le choix d’archigraphème est valide.
--	--	--	--	--

Les treize erreurs étant catégorisées, cet histogramme montre une perspective de la fréquence de chaque catégorie :

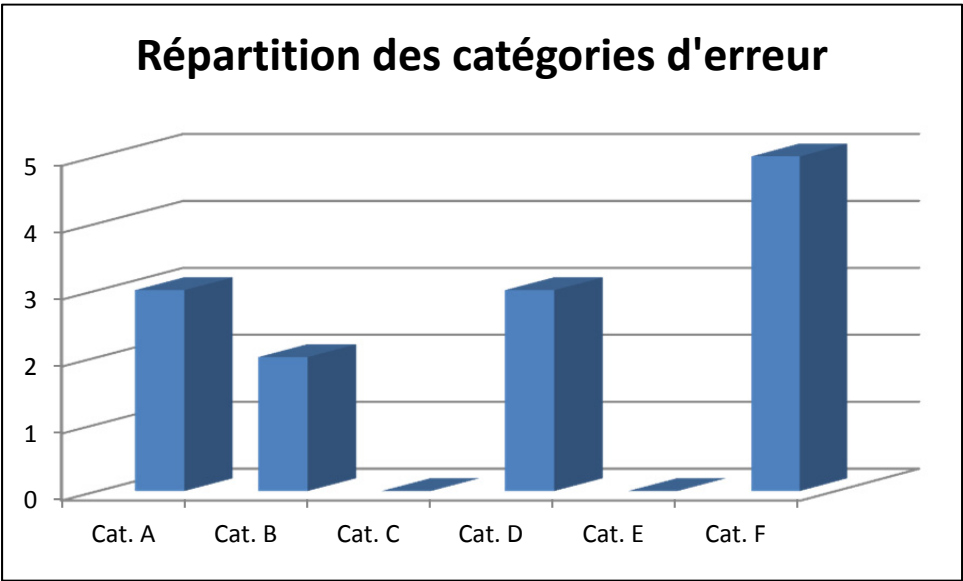


Figure 29 Histogramme de la répartition des erreurs du SPhone par catégorie

- A. Absence du soutien phonétique;
- B. Mauvais choix de soutien phonétique;
- C. Mauvais alignement du soutien phonétique;
- D. Erreur de marquage (gris estompé) d’une syllabe muette;
- E. Erreur de marquage (rouge) d’une voyelle;
- F. Erreur de marquage de liaison (« z’ », « n’ » ou « t’ »).

Tandis que SPhone a bien traité l’alignement du soutien phonétique (catégorie C) et le marquage rouge des voyelles et de leur Sph (catégorie E), les erreurs de marquage de liaison

(« z' », « n' » ou « t' ») (catégorie F) sont les plus fréquentes. Bien que certaines liaisons sont traitées avec succès par le SPhone (les amis, les oiseaux, etc.), certaines liaisons sont plus difficiles à traiter. Comme dans le cas de la liaison en « t », qui se fait avec une lettre « d », dans « grand arbre » ou « quand il », par exemple. Ou encore, la liaison « n' » dans « un homme » se fait, même si le « h » est une consonne, et muette de surcroît.

Les erreurs relatives à l'absence de soutien phonétique, au choix de soutien phonétique, ou au marquage de syllabes muettes (catégories A, B et D), quant à elles, montrent sans surprises que le modèle des règles phonétiques peut encore être amélioré.

Globalement, le résultat obtenu, soit un taux d'erreur moyen de 2,56% dans un corpus de sept textes, doit être mis en perspective. Premièrement, lorsque le travail d'optimisation des règles phonétiques avait été effectué (Section 3.3), plusieurs erreurs avaient été relevées dans le corpus des dix (10) textes de référence utilisés pour l'entraînement du SPhone. Le Tableau 7 présente un sous-ensemble de ces erreurs.

Tableau 7 Erreurs observées dans les textes de référence du corpus d'entraînement

Id	Observations d'erreurs dans les textes de référence du corpus d'entraînement du SPhone	Résultats générés correctement par le SPhone
1	^{a n} <u>différente</u> : espacement erroné dans « an ».	^{an} <u>différente</u> : il n'y a pas d'espacement entre « a » et « n », tel qu'attendu.
2	^{k ê k é} <u>Collectionner</u> : le « t » n'a pas de Sph.	^{k ê ks é} <u>Collectionner</u> : le Sph « s » est ajouté par le SPhone au-dessus du « t ».
3	<u>C'est</u> : « est » n'a pas de soutien phonétique.	^ê <u>C'est</u> : « ê » est ajouté en Sph.
4	<u>facile</u> : le « c » n'a pas de Sph	^s <u>facile</u> : le « s » est ajouté en Sph.
5	^{ê y} <u>soleil</u> : le Sph "y" au-dessus du « l » n'est pas en rouge, alors qu'il devrait l'être (ce phonème est une voyelle).	^{ê y} <u>soleil</u> : le Sph « y » est configuré en rouge par le SPhone.
6	^ê <u>cette</u> : le Sph « s » au-dessus du « c » est absent.	^{s ê} <u>cette</u> : le SPhone ajoute correctement le Sph « s » au-dessus du « c ».
7	<u>Décide</u> : il n'y a pas de Sph « s » au-dessus du « c ».	^s <u>décide</u> : le Sph « s » apparaît, tel qu'attendu.
8	<u>Au</u> : il n'y a pas de Sph « o » au-dessus de ce mot.	^o <u>au</u> : le Sph « o » apparaît, tel qu'attendu.
9	<u>Que</u> : le Sph « k » n'apparaît pas au-dessus du mot.	^k <u>que</u> : le Sph « k » est ajouté par le SPhone, tel qu'attendu.
10	^o <u>un album</u> : la liaison « n' » est absente entre « un » et « album ».	^{n'a o} <u>un a lbum</u> : la liaison « n' » est ajoutée par le SPhone, tel qu'attendu.

De même, le corpus des sept (7) textes de référence pour la validation finale contenait lui aussi des erreurs : elles sont présentées au Tableau 8. Ainsi, lorsque le SPhone avait effectué les opérations d'ajout de soutien phonétique en suivant correctement les règles, si une erreur

était présente dans le corpus de référence, alors la grille d'évaluation finale n'en tenait pas compte dans le taux d'erreur.

Tableau 8 Erreurs observées dans les textes de référence du corpus de validation finale

Id	Observations d'erreurs dans les textes de référence utilisés pour la validation finale du SPhone	Résultats générés correctement par le SPhone
1	Le Sph « ê » n'est pas ajouté au-dessus de tous les mots « est » du corpus de référence.	Le SPhone ajoute le Sph « ê » au-dessus de « est ».
2	 : le Sph « j » est utilisé pour le graphème « ge ». L'erreur est présente à l'intérieur de deux textes du corpus de référence.	 : le SPhone estompe le « e » muet, et place le Sph « j » au-dessus de « g ».
3	La lettre "ô" n'a pas de Sph "o".	Le SPhone ajoute l'archigraphème « o » au-dessus de la lettre « ô », contribuant ainsi à la stabilité de l'interprétation phonétique de cette lettre accentuée.
4	 : le « y » n'a pas de Sph.	 : le SPhone ajoute le Sph « i » au-dessus de « y ».

