

---

## Dicotomix

---



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

**Résumé :** *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 :** *RNNs, Mémoire, Echo States Networks, Musique*

## Remerciements

Tout d'abord, un grand merci à [Eddy Caron](#) et [Issam Raïs](#), nos encadrants de projets à l'ENS de Lyon. Merci pour la liberté dont nous avons joui dans l'organisation et la mise en oeuvre 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 encouragé dans notre démarche. Nous voulons aussi remercier le docteur Emilien Bernard pour l'expérience qu'il nous a apporté 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.

Nous tenons à remercier tous les linguistes intervenus dans le projet, 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, référent régional pour la thématique médecine à l'Agence Régionale de Santé du Rhône-Alpes, qui nous a accompagné tout au long de notre cheminement et a contribué à l'organisation des rencontres parmi les plus décisives pour le projet.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Genèse du projet</b>	<b>4</b>
2.1	Interface cerveau machine . . . . .	5
2.1.1	Casque EEG . . . . .	5
2.1.2	Paradigme Alpha . . . . .	6
2.1.3	Paradigme SSVEP . . . . .	6
2.1.4	Conclusions . . . . .	7
2.2	Akinator . . . . .	7
<b>3</b>	<b>La solution Dicotomix</b>	<b>8</b>
3.1	L'algorithme Dicotomix . . . . .	8
3.2	Le logiciel . . . . .	8
<b>4</b>	<b>L'étude pilote</b>	<b>9</b>
4.1	Le cadre . . . . .	9
4.2	La méthodologie . . . . .	9
4.3	La réalisation . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>10</b>
<b>A</b>	<b>Intervenants extérieurs et chronologie détaillée</b>	<b>10</b>
A.1	Graphe des intervenants . . . . .	10
A.2	Chronologie détaillée . . . . .	10
<b>B</b>	<b>Étude comparative de la solution Dicotomix</b>	<b>12</b>
<b>C</b>	<b>Tutoriel d'utilisation de Dicotomix</b>	<b>20</b>

## 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, sans altérer *a priori* leurs capacités cognitives. Aussi appelé syndrome d'enfermement, les patients se retrouvent prisonniers de leur corps. Cette maladie a notamment été présentée au grand public à travers *Le scaphandre et le papillon* retraçant le combat de Jean-Dominique Bauby pour communiquer. En effet, généralement, la motricité des yeux est conservée et permet de mettre en place un code "Oui/Non" et ainsi 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 du LIS strictement 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 au 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, redessinant, encore une 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 française de l'Interface Cerveau Machine (**BCI** pour Brain Computer Interface). Les interfaces cerveau machines 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 à réponse binaire posées par la machine. C'est à dire 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.

Ces méthodes traditionnelles, que nous avons regroupées dans notre étude comparative (voir Annexe B), reposent toutes sur le même principe. Il s'agit d'énumérer les lettres de l'alphabet au patient et d'attendre qu'il dise oui au moment où l'on annonce la sienne. Ainsi, lettre par lettre les mots sont 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.

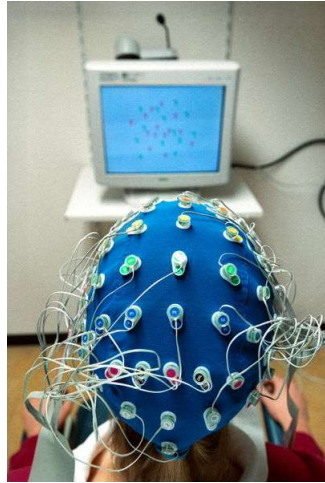


FIGURE 1: Casque d'EEG et interface cerveau machine

Ainsi, très tôt dans notre travail c'est donc dégagé deux grands axes de réflexion :

- **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 l'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, et donc très onéreux (~20k €) ainsi que difficile d'accès à l'hôpital – besoin d'accréditations.
- Le matériel pour particuliers. Il existe des modèles de BCI à des fins expérimentatoires, la résolution est faible mais suffisante pour des premiers résultats. Aussi les budgets ne sont plus du tout les mêmes (~600 €).

