



HAL
open science

Réorganisation neurocognitive et linguistique du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC. Approche interdisciplinaire

Céline Haldin

► **To cite this version:**

Céline Haldin. Réorganisation neurocognitive et linguistique du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC. Approche interdisciplinaire. Psychologie. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2023. Français. NNT: 2023GRALS006 . tel-04146805

HAL Id: tel-04146805

<https://theses.hal.science/tel-04146805v1>

Submitted on 30 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : **ISCE - Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement**

Spécialité : **PCN - Sciences cognitives, psychologie et neurocognition**

Unité de recherche : **Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition**

Réorganisation neurocognitive et linguistique du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC. Approche interdisciplinaire.

*Neurocognitive and linguistic reorganization of language
and speech in post-stroke aphasia. An interdisciplinary
approach.*

Présentée par :

Céline HALDIN

Direction de thèse :

Monica BACIU

Professeure des Universités, Université Grenoble Alpes

Directrice de thèse

Hélène LÆVENBRUCK

Directrice de Recherche, CNRS - Délégation Alpes

Co-directrice de thèse

Rapporteurs :

François-Xavier ALARIO

Directeur de Recherche, CNRS - Délégation Provence Alpes

Rapporteur

Arnaud SAJ

Professeur Adjoint - Université de Montréal

Rapporteur

Thèse soutenue publiquement le **6 mars 2023**, devant le jury composé de :

Monica BACIU

Professeure des Universités, Université Grenoble Alpes

Directrice de thèse

Hélène LÆVENBRUCK

Directrice de Recherche, CNRS - Délégation Alpes

Co-Directrice de thèse

Sylvie MORITZ-GASSER

Maître de Conférences, Université de Montpellier

Examinatrice

Olivier DETANTE

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier, Université Grenoble Alpes

Examineur, Président

François-Xavier ALARIO

Directeur de Recherche, CNRS - Délégation Provence et Corse

Rapporteur

Arnaud SAJ

Professeur Adjoint - Université de Montréal

Rapporteur



Titre — Réorganisation neurocognitive et linguistique du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC. Approche interdisciplinaire.

Résumé — Les troubles langagiers qui caractérisent l'aphasie post-AVC entravent les capacités de communication des patients, avec des conséquences multiples. Il existe une grande variabilité en termes de sévérité initiale des troubles langagiers et de degré de récupération ultérieure du langage et de la parole chez ces patients. Par ailleurs, l'efficacité des méthodes de rééducation orthophonique classique diminue après quelques mois d'application. De plus, nous savons que des facteurs socio-économiques et médico-sanitaires entravent la prise en charge des patients en phase chronique. Il nous semble donc évident qu'il est nécessaire, d'une part, de mieux comprendre les mécanismes neurocognitifs et les facteurs déterminants de la représentation du langage et de sa neuroplasticité, et d'autre part, de développer de nouvelles méthodes et des programmes de rééducation de la parole et du langage, adaptés à la prise en charge à long terme, pour les patients présentant des troubles suite à une lésion cérébrale.

Dans cette thèse, nous nous plaçons dans le cadre des modèles théoriques actuels de production de la parole afin de (i) mieux comprendre l'altération des mécanismes de parole et du langage, en lien avec d'autres processus cognitifs, et la réorganisation des réseaux cérébraux sous-jacents, et (ii) proposer de nouvelles perspectives pour la rééducation du langage et de la parole. Concrètement, nous proposons une nouvelle méthode de rééducation s'appuyant sur une technologie offrant une illustration visuelle réaliste de la dynamique articulatoire linguale et labiale (le logiciel *Ultraspeech-player*). Nous supposons ainsi que l'ajout d'informations visuelles pourrait améliorer les représentations phonologiques multisensorielles, sur lesquelles s'appuient la planification et la programmation motrices lors de la production de parole, et pourrait ainsi contribuer à la réorganisation des réseaux langagiers et à la compensation des déficits observés dans l'aphasie non fluente post-AVC. Au-delà du développement d'une nouvelle méthode, nous promouvons l'intérêt d'appliquer des programmes de rééducation associant au moins deux méthodes pour augmenter l'efficacité et la rapidité de la récupération langagière.

Dans la première partie de ce travail, nous nous focalisons sur le rôle des déterminants de la sévérité initiale et de la récupération du langage et de la parole chez des patients atteints d'aphasie post-AVC. Ainsi, nous montrons l'importance du caractère intensif de la rééducation chez les patients présentant une aphasie sévère, suite à une lésion frontale impliquant le gyrus frontal inférieur. Par ailleurs, nous proposons que le renforcement des mécanismes phonologiques par un entraînement audio-visuel de la parole permettrait une réorganisation anatomo-fonctionnelle optimale des réseaux langagiers.

Dans la seconde partie, nous proposons de compléter la rééducation orthophonique classique avec une rééducation augmentée visuellement, à l'aide du logiciel *Ultraspeech-player*. Nos résultats suggèrent que ce nouveau programme de rééducation renforcée, offrant une visualisation des mouvements des articulateurs de la parole, y compris ceux habituellement non visibles, permettrait une amélioration du langage grâce à un meilleur placement des articulateurs de la parole par le patient. Nous notons également une neuroplasticité langagière qui démontre un recrutement supplémentaire des régions et des mécanismes impliqués dans l'intégration des informations multisensorielles associées à la production de parole.

L'ensemble de ces résultats nous permet de proposer par la suite un protocole expérimental qui évalue, à l'échelle du groupe, l'efficacité sur les plans langagier, cognitif et cérébral de la rééducation renforcée. Plus précisément, nous souhaitons démontrer chez des patients présentant une aphasie non fluente : (i) l'efficacité de la rééducation visuellement augmentée, en comparaison à la rééducation orthophonique classique, et (ii) l'efficacité d'un programme de rééducation associant plusieurs méthodes, en comparaison à une méthode unique. En intégrant un groupe contrôle constitué de participants sains appariés en âge, nous nous intéressons également, indirectement, aux effets du vieillissement sur les mécanismes cognitifs et sur la réorganisation des réseaux cérébraux de la parole et du langage.

Mots clés — aphasie non fluente post-AVC, langage, parole, rééducation visuellement augmentée, *Ultraspeech-player*, neuroplasticité, cerveau, cognition.

Title — Neurocognitive and linguistic reorganization of language and speech in post-stroke aphasia. An interdisciplinary approach.

Abstract — The language disorders that characterize post-stroke aphasia interfere with patients' communication abilities, with multiple impacts on daily life. There is considerable variability in the initial severity of language disorders, as well as the degree of subsequent speech and language recovery among patients. Moreover, the effectiveness of classical speech therapy methods decreases after a few months of application. In addition, socio-economic and medical factors are known to influence the management of patients in the chronic phase. Therefore, there are two essential steps towards advancing the treatment of patients with post-stroke aphasia. First, there is a need for a more thorough understanding of the neurocognitive mechanisms and factors influencing language representation and neuroplasticity in patients with post-stroke disorders. Second, new methods and programs for speech and language rehabilitation in patients with disorders following a brain injury need to be developed on the basis of these novel findings and adapted to long-term management.

Following these requirements and in line with current theoretical models of speech production, the two main goals of this thesis are (i) to better understand the alteration of speech and language mechanisms in relation to other cognitive processes and the reorganization of the underlying brain networks and (ii) to propose new perspectives for speech and language rehabilitation. Specifically, we propose a new rehabilitation method based on technology that provides a realistic visual illustration of lingual and labial articulatory dynamics (the Ultraspeech-player software). We assume that adding visual information could improve the multisensory phonological representations on which motor planning and programming rely during speech production. This visual information could thus contribute to the reorganization of language networks and to the compensation of deficits observed in post-stroke non-fluent aphasia. Beyond developing a new method, we highlight the interest of applying rehabilitation programs combining at least two methods to increase the efficiency and speed of speech and language recovery.

In the first part of this work, we focus on the role of determinants of initial severity and recovery of language and speech in patients with post-stroke aphasia. We show the importance of intensive rehabilitation in patients with severe aphasia following a frontal injury involving the inferior frontal gyrus. In addition, we argue that reinforcing phonological mechanisms through audio-visual training of speech would allow for optimal anatomo-functional reorganization of language networks.

In the second part, we propose to supplement classical language and speech therapy with visually augmented rehabilitation, using the Ultraspeech-player software. Our results suggest that this new rehabilitation program strengthens phonological representations and contributes to reorganizing language networks in patients with post-stroke aphasia.

Taken together, the results of this thesis allow us to propose an experimental protocol that evaluates, at the group level, the efficiency of the augmented rehabilitation at the language, cognitive and cerebral levels. More precisely, in future studies, we aim to demonstrate in patients with non-fluent aphasia : (i) the effectiveness of visually augmented rehabilitation, compared to conventional speech therapy, and (ii) the effectiveness of a rehabilitation program combining several methods, compared to a single method. By including a control group of age-matched healthy participants, we will also provide new evidence of the effects of aging on cognitive mechanisms and the reorganization of speech and language brain networks.

Keywords — post-stroke non-fluent aphasia, language, speech, visually augmented rehabilitation, Ultraspeech-player, neuroplasticity, brain, cognition.

Remerciements

Ce travail est le fruit de nombreuses années passées au LPNC. Presque 8 ans depuis mon premier stage en juin 2015... Le temps est passé si vite, j'en suis ébaubie. Ce laboratoire a été le lieu de nombreuses rencontres avec des personnes qui m'ont beaucoup apporté sur le plan personnel et professionnel.

Mes premiers remerciements s'adressent à mes directrices de thèse, Monica et Hélène. Hélène, nous nous sommes rencontrées lors de mon stage au Babylab en 2015 et je te remercie de m'avoir présentée Monica suite à ce stage. Merci à vous deux de m'avoir proposé un sujet de stage lors de ma première année de Master et merci de m'avoir fait confiance toutes ces années alors que j'avais un parcours assez atypique. Vous avez une approche différente mais aussi complémentaire, ce qui a créé un environnement de travail riche et stimulant et j'ai énormément appris à vos côtés.

Je tiens à remercier les membres du jury, M. Arnaud Saj, M. François-Xavier Alario, Mme Sylvie Moritz-Gasser et M. Olivier Detante, pour leur disponibilité et pour avoir accepté de lire et d'évaluer mon travail de thèse. Je les remercie également pour les échanges constructifs que nous avons eus lors de la soutenance.

Ce travail est le fruit d'une importante collaboration et en ce sens, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont été impliquées dans mon projet de thèse. Je remercie Audrey Acher qui a réalisé la récolte des données et le suivi des patientes lors de la première étude de cas. Je remercie aussi Thomas Hueber qui a développé le logiciel *Ultraspeech-player* et qui s'est montré disponible pour les différentes discussions autour de l'utilisation du logiciel. Merci également à toutes les personnes qui ont contribué à ce travail au sein du GIPSA-Lab, notamment Pascal Perrier, Pierre Badin, Diandra Fabre. Je remercie aussi les personnes avec qui j'ai pu collaborer au sein du Centre Hospitalier Universitaire Grenoble Alpes et notamment dans le service de Médecine Physique et Réadaptation et dans le service de Neurologie, que ce soit dans le cadre de l'étude observationnelle rétrospective ou de la rééducation des patients. Merci au Professeur Dominic Pérennou, à Shenhao Dai, Céline Piscicelli, Valérie Marcon, Camille Lemaire, Emmanuelle Clarac, Assia Jaillard, Isabelle Favre-Wiki et plus largement merci aux neurologues, neuropsychologues et orthophonistes qui ont contribué à ces différents projets. Je tiens également à remercier les personnes avec qui j'ai pu

travailler au sein de la plateforme IRMaGe. Merci à Johan Pietras, Lucie Miquel, Laurent Lamalle, Irène Troprès et Émilie Cousin. Émilie, merci aussi pour ta précieuse aide dans le traitement des données, ainsi que pour les discussions plus informelles que nous avons eues ces dernières années. Je remercie aussi tous les stagiaires qui ont été impliqués dans ce travail, merci à Maïra, Ophélie, Thomas, Clarisse, Arno et Hatie. Enfin, je tiens à remercier aussi tous les participants sans qui ce travail aurait été impossible. Merci à eux pour leur contribution et merci particulièrement aux patients pour leur implication et leur motivation durant la rééducation.