Deuxièmement, l'optimisation des règles phonétiques avait été effectuée par l'ingénieur auteur de cette recherche. Bien qu'une partie des règles phonétiques puissent être optimisées jusqu'à un certain niveau de cette façon, il n'en demeure pas moins que les compétences de personnes membres du corps professionnel des orthophonistes ou du GDA pourront être mises à profit pour cette configuration du modèle, et ainsi influencer le taux d'erreur à la baisse.

Troisièmement, les sept textes utilisés dans le corpus de validation finale sont destinés à des enfants d'âge scolaire, dont certains présentent des incapacités intellectuelles. Ainsi, ces textes avaient déjà été simplifiés par les membres du GDA de l'UdM. Il est probable que le taux d'erreur aurait été plus grand si les textes utilisés pour la validation avaient été d'un

niveau de langage plus complexe, comme dans un ouvrage littéraire, par exemple. En revanche, une personne habileté à faire la lecture d'un ouvrage littéraire est présumée être apte à faire l'association entre les graphèmes et les phonèmes.

Enfin, tel que la démarche empirique le présente, au CHAPITRE 4, le taux d'erreurs regroupe les erreurs du modèle des règles phonétiques. C'est donc dire que pour un texte donné, une même erreur (de même source dans le modèle), n'était comptée que pour une seule erreur de modèle. Par exemple, dans le texte *Le fin mot de l'histoire* (Dulude et Maisonneuve, 2001), le mot 'histoire' est inscrit à cinq reprises. Dans les faits, c'est le soutien phonétique « oua » qui doit être ajouté au-dessus du graphème « oi ». Si le logiciel SPhone avait plutôt ajouté le soutien phonétique « wa », au lieu de « oua » pour les cinq occurrences de ce mot, c'est donc une seule erreur de modèle qui serait en cause. En effet, une fois cette erreur de modèle corrigée dans le logiciel, le soutien phonétique 'oua' serait correctement ajouté au-dessus de toutes les occurrences du mot 'histoires' de cet exemple.

L'interprétation des résultats ayant été mise en perspective, une analyse critique est abordée dans la prochaine section.

5.3 Discussion des résultats

Bien que le SPhone permette d'automatiser les opérations d'ajout de soutien phonétique aux documents de format Word avec un taux d'erreur moyen de 2,56%, ces erreurs nécessitent quand même quelques interventions manuelles avec le Guide phonétique de Word pour être corrigées.

L'objectif de l'utilisation du SPhone par le GDA étant d'alléger la tâche d'ajout manuel du soutien phonétique à des textes, le temps de correction des erreurs que fait le logiciel doit donc être pris en compte dans l'évaluation d'un ratio coût/bénéfices. Toutefois, étant donné que Mme Judith Beaulieu avait déjà évalué à quinze (15) minutes par page (Beaulieu, 2012a), le temps pour ajouter manuellement le soutien phonétique à un document, les vingt-

quatre (24) secondes qu'a pris le SPhone pour effectuer les mêmes opérations sur sept textes (d'une à deux pages) vient ajouter un élément significatif aux bénéfices. Le Tableau 5 témoigne de ces nombres.

Au fur et à mesure que les règles phonétiques (fichier « règles.txt ») seront améliorées par des spécialistes de l'orthophonie, le taux d'erreur sera appelé à diminuer. Ce qui aura alors pour impact de diminuer d'autant plus le temps d'intervention pour les corrections manuelles, et donc, les bénéfices de l'utilisation du SPhone.

CONCLUSION

Le traitement d'ajout du soutien phonétique aux documents de format Microsoft Word demande un effort considérable, soit environ 15 minutes (Beaulieu, 2012) par page. Dans un contexte où le Groupe DÉFI Accessibilité souhaite produire différents types de textes adaptés avec le soutien phonétique, cet effort est trop coûteux pour assurer la viabilité de ce projet. L'objectif de la recherche était alors de déterminer s'il était possible d'automatiser la tâche d'ajout de soutien phonétique et de marquage des syllabes muettes aux documents francophones, de format Word, avec un taux d'erreur de moins de 10% (Section Hypothèses, H1 et H2).

La recherche visait aussi à évaluer quelle architecture pourrait être mise en place pour rendre l'ajout de soutien phonétique dégressif (Section Hypothèses, H3), afin que la densité de soutien phonétique ajouté au document diminue, en fonction de l'augmentation des habiletés du lecteur à associer les graphèmes aux phonèmes de façon autonome. L'*Architecture Tradeoff Analysis Method* (ATAM) (Kazman R., 2000) a été utilisée dans ce contexte. Dès lors, pour son coût optimal et sa non-nécessité à se connecter à internet, c'est une base de données locale et des caractéristiques de gestion de dossiers intégrées à un module d'extension de Word qui a été choisie pour répondre à ce besoin. Ainsi, le logiciel SPhone permet à l'utilisateur de configurer le niveau de dégressivité souhaité pour chaque archigraphème, et ce, de façon indépendante pour chaque apprenant.

Au chapitre de l'association des graphèmes aux phonèmes, Mme Nina Catach, dans son ouvrage *l'Orthographe* (Catach, 2009) a décrit la genèse de la complexification du français écrit au cours des derniers siècles. Ainsi, pour concevoir un logiciel qui automatiserait l'ajout de soutien phonétique à une langue devenue si complexe au fil du temps, la méthodologie Agile « *Feature-Driven Development* » a été adoptée. Puis, une architecture permettant d'intégrer les services d'un moteur de traitement phonétique à un nouveau module d'extension de Word a été conçue. En utilisant un corpus d'entraînement de dix textes du manuel scolaire Signet 3e année (Dulude et Maisonneuve, 2001), adaptés au soutien

phonétique par le GDA de l'UdM dans le cadre de la thèse (Beaulieu, 2013) de Mme Judith Beaulieu, les règles d'interprétation du moteur phonétique et des différentes composantes du système ont été raffinées et adaptées.

C'est ensuite un second corpus de sept textes, aussi tirés du manuel scolaire Signet (3e année), et fournis par Mme Judith Beaulieu, qui ont été utilisés pour valider le taux et les catégories d'erreurs du modèle d'interprétation phonétique du logiciel. En somme, treize (13) erreurs de modèle ont été identifiées, alors que le logiciel de génération du soutien phonétique dégressif avait effectué cinq cent huit (508) opérations automatisées en vingt-quatre (24) secondes sur ces textes. Le taux d'erreur de 2,56% valide ainsi l'hypothèse selon laquelle un logiciel serait en mesure d'automatiser l'ajout de soutien phonétique, à un texte francophone dans un document Word, avec un taux de moins de 10% d'erreurs.

