
Dicotomix



T.Stérin, A.Martin, F.Lécuyer,
E.Hazard, P.Mangold, E.Kerinec, M.Guy,
R.Pellerin, N.Pinson, A.Słowik

Résumé : *TODOOOOOOOOOO WTF Les réseaux de neurones récurrents sont des modèles aptes à apprendre et à générer des séquences temporelles. Ces réseaux se déclinent en plusieurs variantes dont les deux principales sont Vanilla et LSTM. À travers un exemple concret d'inférence grammaticale on constate la faiblesse des Vanilla à exploiter des dépendances temporelles longues. Sur la base de ces résultats expérimentaux on remet en cause l'importance de la raison la plus souvent invoquée dans la littérature pour expliquer cette faiblesse. On propose une autre explication que l'on conjugue avec l'introduction d'une mesure de la capacité de mémoire d'un modèle récurrent. On confronte cette mesure à la théorie des Echo States Networks qui aborde ces questions de mémoire différemment. Forts de ces expériences on applique les techniques décrites à la génération de musique à travers les chorals de Bach.*

Mots clefs : *un, deux, trois*

Remerciements

Tout d'abord, un grand merci à l'ENS de Lyon, au département informatique et à [Eddy Caron](#) et [Issam Raïs](#), nos encadrants de projet. Merci pour la liberté dont nous avons joui dans l'organisation et la mise en œuvre de ce projet. Merci pour la confiance que vous nous avez témoignée tout au long de l'année. Et enfin, merci de nous avoir donné l'occasion de réaliser un projet si prenant.

Nous tenons à remercier très sincèrement le professeur Jacques Luauté qui nous a très généreusement ouvert les portes de son service et toujours encouragés dans notre démarche. Nous voulons aussi remercier le docteur Emilien Bernard pour l'expérience qu'il nous a apportée autour de la maladie de Charcot. Un grand merci à Perrine Seguin, interne du service, Melaine De Quelen et Manel Ben Romdhane, orthophonistes du service et aux externes qui ont organisé la réalisation de l'étude au quotidien. Enfin, un immense merci aux patients pour leur implication dans l'étude et pour tout ce qu'ils nous ont appris humainement.

Nous tenons particulièrement à remercier Maureen Clerc, Alexandra Corneyllie et Jérémie Mattout pour leur aide précieuse dans le domaine de la BCI.

Merci également à tous les linguistes intervenus dans le projet, Nicolas Laurent, Isabel Colón de Carvajal, Matthieu Quignard et Jean-Philippe Magué, qui ont contribué à nourrir notre réflexion et à permettre des améliorations à l'algorithme initial. Nous souhaitons aussi remercier très chaleureusement [Charlie Lopez](#) qui a réalisé tout le design graphique du logiciel. Enfin nous souhaitons remercier [Thibault Souquet](#) pour sa participation à la construction de l'architecture client-serveur du logiciel et à l'organisation visuelle de celui-ci.

Enfin, un très grand merci à Odile Souquet, référente régionale pour la thématique médecine à l'Agence Régionale de Santé du Rhône-Alpes, qui nous a accompagnés tout au long de notre cheminement et a contribué à l'organisation de rencontres décisives pour le projet.

Table des matières

1	Introduction	4
2	Genèse du projet	4
2.1	Interface cerveau machine	5
2.1.1	Casque EEG	5
2.1.2	Paradigme Alpha	6
2.1.3	Paradigme SSVEP	7
2.1.4	Conclusions	7
2.2	Akinator	8
3	La solution Dicotomix	8
3.1	L'algorithme Dicotomix	8
3.2	Le logiciel	9
4	L'étude pilote	9
4.1	Le cadre	9
4.2	La méthodologie	10
4.3	La réalisation	10
5	Conclusion	11
A	Intervenants extérieurs et chronologie détaillée	12
B	Étude comparative de la solution Dicotomix	14
C	Tutoriel d'utilisation de Dicotomix	14

1 Introduction

Le Locked-In Syndrome (**LIS**) est un état neurologique qui prive les patients de la quasi-totalité de leurs capacités motrices : ils ne peuvent ni bouger ni parler, mais leurs capacités cognitives ne sont pas altérées *a priori*. Les patients se retrouvent prisonniers de leur corps, d'où l'appellation de syndrome d'enfermement, parfois utilisée. Cette maladie a notamment été présentée au grand public à travers *Le Scaphandre et le Papillon*, mémoires retraçant le combat de Jean-Dominique Bauby pour communiquer. En effet, la motricité des yeux est généralement conservée et permet de mettre en place un code "Oui/Non" donnant un moyen élémentaire de communication.

La communication, c'est cette problématique qui à l'origine du projet Dicotomix. La rencontre avec le monde hospitalier nous a fait comprendre que ce problème est plus général que le cadre strict du LIS car il concerne d'autres maladies, comme la maladie de Charcot ou sclérose latérale amyotrophique (**SLA**). Là où des études montrent ([ETUDE]) que communiquer est primordial pour le bien-être psychique des patients, d'autres insistent ([ETUDE 9 Chez Pauloss]) sur la pénibilité des méthodes traditionnelles. Ainsi, comment utiliser la technologie pour améliorer les moyens de communication de ces patients ?

Ce rapport a donc pour objectif de présenter les différentes solutions pensées par notre équipe pour répondre à ce problème. C'est grâce à l'intervention de nombreuses personnes du monde hospitalier que nous avons pu confronter nos "idées de laboratoire" aux besoins réels des patients et du monde médical. Cette confrontation a constamment guidé notre démarche et a conduit à notre réalisation principale, le logiciel Dicotomix.

Enfin, nous avons eu la chance de pouvoir faire tester notre logiciel à un patient LIS et une patiente SLA, au cours d'une étude pilote menée avec les Hospices Civiles de Lyon. Cet aboutissement, très intense humainement, a redessiné une nouvelle fois les contours du projet. De sa genèse à l'étude pilote, c'est l'aventure humaine et scientifique du projet Dicotomix.

2 Genèse du projet

L'idée initiale du projet est née à la suite d'une conférence de Maureen Clerc à l'ENS de Lyon. Elle est une des spécialistes français de l'Interface Cerveau Machine (**BCI** pour Brain Computer Interface). Les interfaces cerveau machine constituent l'ensemble des techniques qui permettent d'interagir avec un ordinateur à l'aide de l'activité cérébrale. Sa conférence était orientée autour de l'électroencéphalographie (**EEG**), qui étudie les activités électriques du cerveau grâce à un casque d'électrodes posées sur le scalp (Figure 1). Il s'agissait d'une introduction aux techniques permettant d'exploiter informatiquement ces signaux EEG.

L'idée était alors la suivante : utiliser les signaux EEG pour permettre au patient de répondre à des questions fermées que pose la machine. Autrement dit, le but était d'associer à certains signaux cérébraux que le patient choisit d'émettre la réponse "Oui" et aux autres la réponse "Non". C'est sur cette idée, de répondre à des questions, qu'est construite l'application [Akinator](#). Elle devine, et souvent très rapidement, un personnage auquel on pense. Ainsi, sous réserve d'élargir le procédé à n'importe quel type d'objet, cette méthode pouvait servir d'alternative aux méthodes traditionnelles de communication.

Ces méthodes traditionnelles, que nous avons regroupées dans notre étude comparative (voir Annexe B), reposent toutes sur le même principe : énumérer les lettres de l'alphabet au patient et attendre qu'il dise oui au moment où l'on annonce la sienne. Lettre par lettre, les mots sont ainsi épelés. Tout l'enjeu de notre démarche est de penser une solution moins frustrante [ETUDE 9 Chez Pauloss] que l'épellation. Le système de réponse à des questions, type Akinator, était notre premier candidat.

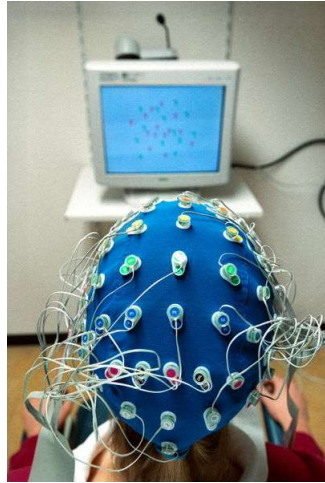


FIGURE 1: Casque d'EEG et interface cerveau machine

Ainsi, deux grands axes de réflexion se sont dégagés très tôt dans notre travail :

- **L'interface**, c'est à dire le moyen physique de dire "Oui" ou "Non". Ici, les signaux EEG contre le mouvement des yeux.
- **La méthode** pour exprimer un mot une fois que l'on est capable de dire "Oui" ou "Non" – peu importe le moyen. Ici, la méthode Akinator contre les méthodes traditionnelles d'épellation.