Je remercie également tous les membres du labo. Merci à toutes et tous pour la bonne ambiance durant toutes ces années. Merci aussi à toute l'équipe administrative : Claire, Sanie, Anissa, Thierry et Guylaine. Un merci tout particulier à Guylaine, merci pour toutes nos conversations et pour tes conseils en tricots. J'espère que nous aurons tous l'occasion de nous recroiser. Peut-être autour d'un gâteau au chocolat...

Je remercie aussi tous les doctorants (les actuels comme les anciens). J'ai mis du temps à m'en rendre compte, mais nous avons une chance immense au labo. La fin de la thèse n'est pas une période facile et vous avez tous eu, à un moment ou un autre, une pensée pour moi et ça fait chaud au cœur. Merci pour les sorties, les parties de cartes et les petites conversations dans les couloirs. Où que j'aille ensuite, cette ambiance me manquera, c'est certain. Je remercie plus particulièrement toutes les personnes qui sont passées par le bureau C105 : Élise, Sonja, Merrick, Mathieu, Laura, Mamady, Clément, mais aussi Didier et Bertha. Merci pour les conversations autour d'un café ou d'un thé. Je continuerai à vous donner quelques « *Word of the Day* » (WoD) de temps en temps.

Élise, tu as été la première avec moi dans le bureau. Merci pour ta bonne humeur, les chansons, les pauses-café, les parties de pièces dans le pot, les *poor-date*... Même si on a aussi parlé de travail, je te remercie pour nos petits échanges en toute légèreté qui ont permis d'avoir une bonne ambiance dans le bureau.

Thierry, je suis heureuse de vous avoir rencontrés, Grâce et toi. Merci pour ta présence pendant la thèse. Après ces nombreuses années au labo (où je suis arrivée avant toi quand même...), tu es devenu un véritable ami.

Je remercie également ma famille et mes amis pour leur présence durant la thèse et lors de la soutenance. Je sais aussi que je n'ai pas toujours été disponible ces dernières années et merci pour votre patience.

Merci à Jordan, Laurine & Alex, Maëva, Coralie, Kelly, Julie, entre autres. Laurine (*ma M*), merci d'être toujours présente depuis les cours de français au lycée. Merci (et bravo!) d'avoir lu ma thèse en entier avant la soutenance et merci de m'avoir écouté parler de travail de nombreuses heures durant toutes ces années, même si tu ne comprenais pas toujours ce que je racontais. Je pense quand même que ces monologues, durant la « minute travail », m'ont permis d'écrire

certaines parties de la thèse, alors merci.

Merci à mes parents et ma sœur. Maman, même si tu ne penses pas mériter de remerciements, je te remercie quand même pour ton soutien toutes ces années. Merci de m'avoir poussée à continuer et de m'avoir encouragée quand d'autres ne croyaient pas en moi. Erik, merci d'avoir été là et comme tu le dis si bien « *Un chercheur qui cherche c'est bien, mais un chercheur qui trouve c'est encore mieux* ». J'espère t'avoir convaincu que j'ai quand même un peu « trouvé » ;). Vava, merci d'avoir été présente et maintenant, tu sais exactement sur quoi je travaille. Enfin, merci à Çoise de t'être enfermée pendant une semaine pour relire la thèse en entier et vérifier l'orthographe et merci à Olivia et Loulou d'avoir fait le déplacement pour moi et d'avoir été présents durant la soutenance (et avant).

Enfin, Ali, j'aurais beaucoup à dire, mais je vais essayer de le faire en une phrase. Je te remercie pour ta présence, ton soutien, les conversations scientifiques ou non, les pauses-café et l'amitié gastronomique.

*
* *

Ce travail a bénéficié d'un financement dans le cadre des Initiatives de Recherche Stratégique (IRS) mises en place par l'Initiative d'Excellence (IDEX) de l'Université Grenoble Alpes.

Table des Matières

Liste des Illustrations	xiii
Liste des Tableaux	xv
Liste des Abréviations	xvii
Avant-propos	1
1 Cadre théorique	7
1 La modalité orale du langage : la production de parole	9
1.1 Généralités en phonétique	9
1.1.1 Les voyelles	10
1.1.2 Les consonnes	12
1.2 Les facteurs influençant la production des phonèmes	16
2 Mécanismes neurocognitifs et architecture cérébrale de la production de la parole	17
2.1 Modèles psycholinguistiques et neurocognitifs	18
2.2 Connectivité des réseaux cérébraux	24
3 Une pathologie acquise du langage : l'aphasie	28
3.1 Historique et définition générale	28
3.2 Les causes de l'aphasie	30
3.3 Classifications des aphasies	32
3.4 Troubles cognitifs associés	34
4 Rééducation du langage et de la parole	35
4.1 Rééducation orthophonique classique	35
4.2 Nouvelles méthodes de rééducation	37
4.2.1 Thérapie par contrainte induite	37
4.2.2 Thérapie par intonation musicale	39
4.2.3 Thérapie fondée sur les méthodes technologiques	41
4.3 Bilan sur les méthodes de rééducation	43
5 Récupération dans le cas de l'aphasie post-AVC	44
5.1 Profils de récupération en lien avec la neuroplasticité	46
5.2 Récupération du langage	48
5.2.1 Facteurs lésion-dépendants	48
5.2.2 Facteurs individuels	50
5.2.3 Facteurs rééducation-dépendants	51
6 Problématique et objectifs	52
2 Les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie post-AVC	57
1 Méthode	61
1.1 <i>Design</i> de l'étude et participants	61
1.2 Mesure principale : sévérité initiale de l'aphasie	62
1.3 Facteurs à l'étude	63
1.3.1 Facteurs sociodémographiques	63

1.3.2	Facteurs cliniques	63
1.3.3	Facteurs lésion-dépendants	65
1.4	Analyses statistiques	67
1.5	Analyses <i>Voxel-based Symptom Mapping</i>	68
2	Résultats	69
2.1	Participants	69
2.2	Déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie	71
2.3	Déterminants lésionnels de la sévérité initiale de l'aphasie	76
3	Discussion	79
3	Les déterminants de la récupération du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC	89
1	Méthode	93
1.1	<i>Design</i> de l'étude et participants	93
1.2	Mesure principale : gain relatif	93
1.3	Facteurs à l'étude	94
1.3.1	Facteurs sociodémographiques	95
1.3.2	Facteurs cliniques	95
1.3.3	Facteurs lésion-dépendants	96
1.3.4	Facteurs rééducation-dépendants	96
1.4	Analyses statistiques	97
1.5	Analyses <i>Voxel-based Symptom Mapping</i>	97
2	Résultats	98
2.1	Participants	98
2.2	Déterminants de la récupération du langage et de la parole	101
2.3	Déterminants lésionnels de la récupération du langage	104
3	Discussion	104
4	Une nouvelle méthode de rééducation de la parole dans l'aphasie non fluente post-AVC	111
1	Étude de cas : patientes P1 et P2	115
1.1	Méthode	116
1.1.1	Participant	116
1.1.2	Rééducation	116
1.1.3	Évaluation du langage et de la parole	119
1.1.4	IRM fonctionnelle de tâche	119
1.1.5	Analyse des données	120
1.2	Résultats	123
1.2.1	Évaluation du langage et de la parole	123
1.2.2	IRMf d'activation	131
1.3	Discussion intermédiaire	132
2	Étude de cas : patient P3	136
2.1	Méthode	136
2.1.1	Participant	136
2.1.2	Rééducation	138
2.1.3	Évaluation neuropsychologique	139
2.1.4	Évaluation du langage et de la parole	139
2.1.5	Analyse de données	140
2.1.6	Analyses statistiques	142
2.2	Résultats	143
2.2.1	Évaluation neuropsychologique	143
2.2.2	Évaluation du langage et de la parole	143
2.3	Discussion intermédiaire	151
3	Conclusion	157

5	Un nouveau protocole expérimental pour la rééducation de la parole dans l'aphasie non fluente post-AVC	159
1	Protocole SEMO	161
1.1	Critères d'inclusion	163
1.2	Évaluation multimodale	164
1.2.1	Évaluation du langage et de la parole	164
1.2.2	Évaluation neuropsychologique	165
1.2.3	Évaluation cérébrale : neuroimagerie	166
1.3	Résultats attendus	166
2	Étude préliminaire	168
2.1	Méthode	169
2.1.1	Participants	169
2.1.2	Rééducation	171
2.1.3	Évaluation neuropsychologique	172
2.1.4	Évaluation du langage et de la parole	172
2.1.5	IRM fonctionnelle	173
2.1.6	Analyse des données de langage et de parole	175
2.1.7	Analyse des données d'IRMf de tâche	180
2.2	Résultats	181
2.2.1	Évaluation neuropsychologique	181
2.2.2	Évaluation du langage et de la parole	182
2.2.3	IRMf de tâche	193
2.3	Discussion	197
6	Discussion générale	209
1	Synthèse des principaux résultats	210
1.1	La variabilité associée à l'aphasie et sa récupération	212
1.2	Une méthode de rééducation de la parole augmentée : le logiciel <i>Ultraspeech-player</i>	213
2	Discussion générale	216
2.1	Vers une rééducation intensive et adaptée	217
2.1.1	Les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie	218
2.1.2	Les déterminants de la récupération langagière	221
2.1.3	Implications thérapeutiques : recommandations pour la rééducation orthophonique	223
2.2	Vers une rééducation augmentée, fondée sur l'intégration sensorimotrice	224
3	Limites	228
4	Perspectives	229
5	Conclusion générale	235
	Bibliographie	237
	Annexes	277
A	Les différents types d'aphasie	279
B	Étude de cas : patientes P1 et P2	283
C	Étude de cas : patient P3	285
1	Critères d'inclusion	285
2	Rééducation	287
3	Évaluation du langage et de la parole	289
D	Étude préliminaire : patient P4	291
1	Protocole SEMO	291
2	Critères d'inclusion	293
3	Rééducation	294
4	IRMf de tâche	295
5	Calcul des performances	296
6	Analyses acoustiques : statistiques	297

7	Résultats : IRMf d'activation	298
E	Articles publiés ou en préparation	301

Liste des Illustrations

1.1	Triangle vocalique permettant d'illustrer les variations articulatoires des différentes voyelles orales	11
1.2	Modèle hiérarchique de contrôle moteur par <i>feedback</i> proposé par Hickok (2012a)	21
1.3	Réseau neuronal impliqué dans l'étape d'articulation du modèle par contrôle prédictif de Grandchamp et al. (2019)	23
1.4	Modèle double voie du langage	26
2.1	Participants inclus dans l'étude sur les déterminants de la sévérité de l'aphasie	62
2.2	Superposition des lésions de tous les patients ($N=96$)	71
2.3	Superposition des cartes de déconnexion de tous les patients ($N=96$)	72
2.4	Résultat des analyses VLSM permettant d'identifier l'association entre les structures de la substance grise lésées et la sévérité initiale de l'aphasie	76
2.5	Résultat des analyses VDSM permettant d'identifier l'association entre les faisceaux de substance blanche déconnectés et la sévérité initiale de l'aphasie	77
3.1	Participants inclus dans l'étude sur les déterminants de la récupération du langage	94
3.2	Distribution de la variable « gain relatif »	95
3.3	Superposition des lésions de tous les patients ($N=53$)	100
3.4	Superposition des cartes de déconnexions de tous les patients ($N=53$)	101
4.1	Coupes axiales issues des IRMs (T1) des patientes P1 (à gauche) et P2 (à droite) permettant de visualiser leurs lésions post-AVC	117
4.2	Illustration de l'interface du logiciel <i>Ultraspeech-player</i> (Hueber, 2013)	118
4.3	Vue sagittale du conduit vocal capturée à l'aide d'une sonde à échographie. Figure issue de la documentation d'Ultraspeech player.	118
4.4	Triangle vocalique de l'orthophoniste représentant les formants F1 en fonction de F2 lors de la production des voyelles orales	125
4.5	Triangles vocaliques de la patiente P1 représentant les formants F1 en fonction de F2 lors de la production des voyelles orales avant (en haut) et après (en bas) la rééducation	126
4.6	Triangles vocaliques de la patiente P2 représentant les formants F1 en fonction de F2 lors de la production des voyelles orales avant (en haut) et après (en bas) la rééducation	127
4.7	Moments spectraux de la patiente P1 pour les consonnes fricatives, avant et après la rééducation	129
4.8	Moments spectraux de la patiente P2 pour les consonnes fricatives, avant et après la rééducation	130
4.9	Coupes axiales issues de l'IRM (T1) du patient P3 permettant de visualiser la lésion post-AVC	137
4.10	Matrices de confusion présentant le phonème cible en fonction du phonème produit pour les voyelles isolées, avant et après rééducation	147
4.11	Matrices de confusion présentant le phonème cible en fonction du phonème produit pour les consonnes et semi-consonnes en condition [CV], avant et après rééducation	147
4.12	Matrices de confusion présentant le phonème cible en fonction du phonème produit pour les consonnes en condition [VCV], avant et après rééducation	148
4.13	Triangles vocaliques représentant F1 en fonction de F2 pour les voyelles orales avant (à gauche) et après (à droite) la rééducation	149
4.14	Distance intra-voyelle représentée pour chaque voyelle avant et après rééducation	150