RECOMMANDATIONS

Des travaux futurs pourront servir à optimiser et à corriger le modèle de traitement phonétique de la solution mise en place, en collaboration avec des orthopédagogues et des orthophonistes. D'ailleurs, chaque limite (Lx) identifiée à la section 1.3 devient aussi une opportunité pour une nouvelle piste de recherche :

- L1 : Le modèle phonétique du SPhone est centré sur la langue française. Une nouvelle recherche pourrait donc viser à adapter le SPhone pour traiter d'autres langues, comme l'espagnol, l'anglais ou l'italien, entre autres.
- L2 : Le logiciel SPhone est limité à ajouter le soutien phonétique aux textes dans le logiciel Word, de Microsoft, conjointement au système d'exploitation Windows. Une nouvelle avenue de recherche pourrait avoir pour objectif d'adapter le logiciel pour d'autres systèmes d'exploitation, comme Android et Mac OS, et des plateformes mobiles telles que l'iPad, le Samsung Galaxy ou le Microsoft Surface Pro.
- L3 : Les textes utilisés pour optimiser et valider le SPhone avaient préalablement été simplifiés, pour un manuel scolaire de 3^e année du primaire. Une nouvelle recherche pourrait viser à traiter des textes d'un plus grand niveau de complexité, par exemple pour des étudiants du niveau secondaire.

Par ailleurs, la démarche empirique, quant à elle, pourrait bénéficier de ces améliorations :

- Valider le logiciel avec de plus grands ensembles de textes, regroupés par niveau de complexité : niveaux primaire, secondaire et collégial.
- Impliquer des assistants chercheurs et orthophonistes du GDA pour les phases d'optimisation et de validation du logiciel.
- Valider la fonction dégressive du logiciel en permettant à l'agent (i.e. professeur, orthopédagogue, parent) d'ajuster la fréquence de l'ajout du soutien phonétique par rapport aux graphèmes de chacun des trente-cinq archigraphèmes (i.e. « au »,

« eau » et « hau » pour le phonème « o », par exemple). La granularité de la paramétrisation du SPh serait ainsi augmentée, en faveur d'un gradient d'apprentissage plus profitable pour l'apprenant.

Finalement, deux autres avenues de recherche ont le potentiel d'élargir le champ d'application du SPhone. D'une part, sur le plan de la gestion de l'aspect dégressif du SPhone et des dossiers des étudiants, le SPhone pourrait bénéficier d'une base de données centralisée sur le réseau internet, ouvrant ainsi la porte à l'utilisation du logiciel dans un contexte d'application plus large, comme celui, notamment, des commissions scolaires.

D'autre part, il serait réaliste et envisageable d'adapter le SPhone pour permettre à l'utilisateur de transposer un document Word, rédigé avec l'orthographe standard sans soutien phonétique, vers l'ortographe altérnative; élargissant ainsi le design actuel du SPhone afin de rejoindre la communauté des personnes qui présentent des incapacités intellectuelles moyennes à sévères.

ANNEXE I

DOCUMENT DE VISION

Logiciel de gestion de soutien phonétique dégressif (SPhone)

Historique des révisions

Date	Version	Description	Auteur
15 mai 2011	1.0	Version initiale	Patrick Tremblay
16 déc 2011	1.1	Version révisée avec les commentaires de JL et SR.	Patrick Tremblay
7 fév 2012	1.2	Ajout : - caractéristiques; - utilisateurs; - intervenants. Version présentée aux professeurs Jacques Langevin et Pierre Bourque, pour la rencontre du 13 février 2012.	Patrick Tremblay
11 fév 2012	1.3	Ajout de définitions.	
11 fév 2013	1.4	Formatage	

Introduction

L'objectif de ce document est de définir, dans un langage clair, le problème et les besoins auxquels le logiciel de génération de soutien phonétique dégressif doit répondre.

Pour ce faire, une identification du profil des parties prenantes, de leurs besoins spécifiques et de leurs critères de succès, mènera à une définition des caractéristiques de la solution proposée.

Objectif

L'objectif ultime de ce document est d'obtenir un accord commun sur la définition du problème, des besoins et des caractéristiques du logiciel proposé.

Comme la qualité de ce document repose sur l'accord de toutes les parties prenantes, plusieurs revues par les pairs seront proposées. Par la suite, les commentaires recueillis permettront l'amélioration de ce document.

Portée

La portée de ce document se limite à la définition du logiciel de génération du soutien phonétique dégressif.

Liste des acronymes

- SPh: Soutien Phonétique
- UdM: Université de Montréal
- ÉTS: École de technologie supérieure
- Document SRS (Software requirement specifications): c'est le document de spécifications des exigences d'un logiciel. Les exigences fonctionnelles et non-fonctionnelles (i.e. attributs de qualité), en font partie.
- GDA: Groupe DÉFI Accessibilité, de l'Université de Montréal
- OC: orthographe conventionnelle
- OA: orthographe alternative (noté : **ortograf alternativ**)

Liste des définitions

- **Archigraphème**: « graphème fondamental, représentant d'un ensemble de graphèmes correspondant au même phonème ou au même archiphonème (ex. O pour o, ô, au, eau, etc.). » (Catach, 2009)
- **Graphème** :
 - La « plus petite unité distinctive d'un système d'écriture. » (Druide informatique, 2012)
 - La « plus petite unité distinctive et/ou significative de la chaîne écrite, composée d'une lettre, d'un groupe de lettres (digramme, trigramme), d'une lettre accentuée ou pourvue d'un signe auxiliaire, ayant une référence phonique et/ou sémique dans la chaîne parlée. Ex. : p, ou, r, ch, a, ss, e, r, dans pourchasser. » (Catach, 2009)
- **Graphème simple/complexe** : le graphème est dit complexe s'il est composé de plus d'une lettre (ex. : « eau », « eault »). Autrement, s'il n'est composé que d'une seule lettre, il sera qualifié de simple.
- **Morphème** : « La plus petite unité significative de la chaîne orale. Ex. : pour, chass, er, dans pourchasser. », (Catach, 2009)
- **Phonème** :
 - La « plus petite unité dépourvue de sens que l'on puisse délimiter dans la chaîne parlée. »,
 - On décrit aussi le phonème comme étant « la plus petite unité distinctive de la chaîne orale, le son. Ex. : s, o, c dans soc », (Catach, 2009)
- **Soutien phonétique dégressif**: Le soutien phonétique est qualifié de dégressif, lorsqu'il fait partie d'un processus dans lequel les archigraphèmes sont ajoutés de moins en moins fréquemment, suivant l'évolution de l'apprentissage de l'élève.