Les deux prochaines parties détaillent nos travaux dans les deux branches et comment, au fil de nos interactions avec le monde hospitalier, nous avons transformé nos approches pour en arriver à Dicotomix.

2.1 Interface cerveau machine

2.1.1 Casque EEG

La première partie de notre travail en BCI a consisté à se renseigner autour du matériel dont on pouvait bénéficier pour réaliser nos expériences EEG. Deux catégories se sont alors dessinées :

- Le matériel d'hôpital, très performant – très bonne résolution des signaux – donc très onéreux (~20k €) et difficile d'accès à l'hôpital (besoin d'accréditations).
- Le matériel pour particuliers. Il existe des modèles de BCI à des fins expérimentales dont la résolution est faible mais suffisante pour des premiers résultats. Le budget est sensiblement différent (~600 €).

Nous nous sommes donc orientés vers les solutions pour particuliers où deux possibilités se présentent à nouveau :

- Du matériel propriétaire, édité par la société Emotiv. Le code associé au matériel (SDK) est protégé et peu malléable.
- Du matériel libre édité par l'organisation [OpenBCI](#) à la philosophie entièrement open software et open hardware (le casque est 3D imprimable).

C'est sous les conseils de Maureen Clerc que nous nous sommes orientés vers le matériel OpenBCI dont elle nous avait attesté la qualité. C'est grâce à Alexandra Corneyllie et Jérémie Mattout, ingénieure de recherche et chercheur spécialistes en BCI, que nous avons pu avoir accès au casque **Ultracortex Mark IV** d'OpenBCI (Figure 2) qu'ils nous ont prêté pendant toute la durée de notre projet.

Nous avons pour ambition d'être capables de détecter un signal binaire avec le casque EEG, c'est-à-dire de concevoir une situation qui permet au patient d'indiquer par son activité cérébrale un "Oui"

FIGURE 4: Ondes alpha : résultats d'expert

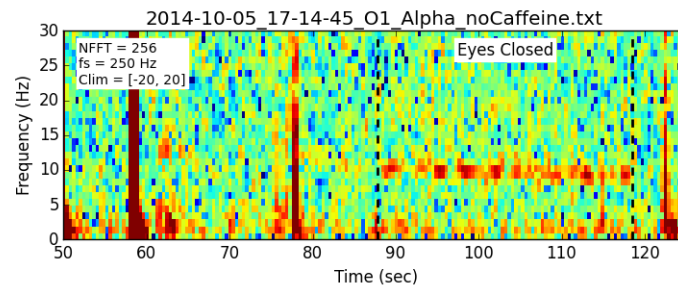
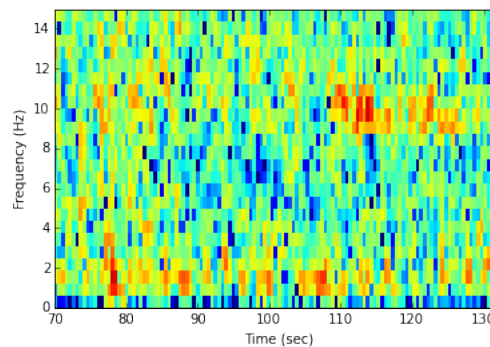


FIGURE 5: Ondes alpha : nos résultats



2.1.3 Paradigme SSVEP

Le paradigme SSVEP repose sur le phénomène de potentiel évoqué [REFERENCE]. Si l'on présente à un sujet une image qui clignote à une certaine fréquence (entre 5 et 10Hz dans nos expériences) on retrouve des pics à cette fréquence dans l'activité du cortex visuel (électrodes O1 et O2 sur la Figure 3). L'idée est donc de proposer deux sources lumineuses qui clignent à deux fréquences différentes sur l'écran (une pour Oui et une pour Non), et de repérer le choix du patient en fonction de celle sur laquelle il porte son attention. Le même blog d'expert [EEG HACKER] réussit à contrôler un robot à l'aide de ce paradigme. Malgré tous nos essais nous n'avons rien obtenu de concluant. Cela est très certainement dû aux raisons suivantes :

- Des problèmes d'acquisitions : des physiciens de l'ENS, spécialistes de l'EEG, ont remis en cause la qualité de nos signaux. Un mauvais placement du casque ou un paramétrage approximatif du logiciel d'acquisition peuvent en être à l'origine.
- Un manque de contrôle sur la fréquence exacte à laquelle la vignette clignote. Jérémie Mattout, spécialiste de l'EEG, nous avait suggéré un protocole plus fin pour se débarrasser de ce biais à l'aide d'électro-photodiodes. Nous n'avons pas réussi à aboutir non plus.

2.1.4 Conclusions

Les difficultés que nous rencontrions avec l'EEG devaient nous inciter à persévérer. Cependant, le professeur Luauté, que nous avons rencontré à mi-parcours (janvier), nous a très vite mis en garde sur la faisabilité de notre démarche. En effet, alors même que nous n'arrivions pas à obtenir des résultats satisfaisants sur des sujets sains, les équipes de recherches spécialistes du domaine butaient à faire fonctionner ces paradigmes chez les patients cérébrolésés [VOIR LES TROIS DOSSIER REFERENCÉS/HARD]. Il nous a invités à nous concentrer en priorité sur la méthode que nous voulions mettre en œuvre pour traiter ces signaux Oui/Non, arguant que nous pourrions la tester avec le code Oui/Non oculaire que beaucoup de ses patients utilisent.

Nous avons donc laissé de côté nos investigations autour de l'interface BCI pour nous concentrer sur la méthode de communication. Toutefois nous avons appris beaucoup de choses pendant cette phase du projet et nous nous sommes familiarisés avec un ensemble de techniques et de protocoles expérimentaux qui nous étaient inconnus. De cette investigation pluridisciplinaire, nous tirons une idée plus claire de la réalité et des enjeux des interfaces cerveau-machine.

2.2 Akinator

TODO

Blabla : au début Akinator. Trop compliqué car besoin que des gens l'entraînent [METTRE LA REF SUR LE FONCTIONNEMENT AKINATOR (voir tout debut du projet)]. Comment simplifier Akinator ? DICHOTOMIE. Dire que l'idée embale Luauté.

3 La solution Dicotomix

3.1 L'algorithme Dicotomix

L'objectif initial est de trouver un mot dans le dictionnaire avec un nombre minimal de questions Oui/Non. Comme il y a deux réponses possibles, l'efficacité est maximale si chaque question élimine la moitié des possibilités. L'idée d'une dichotomie nous est venue naturellement : à chaque étape, un mot central est proposé avec la question "Votre mot est-il avant ?". Quelque soit la réponse, la moitié de l'intervalle considéré dans le dictionnaire est éliminée. D'un point de vue mathématique, la convergence se fait en $\log_2 N$ étapes, soit 17 pour un lexique de $N = 130\,000$ mots.

Cependant, opérer ainsi sur l'ensemble des mots du dictionnaire n'est pas suffisant, puisque cela consiste à séparer à chaque étape en deux parties contenant le même nombre de mots, tandis que nous voulons deux parties de même probabilité. Intuitivement, il devrait être plus simple de trouver les mots les plus courants. Pour résoudre ce problème, la dichotomie peut être pondérée par la fréquence de chaque mot. Cela revient à opérer sur un segment où chaque mot a une longueur proportionnelle à sa fréquence (figure 6).