4.15	Centre de gravité et écart type du patient P3 pour les consonnes fricatives non voisées, avant et après rééducation	151
5.1	Représentation du déroulement du protocole SEMO	162
5.2	Trois coupes axiales issues de l'IRM (T1) du patient P4 permettant de visualiser la lésion post-AVC	170
5.3	Illustration de la distance intra-voyelle et de la distance intra-voyelle inter-sujets	179
5.4	Matrices de confusion pour la répétition de voyelles isolées	186
5.5	Matrices de confusion pour la répétition de consonnes et semi-consonnes en condition [CV]	187
5.6	Matrices de confusion pour la répétition des consonnes en condition [VCV]	189
5.7	Triangles vocaliques représentant F1 en fonction de F2 pour les voyelles orales	190
5.8	Distance intra-voyelle pour les participants sains et intra-voyelle inter-sujets entre les productions des participants sains et du patient	191
5.9	Moments spectraux obtenus lors de la répétition des consonnes fricatives non voisées, pour les participants sains et le patient	192
5.10	Activations cérébrales obtenues pour les participants sains lors des tâches de dénomination (DENO), de détection de rimes (DR) et de répétition de syllabes (RS) réalisées à T1	194
5.11	Activations cérébrales obtenues pour le patient P4 lors des tâches de dénomination (DENO), de détection de rimes (DR) et de répétition de syllabes (RS) réalisées à T1	195
C.1	Illustration de l'interface du logiciel Ultraspeech-player (Hueber, 2013) pour l'exercice 1 réalisé durant la première séance de rééducation	287
D.1	Déroulement détaillé du protocole SEMO	292
D.2	Déroulement des tâches de dénomination et détection de rimes en IRMf	295
D.3	Déroulement de la tâche de répétition de syllabes	296

Liste des Tableaux

1.1	Classification des consonnes de l'alphabet phonétique international	12
2.1	Facteurs sociodémographiques, cliniques et lésion-dépendants des patients	70
2.2	Résultats des analyses statistiques univariées issues de la comparaison entre les groupes (N-Aph, M-Aph, S-Aph)	73
2.3	Valeurs du facteur d'inflation de la variance (VIE, <i>Variance Inflation Factor</i>)	74
2.4	Résultats de l'analyse de régression pas-à-pas couplée avec le <i>bootstrap</i> (ré-échantillonnage avec 1000 réplifications) pour identifier les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie	75
2.5	Résultats de l'analyse multivariée permettant d'explorer l'association entre les facteurs lésion-dépendants et cliniques et la sévérité initiale de l'aphasie	75
2.6	Régions cérébrales lésées, identifiées à l'aide de l'atlas AAL (Tzourio-Mazoyer et al., 2002), associées à la sévérité initiale de l'aphasie	77
2.7	Faisceaux de substance blanche identifiés à l'aide de l'atlas HCP1065 (Yeh, 2022) et associés à la sévérité initiale de l'aphasie	78
3.1	Facteurs sociodémographiques, cliniques, lésion-dépendants et rééducation-dépendants	99
3.2	Résultat des analyses statistiques univariées issues de la comparaison entre les groupes de patients ayant une récupération élevée ou faible	102
3.3	Valeurs du facteur d'inflation de la variance (VIE, <i>Variance Inflation Factor</i>)	103
3.4	Résultats de l'analyse de régression pas-à-pas couplée avec le <i>bootstrap</i> (ré-échantillonnage avec 1000 réplifications) pour identifier les déterminants de la récupération du langage	103
3.5	Modèle issu de l'analyse multivariée permettant d'explorer l'association entre les facteurs cliniques, lésion-dépendants et rééducation-dépendants et la récupération du langage	103
3.6	Régions cérébrales identifiées à l'aide de l'atlas AAL (Tzourio-Mazoyer et al., 2002) et associées à la récupération du langage et de la parole	104
4.1	Données démographiques et cliniques des patientes P1 et P2	116
4.2	Résultats obtenus par P1 et P2 lors des bilans orthophoniques effectués avant et après la rééducation	123
4.3	Performances des patientes P1 et P2 lors de la tâche de répétition de syllabes, avant et après la rééducation	124
4.4	Délai d'établissement du voisement (VOT, en ms) obtenu lors de la répétition des consonnes occlusives pour P1, P2 et l'orthophoniste, avant et après la rééducation des patientes	128
4.5	Activations cérébrales obtenues pour la patiente P1 lors des tâches de détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), avant et après la rééducation	131
4.6	Activations cérébrales obtenues pour la patiente P2 lors des tâches de détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), avant et après la rééducation	131
4.7	Données démographiques et cliniques du patient P3	137
4.8	Scores obtenus par le patient P3 lors du bilan neuropsychologique effectué avant et après rééducation	144
4.9	Performances du patient P3 lors de l'évaluation du langage et de la parole, avant et après rééducation	145
4.10	Pourcentages de processus phonologiques identifiés parmi les erreurs effectuées lors de la répétition de consonnes en condition [CV] et [VCV], avant et après rééducation	146
4.11	Délai d'établissement du voisement (VOT, en ms) obtenu lors de la répétition des consonnes occlusives pour P3 et l'orthophoniste, avant et après la rééducation	150

5.1	Données sociodémographiques et cliniques du patient P4	169
5.2	Données sociodémographiques des participants sains	171
5.3	Résultats de l'évaluation des compétences cognitives	182
5.4	Performances du patient P4 lors de évaluations langagières réalisées à T1, T2 et T3	183
5.5	Processus phonologiques identifiés parmi les erreurs lors de la répétition de consonnes en condition [CV]184	
5.6	Processus phonologiques identifiés parmi les erreurs lors de la répétition de consonnes en condition [VCV]185	
5.7	Valeurs de VOT obtenues pour les consonnes occlusives produites par le patient et les participants sains	191
5.8	Valeurs moyennes des centre de gravité (CG) et écart type (ET) spectraux du patient et des participants sains, obtenues lors de la répétition des consonnes fricatives non voisées	193
5.9	Contrastes entre T1 et T2 pour les activations cérébrales obtenues lors des tâches de dénomination (DENO), détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), pour les participants sains	194
5.10	Contrastes entre T1 et T2 pour les activations cérébrales obtenues lors des tâches de dénomination (DENO), détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), pour le patient P4	196
6.1	Différences entre les études de cas et le protocole SEMO	216
A.1	Tableau représentant les différents types d'aphasie, les troubles ainsi que la localisation de la lésion associée	280
A.1	Tableau représentant les différents types d'aphasie (suite)	281
A.1	Tableau représentant les différents types d'aphasie (suite)	282
B.1	Items contenus dans l'épreuve de répétition de monosyllabes ou bi-syllabes sémantisés (bilan acoustique)	283
C.1	Évaluation de la familiarité du patient P3 avec les outils numériques	285
C.2	Scores aux épreuves du bilan neuropsychologique permettant de valider les critères d'inclusion dans le protocole pour le patient P3	286
C.3	Scores aux épreuves du bilan orthophonique permettant d'évaluer les compétences de langage et de valider les critères d'inclusion dans le protocole pour le patient P3	286
C.4	Détail du contenu des séances de rééducation du patient P3	288
C.5	Contenu des tâches de l'évaluation du langage et de la parole du patient P3	289
D.1	Scores aux épreuves permettant de valider les critères d'inclusion dans le protocole SEMO pour le patient P4	293
D.2	Évaluation de la familiarité du patient P4 avec les outils numériques	293
D.3	Détail du contenu des séances de rééducation du patient P4	294
D.4	Activations cérébrales obtenues pour les participants sains lors des tâches de dénomination (DENO), détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), à T1 et T2	299
D.5	Activations cérébrales obtenues pour le patient P4 lors des tâches de dénomination (DENO), détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), à T1 et T2	300

Liste des Abréviations

AB	Aire de Brodmann
ADRS	<i>Aphasia Depression Rating Scale</i>
AMS	Aire Motrice Supplémentaire
ASRS	<i>Aphasia Severity Rating Scale</i>
AVC	Accident Vasculaire Cérébral
BALE	Batterie Analytique du Langage Écrit
BDAE	<i>Boston Diagnostic Aphasia Examination</i>
BECD	Batterie d'Évaluation Clinique de la Dysarthrie
BEM	Batterie d'Efficiencé Mnésique
CASP	<i>Cognitive Assessment Scale for Stroke Patients</i>
CG	Centre de Gravité spectral
DENO	Dénomination d'images
DLPF	<i>DorsoLateral PreFrontal cortex</i>
DMN	<i>Default Mode Network</i>
DR	Détection de Rimes
DTI	<i>Diffusion Tensor Imaging</i>
EF	Évaluation Finale
EI	Évaluation Initiale
ET	Écart Type spectral
FA	Faisceau Arqué
FAT	<i>Frontal Aslant Tract</i>
FLAIR	<i>Fluid Attenuated Inversion Recovery</i>
FLI	Faisceau Longitudinal Inférieur
FLM	Faisceau Longitudinal Moyen
FLS	Faisceau Longitudinal Supérieur
FU	Faisceau <i>Uncine</i>
GA	Gyrus Angulaire
GFI	Gyrus Frontal Inférieur
GFI-op	Gyrus Frontal Inférieur <i>pars opercularis</i>
GFI-orb	Gyrus Frontal Inférieur <i>pars orbitalis</i>
GFI-tri	Gyrus Frontal Inférieur <i>pars triangularis</i>
GFM	Gyrus Frontal Médian
GFS	Gyrus Frontal Supérieur
GSM	Gyrus SupraMarginal
GTI	Gyrus Temporal Inférieur
GTM	Gyrus Temporal Médian
GTS	Gyrus Temporal Supérieur
HAD	<i>Hospital Anxiety and Depression scale</i>

HD	Hémisphère Droit
HG	Hémisphère Gauche
IC	Intervalle de Confiance
IE	Indice d'Évolution
IFOF	<i>Inferior Fronto-Occipital Fasciculus</i>
IRMf	Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle
LPI	Lobule Pariétal Inférieur
LPS	Lobule Pariétal Supérieur
M1	Cortex Moteur Primaire
M-Aph	Patients présentant une Aphasie Modérée/légère
MI	Membres Inférieurs
MIT	<i>Melodic Intonation Therapy</i>
MOCA-B	<i>Montreal Cognitive Assessment-Basic</i>
mRS	<i>modified Rankin Scale</i>
MS	Membres Supérieurs
N-Aph	Patients cérébro-lésés sans aphasie
NIHSS	<i>National Institutes of Health Stroke Scale</i>
OR	<i>Odds Ratio</i>
PPC	Pourcentage de Phonèmes Corrects
RS	Répétition de syllabes
RTS	Radiations Thalamiques Supérieures
S1	Cortex Somesthésique Primaire
S-Aph	Patients présentant une Aphasie Sévère
SEMO	SEnsoriMOtrice (protocole de rééducation)
SFC	<i>State Feedback Control model</i>
STS	Sillon Temporal Supérieur
TCI	Thérapie par Contrainte Induite
VDSM	<i>Voxel-based Disconnectome-Symptom Mapping</i>
VIF	<i>Variance Inflation Factor</i>
VLSM	<i>Voxel-based Lesion-Symptom Mapping</i>
VOT	<i>Voice Onset Time</i>
WMHs	<i>White Matter Hyperintensities</i>

Avant-propos

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux processus et aux substrats cérébraux qui soutiennent la récupération de la parole dans l'aphasie, un trouble langagier acquis, secondaire à une lésion cérébrale. En France, la prévalence de ce trouble est estimée à près de 300 000 personnes et l'incidence est de plus de 40 000 nouveaux cas par an, faisant de l'aphasie un enjeu sanitaire majeur (Fédération Nationale des Aphasiques de France, 2022). Les manifestations observées sont variables et peuvent concerner, à différents degrés, les versants expressifs et/ou réceptifs du langage, en modalité orale et/ou écrite.