- **SPh**: Soutien phonétique. À l'instar des roues d'appoint installées sur le vélo de l'enfant qui débute ses premières balades, le SPh désigne un mécanisme permettant de diminuer la complexité de la lecture du français. Il s'agit de superposer des archigraphèmes au-dessus des graphèmes dont l'association au phonème est difficile pour le lecteur, le plaçant ainsi en situation de handicap.

Opportunité d'affaires

Le logiciel de génération de soutien phonétique dégressif concerne toute personne qui éprouve des difficultés à lire le français, afin de leur donner accès à l'information et à la participation citoyenne.

Il serait mis en marché chez les acteurs du milieu scolaire, tels que:

- les enseignants du niveau primaire;
- les enseignants et étudiants du domaine de l'éducation aux adultes;
- les enseignants du français langue seconde pour le groupe des personnes allophones;
- les éditeurs de manuels scolaires;
- les orthopédagogues;
- les orthophonistes;
- les parents;

Il est à noter que le gouvernement du Québec offre des subventions pour l'achat de logiciels d'aide à l'apprentissage scolaire.

<http://www.afe.gouv.qc.ca/fr/autresProgrammes/allocationsBesoinsJeunes.asp>

Énoncé du problème

Voici un sommaire de l'énoncé du problème à résoudre. Toutes les parties prenantes auront avantage à s'entendre, et à proposer des correctifs, à la définition suivante:

Le problème	de la difficulté, pour certains groupes de personnes, à acquérir les habiletés nécessaires en vue de développer l'autonomie à lire le français, en raison de la complexité liée à l'association entre les graphèmes et les phonèmes.
affecte	- les élèves, les enseignants, les parents, les orthophonistes, et orthopédagogues - les coûts sociaux associés au support de ces groupes de personnes.
dont l'impact est	- de nuire à la progression scolaire des enfants ne sachant pas lire, lors de leur arrivée en 3e année du primaire; - de créer un casse-tête pour les enseignants du primaire, alors qu'ils sont chargés d'enseigner à un groupe dans lequel ces enfants ne sont pas en mesure de suivre le rythme des autres; - de limiter la participation sociale et l'accès à la démocratie pour les immigrants allophones éprouvant des difficultés à lire le français; - d'imposer un effort considérablement élevé aux orthophonistes, parents, enseignants et orthopédagogues ayant un temps limité, et des outils n'étant pas toujours adaptés en vue de faciliter l'apprentissage de la lecture du français.

Une bonne solution offrirait des caractéristiques telles que	- l'apprentissage du français serait facilité par un logiciel fournissant la possibilité, pour l'ensemble d'un texte rédigé en langue française, de superposer des archigraphèmes au-dessus des graphèmes dont l'association phonétique pose problème pour un groupe de lecteurs visés; - le traitement de superposition des archigraphèmes serait automatisé, pour l'ensemble du texte concerné; - les archigraphèmes superposés aux graphèmes seraient graduellement retirés et ce, à mesure que le lecteur acquiert les correspondances graphèmes-phonèmes complexes; - les acteurs utilisateurs du logiciel seraient en mesure de sauver du temps à ajouter le SPh au texte, par rapport à un traitement manuel. - Ce logiciel fournirait aussi la possibilité, pour une personne en particulier, de gérer le retrait progressif des archigraphèmes; - le logiciel pourrait s'utiliser tant dans un environnement de travail (i.e. école, bureau d'un(e) spécialiste) qu'à la maison; - le logiciel s'adapterait autant à un ordinateur de table qu'à un ordinateur portable, sur une plateforme Windows ou Macintosh récente.
---	--

Positionnement du produit

Voici un tableau qui situe la position de ce logiciel dans le marché des produits éducatifs:

Le logiciel de génération du soutien phonétique dégressif s'adresse à des utilisateurs:	orthopédagogues enseignants parents adultes allophones; élèves et étudiants allophones élèves et étudiants dyslexiques organismes communautaires organismes publics sociétés de services
dont les sujets apprenants (i.e. élèves)	sont de jeunes élèves du primaire et des adolescents et adultes allophones
Qui	ont besoin d'un facilitateur, dans le texte, pour les aider à faire l'association entre les syllabes écrites (les graphèmes) et les phonèmes (le son prononcé).
Le logiciel de génération du soutien phonétique dégressif	est un logiciel éducatif
Qui	<i>[statement of key benefit; that is, the compelling reason to buy]</i> - permet aux spécialistes de l'enseignement, de l'orthophonie et de l'orthopédagogie, d'ajouter automatiquement le soutien phonétique à des textes, tout en adaptant facilement le retrait de cet appoint à mesure que les habiletés de l'apprenant grandissent; - favorise l'acquisition de l'autonomie, de l'accès à la culture et à la participation sociale par l'apprentissage

	de la lecture du français, chez les élèves du primaire et les allophones dont le français n'est pas la langue maternelle; - rend accès à l'information sociale et politique, relative à la participation citoyenne.
Notre produit	Permet de gérer le niveau de progression des apprenants, par un dossier informatisé accessible en ligne. Met l'accent sur l'ajout de soutien phonétique, basé sur 35 graphèmes de base (les archigraphèmes). Permet de gérer le dossier de progression de chaque utilisateur, en permettant de doser l'étendue de l'aide phonétique offerte. C'est ainsi qu'on qualifie le logiciel de dégressif, axé sur l'association graphème-phonème.

Marché Cible

- Tous les professionnels du monde de l'éducation (enseignants, orthophonistes, ...)
- Écoles primaires et secondaires;
- Éducation aux adultes;
- Maison d'édition de livres et manuels scolaires;
- Tout palier gouvernemental ou d'entreprise, désirant fournir un support phonétique aux allophones;

Descriptions des intervenants et des utilisateurs

Les intervenants sont catégorisés avec leurs responsabilités respectives :

Nom	Description	Responsabilités
Groupe DÉFI Accessibilité de l'Université de Montréal	Groupe de professeurs et d'auxiliaires de recherche, dont le mandat vise à étudier et appliquer le concept de l'accessibilité universelle	-références SPh -réviser les travaux -références pour les tests, et les utilisateurs spécialistes potentiels.
Parents	Ce sont les parents d'élèves du 1 ^{re} et 2 ^e année du primaire.	Ayant l'éducation de leurs enfants à coeur, ces parents veulent que leurs enfants gagnent le niveau d'autonomie requis, et ce, à l'âge approprié. Ainsi, ils s'attendent à ce que leurs enfants soient aptes à lire, dès leur entrée en 3 ^e année du primaire.