Nous nous sommes donc orientés vers les solutions pour particuliers où encore on trouve principalement deux possibilités :

- Du matériel propriétaire, édité par la société Emotiv. Le code associé au matériel (SDK) étant donc protégé et potentiellement 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 de 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.

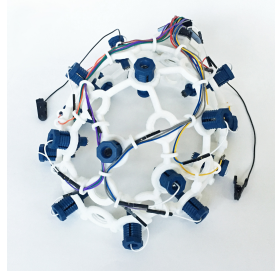


FIGURE 2: Ultracortex Mark IV, casque EEG OpenBCI

Nous avons pour ambition d'être capable 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" ou un "Non". Nous avons envisagés deux paradigmes EEG, parmi les plus simples de la discipline, les ondes alpha et le SSVEP.

### 2.1.2 Paradigme Alpha

Lorsqu'on se relaxe – fermer les yeux par exemple, le cerveau produit avec une intensité plus élevée que la moyenne des composantes à 10Hz que l'on retrouve en position O1 du système 10-20 (Figure 3). Ces composantes sont appelées ondes Alpha [REF NECESSAIRE]. Il s'agit donc de repérer ces pics de fréquence à 10Hz et de les associer à une réponse, par exemple "Oui". La Figure 4 montre les résultats en temps fréquence issus d'un blog d'expert [REF EEG HACKER] contre les meilleurs données que nous avons pu générer en Figure 5. On voit que les siennes sont très discriminées. Les notres sont plus hasardeuses car il s'agissait d'en retrouver sur toute la période temporelle et que l'on en voit seulement autour de 110s. Notre expérimentation avec les ondes alpha n'a pas été concluante. Une des hypothèses, autre que celle de la fiabilité de l'acquisition est que l'émission des ondes alpha est sujet-dépendante : certaines personnes en produisent moins que d'autres et nous faisons souvent les tests avec le même d'entre nous.

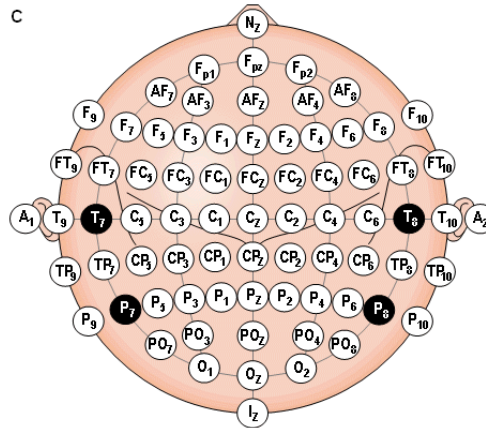


FIGURE 3: Système 10-20, norme de placement des électrodes pour les casques EEG

### 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 (O1, O2 sur la Figure 3). L'idée est donc de proposer deux vignettes qui clignotent 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

FIGURE 4: Ondes alpha : résultats d'expert

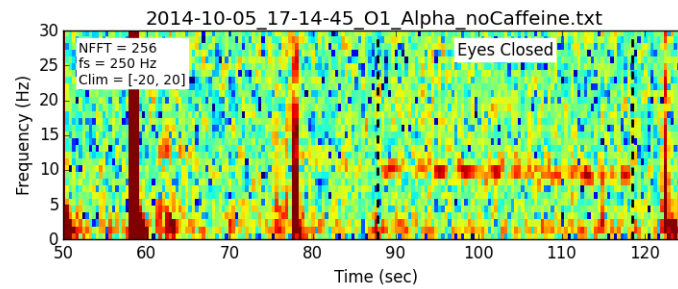
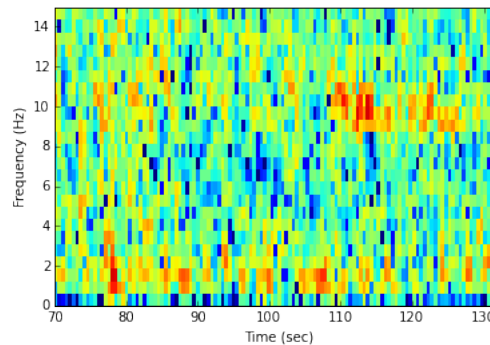


FIGURE 5: Ondes alpha : nos résultats



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 très certainement pour les raisons suivantes :

- Des problèmes d'acquisitions, en effet des spécialistes de l'EEG à l'ENS on remis en cause la qualité de nos signaux.
- 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 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 REFERENCES/HARD]. Il nous invita à nous concentrer en priorité sur la méthode que nous voulions mettre en oeuvre pour traiter ces signaux "Oui" / "Non" puisqu'il était déjà possible de la tester avec le code "Oui" / "Non" oculaire de ses patients.