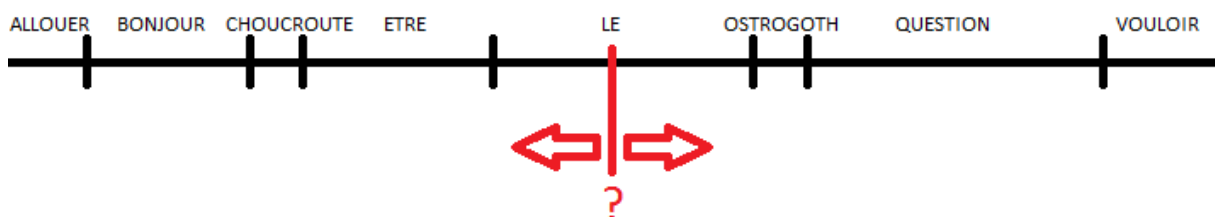


FIGURE 6: Schéma du fonctionnement de l'algorithme dichotomique pondéré

Pour déterminer la fréquence de chaque mot, nous avons utilisé une base de données (fournie par lexique.org) donnant les fréquences des mots de la langue française en se basant sur des livres et des films. Nous avons ensuite ajouté quelques astuces en réponse à différents problèmes.

Un premier problème, d'apparence anodine, est le déterminisme de cet algorithme, qui a plusieurs effets négatifs. Premièrement, le "centre" de l'intervalle est fixe donc peut tomber sur un mot peu utilisé alors même que des mots courants sont à proximité. De plus, la séquence de mots proposée est toujours la même, ce qui peut rendre l'utilisation répétitive voire désagréable (une version de l'algorithme menait systématiquement au mot "cadavre" quand on cherchait "bonjour"). Pour régler ce problème, nous

avons ajouté un facteur aléatoire : le "centre" de l'intervalle est légèrement décalé aléatoirement, ce qui fait statistiquement tomber sur des mots importants et variés. L'ajout de ce facteur aléatoire nous a imposé de mettre en place une mémorisation du chemin pour pouvoir revenir sur ses pas, car ce chemin n'était alors plus déterministe.

Malgré la prépondérance des mots importants, la rapidité escomptée n'était pas au rendez-vous. En particulier, l'utilisation en mode épellation (voir le tutoriel en Annexe C) menait à des situations presque risibles : alors que chacun s'attend à trouver un U après un Q, le logiciel proposait inlassablement d'autres lettres. Pour éviter ce genre de situation très frustrante, les spécialistes en linguistique informatique Matthieu Quignard et Jean-Philippe Magué nous ont suggéré d'utiliser une *mémoire des n-grams*.

Le principe est simple : tous les mots du dictionnaire sont observés, et les successions de n lettres les plus fréquentes sont gardées en mémoire. Ainsi, les propositions faites par le logiciel pour la prochaine lettre vont dépendre des précédentes. Nous avons lancé un script permettant d'apprendre la probabilité des 5-grams dans le dictionnaire français, 5 étant un bon compromis entre efficacité (5 lettres données ne laissent pas beaucoup de choix sur la suivante) et rapidité (le nombre de n -grams étant exponentiel en n). TODO

Parler ensuite du spelling Mode et de la prédiction de lettre grace aux 5-grams (remercier linguistes Quignard et Magué pour l'idée blabla).

Dire qu'on pourrait faire du ngrams sur les mots pour prediction de mots.

Mentionner les techniques à l'état de l'art dans le domaine LSTM et réseaux de neurones récurrents.

Insister que Dicotomix en bénéficiera bcp.

DIRE LE MOT INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Dire que Luauté était emballé.

P.e : reprendre les schémas de la pres

3.2 Le logiciel

TODO

Archi client serveur

JS

BLABLA c'est portable (testé sur MAC Linux et Windows pour de vrai)

plz : dire ce qu'à "fait" Souquet. + charlie Lopez.

Des ptites captures d'écran du futur. ==> On peut juste dire "voir le tuto comment c bo"

4 L'étude pilote

4.1 Le cadre

Le professeur Jacques Luauté nous a accueilli au Service de Rééducation Post Réanimation (**SRPR**) de l'hôpital neurologique Pierre Wertheimer (Vinatier). C'est dans ce service que nous avons rencontré un patient atteint de LIS afin de pouvoir lui faire tester Dicotomix. Perrine Seguin, interne du service, les équipes d'orthophonistes ainsi que les externes en médecine nous ont accompagnés tout au long de la réalisation de l'étude.

Le docteur Émilien Bernard nous a mis en relation avec une patiente atteinte de SLA. Nous sommes allés la rencontrer à domicile. Ainsi notre étude pilote a reposé sur des tests réalisés chez un patient LIS et une patiente SLA.

4.2 La méthodologie

La méthodologie de l'étude a été pensée avec l'équipe du professeur Luauté et est résumée Figure 7. Delphine Maucort-Boulch spécialiste de méthodologie dans le cadre de ce type d'étude nous a aidé à finaliser le protocole.

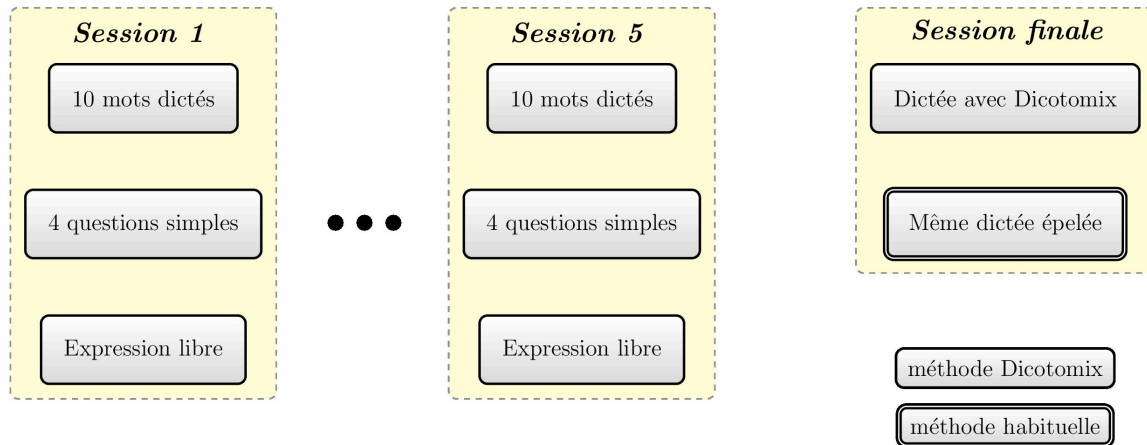


FIGURE 7: Méthodologie de l'étude pilote

Il s'agissait d'abord d'entraîner le patient à utiliser le logiciel au cours de 5 sessions d'entraînement (une par jour). Chaque session consistant à lui demander de trouver 10 mots dictés avec la méthode ; puis de répondre à quatre questions simples ("Quelle est votre couleur préférée ?") ; et enfin de le laisser s'exprimer librement avec l'outil s'il le souhaitait.

Ensuite, pour la session finale ou session d'évaluation, le même texte est dicté deux fois et le patient doit l'écrire la première fois avec Dicotomix puis avec sa méthode habituelle. La même limite de temps est imposée pour les deux dictées et il s'agit donc de voir jusqu'où le patient a pu aller avec chacune des deux méthodes.

4.3 La réalisation

Nous avons commencé par tester le protocole avec le patient LIS. Entièrement paralysé, son code Oui/Non consistait à lever les yeux vers le ciel pour "Non" et les fermer pour "Oui". La réalité a bien sûr eu raison de notre méthodologie. Très éprouvante en pratique, notre méthodologie a été simplifiée à l'extrême. On ne demandait jamais plus de 5 mots au patient. Le mode Dicotomix est vite abandonné face à des difficultés trop grandes pour le patient – il ne fallait surtout pas le décourager. Nous nous sommes donc limité au mode épellation. Les externes du service ont grandement contribué à la réalisation de l'étude en visitant le patient quotidiennement et lui proposant des jeux, type pendu, pour rendre les sessions d'entraînement ludiques.

Ce patient a perdu la volonté de s'exprimer avec le personnel médical, il s'agissait de voir si notre méthode pouvait la lui rendre. Cela n'a pas été le cas car le patient n'a jamais voulu réaliser une "expression libre". Cependant nous avons pris conscience que le plus important pour lui, au delà de la méthode pour communiquer, était la présence humaine. Ainsi à la question "voulez vous que l'on s'en aille ?", que l'on posait par peur de l'avoir trop fatigué, il répondait toujours "non".