Les causes de l'aphasie sont multiples (Chomel-Guillaume, Leloup, & Bernard, 2021). L'accident vasculaire cérébral (AVC) représente l'une des causes les plus fréquentes de lésion cérébrale à l'origine de l'aphasie (21-38% d'aphasie post-AVC; Brust, Shafer, Richter, & Bruun, 1976; Engelter et al., 2006; Pedersen, Stig Jørgensen, Nakayama, Raaschou, & Olsen, 1995). De plus, les troubles du langage et de la parole qui caractérisent l'aphasie représentent une source significative de handicap en termes de communication, avec des répercussions sur la vie familiale, professionnelle et sociale du patient. Par conséquent, la prise en charge de l'aphasie de façon précoce et adaptée, visant à permettre la meilleure récupération possible du langage et des capacités de communication, représente un enjeu crucial pour la clinique et la pratique orthophonique. Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons particulièrement aux facteurs et aux stratégies de remédiation orthophonique pouvant contribuer à la récupération de la production de la parole¹ dans le cadre de l'aphasie suite à un AVC.

1. Les termes de « parole » et « langage » ont des significations différentes selon les domaines. En linguistique, le langage désigne la capacité universelle qui nous permet d'exprimer une pensée et de communiquer; il se distingue de la parole – usage concret et individuel de cette compétence. En orthophonie, la parole désigne souvent l'étape finale du processus de production du langage, c'est-à-dire la phonation, l'articulation et l'émission de mots à voix haute. C'est dans ce deuxième cadre que nous utilisons ici le terme de parole, avec la précaution que cette étape finale d'émission sonore soit influencée par les opérations langagières de plus haut niveau (telles que la formulation syntaxico-prosodico-lexicale et la planification phonologique) et qu'elle-même influence ces opérations en retour (Grandchamp et al., 2019). Il est donc parfois difficile de séparer précisément les processus relevant du langage de ceux relevant de la parole.

Tout d'abord, il faut rappeler qu'il existe une grande variabilité en termes de sévérité initiale des troubles langagiers ainsi qu'en termes de degré de récupération langagière ultérieure. De nombreux facteurs expliquent cette variabilité inter-individuelle (*e.g.*, pour une revue, voir [Gerstenecker & Lazar, 2019](#)). Parmi eux, on relève des facteurs sociodémographiques (*i.e.*, le sexe, l'âge, la préférence manuelle, le niveau d'éducation, le statut socio-professionnel, les interactions sociales), neurophysiologiques (*i.e.*, le degré de plasticité neuronale et de flexibilité, fortement lié à la capacité de réserve cognitive), cliniques (*i.e.*, les performances cognitives et langagières), ainsi que des facteurs associés à la lésion cérébrale elle-même (*i.e.*, le type et la sévérité de l'AVC, la taille et la localisation de la lésion et le type d'aphasie). Notons que la récupération langagière est également influencée par des facteurs associés à la lésion, tels que la sévérité de l'aphasie (*e.g.*, [Lahiri, Dubey, Ardila, Sanyal, & Ray, 2021](#)), ainsi que des facteurs liés à la rééducation orthophonique, notamment la durée, l'intensité et le type de rééducation (*e.g.*, [Brady et al., 2022a, 2022b](#) ; [Brady, Kelly, Godwin, Enderby, & Campbell, 2016](#)). Une revue récente s'appuyant sur une base de données internationale sur l'aphasie indique que la rééducation doit être mise en place le plus précocement possible (voir [Ali et al., 2021](#) ; [Brady et al., 2022a](#)).

De manière générale, lors de la rééducation orthophonique classique, l'orthophoniste administre des tests normés en fonction de l'âge du patient présentant une aphasie et de l'usage que le patient fait du langage dans son quotidien. Dans un premier temps, l'orthophoniste favorise la restauration de la fonction défaillante. Toutefois, si le trouble persiste sans amélioration, elle (ou il) proposera des méthodes palliatives qui utilisent les compétences intactes. Ainsi, l'orthophoniste essaiera, par des chemins détournés et des nouvelles stratégies, de permettre aux patients de retrouver leurs capacités de communication ([Chomel-Guillaume et al., 2021](#)). Malgré l'efficacité indéniable de la rééducation orthophonique classique dans les phases aiguë et subaiguë post-AVC, on observe souvent que la rééducation orthophonique atteint un plateau après trois à six mois, avec des bénéfices moindres ([El Hachioui et al., 2013](#) ; [Gerstenecker & Lazar, 2019](#)). Ceci justifie la mise en place de nouveaux programmes et méthodes de rééducation² permettant à la récupération langagière de se poursuivre, même au-delà de trois mois. Dans ce cadre, les approches rééducatives s'appuyant sur des technologies émergentes (telles que les interfaces de reconnaissance de la

2. Notons que, dans ce travail, nous distinguons la notion de méthode de rééducation qui s'applique pour un outil donné utilisé lors de la rééducation (*e.g.*, la rééducation orthophonique classique), de la notion de programme de rééducation qui comprend un ensemble de plusieurs méthodes (*e.g.*, l'utilisation de la réalité virtuelle en complément de la rééducation orthophonique classique).

parole ou de réalité virtuelle), développées dans les dernières années, semblent prometteuses (Braley et al., 2021 ; Stark & Warburton, 2018).

Dans ce contexte, ce travail de thèse a deux objectifs principaux : (i) évaluer les facteurs de variabilité de la sévérité initiale de l'aphasie et du degré de récupération du langage et de la parole chez des patients présentant une aphasie post-AVC, et (ii) évaluer l'effet sur la récupération de la parole, d'un programme de rééducation renforcée – s'appuyant sur une technologie offrant une illustration visuelle réaliste de la dynamique articulatoire linguale et labiale (*Ultraspeech-player*) en complément de la rééducation orthophonique classique – appliqué à des patients présentant une aphasie non fluente post-AVC. Ces deux objectifs sont abordés à travers plusieurs études qui ont été réalisées dans une perspective interdisciplinaire, s'inscrivant dans le cadre général de la psychologie expérimentale, des sciences du langage, de la neuropsychologie et de la neuroimagerie anatomo-fonctionnelle. Ainsi, l'organisation du travail expérimental présenté dans cette thèse est décrite ci-dessous.

Concernant le **premier objectif**, qui vise à évaluer les facteurs de variabilité de la sévérité de l'aphasie et du degré de récupération du langage et de la parole chez des patients présentant une aphasie post-AVC, deux études sont présentées.

- La première étude est une étude observationnelle rétrospective, à partir d'une cohorte préexistante de patients présentant un AVC (avec ou sans aphasie), visant à identifier les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie, parmi des facteurs socio-démographiques, cliniques et associés à la lésion.
- La deuxième étude observationnelle rétrospective présentée s'appuie également sur les données d'une cohorte préexistante de patients présentant une aphasie post-AVC, et a pour but d'identifier les déterminants de la récupération langagière, parmi des facteurs socio-démographiques, cliniques, ainsi que des facteurs associés à la lésion et à la rééducation.

Le **deuxième objectif** vise à évaluer l'effet sur la récupération de la parole, d'un programme de rééducation renforcée appliqué à des patients présentant une aphasie non fluente suite à un AVC. Ce programme s'appuie sur le logiciel *Ultraspeech-player* en complément de la rééducation orthophonique. Cet objectif est déployé à travers trois études.

- La première est une étude de cas réalisée afin d'évaluer l'efficacité, sur les plans langagier et anatomo-fonctionnel, d'un programme de rééducation renforcée chez deux patientes

présentant une aphasie non fluente en phase chronique. Dans cette étude, les patientes ont été guidées par une orthophoniste, dans la phase initiale du programme, puis ont pratiqué la rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player* à domicile, sans l'aide de l'orthophoniste.

- La deuxième étude de cas a été réalisée afin d'évaluer l'efficacité, sur le plan langagier, du programme de rééducation renforcée appliqué à la rééducation de la parole d'un patient présentant une aphasie non fluente en phase chronique. Dans cette deuxième étude, le patient a été guidé par nous-mêmes tout au long de la rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player*.
- La troisième étude introduit un nouveau protocole expérimental permettant d'évaluer l'efficacité du logiciel *Ultraspeech-player* en complément de la rééducation orthophonique en le comparant à la rééducation orthophonique classique seule. Une étude de cas préliminaire basée sur ce nouveau protocole est présentée.

Ainsi, cette thèse est composée de six chapitres. Pour guider la lecture, les encadrés bleus fournissent des informations supplémentaires et les encadrés oranges contiennent un résumé avec les informations importantes dans le cadre de cette thèse.

Dans le **Chapitre 1**, nous présentons une revue de la littérature détaillant différents modèles du langage et de la parole à des niveaux linguistique, cognitif et cérébral. Nous présentons également l'aphasie, les troubles associés et la récupération du langage et de la parole *via* les méthodes actuelles de rééducation. Les objectifs de ce travail de thèse s'inscrivent dans ces cadres théorique et clinique.

Dans le **Chapitre 2**, nous présentons, au travers d'une étude de cohorte, les facteurs sociaux, comportementaux et cérébraux qui influencent la sévérité initiale de l'aphasie. Parmi les facteurs étudiés, nous détaillons les facteurs socio-démographiques, cliniques et associés à la lésion.

Dans le **Chapitre 3**, nous présentons, également au travers d'une étude de cohorte, les facteurs sociaux, comportementaux et cérébraux (socio-démographiques, cliniques, associés à la lésion et à la rééducation) qui influencent la récupération du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC.

Dans le **Chapitre 4**, nous souhaitons évaluer l'effet d'un nouveau programme de rééducation basé sur l'illustration visuelle (utilisant le logiciel *Ultraspeech-player*) en complément de la rééducation orthophonique classique. Pour cela, nous présentons plusieurs études de cas mettant

en avant la faisabilité et l'efficacité du programme de rééducation. À la fin de ce chapitre, nous soulevons quelques limites inhérentes à ces études de cas.

Dans le **Chapitre 5**, sur la base des limites soulevées dans le chapitre précédent, nous présentons le nouveau protocole expérimental que nous avons mis au point. Ce protocole permet d'évaluer, grâce à une étude de groupe, l'efficacité d'un programme de rééducation renforcée (utilisant la rééducation augmentée visuellement avec le logiciel *Ultraspeech-player* en complément de la rééducation classique) comparée à la rééducation orthophonique classique seule. Ce protocole inclus également un groupe de participants sains contrôles. Nous présentons une étude préliminaire mettant en application ce nouveau protocole, ainsi que les données recueillies chez des participants sains contrôles.

Enfin, dans le **Chapitre 6**, après un résumé des principaux résultats obtenus dans cette thèse, nous discutons des apports de ce travail. Pour cela, nous présentons les facteurs associés à la sévérité de l'aphasie et sa récupération afin de montrer les enjeux d'une rééducation intensive et adaptée. Puis, nous nous focalisons sur l'intérêt d'une rééducation augmentée visuellement et fondée sur l'interaction sensorimotrice pour la rééducation de la parole dans l'aphasie post-AVC.