Nous avons donc laissé de côté nos investigations autour de la BCI. Toutefois nous avons appris beaucoup de choses pendant cette phase du projet et nous nous sommes familiarisés avec un ensemble de techniques et de protocole expérimentaux qui nous étaient inconnus. Nous en tirons une idée plus claires 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 ? DICOTOMIE. Dire que l'idée embale Luauté.

### 3 La solution Dicotomix

#### 3.1 L'algorithme Dicotomix

Pour une entrée de type "Oui" / "Non", le plus efficace est d'optimiser chaque question en l'utilisant pour diviser par deux le nombre de possibilités, d'où l'idée d'une simple dichotomie. 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. C'est pourquoi nous procédons par dichotomie pondérée par des fréquences pour chaque mot, ce qui revient à opérer sur un segment ou chaque mot à une longueur proportionnelle à sa fréquence (figure 6).

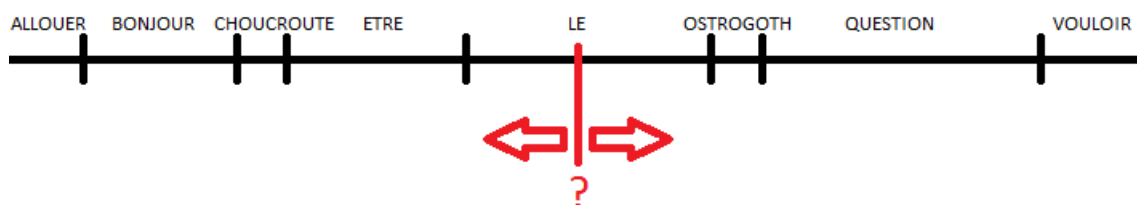


FIGURE 6: Schéma du fonctionnement de l'algorithme

Pour déterminer la fréquence de chaque mot, nous avons utilisé une base de données 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 : le côté répétitif pour l'utilisateur, le fait de tomber sur un mot très improbable situé juste à côté d'un mot souvent utilisé, ou encore l'apparition fréquente d'un mot désagréable (une version de l'algorithme menait très régulièrement au mot "cadavre"). Nous avons réglé ce problème en ajoutant un léger facteur aléatoire lorsque l'on coupe un segment en deux, pour ne pas tomber systématiquement sur le même mot.

Après cette modification, il a fallu mettre en place une mémorisation du chemin pour pouvoir revenir sur ses pas, puisque cette opération n'était plus déterminisée par la position actuelle.

TODO

Parler ensuite du spelling Mode et de la prédiction de lettre grâce 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 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.

## 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 accompagné 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.