Le coût cognitif de notre méthode, que nous redoutions tant s'est fait sentir le jour de l'évaluation. En effet le patient est allé deux fois plus vite avec sa méthode traditionnelle qu'avec Dicotomix. Même si elle sont moins rapides en théorie, les méthodes traditionnelles se défendent bien car l'énumération

du tableau de lettres va très vite. La première idée que donne cette expérience, dans la veine de la prédiction de lettres du mode épellation, serait de dynamiser les tableaux de lettres traditionnels pour qu'ils se recomposent à chaque lettre épelée pour favoriser les prochaines lettres les plus probables.

Nous avons pu rencontrer une patiente SLA pour tester le même protocole à domicile. Possédant encore la mobilité de ses mains nous avons pu communiquer par mail autour de la méthode. Cette patiente, qui a écrit plusieurs livres alors qu'elle était déjà malade, a vu en notre méthode plus quelque chose de ludique que de manifestement pratique. Aussi, malheureusement, un problème d'encodage des accents sur son PC (Windows) l'a empêchée de mener à terme ses essais avec le logiciel. La préoccupation majeure de cette patiente était plus celle de l'interface, eye-tracker, head-tracker que celle de la méthode. Encore un élément que le contact avec la réalité nous a permis de réaliser.

5 Conclusion

Le projet Dicotomix est avant tout une histoire de rencontres. Rencontres avec des disciplines différentes comme la BCI ou la linguistique, avec des univers différents comme le monde hospitalier. Mais surtout rencontres avec des personnes, toutes passionnées, qui ont donné sens à ce que nous voulions faire.

Cette expérience nous a initiés au défi que représente le fait de vouloir réaliser une idée. Défi car à mesure que l'on se rapproche de sa concrétisation, de son passage à la réalité, cette idée se re-modèle et change de forme sous les contraintes de cette réalité qui en est l'unique juge. Exactement suivant ce principe, alors que les résultats de l'étude pilote sont mitigés, ils nous ont dévoilé de nombreux moyens d'améliorer la technique. À commencer par en utiliser uniquement la composante prédictive afin de construire un tableau de lettres interactif.

Persuadés que pour être poursuivi dans des conditions sérieuses ce projet nécessiterait un investissement à plein temps de notre part et face à l'éparpillement qui attend notre équipe avec l'entrée en M2, nous avons pris la décision de le laisser reposer pour le moment. Tous nous abordons des parcours différents et nos regards croisés pourront enrichir, dans le futur, notre rapport à la problématique principale de Dicotomix. Pour l'heure, elle nous laisse forts de tout ce que l'on peut apprendre en allant à la rencontre des autres.

A Intervenants extérieurs et chronologie détaillée

La Figure 8 montre les principaux intervenants extérieurs qui ont participé à l'élaboration ou à la mise en place du projet. Y sont également représentés les différents liens entre ces personnes et leurs catégories de profession. Ce graphe permet de comprendre d'un coup d'œil l'organisation des participants ; une étude chronologique permet cependant une meilleure appréhension des interactions que nous avons eues avec ces personnes, et de leur influence sur le projet.

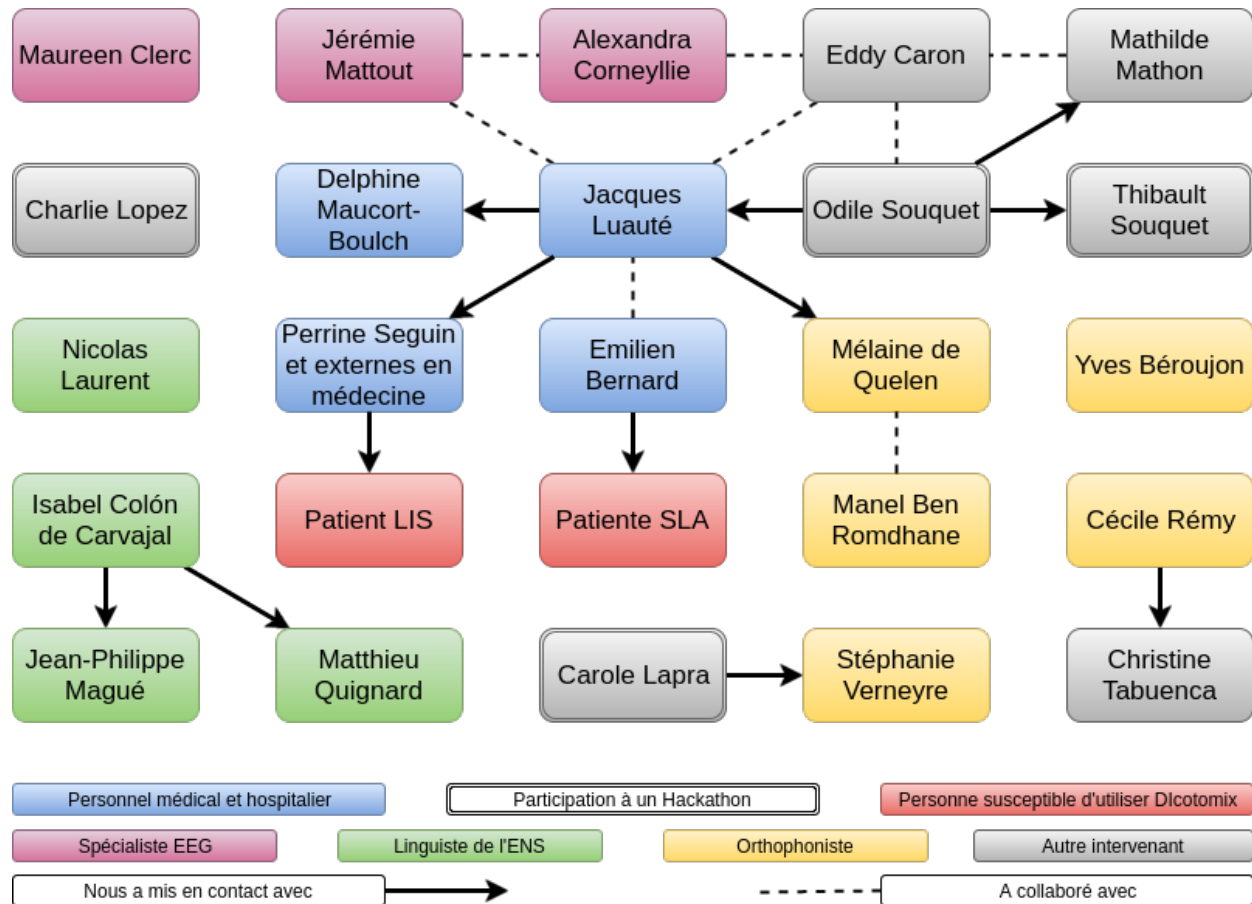


FIGURE 8: Graphe des intervenants

Octobre : Rendez vous téléphonique avec **Maureen Clerc**, spécialiste de la BCI à l'INRIA Grenoble. Prise de connaissance de ses travaux autour du paradigme **P300** et des **P300-spellers**. Son équipe publiera bientôt ses résultats autour de leur système d'épellation P300 présenté comme le plus performant au monde. Comme vous le verrez dans la synthèse nous n'utilisons pas ce paradigme mais pourrions donc **comparer** notre méthode à celle-ci.

9 novembre : Rendez vous avec Yves Bérroujon et son équipe de la fondation OVE. Ces orthophonistes travaillent au contact de jeunes malentendants. Première confrontation avec les **systèmes d'expression à base d'images**, piste un temps considérée pour notre projet. **Problème :** le caractère trop peu formalisé de ces méthodes qui les rend difficiles à implémenter de manière générale.

10 novembre : rendez-vous téléphonique avec **Carole Lapra**, docteur qui nous mettra en relation avec des professionnels de santé spécialisés dans le domaine qui nous intéresse.

18 novembre : rendez-vous avec **Stéphanie Verneyre** par l'intermédiaire de Carole Lapra, du service de neurologie de l'hôpital neurologique Pierre Wertheimer. Spécialiste de l'aphasie, Mme. Verneyre nous a aidés à **cibler** les pathologies pour lesquelles notre méthode pourrait être efficace. Nous décou-

vrons à cette occasion la maladie de Charcot (SLA).

18-20 novembre : participation au Hackathon "Hacking Health". Nous rencontrons de nombreux professionnels de santé notamment **Odile Souquet** médecin à l'ARS (Agence régionale de Santé) qui n'a eu de cesse par la suite de nous accompagner de manière très personnalisée. Nous lui devons des rencontres qui se sont montrées déterminantes pour notre projet.