Enseignants	Ils sont chargés d'un groupe d'élèves du primaire, ou encore, d'un groupe de personnes allophones.	Les enseignants ont à cœur l'atteinte des objectifs scolaires pour tous leurs élèves, mais ont aussi un emploi du temps très serré.
Commission scolaire de Montréal (CSdM)		“Les élèves qui n'ont ni le français ni l'anglais comme langue maternelle ont atteint cette année une proportion de 47,8% dans les écoles de la Commission scolaire de Montréal (CSDM), comparativement à 47,7% du côté des francophones. ”, du Web. Mercredi 25 mai 2011. http://www.lapresse.ca/actualites/education/201105/24/01-4402472-plus-dallophones-que-de-francophones-a-la-csdm.php?utm_categorieinterne=traffiddrivers&utm_contenuinterne=cyberpresse_B4_manchettes_231_accueil_POS3
Orthopédagogues	Spécialiste Définition tirée du site web Granddictionnaire.com	« <i>Personne qui œuvre auprès des enfants, des adolescents ou des adultes afin de prévenir, identifier et corriger leurs troubles d'apprentissage scolaire.</i> »

Orthophonistes	Spécialiste Définition tirée du site web Granddictionnaire.com	<i>« Personne qui étudie et évalue les troubles pathologiques de la communication humaine (voix, parole, langage), et qui les traite au moyen de techniques de correction et de réapprentissage. »</i>
----------------	---	--

Résumé des utilisateurs

Nom	Description	Responsabilités	Intervenant
Toute personne désirant adapter du texte avec le soutien phonétique.	Enseignants; Orthopédagogues; Orthophonistes; Parents; Éducateurs-trices spécialisé(e)s; Éditeur de manuels scolaires; Chercheurs du GDA de l'UdM; Adjoint(e) d'un ministre anglophone;	Interagir avec l'Agent responsable de l'utilisation du logiciel et de la gestion de ses paramètres de progression.	

Caractéristiques du produit

Se référer à la liste des exigences fournies en annexe du mémoire.

ANNEXE II

ANALYSE DES REQUIS

Caractéristiques	Priorité	Recherches/travaux sous-jacents	Statut de l'implémentation
<u>TENUE DE DOSSIERS</u>			
Le logiciel doit permettre à l'Agent:			
d'obtenir la documentation relative à l'utilisation du logiciel;	Important.	Enseignement interactif en technologie Flash, Flex, HTML. Choix et conception de modules d'apprentissage en une technologie sélectionnée.	À faire.
de gérer les informations relatives des Sujets desquels il est responsable;	Important.	Système de gestion de base de données distribué compatible aux critères du projet, accessible sur internet. Compatibilité des fureteurs sous protocole HTTP et HTTPS. Évaluation de serveurs de données MySQL en arrière-plan; Évaluation de PHP.	Étant donné les coûts relatifs à cette implémentation, une base de données locale, à l'ordinateur de l'utilisateur, sera utilisée pour garder les données relatives au dossier de l'apprenant.
Le logiciel doit permettre à l'Agent de tenir un dossier distinct pour chaque Sujet Code permanent, nom, prénom; Agent (ex.: identité de l'orthophoniste) et Institution	Important.	Modélisation conceptuelle en schéma de données relationnelles.	Idem.

associés.			
Le logiciel doit permettre à l'Agent de modifier ce dossier, afin de pouvoir sélectionner les archigraphèmes à être ajoutés au texte.	Important.	Générateur interactif de requêtes SQL.	Idem.
Le logiciel doit permettre à l'Agent de mettre à jour ce dossier, à mesure que l'habileté à la lecture chez le sujet s'accroît. Ainsi :	Important. Critique.	SGBD en consultation, modification, ajout et suppression. Système de maintenance, administration de serveur de données.	Idem.
le logiciel doit permettre à l'agent d'indiquer la proportion (jamais, 50% ou toujours) d'occurrences auxquelles les archigraphèmes seront superposés au texte;	Critique.		
Le logiciel doit permettre à l'Agent d'activer ou de désactiver la possibilité d'estomper les lettres muettes en gris;	Important.		
Le logiciel doit offrir la possibilité d'estomper les lettres muettes en gris, et ce, de façon dégressive.	Important.		
<u>ÉDITION DE TEXTES À TRAITER</u>			
Le logiciel doit permettre à l'Agent:			
d'accéder à une façon simple et rapide d'adapter des textes, en format Word, avec le Soutien phonétique.	Critique.	Conception d'un sous-système intégré à Word, Java, Visual Studio CPP, compatible aux versions 2002, 2003, 2007, 2010 et 2011. Sous Windows XP, Pro, Windows 7. Et Appel Mac OS X.	Caractéristique implémentée.
de sélectionner une partie, ou l'ensemble d'un texte à être traité;	Critique.	Interaction avec le sous-système intégré	Caractéristique implémentée.

		dans Word.	
d'ajouter automatiquement le SPh à la sélection effectuée; un archigraphème au-dessus de chaque graphème sélectionné;	Critique.	Recherche d'un moteur phonétique. Conçu sous le langage Java, il serait compatible à différents systèmes d'exploitation (Windows + Mac).	Caractéristique implémentée.
Question que Patrick Tremblay avait posée pour obtenir la réponse de Judith, ci-bas : Parmi les 35 graphèmes qu'on utilise lorsqu'on transpose l'OC en OA, lesquels ne sont *pas* utilisés pour l'ajout du SPh ? Par exemple, on ajouterait un 'o' au-dessus de 'eau' dans bateau. Mais évidemment pas un 'a' au-dessus... du 'a'! :) Existe-t-il des règles générales, qui nous indiquent au-dessus de quelles syllabes on ajoute le SPh ? Réponse de Judith Beaulieu : Voici les règles écrites par Judith Beaulieu, et retransmises à Patrick Tremblay via Jacques Langevin, le 14 octobre 2011. <u>Règle générale</u> : Avant qu'il ne devienne dégressif, le SPh est ajouté au-dessus de tout graphème qui n'est pas un archigraphème. ☐ Lorsque la lettre écrite est un archigraphème de l'OA, il n'y a pas de soutien phonétique. Par exemple, sur le «a», le «e», le «p», etc. ☐ Lorsqu'il ne s'agit pas d'un archigraphème de l'OA, il y a soutien phonétique. Par exemple pour «eau», «au», «ain», etc. ☐ Il faut faire attention, le soutien phonétique doit être sur le son complet. Par exemple, dans «Remets-toi», le ê est au-dessus de «et» et le «s» est estompé. Ce sont les lettres «e» et «t» qui font le son ê. ☐ En OA, les lettres muettes sont omises, mais en SPh elles sont estompées en gris. Par exemple, dans «un petit bateau», le 2^e «t» du mot petit sera en gris et au-dessus du «eau» il y aura un petit o. ☐ La liaison est marquée, comme en OA, par contre elle est ajoutée sur le premier son du mot. Par exemple, pour «les abeilles», il y a un ê sur le «es» de «les» et un z' a sur le			

«a» du mot abeille. Attention, il y a un espace entre l’apostrophe et le premier graphème (pour indiquer qu’on ne crée pas un nouveau mot du genre «zabeille».