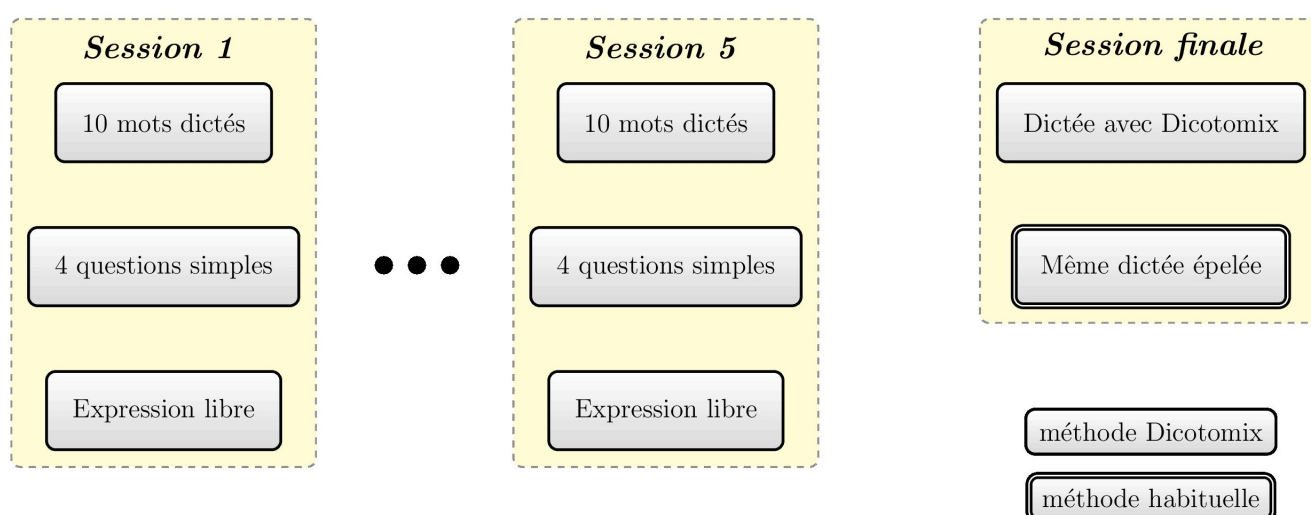


FIGURE 7: Méthodologie de l'étude pilote

Il s'agissait d'abord d'entraîner le patient à utiliser le logiciel au cours de 5 sessions d'entraînement – une par jour. Chaque sessions 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, on dicte le même texte 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 demandais 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 empêché 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

### A Intervenants extérieurs et chronologie détaillée

#### A.1 Graphe des intervenants

TODO : graphe des intervenants

#### A.2 Chronologie détaillée

- **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 pourrons 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 aidé à **cibler** les pathologies pour lesquelles notre méthode pourrait être efficace. Nous découvrons 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 cesse par la suite de nous accompagner de manière très personnalisée. Nous lui devons parmi les rencontres les plus 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 Maucort-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

# 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 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

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

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 une épellation lettre par lettre : "la lettre recherchée est-elle avant ou après dans l'alphabet?"

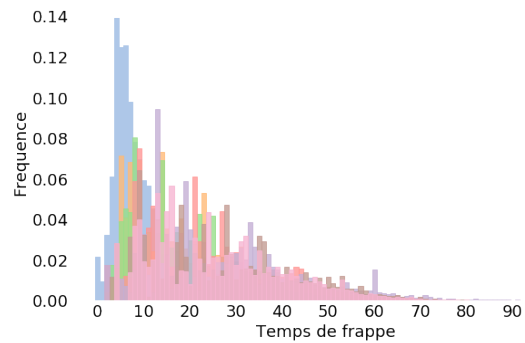
L'intérêt de l'approche dichotomique est très simple : à chaque question, la moitié des possibilités sont éliminées. Cela permet de se rapprocher rapidement de la solution, même dans un grand lexique.

#### 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 EJASINT, 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.



**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 EJASINT, rouge : 3, violet : 4, marron : 5, rose pâle : 6

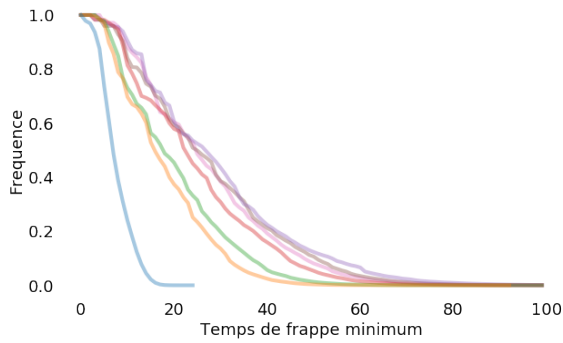
La distribution de ces longueurs de frappe, ajustée à l'aide de la fréquence d'apparition des mots dans la langue française, est un bon indicateur de la rapidité d'utilisation des différentes méthodes. La figure 2 montre que la probabilité d'utiliser peu de coups pour épeler un mot est très élevée avec 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 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 EJASINT.