19 novembre : rencontre avec **Alexandra Corneyllie** du CNRS qui nous a prêté le système de BCI que nous utilisons. Madame Corneyllie est l'une de nos interlocuteurs principaux sur la partie BCI du projet.

22 décembre : rencontre téléphonique avec **Jérémie Mattout**, spécialiste de la BCI et de ses applications à la médecine au CNRS, dans l'équipe d'Alexandre Corneyllie. À la suite de cette discussion **nous adoptons définitivement le paradigme SSVEP** (au lieu de P300) pour notre interface. Sous ses conseils, nous empruntons un générateur basse-fréquence et une led au laboratoire de physique. Ce dispositif nous permet de contrôler précisément notre système oscillant et pallie les difficultés que nous avons rencontrées avec la BCI.

3 janvier : rencontre avec le Professeur **Jacques Luauté**, via Odile Souquet, chef du service de rééducation neurologique à l'hôpital Henry Gabrielle. M. Luauté nous explique que faire marcher la BCI chez les sujets handicapés est un défi non encore résolu par les chercheurs spécialistes comme M. Mattout. Cependant le Professeur se montre très enthousiaste quand à notre méthode dichotomique d'énumération du dictionnaire. Il nous propose de la tester dès février étant donné que tous ses patients disposent déjà d'interfaces personnalisées pour exprimer 'oui' ou 'non'. Nous nous focalisons donc sur cette partie du projet pour fournir une solution à tester lors de nos rencontres de février. Cette rencontre souligne l'importance de se mettre en relation avec des linguistes.

6 janvier : réunion avec **Charlie Lopez**, rencontrée au Hackathon, graphiste qui a réalisé l'interface utilisateur de notre programme.

17 janvier : rencontre avec **Nicolas Laurent**, professeur de grammaire à l'ENS. Discussion autour des aspects linguistiques de notre projet. Il nous suggère de nous mettre en relation avec le laboratoire de linguistique informatique **ICAR** de l'ENS de Lyon.

6 février : rencontre avec **Cécile Remy**, via Odile Souquet, spécialiste des **SLA** qu'elle soigne à domicile.

10 février : nouveau rendez-vous avec le professeur Luauté pour présenter l'avancement de nos travaux et mettre en place l'étude pilote.

3-4 mars : participation au Hackathon "Hive" de l'école centrale Lyon.

10 mars : rencontre avec Mathilde Mathon autour de la métropole de Lyon.

16 mars : rencontre avec la linguiste Isabel Colon de Carvajal qui nous éclaire sur les bases de données linguistiques d'interactions orales – notamment dans le domaine de la médecine.

17 mars : nouvelle réunion de travail avec le professeur Luauté et son équipe. Nous rencontrons notamment le docteur Émilien Bernard grâce à qui nous avons pu aller à la rencontre d'une patiente SLA.

24 mars : réunion avec le professeur Luauté et Delphine Maucourt-Boulch autour de la méthodologie de l'étude pilote.

31 mars : rencontre avec les linguistes spécialistes de Traitement Automatique des Langues, Matthieu Quignard et Jean-Philippe Magué. Ils nous exposent les différentes techniques que l'on peut implémenter dans le cadre de la prédiction de mots. À commencer par les n-grams.

5-23 avril : étude pilote.

B Étude comparative de la solution Dicotomix

Voir ci-après.

C Tutoriel d'utilisation de Dicotomix

Voir ci-dessous.

Comparaison de la méthode de saisie dichotomique avec les méthodes d'épellation traditionnelles

ÉQUIPE DICOTOMIX ENS de Lyon
dicotomix@listes.ens-lyon.fr

Résumé

Les méthodes traditionnelles permettant de communiquer en se limitant à une entrée de la forme oui ou non sont basées sur une épellation lettre par lettre. Ici, une approche différente est considérée, où les mots sont épelés un à un par dichotomie [8] sur l'ensemble du dictionnaire français. Cette méthode est comparée aux méthodes traditionnelles en vigueur dans le milieu médical. Nous montrons que notre méthode permet d'écrire les mots beaucoup plus rapidement, et ce même si l'on présuppose que quatre lettres suffisent à deviner le mot dans les méthodes classiques.

I. INTRODUCTION

LA communication chez des patients atteints de locked-in syndrom (LIS) ou de la maladie de Charcot est difficile. Elle se fait avec un aide soignant, qui interprète les signaux que le patient parvient à exprimer, que ce soit par des techniques d'eye-tracking [2], de Brain-Computer interface [7] [3] ou autrement. [5]

Les méthodes de saisie traditionnelles utilisées dans le milieu médical reposent toutes sur le même principe. [9] Elles consistent à épeler les mots lettre à lettre, en parcourant l'alphabet pour chacune des lettres. Ce type de méthode peut s'avérer frustrant [9] pour l'utilisateur, qui décide parfois même de renoncer à la communication, tant elle peut être fastidieuse. L'outil informatique s'avère ainsi être capital [6] pour permettre à l'aide-soignant d'aider le patient à communiquer. Une autre approche propose d'utiliser plus efficacement une entrée binaire afin d'écrire non pas une lettre à la fois, mais un mot à la fois. Ainsi, nous mettons ici en avant l'intérêt d'une telle méthode, en les comparant sur l'ensemble du dictionnaire.

II. MÉTHODES TRADITIONNELLES

L'essentiel des méthodes traditionnelles repose sur une division de l'alphabet en une table en deux dimensions, où la recherche de la lettre voulue se fait en deux temps. [1] Dans un premier temps, on recherche la ligne dans laquelle se situe la lettre voulue, en posant la question "est-ce que votre lettre est dans la première ligne", ou dans la seconde, jusqu'à arriver à la bonne ligne. Ensuite, on itère de la même manière sur les colonnes, en proposant chacune des lettres de

Code "EJASINT" conseillé par ALIS						
1	E	A	N	R	C	V
2	J	I	L	P	H	W
3	S	U	D	G	K	
4	T	M	B	Z		
5	O	F	X			
6	Q	Y				

Figure 1 – Alphabet EJASINT, majoritairement utilisé pour la saisie lettre à lettre par l'association ALIS

la ligne jusqu'à trouver celle voulue.

Une des méthodes d'épellation les plus répandues utilise l'alphabet EJASINT [4] décrit dans la figure 1. Les autres méthodes envisagées ici sont décrites en annexe, et reposent toutes sur ce même principe de grille de lettres, avec une répartition différente de l'alphabet.

III. MÉTHODE DICHOTOMIQUE

Notre méthode repose sur un parcours du dictionnaire français par dichotomie, en tenant compte des fréquences des mots dans l'usage courant de la langue française. L'on présente un mot au patient et la question posée est de la forme "votre mot est-il avant ou après dans l'alphabet?"

Une seconde méthode que nous évoquerons est la méthode de l'épellation dichotomique, reprenant le principe de la dichotomie mais cette fois pour

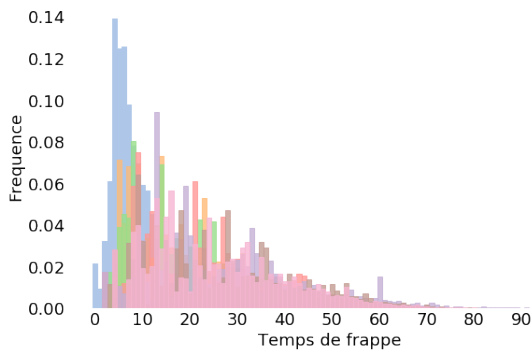


Figure 2 – Distribution du temps de frappe en fonction de la longueur des mots pour différentes méthodes. Bleu - recherche dichotomique, orange : épellation dichotomique, vert : alphabet EJA-SINT, rouge : 3, violet : 4, marron : 5, rose pâle : 6

une épellation lettre par lettre : “la lettre recherchée est-elle avant ou après dans l’alphabet?”.

L’intérêt de l’approche dichotomique est très simple : à chaque question, la moitié des possibilités sont éliminées. Cela permet de se rapprocher rapidement de la solution, même dans un grand lexique.