□ Lorsque le phonème est une voyelle (an, on, in...) le graphème complexe et son soutien phonétique sont en rouge (Réfère-toi au début de tout dictionnaire Larousse, la table de prononciation du français distingue les phonèmes en consonnes et voyelles (ordinaires ou nasales ou semi-voyelles).

Caractéristiques	Priorité	Recherches/travaux sous-jacents	Statut de l’implémentation
Le logiciel doit permettre à l’aligner automatiquement le SPh au-dessus des syllabes applicables (se référer aux règles de Judith);	Critique.	Concevoir un algorithme tenant compte de la taille des syllabes, des paramètres modifiables par l'utilisateur et des contraintes inhérentes aux règles d'ajout du soutien phonétique.	Caractéristique implémentée.
<u>FORMATAGE DES TEXTES ADAPTÉ AVEC LE SPh</u>			
Le logiciel doit permettre au Sujet:			
d'ignorer les lettres muettes en les estompant en gris, selon son profil.	Critique.	Évaluation de moteurs phonétiques et d'algorithmes.	Caractéristique implémentée, sans tenir compte du profil à ce stade-ci.
de mettre l'accent sur le Soutien phonétique en l'inscrivant en rouge; d'inscrire tous les graphèmes complexes des voyelles et leur soutien SPh en rouge. De faire en sorte que les consonnes appuyées d'un Sph demeurent en police d'un couleur noire.	Critique.	Idem.	Caractéristique implémentée.

d'entendre un mot ou une phrase sélectionnée;	Envisageable.	Évaluation de moteurs phonétiques TTS.	Caractéristique non implémentée.
d'avoir accès à un didacticiel vocal, relatif aux caractéristiques d'un texte dont la modalité d'adaptation de soutien phonétique a été ajoutée;	Envisageable. Important.	Évaluation de moteurs phonétiques Text-to-Speech (TTS) pouvant être intégrés, dont la voix est fidèle à la réalité. À bas coûts.	Caractéristique non implémentée.
<u>Compatibilité avec les systèmes d'exploitation</u>			
Compatibilité du module d'extension de Word avec Windows	Critique.	Évaluation de framework intégré pour Word.	Fonctionnalité implémentée.
Compatibilité du module d'extension de Word avec Mac OS.	Importante.	Non implémentée.	

ANNEXE III

TABLE DE TRANSPOSITION VERS L'OA

Table de transposition, version 4.5				
VOYELLES				
no	phonèmes	graphèmes	orthographe conventionnelle	orthographe alternatif
1	[i]	i	il, épi, lyre	il, épi, lir
2	[e]	é	blé, aller, chez, épée, j'ai	blé, alé, ché, épé, j'é
3	[ɛ]	ê	lait, merci, fête	lê, mersi, fêt
4a	[a]	a	ami, patte	ami, pat
4b	[ɑ]	ɑ	pas, pâte	pa, pat
5a	[ɔ]	o	fort, donner, sol	for, doné, sol
5b	[o]	o	mot, dôme, eau, saule, zone	mo, dom, o, sol, zone
6	[u]	ou	genou, roue	jenou, rou
7	[y] = [ɥ]	u	ruc, vêtu, huile	ru, vêtû, uil
8a	[ø]	eu	peu, deux	peu, deû
8b	[œ] = [ə]	e	peur, meuble	pêr, mebl
9	[ɛ]	e	premier	premié
10	[ɛ̃]	in	brin, plein, bain	brin, plin, bln
11	[ɑ̃]	an	sans, vent	san, van
12	[ɔ̃]	on	ton, ombre, bonté	ton, onbr, bonté
13	[ɑ̃]	un	lundi, brun, parfum	lundî, brun, parfûn
SEMI-CONSONNES				
14a	[j]	y	paille, ail	pay, ay
14b	[j]*	i	avion, hiérarchie	avion, iérarchi
15	[w] = [u]	ou	fouet, joie, noir	foué, loua, nouar
CONSONNES				
16	[p]	p	père, soupe	pêr, soup
17	[t]	t	terre, vite	têr, vit
18	[k]	k	cou, qui, sac, képi	kou, ki, sak, képi
19	[b]	b	bon, robe	bon, rob
20	[d]	d	dans, aide	dan, éd
21	[g]	g	gare, bague, gui	gar, bag, gi
22	[f]	f	feu, neuf, photo	feu, nef, foto
23	[s]	s	sale, celui, ça, dessous, tasse, nation	sal, selui, sa, desou, tas, nasyon
24	[ʃ]	ch	chat, tache, schéma	cha, tach, chéma
25	[v]	v	vous, rêve, wagon	vou, rêv, vagon
26	[z]	z	zéro, maison, rose	zéro, mézon, roz
27	[ʒ]	j	je, gilet, géôle	je, jlié, jol
28	[l]	l	lent, sol	lan, sol
29	[ʀ]	r	ruc, venir	ru, venir
30	[m]	m	mot, flamme	mo, flam
31	[n]	n	nous, animal	nou, animal
32	[ɲ]	gn	agneau, vigne	agno, vign
PHONÈME COMPOSÉ				
33	[nə]**	ne	personne, tonne, fine	pêrsone, tone, fine
CONSONNES COMPOSÉES				
34	[ks]	ks	mixer, expert, pyrex	miksé, êkspêr, pirêks
35	[gz]	gz	xénophile, exil	gzénofil, êgzil

[j]* : si précédé d'une consonne ou si placé en début de mot.

[nə]** situé en fin de mot.

Figure 30 Table de transposition
Version 4.5 (Langevin J., 2015)

ANNEXE IV

EXEMPLE DE SOUTIEN PHONÉTIQUE DANS UN MANUEL SCOLAIRE

Cet exemple de texte adapté avec le soutien phonétique est tiré du manuel scolaire de 3^e année Signet (Dulude et Maisonneuve, 2001). Il fait partie des travaux de doctorat de Judith Beaulieu (Beaulieu, 2013).



De grandes et de petites collections

Tu as ^âdes ^{i n}timbres ou ^âdes ^{k k y j}coquillages?
Tu peux ^êfaire ^{k ê k}une collection.

1. Est-ce ^kque tu ^kconnais ^êquelqu'un ^{k ê k}qui ^kfait ^êune ^{k ê k}collection?

2. Mets-toi ^âen ^{oua a n n'ê k}équipe et réponds ^oaux ^{k ê}questions.

a) Qu'est-ce ^kqu'une ^{k ê k}collection?

b) Qu'est-ce ^kqu'on peut ^{k ê k}collectionner ^é?

^{a n}Pendant ^kla discussion, tu vérifieras le ^{a n}temps.



22 [tion = sion] [ce = se]

ANNEXE V

EXEMPLE D'UN TEXTE DU CORPUS D'ENTRAÎNEMENT DU SPHONE

Cet exemple est tiré du manuel scolaire Signet (Dulude et Maisonneuve, 2001), de 3^e année du primaire. Aux fins d'entraînement du SPhone, le soutien phonétique a préalablement été retiré.