##### 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



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

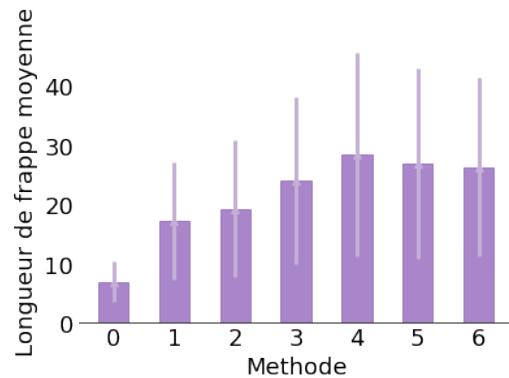
temps moyen nécessaire pour écrire un mot, et le temps maximal garanti.

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 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”.

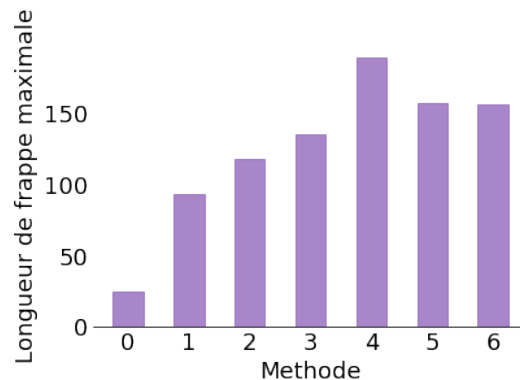
Même si l’intervention de l’aidant permet souvent de trouver les mots sans épeler toutes les lettres, on peut s’intéresser au pire des cas, c’est-à-dire au mot du dictionnaire le plus long à trouver. On remarque sur la figure 14 que la dichotomie sur le lexique offre une performance drastiquement meilleure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

## V. ÉPELLATION DES 4 PREMIÈRES LETTRES

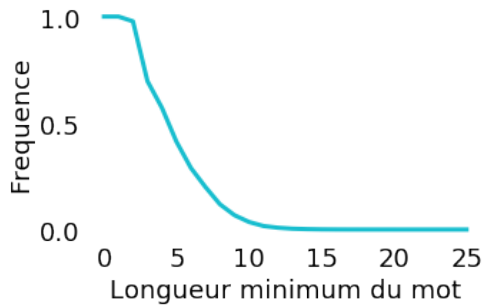
Remarquons que, en fréquence, plus de la moitié des mots du français continennent moins de 4 lettres (cf figure 6). Par ailleurs, faisons l’hypothèse qu’en pratique, l’on arrive à



**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 EJASINT, 3 à 6 - méthodes 3 à 6



**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

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

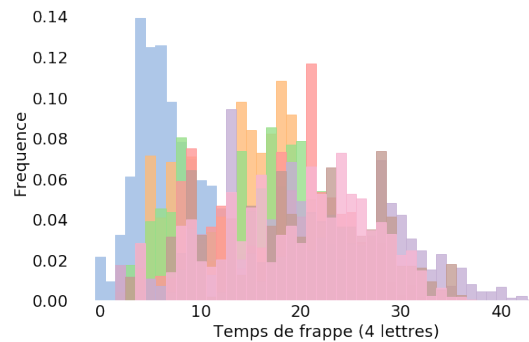
#### i. Distribution des temps de frappe

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.

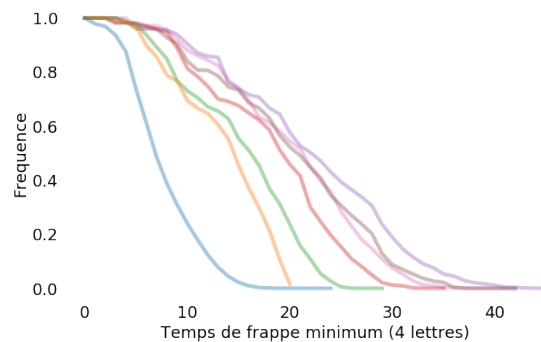
Cette tendance est également confirmée par la fréquence des mots ayant une longueur de frappe supérieure à la longueur donnée en abscisse (figure 8).