CHAPITRE 1

Cadre théorique

Table des Matières

1	La modalité orale du langage : la production de parole	9
1.1	Généralités en phonétique	9
1.1.1	Les voyelles	10
1.1.2	Les consonnes	12
1.2	Les facteurs influençant la production des phonèmes	16
2	Mécanismes neurocognitifs et architecture cérébrale de la production de la parole	17
2.1	Modèles psycholinguistiques et neurocognitifs	18
2.2	Connectivité des réseaux cérébraux	24
3	Une pathologie acquise du langage : l'aphasie	28
3.1	Historique et définition générale	28
3.2	Les causes de l'aphasie	30
3.3	Classifications des aphasies	32
3.4	Troubles cognitifs associés	34
4	Rééducation du langage et de la parole	35
4.1	Rééducation orthophonique classique	35
4.2	Nouvelles méthodes de rééducation	37
4.2.1	Thérapie par contrainte induite	37
4.2.2	Thérapie par intonation musicale	39
4.2.3	Thérapie fondée sur les méthodes technologiques	41
4.3	Bilan sur les méthodes de rééducation	43
5	Récupération dans le cas de l'aphasie post-AVC	44
5.1	Profils de récupération en lien avec la neuroplasticité	46
5.2	Récupération du langage	48
5.2.1	Facteurs lésion-dépendants	48
5.2.2	Facteurs individuels	50
5.2.3	Facteurs rééducation-dépendants	51
6	Problématique et objectifs	52

Dans ce chapitre, nous présentons le contexte théorique de ce travail de thèse avec quelques notions clés sur le langage et la parole. Puis, nous abordons le cas de l'aphasie, un trouble acquis du langage. Nous définissons l'aphasie, les méthodes mises en œuvre pour la rééducation des troubles du langage et de la parole, ainsi que les mécanismes cognitifs et cérébraux associés à la récupération des fonctions langagières. Ces éléments sont étudiés à la lumière des modèles neurocognitifs et neurolinguistiques de la production de la parole, afin de déterminer les facteurs influençant la récupération du langage et de la parole et de développer de nouveaux programmes de rééducation renforcée chez les patients atteints d'aphasie.

Pour présenter le contexte de la thèse, nous abordons les modèles théoriques de la production du langage et de la parole (voir définitions dans l'Encadré 1.1) à des niveaux linguistique (*i.e.*, l'étude scientifique du langage et de sa structure incluant l'étude de la morphologie, la syntaxe, la phonétique et la sémantique), cognitif (*i.e.*, l'étude des compétences nécessaires à l'exécution des tâches associées au langage) et cérébral (*i.e.*, l'étude des représentations cérébrales du langage).

Encadré 1.1 : Quelques définitions ^a

^a. Les définitions présentées ici sont issues du Dictionnaire de l'American Psychological Association (2022a) et sont celles que nous adopterons pour l'ensemble de ce travail.

- **Le langage** est défini comme une capacité naturelle, intrinsèque et universelle des êtres humains à construire des systèmes de communication en utilisant des codes (sons ou symboles écrits) et à combiner ces codes afin d'échanger des informations avec les autres personnes qui les entourent.
- **La parole** est définie comme le produit des mouvements bucco-moteurs aboutissant à l'articulation du langage (la prononciation des sons et des mots). Il s'agit de la modalité orale du langage. La production de la parole nécessite, entre autres, des processus lexico-syntaxiques et de planification phonologique et articulatoire en amont.
- **L'articulation** est définie comme la mise en forme et la production des sons nécessaires à une parole intelligible. L'articulation est un processus complexe qui implique une « justesse » dans le placement des structures du tractus vocal, le séquençement temporel, la direction des mouvements, la force exercée, la vitesse de réponse et l'intégration neuronale de toutes ces actions.

Nous considérons la capacité de langage comme une fonction cognitive complexe, impliquant un système sémantique (*i.e.*, le vocabulaire et l'accès lexical), des capacités sensorimotrices spécialisées de production et perception (*i.e.*, l'articulation, la phonation sur le versant production et le décodage acoustico-phonétique sur le versant réception), des capacités de combinaison et de

manipulation d'unités (*i.e.*, encodages grammatical, prosodique, syntaxique et phonologique) et de compréhension de codes (*i.e.*, symbolisme et compréhension) (cf. Roger, Banjac, Thiebaut de Schotten, & Baciú, 2022). De plus, le langage est une fonction hautement intégrative, entrelaçant les opérations spécifiquement linguistiques (traitement du code linguistique) et les processus extra-linguistiques (*e.g.*, le contrôle de l'attention, l'inférence prédictive et la mémoire à long terme) (cf. Roger, Rodrigues De Almeida, et al., 2022). Dans ce travail, nous nous concentrons sur l'étape ultime du processus de production orale du langage, la parole, et notamment sur la production de sons de parole (voyelles, consonnes et syllabes) ou de mots isolés.

1 La modalité orale du langage : la production de parole

La production de parole met en jeu trois processus : la respiration, la phonation et l'articulation (*e.g.*, Hardcastle & Marchal, 1990 ; Kent, 1997 ; Vaissière, 2015). L'étape d'articulation implique un système complexe d'articulateurs et de muscles (*e.g.*, voir Marchal, 2011 ; Perrier & Schwartz, 2016). Notons que, parmi ces articulateurs, la langue et les lèvres jouent un rôle prédominant. Notamment, la langue est considérée comme l'articulateur le plus important lors de la production de la parole, puisque c'est elle principalement qui donne sa forme au conduit vocal et qui contribue à moduler le signal sonore (Meunier, 2007 ; Perrier & Schwartz, 2016).

1.1 Généralités en phonétique

Le phonème représente la plus petite unité fonctionnelle d'un système phonologique. Il joue un rôle contrastif, c'est-à-dire que son changement crée un contraste de sens (Vaissière, 2015). En français, les phonèmes se décomposent en 18 consonnes /p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, ɲ, ɲ, l, ʁ/, 3 semi-consonnes (ou semi-voyelles) /j, w, ɥ/ et 16 voyelles /i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a, ɑ, ə, ã, õ, ê, œ/ dont certaines n'existent que dans certaines variétés régionales.

Ces phonèmes peuvent être regroupés en fonction de critères articulatoires ou acoustiques. Selon des critères articulatoires, on peut distinguer les voyelles, caractérisées par une libre circulation de l'air dans le tractus vocal, et les consonnes, caractérisées par un rétrécissement du tractus en un point entraînant une interruption ou perturbation dans la circulation de l'air (Meunier, 2007). D'un point de vue acoustique, les phonèmes sont caractérisés principalement par leur composition spectrale (*i.e.*, la répartition de l'énergie dans l'échelle des fréquences), c'est-à-dire

les formants pour les voyelles et la distribution de l'énergie dans l'échelle des fréquences pour les bruits des consonnes (Vaissière, 2015).

Enfin, d'un point de vue phonétique, on regroupe les phonèmes en différentes classes. Ces classes sont détaillées dans les sections suivantes. On abordera dans cette thèse uniquement les phonèmes du français.

1.1.1 Les voyelles

D'un point de vue acoustique, les voyelles sont caractérisées par la présence de zones d'harmoniques renforcées (correspondant aux résonances naturelles du conduit vocal) : les formants. Ces formants sont numérotés en fonction de la hauteur de leur fréquence en commençant par celui de plus basse fréquence : F1, F2, F3, etc. (Vaissière, 2015). Les valeurs des formants dépendent de la configuration des cavités buccale, pharyngale et nasale, qui est différente selon les voyelles (Meunier, 2007).

La forme des cavités pharyngale, buccale et nasale spécifique aux voyelles peut être influencée par quatre paramètres (Meunier, 2007) : le **degré d'aperture** de la mandibule qui est relié à la hauteur de la langue et donc à la taille de la cavité pharyngale (*e.g.*, pour les voyelles ouvertes, l'aperture est maximale, la langue est abaissée et la cavité pharyngale est petite) ; la **position de la langue** (ou lieu d'articulation) qui peut être antérieure ou postérieure et ainsi entraîner une modification de la taille de la cavité buccale (*e.g.*, les voyelles antérieures sont caractérisées par une petite cavité buccale) ; la **forme des lèvres** qui est associée à l'arrondissement (ou protrusion) ou au contraire à l'étirement de celles-ci (les voyelles arrondies correspondent à un allongement de la cavité buccale et à la création d'une cavité labiale) ; et la **position du velum** (nommé aussi voile du palais) qui permet de distinguer les voyelles orales et nasales (*e.g.*, lors de la production des nasales, le voile du palais est abaissé, permettant au flux d'air d'accéder aux fosses nasales et induisant un couplage acoustique entre les cavités orale et nasale).

Il existe un lien entre les paramètres définissant la configuration des cavités buccale, pharyngale et nasale et les valeurs de formants, en particulier les trois premiers (F1, F2 et F3). En effet, la valeur de F1 est sensible au degré d'abaissement de la langue et de la mandibule (et donc à l'aperture). Ainsi, plus la voyelle est ouverte et plus la langue sera abaissée, plus le formant F1 sera élevé. La valeur de F2, quant à elle, est affectée par le lieu d'articulation et dépend donc de la position de la

langue dans l'axe antéro-postérieur, mais également de l'arrondissement des lèvres (arrondies ou étirées). Ainsi, plus la voyelle est antérieure, plus F2 sera grand. Enfin, la valeur de F3 est sensible à l'arrondissement des lèvres (étirées ou arrondies). Lors de la production d'une voyelle arrondie, on observe un allongement de la cavité buccale et la création d'une cavité labiale, ce qui entraîne un abaissement des valeurs de F2 et F3 (Meunier, 2007).

Une représentation graphique des voyelles sous forme d'un triangle vocalique est souvent réalisée afin d'illustrer les variations articulatoires et acoustiques des voyelles (Figure 1.1).

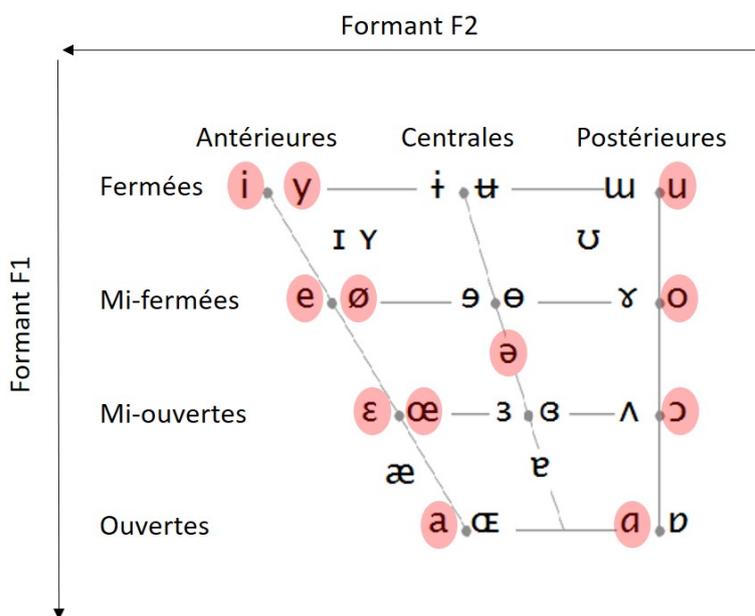


FIGURE 1.1 – Triangle vocalique permettant d'illustrer les variations articulatoires des différentes voyelles orales. Lorsque les voyelles sont présentées côte à côte et séparées par un point celle de droite est une réalisation arrondie et celle de gauche une réalisation étirée. Les voyelles du français sont entourées et surlignées en rouge. Figure adaptée de *The International Phonetic Alphabet Chart* (International Phonetic Association, 2015).

Dans cette représentation graphique, l'axe des ordonnées correspond à la valeur de F1 (croissante du haut vers le bas) et traduit l'aperture (de fermée à ouverte) et la hauteur de la langue (de haut en bas dans la cavité buccale). L'axe des abscisses, quant à lui, correspond à la valeur de F2 (croissante de droite à gauche) et traduit la position de la langue (axe postéro-antérieur dans la cavité buccale) et l'arrondissement des lèvres. Ainsi, les extrémités de ce triangle sont donc : /i/ la voyelle la plus fermée, non arrondie et antérieure (extrémité gauche, F1 faible et F2 élevé) ; /u/ la plus fermée, postérieure et arrondie (extrémité droite, F1 faible et F2 faible) ; /a/ la plus ouverte, plutôt centrale et non arrondie (en bas proche du centre, F1 élevé) (Meunier, 2007 ; Meynadier, 2013).

1.1.2 Les consonnes

Les consonnes du français se distinguent selon quatre critères : (i) le **mode de voisement** (voisé ou non voisé) ; (ii) le **mode d'articulation** correspondant au degré de constriction (occlusif, fricatif et approximant) ; (iii) le **lieu d'articulation** (bilabial, labiodental, dental, alvéolaire, post-alvéolaire, palatal, vélaire et uvulaire) ; (iv) **la nasalité**. Dans l'alphabet phonétique international, les consonnes sont classées selon ces critères (voir Tableau 1.1 ; [International Phonetic Association, 2015](#)).