IV. ÉPELLATION COMPLÈTE

Nous nous référons, dans cette partie, aux différentes méthodes au travers des numéros suivants : 0 - recherche dichotomique (implémentée dans Dicotomix), 1 - épellation dichotomique, 2 - alphabet EJA-SINT, les suivants correspondant aux numéros des alphabets en annexe.

i. Distribution des temps de frappe

Pour mesurer l’efficacité de chaque méthode, nous comptons le nombre de questions nécessaire pour trouver les mots. Ainsi, nous considérons chaque mot du dictionnaire et calculons le temps qu’il faut pour le trouver.

La distribution de ces longueurs de frappe, ajustée à l’aide de la fréquence d’apparition des mots dans la langue française, est un bon indicateur de la rapidité d’utilisation des différentes méthodes. La figure 2 montre que la probabilité d’utiliser peu de coups pour épeler un mot est très élevée avec la méthode Dicotomix. Les autres méthodes sont distribuées sur des temps d’épellation beaucoup plus élevés.

La figure 3 montre la probabilité pour qu’un mot ait une longueur de frappe supérieure à la longueur de frappe donnée en abscisse. Elle confirme l’efficacité théorique de notre méthode car la fréquence d’apparition de mots nécessitant au moins 20 coups

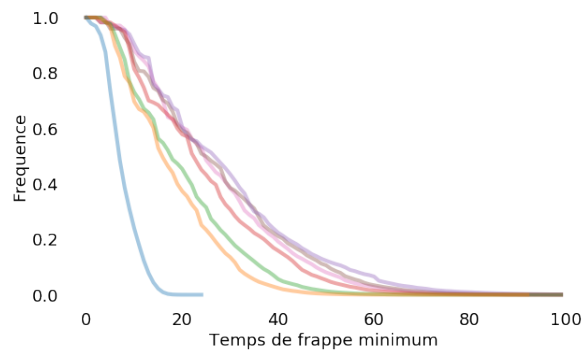


Figure 3 – Proportion de mots ayant un temps de frappe supérieur à un temps donné. Bleu - recherche dichotomique, orange : épellation dichotomique, vert : alphabet EJA-SINT, rouge : 3, violet : 4, marron : 5, rose pâle : 6

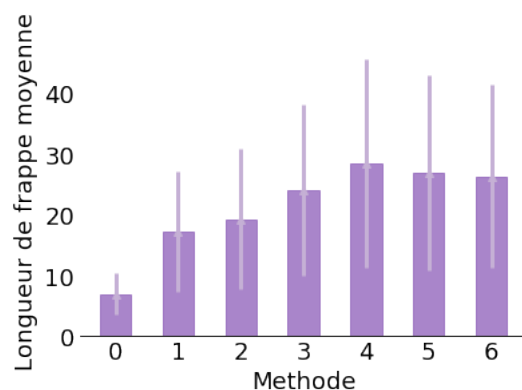


Figure 4 – Longueur de frappe moyenne sur l’ensemble du dictionnaire (barre violettes), avec l’écart-type de la distribution (petites barres violettes claires). 0 - recherche dichotomique, 1 - épellation dichotomique, 2 - alphabet EJA-SINT, 3 à 6 - méthodes 3 à 6

pour être tapés est presque nulle, contre plus de 50% pour les autres méthodes.

La méthode d’épellation dichotomique, quant à elle, donne des résultats proches de l’alphabet EJA-SINT.

ii. Moyenne et maximum

Les distributions donnent beaucoup d’informations sur les méthodes, mais les graphes sont difficilement lisibles. D’un point de vue pratique, on s’intéresse principalement au temps moyen nécessaire pour écrire un mot, et le temps maximal garanti.

La figure 4 montre que la recherche dichotomique a une longueur de frappe moyenne significativement plus faible que toutes les autres méthodes considérées, ce qui signifie que les mots sont en moyenne

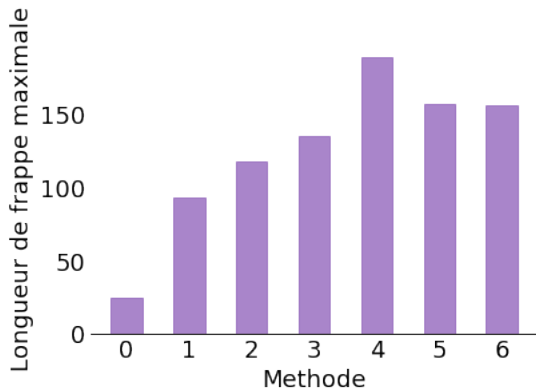


Figure 5 – Temps de frappe du mot le moins accessible. 0 - recherche dichotomique, 1 - épellation dichotomique, 2 - alphabet EJASINT, 3 à 6 - méthodes 3 à 6

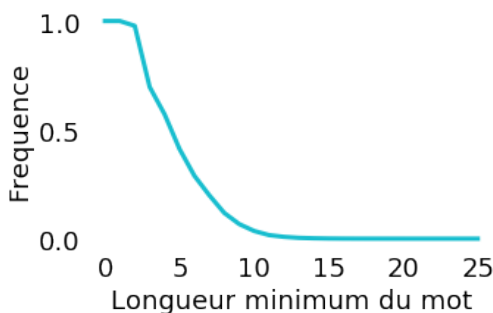


Figure 6 – Fréquence des mots de longueur supérieure à une longueur donnée dans le dictionnaire

tapés trois à cinq fois plus vite. De plus, son écart-type est plus faible donc il est peu probable d'avoir à écrire un mot "long".

Même si l'intervention de l'aidant permet souvent de trouver les mots sans épeler toutes les lettres, on peut s'intéresser au pire des cas, c'est-à-dire au mot du dictionnaire le plus long à trouver. On remarque sur la figure 14 que la dichotomie sur le lexique offre une performance drastiquement meilleure que les autres méthodes, avec un facteur variant de quatre à sept.

V. ÉPELLATION DES 4 PREMIÈRES LETTRES

Remarquons que, en fréquence, plus de la moitié des mots du français contiennent moins de 4 lettres (cf figure 6). Par ailleurs, faisons l'hypothèse qu'en pratique, l'on arrive à savoir quel est le mot tapé à partir de la quatrième lettre. Nous reprenons donc dans cette partie la même comparaison des différentes méthodes, cette fois en se limitant à l'épellation des 4 premières lettres de chaque mot. Notons par ailleurs,

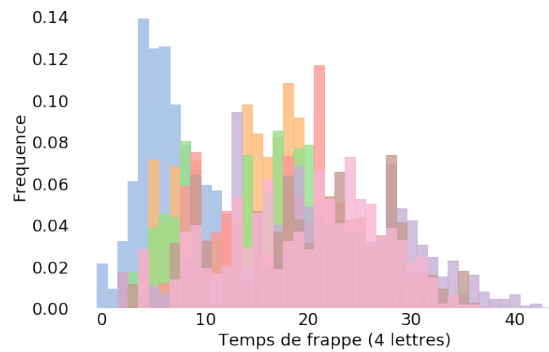


Figure 7 – Distribution du temps de frappe en fonction de la longueur des mots pour différentes méthodes (épellation des 4 premières lettres uniquement). Bleu - recherche dichotomique, orange : épellation dichotomique, vert : alphabet EJASINT, rouge : 3, violet : 4, marron : 5, rose pâle : 6

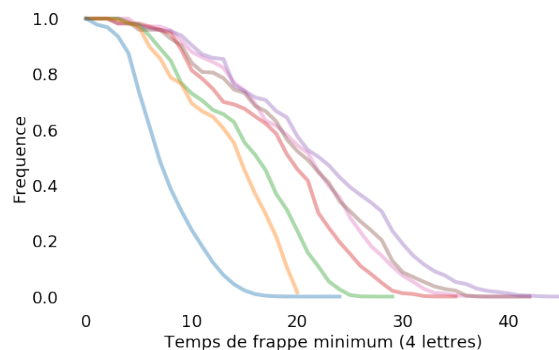


Figure 8 – Proportion de mots ayant un temps de frappe donné (épellation des 4 premières lettres uniquement). Bleu - recherche dichotomique, orange : épellation dichotomique, vert : alphabet EJASINT, rouge : 3, violet : 4, marron : 5, rose pâle : 6

que la méthode de recherche dichotomique continue, en revanche, à épeler les mots complètement.

i. Distribution des temps de frappe

La distribution des temps de frappe (figure 7) continue à donner la même tendance que précédemment, et la méthode de recherche dichotomique permet toujours de trouver plus rapidement les mots les plus fréquents.