Le lapin et le renard

Le lapin et le renard vont à la pêche.

Le lapin a une grande queue.

Le lapin pêche avec sa grande queue.

Le lapin plonge sa queue dans l'eau.

Une tortue mord la queue du lapin.

Le lapin va tomber dans l'eau.

Le renard attrape le lapin par les oreilles.

La tortue a mangé la queue du lapin.

ANNEXE VI

GABARIT DU DOSSIER D'UN APPRENANT

~~~~~  
Informations sur l'apprenant:  
~~~~~

Institution :
Code permanent :
Nom de famille :
Prénom de l'apprenant :

~~~~~  
Informations sur l'agent:  
~~~~~

Nom :
Prénom :

~~~~~  
Notes de suivi  
~~~~~

Date / Notes :

~~~~~  
Inclusion/exclusion du soutien phonétique: instructions.

1) Pour chacun des archigraphèmes génériques ou spécifiques listés ci-dessous, veuillez spécifier l'une des trois options suivantes:

- oui : L'archigraphème sera toujours affiché (i.e. 100%).
- non : L'archigraphème ne sera jamais ajouté (i.e. 0%).
- dégressif : L'archigraphème sera affiché une fois sur deux (i.e. 50%).

2) Le "oui", le "50%", ou le "non" sont inscrits après les deux-points ":".

3) Vous pouvez, au besoin, inscrire un commentaire sur la même ligne, après le "oui" ou le "non". Ce commentaire doit toutefois ne tenir que sur une ligne.

&~&~~~~~&~&  
&~& VEUILLEZ NE PAS MODIFIER NI SUPPRIMER CE BLOC &~&  
&~&1~~~~~&~&  
(am) :oui  
(an) :oui  
(an) :oui // Standardisation du phonème "en".  
(an n) :oui // Liaison en 'n'  
(c) :dégressif // Que ce soit pour "c'est", "s'est" ou "ses", par exemple.  
(ch) :oui  
(e) :oui // Comme dans le cas du "eu" de "meuble"  
(é) :oui // Comme dans le cas du "ai" de "j'ai"  
(ê) :oui // Comme dans le cas de les, ces, des, ses, etc.  
(ê t) :oui // Liaison en 't', comme dans le cas de "c'est un"  
(ê z) :oui // Liaison en 'z', précédé du phonème 'ê' ("les escargots")  
(ê z') :oui // Liaison en 'z', pour certains cas spécifiques.  
(gn) :oui //  
(gz) :oui // Comme dans le cas de "xylophone"  
(i) :oui // Règle no 1 (Table de transposition, version 4.5)  
(i z) :oui // Liaison en 'z', précédé du phonème 'i' ("tu écris alors")  
(in) :oui // Comme dans le cas de "bien"

```

(j)      :oui           // Spécifique pour certains sons "j".
(kê)     :oui           // Comme dans le cas de "quelque"
(ks)     :oui           // Spécifique pour certains sons "ks"
(man)    :oui           // Comme dans le cas du "ment" de "lentement"
(n e)    :oui           // Comme dans le cas de "je donne"
(o)      :dégressif    // Comme dans le cas de "eau"
(omm)    :oui
(on)     :oui
(on n)   :oui           // Liaison en 'n'
(onn)    :oui
(ou)     :oui           // Règle no 6 (Table de transposition, version 4.5)
(oua)    :oui           // Comme dans le cas de "toile"
(r)      :oui
(s)      :dégressif
(tu)     :oui           // Spécifique à ce logiciel pour le "tu"
( t)     :oui           // Liaison (i.e. "grand ami").
(u)      :oui
(un n)   :oui           // Liaison en 'n'
(y)      :oui           // Comme dans le cas de "feuilles"
(y)      :oui           // "briller"
(z')     :oui           // Liaison en 's', comme dans le cas de "les oiseaux"

```

```

~&~~~~~&
~&          AFFICHAGE DES LETTRES MUETTES EN GRIS ESTOMPÉ          &~&
~&          &~&
~& En OA, les lettres muettes sont omises, mais en SPh,          &~&
~& elles sont estompées en gris. Désirez-vous estomper les      &~&
~& lettres muettes en gris ?                                     &~&
~&          &~&
~& Veuillez indiquer OUI ou NON.                                  &~&
~&          &~&
~&          VEUILLEZ NE PAS SUPPRIMER CE BLOC DE TEXTE          &~&
~2~~~~~&
oui
~&~~~~~&

```