Tableau 1.1 – Classification des consonnes de l'alphabet phonétique international. Les consonnes sont classées selon le lieu d'articulation (en colonne) et le mode d'articulation (en ligne). Dans chaque cellule on retrouve les consonnes non voisées à gauche et les voisées à droite. Les consonnes du français sont surlignées en rouge. On note que /β/ et /χ/ sont ici notés comme deux phonèmes, alors qu'en français, il ne s'agit que de deux variantes allophoniques du même phonème. On note aussi que les nasales /ɲ/ et /ŋ/ sont parfois considérées en français comme des groupes de consonnes plutôt que des consonnes simples. Tableau adapté de *The International Phonetic Alphabet Chart* ([International Phonetic Association, 2015](#)).

	Bilabial	Labiodental	Dental	Alveolar	Postalveolar	Retroflex	Palatal	Velar	Uvular	Pharyngeal	Glottal
Plosive	p b		t d			ʈ ɖ	c ɟ	k ɡ	q ɢ		ʔ
Nasal	m	ɱ	n			ɳ	ɲ	ŋ	ɴ		
Trill	ʙ		r						ʀ		
Tap or Flap		ⱱ	ɾ			ɽ					
Fricative	ɸ β	f v	θ ð	s z	ʃ ʒ	ʂ ʐ	ç ʝ	x ɣ	χ ʁ	ħ ʕ	h ɦ
Lateral fricative			ɬ ɮ								
Approximant		ʋ	ɹ			ɻ	j	ɰ			
Lateral approximant			l			ɭ	ʎ	ʟ			

Les consonnes du français peuvent donc être divisées en trois grandes classes, selon leur nasalité et leur mode d'articulation : les consonnes occlusives (ou plosives) orales et nasales, les fricatives (ou constrictives) et les vocaliques (ou sonantes) ([Meunier, 2007](#)). Dans la suite de cette section, nous détaillerons successivement chacune de ces classes en précisant les consonnes qui les composent et les paramètres acoustiques qui les caractérisent.

Les consonnes occlusives (ou plosives) Il existe six consonnes occlusives en français /p, t, k, b, d, ɡ/. Ces consonnes se caractérisent par la fermeture complète du conduit oral ([Vaissière, 2015](#)). Les occlusives orales se distinguent par deux événements temporels : la tenue (maintien de l'occlusion) et le relâchement de l'occlusion. Durant la phase de tenue de l'occlusion, l'air expiré

s'accumule dans la cavité orale et la pression intra-orale augmente. Au cours de cette phase, les plis vocaux peuvent vibrer ou non, selon la nature de la consonne (voisée ou non voisée). Durant la phase de relâchement de l'occlusion, la pression accumulée est libérée, ce qui se traduit par un bruit court d'énergie forte nommé bruit d'explosion (ou *burst*). Ces consonnes occlusives peuvent donc être divisées en plusieurs sous-groupes selon deux caractéristiques phonétiques : le voisement qui permet de distinguer les occlusives voisées /b, d, g/ des non voisées /p, t, k/ ; et le lieu d'articulation qui permet de distinguer /p, b/ qui sont bilabiales, /t, d/ qui sont alvéolaires, et /k, g/ qui sont vélares (Meunier, 2007).

Une des principales caractéristiques acoustiques mesurées sur les consonnes occlusives est le délai d'établissement du voisement (ou *Voice Onset Time*, VOT), qui permet de distinguer les consonnes voisées des consonnes non voisées et qui dépend également du lieu d'articulation (Meunier, 2007). Le VOT est la durée entre le relâchement consonantique (*burst*) et la reprise de la vibration glottique (Lisker & Abramson, 1964). Cette valeur du VOT varie en fonction du voisement. En français, il est négatif pour les occlusives voisées, car l'établissement du voisement précède l'explosion, et il est positif pour les non voisées (Meunier, 2007).

Les consonnes occlusives peuvent également être différenciées par l'énergie, la durée et le spectre de fréquence du bruit d'explosion (Meunier, 2007). On peut ainsi décrire ces consonnes à l'aide des moments spectraux (Forrest, Weismer, Milenkovic, & Dougall, 1988 ; Jongman, Wayland, & Wong, 2000 ; Stevens & Blumstein, 1978). Enfin, la trajectoire de la transition formantique avec la voyelle suivante ou précédente, en particulier F2 et F3, peut également permettre de caractériser ces consonnes occlusives¹ (Meynadier, 2013).

Les consonnes fricatives (ou constrictives) Les consonnes fricatives /f, s, ʃ, v, z, ʒ/ se caractérisent par un bruit turbulent continu, au niveau de la constriction supraglottique, durant toute la tenue de la consonne. Le bruit supraglottique est principalement filtré par la cavité située en avant du rétrécissement. Plus la cavité en avant est petite et plus la résonance sera élevée (Vaissière, 2015). Ainsi, les bruits de friction correspondant à /s/ et /z/ sont respectivement plus aigus que ceux

1. Lors de la production d'un enchaînement de sons, on observera un chevauchement articulatoire avec certains gestes articulatoires qui sont anticipés et/ou maintenus lors de la réalisation des phonèmes précédents ou suivants. Les traces acoustiques de ces chevauchements seront regroupées sous le terme de « coarticulation ». Une des traces les plus visibles de cette coarticulation est la transition formantique, qui rend compte du passage d'une position articulatoire à une autre (Meunier, 2007 ; Meynadier, 2013).

qui correspondent à /ʃ/ et /ʒ/, car la langue étant positionnée plus en avant, la cavité antérieure est plus courte pour /s/ et /z/ que pour /ʃ/ et /ʒ/.

Ces consonnes peuvent être caractérisées selon : le voisement (/f, s, ʃ/ sont non voisées, tandis que /v, z, ʒ/ sont voisées) et la fréquence et l'intensité du bruit de friction, qui dépend du lieu d'articulation. Pour les consonnes fricatives, il existe trois lieux d'articulations : alvéolaire pour /s, z/, labiodental pour /f, v/ et post-alvéolaire pour /ʃ, ʒ/ (Meunier, 2007).

Les moments spectraux caractérisent le spectre du bruit de friction spécifique au lieu d'articulation de ces consonnes (Forrest et al., 1988 ; Nissen & Fox, 2005). Il en existe quatre : le premier moment spectral, nommé centre de gravité ou moyenne spectrale, correspondant à la fréquence du centre de gravité spectral ; le deuxième moment correspond à la variance ou à l'écart type du spectre en fréquence ; le troisième moment est le coefficient d'asymétrie de l'enveloppe spectrale (appelé aussi *skewness*) ; et le quatrième moment est le degré d'aplatissement du spectre (appelé aussi *kurtosis*) (Forrest et al., 1988 ; Jongman et al., 2000). Le centre de gravité permet de distinguer les fricatives alvéolaire /s/ et post-alvéolaire /ʃ/. Sa valeur est corrélée négativement avec la longueur de la cavité de résonance avant, ce qui permet de décrire le lieu de la constriction. Ainsi, plus la cavité de résonance est petite, plus la valeur du centre de gravité est élevée : la valeur sera plus élevée pour /s/ que pour /ʃ/. L'écart type permet de différencier une forme spectrale diffuse et plate, comme pour /f/, d'une forme compacte et pointue, comme pour /s/. Ainsi, la valeur d'écart type sera plus faible pour /s/ que pour /f/. Le coefficient de dissymétrie décrit la répartition de l'énergie du spectre par rapport à la moyenne et permet de distinguer /ʃ/ qui possède un coefficient positif de /s/ qui possède un coefficient négatif. Enfin, le coefficient d'aplatissement décrit l'aplatissement du pic spectral. Sa valeur est plus élevée pour /s/ que pour /ʃ/ (Li, Edwards, & Beckman, 2009 ; Nissen & Fox, 2005).

Les fricatives peuvent également être caractérisées par le VOT qui permet la distinction entre les voisées et les non voisées (voir Abramson & Whalen, 2017) et par la transition formantique avec la voyelle précédente ou suivante, qui permet de distinguer les fricatives labiodentales, alvéolaires et post-alvéolaires (voir Meynadier, 2013).

Les consonnes vocaliques (ou sonantes) Les consonnes vocaliques sont caractérisées par un rétrécissement partiel ou transitoire du tractus vocal, induisant l'apparition de structures formantiques moins stables et intenses que pour les voyelles (Meunier, 2007 ; Vaissière, 2015). Parmi ces consonnes, en français, on distingue :

- L'approximante latérale /l/ qui est produite avec une occlusion incomplète du conduit vocal effectuée par l'apex de la langue contre les alvéoles du palais, combinée à un abaissement de la lame et un resserrement des côtés de la langue permettant le passage de l'air latéralement (Meynadier, 2013 ; Vaissière, 2015). L'obstacle produit par l'apex de la langue induit une bifurcation du conduit vocal latéralement, ce qui est à l'origine d'antiformants² (Meynadier, 2013).
- La vibrante /ʁ/ qui prend plusieurs formes selon le contexte phonétique. Pour simplifier, en français : la fricative uvulaire voisée /ʁ/ est produite lorsqu'elle est précédée d'un son voisé (e.g., « druide » noté /dʁʁid/), tandis que la fricative uvulaire non voisée /χ/ est produite lorsqu'elle est précédée d'un son non voisé (e.g., « huître » noté /χitχ/) (Meunier, 2007).
- Les nasales /m, n, ɲ, ŋ/ qui sont caractérisées par une obstruction complète du conduit oral et un abaissement du velum permettant à l'air de sortir par les fosses nasales (Meunier, 2007). Ces consonnes se caractérisent par une structure formantique complexe avec des formants et des antiformants (Meynadier, 2013). Bien que ces consonnes puissent être décrites comme des « occlusives nasales » d'un point de vue articulaire, les caractéristiques acoustiques permettent de les classer parmi les consonnes vocaliques.
- Les glissantes /j, w, ɥ/ (aussi appelées semi-voyelles ou semi-consonnes) qui peuvent, d'un point de vue articulaire et acoustique, être comparées à trois voyelles du français : /i/, /y/ et /u/ (Meunier, 2007). Ces consonnes glissantes possèdent donc les mêmes caractéristiques acoustiques que les voyelles /i, y, u/ avec les mêmes valeurs de formants F1, F2 et F3. Cependant, elles se distinguent par une durée plus courte et une instabilité de la trajectoire formantique (Meynadier, 2013).

2. Lorsqu'un embranchement est réalisé dans le conduit vocal (e.g., suite à une bifurcation ou lors du couplage des conduits oral et nasal), l'air expiré empruntera plus d'un seul canal, ce qui induit le phénomène d'antirésonance. Ainsi, des antiformants pourront apparaître sous forme de creux locaux d'énergie suite à l'atténuation d'amplitude dans certaines bandes de fréquence (Meynadier, 2013).

1.2 Les facteurs influençant la production des phonèmes

Il existe une variabilité lors de la production des phonèmes, qui se manifeste au niveau des caractéristiques acoustiques. Parmi les facteurs à l'origine de cette variabilité, on retrouve : le sexe, l'âge et les caractéristiques propres aux locuteurs, dont la taille du conduit vocal, l'accent régional, et d'autres variables sociolinguistiques. De plus, on observe une variabilité intra-individuelle, liée à des facteurs tels que l'état émotionnel ou l'intonation (Meunier, 2007).

Des études se sont intéressées à l'effet de l'âge sur la production de parole et ont montré : une variation des paramètres acoustiques avec un VOT plus court lors du vieillissement, en particulier chez les hommes, et une augmentation de F0 chez les hommes et une diminution chez les femmes (Dehqan, Scherer, Dashti, Ansari-Moghaddam, & Fanaie, 2012 ; Torre & Barlow, 2009 ; Verhaegen, Delvaux, Fagnart, et al., 2020) ; une diminution du degré de coarticulation et de la variabilité de la durée des segments de parole (D'Alessandro & Fougeron, 2018) ; un ralentissement de la parole et une plus forte variabilité intra- et/ou inter-locuteur lors de la production de parole (Hermes, Mertens, & Mücke, 2018 ; Torre & Barlow, 2009) ; et plus d'erreurs de type dévoisement (Verhaegen, Delvaux, Fagnart, et al., 2020). Ces différentes modifications peuvent être expliquées par une modification de la vitesse d'articulation, une altération de la coordination et une modification des capacités d'anticipation (D'Alessandro & Fougeron, 2018 ; Hermes et al., 2018).