#### ii. Moyenne et maximum

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

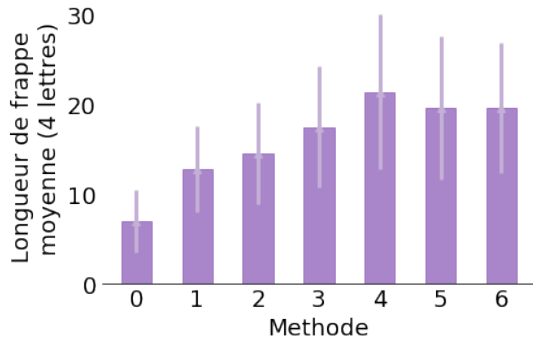


**Figure 7** – Distribution du temps de frappe en fonction de la longueur des mots pour différentes méthodes (épellation des 4 premières lettres uniquement). Bleu - recherche dichotomique, orange : épellation dichotomique, vert : alphabet EJASINT, rouge : 3, violet : 4, marron : 5, rose pâle : 6

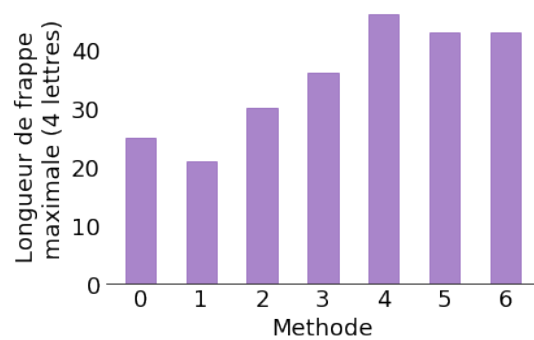


**Figure 8** – Proportion de mots ayant un temps de frappe donné (épellation des 4 premières lettres uniquement). Bleu - recherche dichotomique, orange : épellation dichotomique, vert : alphabet EJASINT, rouge : 3, violet : 4, marron : 5, rose pâle : 6





**Figure 9** – Longueur de frappe moyenne sur l'ensemble du dictionnaire (barre violettes), 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 EJASINT, 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 EJASINT, 3 à 6 - méthodes 3 à 6

toutes les méthodes à présent utilisées dans le milieu médical.

communiquer. Charge à nous de faire diminuer son coût cognitif pour proposer une phase de test stimulante aux patients.

## 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

## 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'écriture 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'écriture 4.

Consonnes 1 <sup>re</sup> partie			
B	C	D	F
G	H	J	K

Consonnes 2 <sup>e</sup> 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'écriture 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'écriture 6.

## 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.

## C Tutoriel d'utilisation de Dicotomix

# 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 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.

## Fonctionnalités

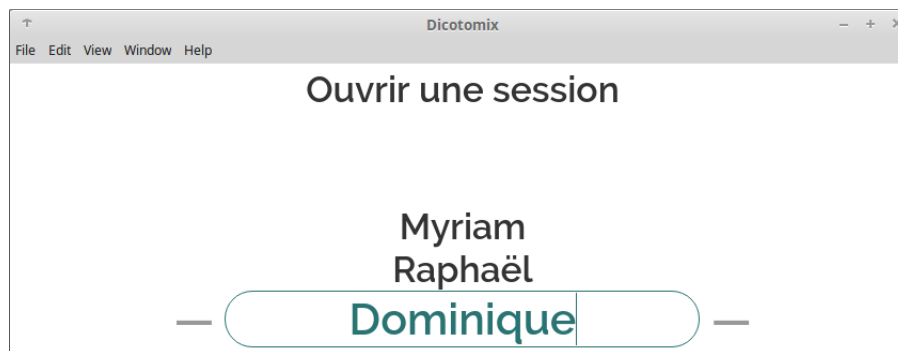
- écrire rapidement des phrases en français
- utiliser n'importe quel mot, avec accents, traits d'union, apostrophes...
- rectifier une erreur, effacer un mot
- épeler de nouveaux mots et les ajouter au dictionnaire
- obtenir un logiciel personnalisé qui met en avant *vos* mots préférés