```

~&~~~~~&
~&          AFFICHAGE DES GRAPHÈMES ET PHONÈMES EN ROUGE          &~&
~&          &~&
~& Désirez-vous afficher le graphème complexe et son            &~&
~& soutien phonétique en rouge, lorsque le phonème est une voyelle ? &~&
~&          &~&
~& Veuillez indiquer OUI ou NON.                                  &~&
~&          &~&
~&          VEUILLEZ NE PAS SUPPRIMER CE BLOC DE TEXTE          &~&
~3~~~~~&
oui
~&~~~~~&

```

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Armand, Françoise. 2005. « Les élèves immigrants nouvellement arrivés et l'école québécoise ». *Santé, Société et Solidarité*, n°1, p. 11.
- Bara, F., E. Gentaz et P. Colé. 2004. *Les effets des entraînements phonologiques et multisensoriels destinés à favoriser l'apprentissage de la lecture chez les jeunes enfants*. *Enfance*, Vol. 56, p. 387-403. DOI : 10.3917/enf.564.0387.
- Batista, Luana Bezerra, et Sylvie Ratte. 2012. « A Multi-Classifer System for Sentiment Analysis and Opinion Mining ». In *Proceedings of the 2012 International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM 2012)*. p. 96-100. 2457112: IEEE Computer Society.
- Beaulieu, J. 2012. *Témoignage: "Estimation du temps moyen que prend l'ajout de soutien phonétique dans un document Word"*. Courrier électronique envoyé à Patrick Tremblay. Judith Beaulieu, 1 p. Consulté le 5 octobre 2012.
- Beaulieu, Judith. 2013. « Productivité de manuels scolaires adaptés pour élèves ayant deux années de retard en lecture ». Thèse de doctorat. Montréal, Université de Montréal, 270 p.
- Catach, Nina. 2009. *L'orthographe*, 9e édition. Coll. « Que sais-je ? ». France: Presses universitaires de France, 128 p.
- Charron, A., I. Montésinos-Gelet et M.-F. Morin. 2009. *Description et catégorisation des pratiques déclarées en orthographes approchées chez des enseignantes du primaire*. *Revue des sciences de l'éducation*, 35 (3), 85-106.
- CMMI-Institute. 2014. « CMMI for Development: Guidelines for Process Integration and Product Improvement ». n° 3.
- Druide informatique, inc. 2012. *Logiciel Antidote 8*.
- Dulude, F., et H. Maisonneuve. 2001. *Signet, 3e année*. Montréal: Éditions du Renouveau Pédagogique Inc.
- GDA. 2009. « Programme de recherche et innovation 2010-2014 ». n° 2.5, p. 1-15.
- GDA. À jour au 1er novembre 2014. « Didacticiel pour l'apprentissage de l'orthographe alternatif ».

- GDA, Langevin, Rocque, Chalghoumi, Ghorayeb. 2011. « Accessibilité universelle et designs contributifs ». *Développement humain, handicap et changement social du Réseau international sur le processus de production du handicap (RIPPH)*, vol. 19, No 3, p. 7-24.
- Green, S., R. Peterson et J. Lewis. 2006. *Language and literacy promotion in early childhood settings: a survey of center-based practices*. Early childhood research & practice, vol. 8, No 1.
- H. Collavizza, Jean-Paul Stromboni, Affouard, Lemonnier, Fournols et Lizzul. 2005. *S.I. VOX / Vocalyze*. Coll. « Code source de logiciel. ». Polytech'Nice Sophia-Antipolis (UNSA) : France.
- Landauer, TK , et J. Psotka. 2000. *Simulating text understanding for educational applications with Latent Semantic Analysis: Introduction to LSA*. Interactive Learning Environments, Vol. 8, Issue 2.
- Langevin, Rocque, Chalghoumi, Ghorayeb et Université de Montréal. 2011a. « Accessibilité universelle et designs contributifs ». *Revue Développement humain, handicap et changement social du Réseau international sur le processus de production du handicap (RIPPH)*, vol. Vol. 19, No 3, 7-24.
- Langevin, Rocque, Chalghoumi, Ghorayeb et Université de Montréal. 2011b. « Rapport de recherche pour les milieux associatifs de Montréal, Accessibilité universelle et designs contributifs (version 5.3) ».
- Langevin, Rocque, Ghorayeb Chalghoumi et Université de Montréal. 2011c. « Accessibilité universelle et designs contributifs ». *Revue Développement humain, handicap et changement social du Réseau international sur le processus de production du handicap (RIPPH)*, vol. Vol. 19, No 3, 7-24.
- Langevin et Rocque, GDA. 2010. *Trois pédagogies adaptées*. Recueil de textes de l'université d'été (ergonomie et incapacités intellectuelles). Université de Montréal.
- Langevin J., Gervais N. 2008. *Université d'été : ergonomie et incapacités intellectuelles*. Recueil de textes. Université de Montréal.
- Langevin J., Rocque S. 2011. *Table de transposition*. Table de transposition de l'OC à l'OA. 4.5. GDA.
- Langevin J., Rocque S., Groupe DÉFI Apprentissage. 2014. *Extraits de l'ortographe alternatif*. Document. Coll. « L'ortographe alternatif ». Groupe DÉFI Accessibilité (GDA).
- Legendre, Renald. 1993. « Dictionnaire actuel de l'éducation, 2e édition ».

- Legendre, Renald. 2005. *Dictionnaire actuel de l'éducation*, 3e édition. Guérin, éditeur ltée.
- Manning, C, P Raghavan et H. Schütze. 2008. *Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Speech Recognition, and Computational Linguistics*, 2nd edition. Prentice-Hall.
- Ministère de l'éducation nationale de France. 2012. « Concertation sur la refondation de l'école de la République ». *Traitement du handicap: éléments de comparaison internationale* En ligne. Ministère de l'éducation nationale de France. < [http://www.education.gouv.fr/archives/2012/refondonslecole/wp-content/uploads/2012/09/consulter\\_la\\_comparaison\\_internationale\\_sur\\_le\\_handicap1.pdf](http://www.education.gouv.fr/archives/2012/refondonslecole/wp-content/uploads/2012/09/consulter_la_comparaison_internationale_sur_le_handicap1.pdf) >. Consulté le 2 novembre 2014.
- Morin M.-F., N. Prévost et M.-C. Archambault. 2009. *Effet de différentes pratiques d'éveil à l'écrit en maternelle sur l'apprentissage du français écrit*.: Spirale – Revue de recherches en éducation, 44, 83-100.
- Québec (Province). À jour au 1er novembre 2014a. « Loi assurant l'exercice des droits des personnes handicapées en vue de leur intégration scolaire, professionnelle et sociale ». En ligne. Québec (Qc.) : Éditeur officiel du Québec. < [http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/E\\_20\\_1/E20\\_1.html](http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/E_20_1/E20_1.html) >. Consulté le 2 novembre 2014.
- Québec (Province). À jour au 1er novembre 2014b. « Loi sur l'instruction publique ». En ligne. Québec (Qc.) : Éditeur officiel du Québec. < [http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/I\\_13\\_3/I13\\_3.html](http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/I_13_3/I13_3.html) >. Consulté le 2 novembre 2014.
- Ramsin, Raman, et Richard F. Paige. 2008. « Process-centered review of object oriented software development methodologies ». *ACM Computing Surveys*, vol. 40, n° 1, p. 1-89.
- Reeder, F. 2006. *Measuring MT Adequacy Using Latent Semantic Analysis*. Proceedings of the 7th Conference of the Association for Machine Translation in the Americas, pages 176-184.
- Rieben, L., L. Ntamakiliro, B. Gonthier et M. Fayol. 2005. *Effects of Various Early Writing Practices on Reading and Spelling Components*. Studies of Reading, Vol. 9, No 2, p. 145-166.
- Vickoff, Jean-Pierre. 2014. *Cycle des méthodes Agiles*. Travail personnel publié sur le web. < [http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode\\_agile#mediaviewer/Fichier:Semiliteratif.jpg](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_agile#mediaviewer/Fichier:Semiliteratif.jpg) >. Consulté le 2 novembre 2014.

Viens J., Langevin J., M. Saint-Pierre et Rocque S. 2012. *Pour des technologies accessibles aux élèves handicapés ou en difficulté d'apprentissage ou d'adaptation*. Montréal, Québec: Éditions Nouvelles.

Ville de Montréal. 2010. *L'accessibilité universelle : un engagement de la Ville de Montréal*. En ligne. Montréal: Ville de Montréal. < [http://servicesenligne.ville.montreal.qc.ca/sel/publications/PorteAccesTelechargement?lng=Fr&systemName=76015582&client=Serv\\_corp](http://servicesenligne.ville.montreal.qc.ca/sel/publications/PorteAccesTelechargement?lng=Fr&systemName=76015582&client=Serv_corp) >. Consulté le 2 novembre 2014.

Ville de Montréal. 2014. *AccèsSimple*, [http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?\\_pageid=1576,53793586&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=1576,53793586&_dad=portal&_schema=PORTAL). En ligne. Montréal. Consulté le 2 novembre 2014.