Le sexe a également un impact sur les caractéristiques acoustiques, en raison des différences morphologiques au niveau de la taille du conduit vocal entre hommes et femmes. Parmi les différences acoustiques mesurées, on observe, pour les voix de femmes : des valeurs de formants plus élevées (Meynadier, 2013 ; Pépiot, 2016a ; Simpson, 2009) ; des moments spectraux pour les consonnes occlusives et fricatives non voisées /t, k, s, ʃ/ plus élevés (Pépiot, 2016a) ; un VOT plus long pour les occlusives non voisées et plus court pour les occlusives voisées (Pépiot, 2016b) ; un F0 moyen plus haut et une amplitude de variation de F0 plus grande (Pépiot, 2015).

Résumé 1.1 : La parole

- Les voyelles (/i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a, ɑ, ə, ã, õ, ẽ, õẽ/) se distinguent selon le degré d'aperture, la forme des lèvres, la position de la langue et la position du velum.
- Les voyelles orales sont caractérisées par des valeurs de formants. Les valeurs des formants F1 et F2, combinées aux degrés d'aperture et d'antériorité, sont utilisées afin de représenter graphiquement (par un triangle vocalique) à la fois les variations acoustiques et articulatoires des voyelles.
- Les consonnes sont divisées en sous-classes selon le mode d'articulation : les occlusives /p, t, k, b, d, g/ ; les fricatives /f, s, ʃ, v, z, ʒ/ ; et les vocaliques /l, ʋ, m, n, ɲ, ɳ, j, w, ɥ/.
- Le VOT permet de distinguer les occlusives voisées /b, d, g/ et non voisées /p, t, k/ (ainsi que les fricatives voisées /v, z, ʒ/ et non voisées /f, s, ʃ/).
- Les consonnes fricatives sont caractérisées par le centre de gravité spectral et l'écart type spectral (les deux premiers moments spectraux) qui traduisent la distinction entre l'alvéolaire /s/ et la post-alvéolaire /ʃ/ et entre la labiodentale /f/ et l'alvéolaire /s/, respectivement.
- Les caractéristiques acoustiques et la dynamique de la production de parole sont influencées par l'âge, le sexe ou les caractéristiques propres aux locuteurs.

2 Mécanismes neurocognitifs et architecture cérébrale de la production de la parole

Différents courants ont marqué l'évolution des modèles neurocognitifs du langage et de la parole. Au XIX^e siècle, les modèles proposaient une vision localisationniste dans laquelle une région cérébrale donnée était impliquée dans une fonction cognitive donnée. Les démonstrations les plus probantes de ces modèles ont été faites par Broca (1861b), avec le rôle du gyrus frontal inférieur gauche dans la production du langage, et Wernicke (1874), avec le rôle de la partie postérieure du lobe temporal gauche dans la compréhension du langage³. C'est dans le cadre de ces modèles localisationnistes, qu'est proposée la notion de régions « éloquentes » (principalement dans le contexte de la neurochirurgie), c'est-à-dire des régions cruciales pour une fonction cognitive donnée. Dans cette théorie localisationniste, l'atteinte de ces régions « éloquentes » entraînerait un dommage permanent (pour un historique sur le localisationnisme, voir Finger, 2009 ; Monroy-Sosa et al., 2021). Or, cette théorie peut être remise en question. En effet, des études ont montré que lors d'une résection, de la région appelée « aire de Broca » par exemple, il est possible de n'observer

3. Selon certaines études, le modèle proposé par Wernicke fait partie des modèles localisationnistes (e.g., voir Middlebrooks, Yagmurlu, Szaflarski, Rahman, & Bozkurt, 2016), cependant d'autres études le classent dans les modèles associationnistes, voire connexionnistes (e.g., voir Monroy-Sosa et al., 2021).

aucun déficit, de même qu'il est possible d'observer une récupération après une lésion cérébrale (Duffau, 2018). Par ailleurs, Hagoort (2016) mentionne les limites des modèles localisationnistes, notamment que la connectivité associée au langage ne se limite pas à un faisceau unique et qu'il n'existe pas de régions distinctes pour la production et la compréhension du langage et de la parole, mais que les réseaux sont partagés pour ces deux composantes.

Les modèles basés sur une vision associationniste proposés aux XIX^e et XX^e siècles (*e.g.*, voir Geschwind, 1970 ; Lichteim, 1885 ; Wernicke, 1874) peuvent être considérés comme une source d'inspiration pour les modèles connexionnistes actuels. Ces modèles connexionnistes impliquent un traitement parallèle et distribué de l'information cognitive, contrairement aux modèles localisationnistes qui proposent une approche modulaire et compartimentée de la cognition. La théorie « hodotopique », proposée comme une extension des théories associationnistes, propose que les fonctions cognitives sont localisées dans des « épacentres » corticaux inter-connectés par des fibres de substance blanche (Catani & ffytche, 2005 ; Monroy-Sosa et al., 2021). Dans ce type de modèles, la production du langage est sous-tendue par de larges réseaux et sous-réseaux réalisant des traitements parallèles, plutôt que par des centres individuels (*e.g.*, Dick, Bernal, & Tremblay, 2014 ; Duffau, 2008 ; Duffau, Moritz-Gasser, & Mandonnet, 2014 ; Friederici & Gierhan, 2013).

2.1 Modèles psycholinguistiques et neurocognitifs

Dans cette thèse, nous nous intéressons plus spécifiquement à la production de la parole. Dans les modèles psycholinguistiques consensuels actuels (Bock, 1987 ; Dell, 1986, 2013 ; Kempen & Hoenkamp, 1987 ; Levelt, 1989 ; Levelt, Roelofs, & Meyer, 1999), la production de parole est considérée comme impliquant différentes étapes hiérarchiques qui s'influencent les unes les autres avec des rétroactions d'une étape vers la (ou les) précédente(s). L'étape de plus haut niveau hiérarchique est la conceptualisation (ou idéation) qui fournit le message préverbal correspondant à l'intention communicative. Elle est suivie d'étapes de formulation (ou encodages) prosodico-lexico-morpho-syntaxico-phonologique et d'étapes de planification et de programmation motrices et se termine par l'exécution des mouvements articulatoires et phonatoires, résultant en l'émission de sons (Levelt et al., 1999). La plupart des modèles psycholinguistiques incluent des mécanismes de contrôle (ou *monitoring*), qui permettent de contrôler la sortie articulatoire par rapport à l'intention communicative initiale. Ces mécanismes engagent des processus d'auto-perception

et d'auto-évaluation. Les travaux des psycholinguistes sur les erreurs de production de parole et leurs corrections spontanées (e.g., [Fromkin, 1980](#)) indiquent en effet que, lors de la production de parole, des processus perceptifs évaluent les signaux de parole émis. Ce *monitoring* s'appuie sur un système de rétroaction externe (*feedback* externe) qui évalue la conformité des signaux auditifs et somatosensoriels émis par rapport à l'intention communicative. Le *monitoring* de la production du langage oral peut s'effectuer à différents niveaux (sémantique, syntaxique, prosodique, lexical et phonologique) et les erreurs de production sont corrigées rapidement, parfois avant même la fin de l'énonciation (cf. [Postma, 2000](#), pour une revue). La rétroaction externe est donc insuffisante. Il a été proposé que le *monitoring* pourrait utiliser également des rétroactions internes (e.g., [Levelt et al., 1999](#)) en amont de l'exécution motrice.

En intégrant des connaissances issues des théories sur le contrôle moteur, certains chercheurs ont proposé que le *monitoring* par rétroaction interne reposerait sur des mécanismes de prédiction (e.g., [Hickok, 2012a](#) ; [Hickok, Houde, & Rong, 2011](#) ; [Løevenbruck, 2019](#) ; [Pickering & Garrod, 2013, 2021](#)). Dans le cadre du contrôle moteur prédictif, les commandes motrices envoyées aux articulateurs de la parole dans l'étape de programmation motrice sont dupliquées en une copie d'efférence. Cette copie est utilisée par un modèle interne (ou prédicteur) qui simule des signaux sensoriels (par exemple auditifs). Comme le note [Meloni \(2022\)](#), les signaux simulés sont nommés « prédits » car ils sont produits avant les signaux sensoriels effectifs émis en sortie du conduit vocal. Ces signaux sensoriels prédits peuvent être évalués et, en cas d'erreur, les commandes motrices peuvent être modifiées par rétroaction interne. Des traitements perceptifs sont donc également effectués sur les signaux prédits lors de la production de parole, en amont de l'exécution motrice.

Des représentations sensorielles semblent donc en jeu pendant le processus moteur d'émission de parole, ce qui est en accord avec les théories et modèles qui postulent des interactions entre la production et la perception de la parole (e.g., sur le versant perception, la PACT ou le modèle COSMO, [Moulin-Frier, Diard, Schwartz, & Bessière, 2015](#) et sur le versant production le modèle de [Patri, Perrier, Schwartz, & Diard, 2018](#)). Nous présentons donc ci-dessous quelques modèles de production de parole qui intègrent cette interaction entre les informations sensorielles et motrices.

Sur la base de l'intégration de modèles issus de la psycholinguistique, de la neurolinguistique et du contrôle moteur par rétroaction d'états (*state feedback control model*, SFC), [Hickok et al. \(2011\)](#) ont proposé un modèle SFC intégré. Dans ce modèle, un contrôleur génère des commandes

motrices envoyées à l'appareil vocal ainsi qu'une copie d'efférence de ces commandes. La copie d'efférence est utilisée par un modèle interne du conduit vocal qui génère des prédictions sur l'état dynamique du tractus vocal et sur les conséquences sensorielles (auditives) de cet état. Selon les auteurs, le modèle interne du conduit vocal (ou « système phonologique moteur ») correspond à ce qui est nommé « lexique phonologique de sortie » dans certains modèles psycholinguistiques. Les prédictions des conséquences sensorielles (ou « système phonologique auditif ») correspondent à ce qui est généralement nommé le « lexique phonologique d'entrée ». Les systèmes phonologiques moteur et auditif sont reliés par un système de traduction auditivo-motrice. Ce système est activé par des entrées parallèles du système lexical-conceptuel vers les systèmes phonologiques moteur et auditif. Une proposition d'extension de ce modèle en un modèle hiérarchique plus complet a été proposée par [Hickok \(2012a\)](#).

Dans ce modèle étendu, [Hickok \(2012a\)](#) avance qu'à l'issue de l'étape d'encodage phonologique, le lemme est converti dans un format double intégrant des représentations auditives (sensorielles) et motrices (voir Figure 1.2). Une première boucle sensorimotrice (auditivo-motrice, corticale) permet d'associer la représentation auditive, codée au niveau du gyrus temporal supérieur (GTS) postérieur et du sillon temporal supérieur (STS), à une représentation motrice, codée au niveau du gyrus frontal inférieur (GFI) et du cortex prémoteur ventral. La transformation entre les deux types de représentation se fait via la jonction temporo-pariétale. Une deuxième boucle sensorimotrice (somato-sensorimotrice, cortico-cérébelleuse), à la suite et en parallèle de la première, permet d'associer la représentation somatosensorielle, codée au niveau du cortex somesthésique primaire (S1) et du gyrus supramarginal (GSM) antérieur, avec une représentation motrice, codée au niveau du cortex moteur primaire (M1).