Cette tendance est également confirmée par la fréquence des mots ayant une longueur de frappe supérieure à la longueur donnée en abscisse (figure 8).

ii. Moyenne et maximum

La longueur moyenne de frappe (figure 9) reste aussi avantageuse par rapport aux autres méthodes.

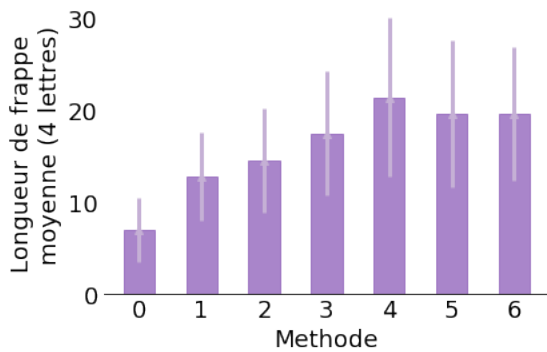


Figure 9 – Longueur de frappe moyenne sur l'ensemble du dictionnaire (barre violette), avec l'écart-type de la distribution (petites barres violettes claires) (épellation des 4 premières lettres uniquement). 0 - recherche dichotomique, 1 - épellation dichotomique, 2 - alphabet EJAINT, 3 à 6 - méthodes 3 à 6

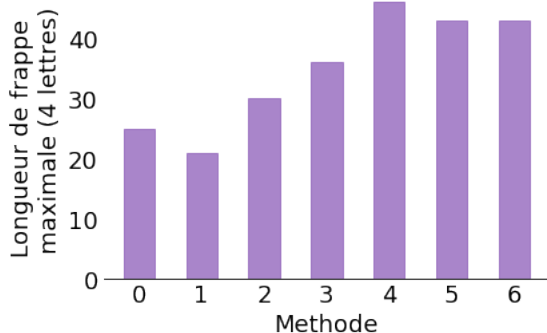


Figure 10 – Temps de frappe du mot le moins accessible (épellation des 4 premières lettres uniquement). 0 - recherche dichotomique, 1 - épellation dichotomique, 2 - alphabet EJAINT, 3 à 6 - méthodes 3 à 6

Cependant, la longueur maximale (10) est plus élevée que pour l'épellation dichotomique. Malgré tout, la recherche dichotomique reste meilleure, de ce point de vue, que toutes les méthodes à présent utilisées dans le milieu médical.

VI. CONCLUSION

La méthode de recherche dichotomique utilisée par le projet Dicotomix est donc une méthode permettant, d'un point de vue théorique, d'écrire de façon significativement plus rapide que les méthodes actuelles.

Il faut noter que cette étude théorique ne prend pas en compte :

- Le protocole expérimental qui sera effectivement implémenté avec chaque patient et qui pourrait

potentiellement rajouter des questions à la recherche.

- Le coût cognitif supérieur que notre méthode nécessite par rapport aux autres méthodes.
- L'impact plus grand d'une erreur commise par le patient sur la recherche d'un mot ainsi que la nécessité d'être à l'aise avec son orthographe.

Malgré ces obstacles pratiques, notre étude montre son potentiel pour aider les patients à communiquer. Charge à nous de faire diminuer son coût cognitif pour proposer une phase de test stimulante aux patients.

RÉFÉRENCES

- [1] ALIS. Codes de communication conseillés par alis. 2014.
- [2] Park SW et al. Augmentative and alternative communication training using eye blink switch for locked-in syndrome patient. *Ann Rehabil Med.*, 2012.
- [3] Sorger B et al. A real-time fmri-based spelling device immediately enabling robust motor-independent communication. *Current Biology*, volume 22, issue 14, 2012.
- [4] Véronique Gaudeul. Communiquer sans la parole? guide pratique des techniques et des outils disponibles. 2015.
- [5] Andrea Goldstein. Combating locked-in syndrome : New methods of communication for als patients. 2006.
- [6] Chloé Haristoy. L'outil de communication technologique : un moyen de reprendre des décisions pour les personnes atteintes du locked-in syndrome. *Médecine humaine et pathologie*, 2015.
- [7] N. Birbaumer J. Perelmouter. A binary spelling interface with random errors. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, volume 2, 2000.
- [8] Donald E. Knuth. *The Art of Computer Programming*, volume 3. Searching and Sorting. Addison-Wesley, 1973.
- [9] Julien Terroir. La communication : source d'anxiété? *IFSI Croix-Rouge de la Métropole Tourcoing*, 2004-2007.

ANNEXES

Code "EJASINT" conseillé par ALIS						
1	E	A	N	R	C	V
2	J	I	L	P	H	W
3	S	U	D	G	K	
4	T	M	B	Z		
5	O	F	X			
6	Q	Y				

Figure 11 – Alphabet EJASINT, majoritairement utilisé pour la saisie lettre à lettre par l'association ALIS

A	E	I	O	U	Y					
B	C	D	F	G	H	J	K	L		
M	N	P	Q	R	S	T	V	W	X	Z

Figure 12 – Alphabet de la méthode d'épellation 3.

A	Z	E	R	T	Y	U	I	O	P
Q	S	D	F	G	H	J	K	L	M
W	X	C	V	B	N				

Figure 13 – Alphabet de la méthode d'épellation 4.

Consonnes 1 ^{re} partie			
B	C	D	F
G	H	J	K

Consonnes 2 ^e partie			
L	M	N	P
Q	R	S	T
V	W	X	Z

Voyelles		
A	E	I
O	U	Y

Figure 14 – Alphabet de la méthode d'épellation 5.

B	C	D	F	G
H	J	K	L	M

N	P	Q	R	S
T	V	W	X	Z

A	E	I	O	U	Y
---	---	---	---	---	---

Figure 15 – Alphabet de la méthode d'épellation 6.

Dicotomix

Quand oui et non permettent de tout dire...

Dicotomix est un logiciel qui permet d'écrire une phrase en parcourant le dictionnaire. Son but principal est d'offrir une saisie plus rapide à certaines personnes en situation de handicap. Les patients pourront trouver leurs mots en ne s'exprimant que par *oui* ou *non*. Le seul autre prérequis est de connaître l'alphabet ... mais Dicotomix vous aide pour que ce soit le plus facile possible !

Ce logiciel est développé par une équipe d'étudiants en première année de master d'informatique à l'Ecole Normale Supérieure de Lyon.

Ce logiciel en construction peut présenter des bugs ou des incohérences. **Il ne faut donc pas vous inquiéter ou vous sentir fautif si des problèmes surviennent lors de l'utilisation ou si vous n'arrivez pas à vous en servir.**

Fonctionnalités

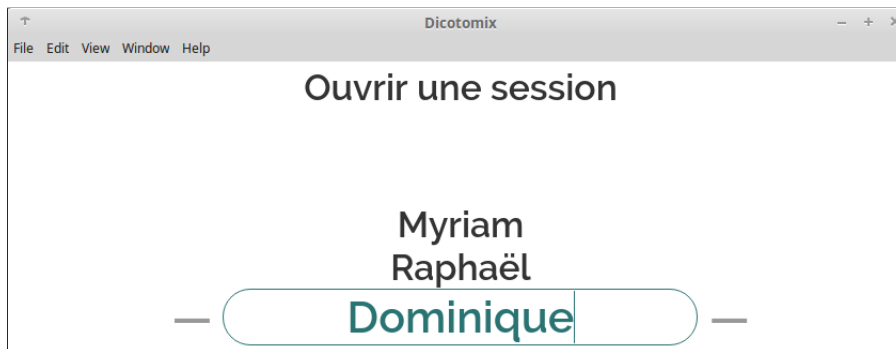
- écrire rapidement des phrases en français
- utiliser n'importe quel mot, avec accents, traits d'union, apostrophes...
- rectifier une erreur, effacer un mot
- épeler de nouveaux mots et les ajouter au dictionnaire
- obtenir un logiciel personnalisé qui met en avant *vos* mots préférés

Utilisation

Dicotomix s'utilise à deux : la personne en situation de handicap moteur, que nous appellerons Dominique, et son aide, Alex.

1 Connexion

En ouvrant le logiciel, les noms des différents patients sont proposés. Alex utilise les flèches Haut et Bas du clavier pour sélectionner le bon prénom ou se placer sur le champ « Nouvel utilisateur ».