## 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

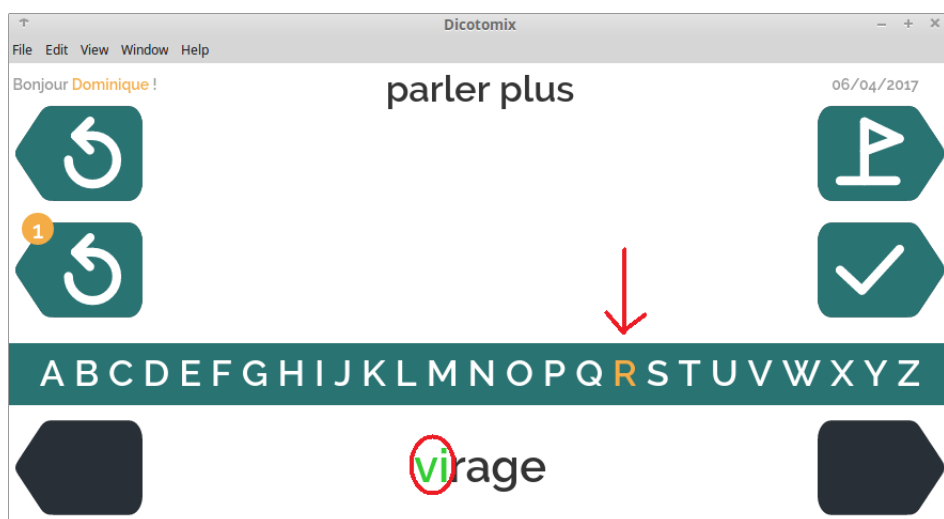
Pour écrire une phrase, Dominique doit penser à un premier mot. Dicotomix propose alors un autre mot pris au milieu du dictionnaire. Alex demande à Dominique :

- *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* ?

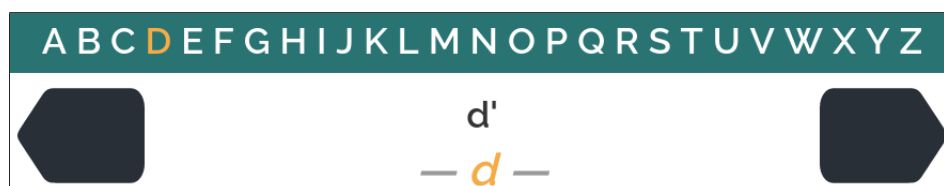


Dans l'exemple ci-dessus, Dominique cherche à écrire « vite ». Dicotomix propose « virage », met en vert les deux premières lettres (qui sont garanties par les questions précédentes). Comme le T de « viTe » est après le R surligné de « viRage », il faut dire *après*.

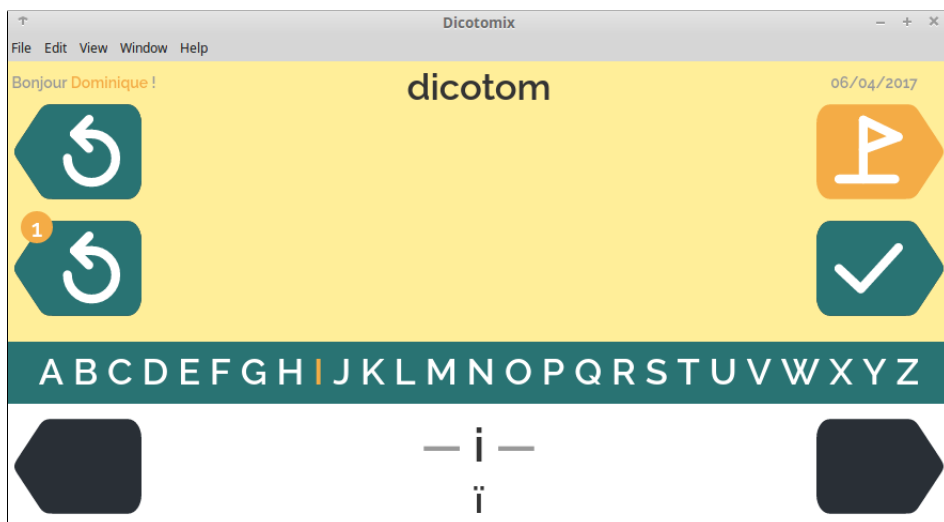
Les lettres vertes peuvent aussi permettre à Alex de deviner le mot. Alex peut alors écrire manuellement le mot à la suite de la phrase.

### 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 beaucoup 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.