Une fois le nom sélectionné, il faut appuyer sur Entrée ou Espace.

2 Ecriture

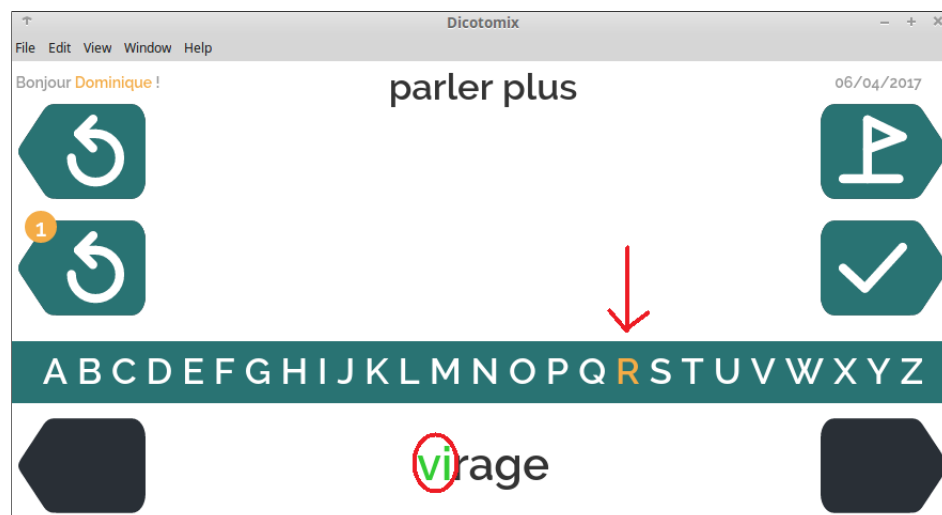
Pour écrire une phrase, Dominique doit penser à un premier mot. Dicotomix propose alors un autre mot pris dans le dictionnaire. Alex dit à Dominique :

- *Le mot proposé est ...*, et laisse un temps de réflexion durant lequel Dominique dit oui si c'est son mot
- *Votre mot est-il avant dans le dictionnaire ?* Si oui, Alex appuie sur la flèche Gauche
- *Votre mot est-il après ?* Si oui, Alex appuie sur la flèche Droite
- *Votre mot est-il dans la liste ?* Si oui, Alex parcourt la liste avec les flèches Haut et Bas puis appuie sur Entrée, Espace ou le bouton Valider lorsque c'est le bon mot
- *Avez-vous fait une erreur ?* Si oui, Alex appuie sur Annuler ou Recommencer
- *Voulez-vous ajouter un mot ?* Si oui, Alex appuie sur le bouton Epeler



Au bout de quelques étapes, Dicotomix va avoir la certitude que votre mot commence par certaines lettres : il les affiche en vert. Si votre mot ne commence pas par les lettres vertes, c'est que vous avez fait une erreur (alors, faites Recommencer ou Annuler) ... ou qu'il n'existe pas dans le dictionnaire (alors, passez en Epellation) !

Une lettre de l'alphabet est surlignée en orange : c'est la première lettre qui n'est pas encore verte, celle pour laquelle le logiciel n'est pas encore sûr. Vous pouvez vous en servir pour faciliter la question *avant* / *après* ?

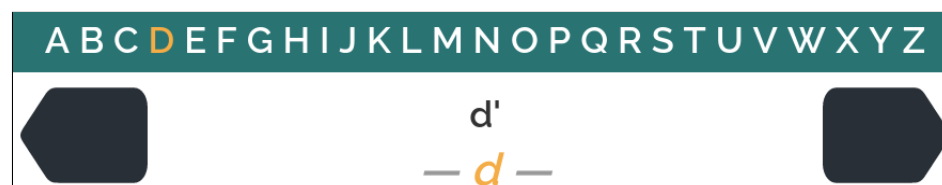


Dans l'exemple ci-dessus, Dominique cherche à écrire « vite ». Dicotomix propose « virage », met en vert les deux premières lettres (qui sont garanties par les questions précédentes). Comme le T de « viTe » est après le R surligné de « viRage », il faut dire *après*.

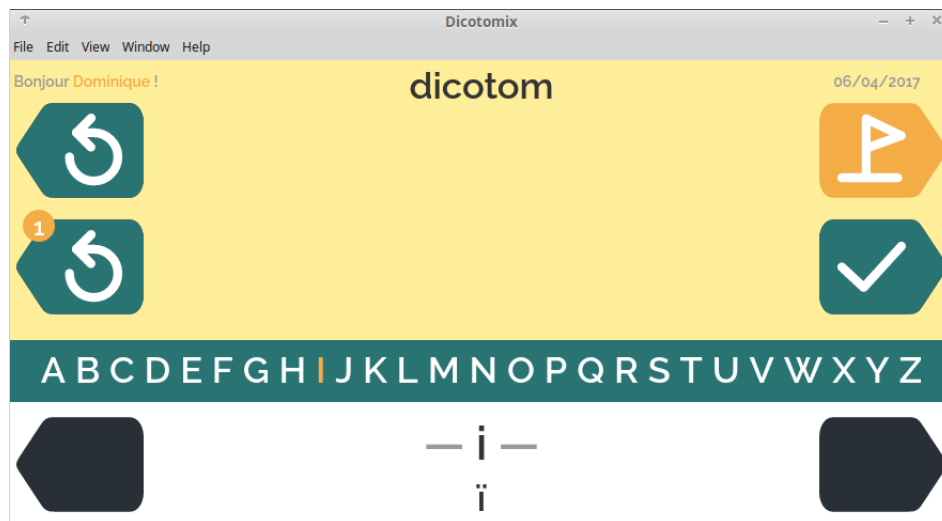
Les lettres vertes peuvent aussi permettre à Alex de deviner le mot. Alex peut alors écrire manuellement le mot à la suite de la phrase, puis appuyer sur Recommencer pour chercher le mot suivant.

3 Epellation

Lorsqu'un mot n'existe pas, Dicotomix passe automatiquement en mode Epellation. Il est possible de l'activer manuellement, soit en cliquant sur le Drapeau (en haut à droite), soit en sélectionnant une lettre seule (orange et italique).



Lorsque le mode Epellation est activé, le fond devient orange et le drapeau s'allume pour le signaler. Désormais, ce n'est plus entre les mots qu'on navigue mais entre les lettres : c'est beaucoup plus facile, mais généralement moins rapide !



Une fois le nouveau mot écrit, Alex appuie sur le drapeau. Cela fait revenir au mode normal et ajoute le nouveau mot au dictionnaire. Ainsi la prochaine fois, Dominique pourra trouver ce mot sans l'épeler.

Conseils

1 Théoriques

Les caractères spéciaux comme les accents, l'apostrophe, le tiret, le point, etc, n'influent pas dans l'alphabet :

- *d'accord* est avant *dame*
- *descendre* est avant *désir*
- *ça* est avant *citrouille*
- *porte-monnaie* est avant *porter*
- *portée* est avant *porte-monnaie*

Si deux mots ont le même début, le plus court est avant :

- *ça* est avant *camion*
- *des* est avant *désir*
- *l'* est avant *la*

Les signes de ponctuations sont listés au tout début de l'alphabet (avant *a*).

2 Pratiques

Pour trouver un mot, toutes les questions sont importantes : il **ne faut pas changer d'objectif** au cours d'une question, sinon Dicotomix ne trouvera pas. Il vaut mieux Recommencer.

Il est préférable d'**éviter la précipitation** pour répondre correctement à *avant* / *après*. La navigation dans l'alphabet est une chose inhabituelle que la plupart d'entre nous n'ont pas pratiquée depuis la primaire... Mais les réflexes reviennent vite après quelques jours d'entraînement !

Parfois, le premier mot proposé est très proche du mot recherché, mais le second mot proposé est très loin. Ce n'est pas une erreur : le curseur fait simplement de grands bonds dans l'alphabet, mais il finira par revenir sur votre mot.

En cas d'erreur, il vaut souvent mieux complètement supprimer le mot plutôt que de faire plusieurs retours arrière.

Contact

Si vous rencontrez un problème, souhaitez faire une suggestion, ou voulez renvoyer les données générées par les tests, vous pouvez contacter l'équipe Dicotomix via dicotomix@ens-lyon.fr ou sur le site internet <http://graal.ens-lyon.fr/dicotomix/>.