Dans ce modèle, il est proposé que ces deux boucles correspondent à des niveaux linguistiques différents. La boucle auditivo-motrice (de haut niveau) code les informations au niveau de la syllabe, tandis que la boucle somato-sensorimotrice (de bas niveau) code les informations au niveau des phonèmes (groupes de traits articulatoires). Inspiré par les théories du contrôle moteur de la parole, le modèle de [Hickok \(2012a\)](#) inclut des principes de contrôle prédictif fondés sur des modèles internes, mais diffère quelque peu des modèles classiques s'appuyant sur la notion de copie d'efférence. En effet, le principe de copie d'efférence est remplacé par une boucle avec des signaux

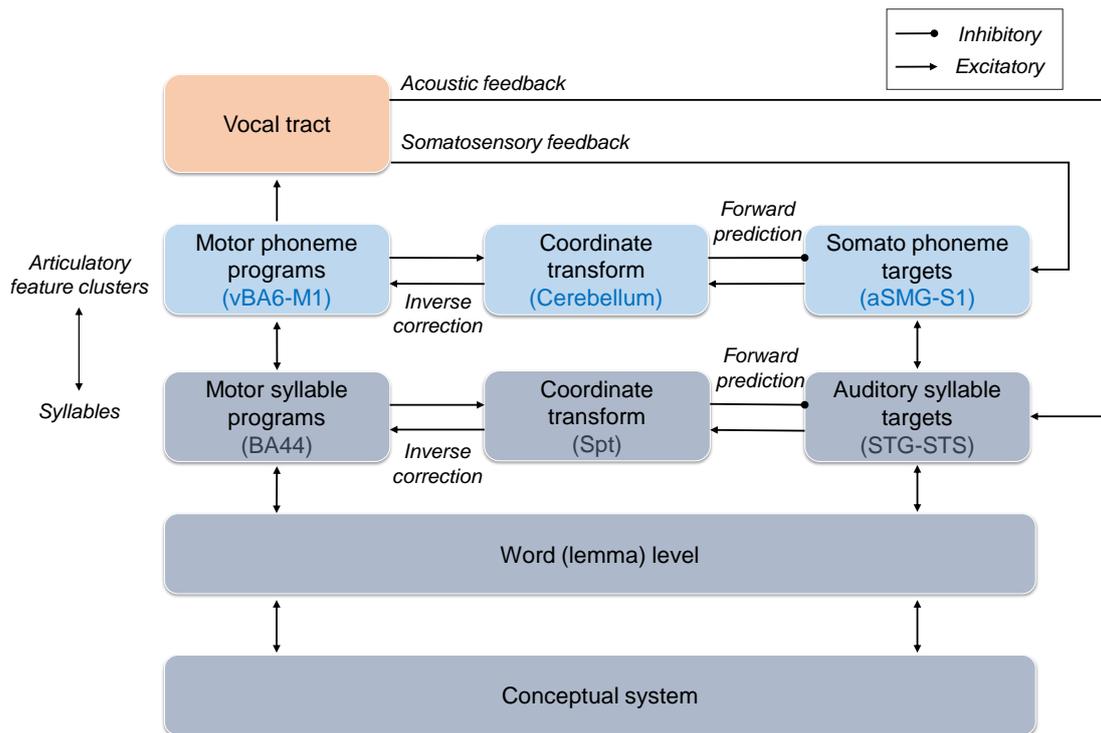


FIGURE 1.2 – Modèle hiérarchique de contrôle moteur par *feedback* proposé par Hickok (2012a). aSMG, gyrus supramarginal antérieur; M1, cortex moteur primaire; S1, cortex somatosensoriel primaire; STG, gyrus temporal supérieur; STS, sillon temporal supérieur; vBA6, AB6 ventrale; Spt, fissure sylvienne au niveau de la jonction temporo-pariétale. Cette figure est adaptée de Hickok (2012a).

excitateurs et inhibiteurs, dans laquelle une représentation motrice calculée à partir de la représentation sensorielle est comparée à la représentation motrice initiale (et la renforce) tandis que la représentation motrice initiale elle-même génère une représentation sensorielle (qui sera inhibée).

Ainsi, ce modèle de Hickok (2012a) offre des perspectives intéressantes car il permet de rendre compte de la nature à la fois auditive et somatosensorielle des représentations phonologiques. Cependant, dans ce modèle, la façon dont les deux types de représentation (auditive et somatosensorielle) coexistent et sont gérés lors de la production de parole n'est pas détaillée. De plus, comme le note Løevenbruck (2019), il semble qu'il existe une confusion (ou une imprécision) entre les notions de représentations motrices, articulatoires et somatosensorielles.

Dans le modèle proposé par Løevenbruck et al. (2018) et modifié dans Grandchamp et al. (2019) et Løevenbruck (2019), il est fait l'hypothèse que les objectifs phonologiques sont définis en termes « supramodaux », fusionnant différentes modalités sensorielles (*i.e.*, auditives et somatosensorielles), et non *via* deux voies auditive et somatosensorielle (comme défini par Hickok, 2012a). Cette

ébauche supramodale est convertie en programme moteur (par un modèle interne inverse) et une copie d'efférence du programme moteur est utilisée (par un modèle interne prédicteur) pour fournir une prédiction sensorielle (auditive et somatosensorielle) qui, une fois intégrée, peut être comparée aux objectifs initiaux (*i.e.*, avant même l'articulation effective, ce qui permet un ajustement en ligne efficace du programme moteur).

Dans ce modèle, illustré dans la Figure 1.3 et détaillé dans Loevenbruck (2019), lors de la production d'un mot isolé, un lemme est d'abord récupéré, ce qui correspond à l'activation du gyrus temporal moyen (GTM) gauche. Ce lemme est converti en objectif phonétique, dans un format supramodal activant le lobule pariétal inférieur (LPI) gauche (flèche 1). Cet objectif supramodal est transmis directement au cervelet (flèche 2), siège d'un modèle interne inverse qui transforme l'objectif supramodal en une spécification motrice. Cette spécification est transmise au cortex frontal (flèches 3 et 3'). À ce niveau, les programmes moteurs sont générés via le GFI gauche et l'insula (flèche 3), puis le cortex prémoteur ventral gauche, l'aire motrice supplémentaire (AMS) et M1 (flèche 3'). Ces programmes intègrent la spécification motrice et les éventuelles actions de parole en cours. Les commandes motrices ainsi générées sont transmises à l'appareil vocal. Les mouvements phonatoires et articulatoires résultants et les sons émis sont perçus par les systèmes périphériques somesthésiques et auditifs qui fournissent des retours sensoriels, traités par les cortex somatosensoriel et auditif.

En parallèle, une copie d'efférence des commandes motrices est traitée par un deuxième modèle interne (prédicteur) dans le cervelet, ce qui fournit une prédiction de l'état sensoriel qui résulterait de ces commandes (flèche 4). Cette prédiction est transmise au cortex sensoriel via le thalamus (flèches 5a et 5b). Ce signal multisensoriel prédit (auditif et somatosensoriel, voire visuel) correspond à la sensation sonore lors de la production de parole intérieure (considérée dans ce modèle comme une production de parole à voix haute interrompue). Après l'application d'un délai, le signal multisensoriel prédit pourra être comparé au signal sensoriel effectif, lors de la production vocale, ce qui permet éventuellement de mettre à jour le modèle interne prédicteur. Les signaux multisensoriels prédits et effectifs sont transformés chacun, via la jonction temporo-pariétale, en une représentation supramodale, qui peut être comparée à l'objectif supramodal désiré, au niveau du cortex associatif (LPI). La comparaison entre les états désiré et prédit ainsi que les états désiré et effectif se fait possiblement à ce niveau. Enfin, l'ensemble de ces activations est sous contrôle du

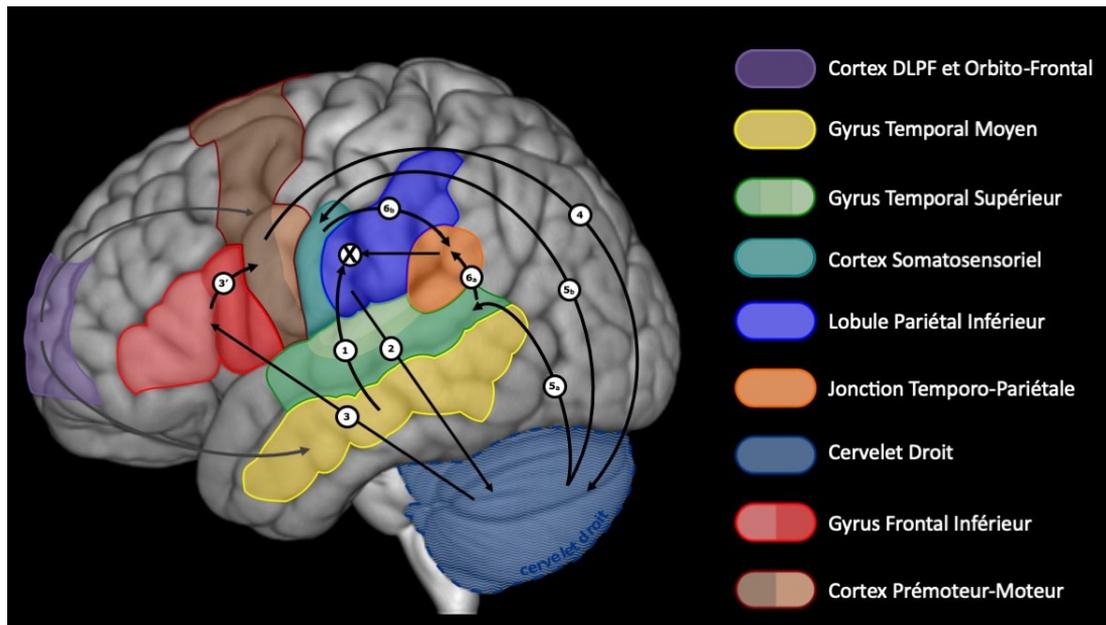


FIGURE 1.3 – Réseau neuronal impliqué dans l'étape d'articulation du modèle par contrôle prédictif de Grandchamp et al. (2019). Les flèches numérotées représentent l'ordre dans lequel se produit la séquence d'activation, certaines activations ayant lieu en parallèle. La croix représente l'endroit où se fait la comparaison entre les états phonétiques désiré et prédit, avant l'articulation effective. Figure tirée de Løevenbruck (2019), avec la permission de l'auteur.

système exécutif (notamment cortex rostral préfrontal et cortex cingulaire antérieur), qui déclenche ou interrompt l'exécution motrice (flèches grises non numérotées).

Dans les modèles décrits ou mentionnés précédemment (Grandchamp et al., 2019 ; Hickok, 2012a ; Hickok et al., 2011 ; Løevenbruck, 2019), ainsi que dans des méta-analyses (Price, 2012 ; Vigneau et al., 2006, 2011) décrivant l'architecture cérébrale des différents processus impliqués dans le traitement du langage et de la parole, les auteurs ont montré que ces processus étaient sous-tendus par un vaste réseau de régions situées principalement dans l'hémisphère gauche. Cette latéralisation du langage serait renforcée par le biais de connexions intra-hémisphériques (*i.e.*, permettant la communication entre les régions impliquées dans le langage à gauche) et inter-hémisphériques (*i.e.*, les connexions entre l'hémisphère gauche et l'hémisphère droit à l'origine de l'inhibition transcallosale⁴) (Tzourio-Mazoyer, Perrone-Bertolotti, Jobard, Mazoyer, & Baciú, 2017).

Il a en effet été montré qu'il existe une asymétrie des deux hémisphères en termes d'implication dans les processus langagiers avec une latéralisation du langage à gauche, bien que certaines régions au niveau de l'hémisphère droit soient également impliquées (Vigneau et al., 2011). Récemment,

4. L'inhibition transcallosale inter-hémisphérique est exercée par l'hémisphère gauche sur l'hémisphère droit et permet à l'hémisphère gauche de maintenir sa dominance pour les fonctions langagières.

Labache et al. (2020) ont identifié, chez 287 participants sains, trois types de latéralisation du langage : (i) la latéralisation typique forte (43,6%) avec une forte latéralisation à gauche lors de tâches de langage, une forte connectivité intra-hémisphérique et une faible connectivité inter-hémisphérique au repos, ainsi qu'une forte asymétrie du volume de substances blanche et grise à gauche; (ii) la latéralisation typique modérée (46%) avec une asymétrie gauche modérée lors de tâches de langage, un plus faible degré de connectivité intra-hémisphérique gauche et un plus fort degré de connectivité inter-hémisphérique; et (iii) la latéralisation atypique (10,4%) avec une latéralisation droite lors de tâche de langage, une forte connectivité intra-hémisphérique bilatéralement, une forte connectivité inter-hémisphérique, ainsi qu'une faible asymétrie gauche du volume de substances blanche et grise.

Cette spécialisation hémisphérique du langage dépend de plusieurs facteurs inter-individuels, tels que la préférence manuelle (Labache et al., 2020 ; Mazoyer et al., 2014 ; Nenert et al., 2017), le sexe (Labache et al., 2020 ; Tzourio-Mazoyer et al., 2017), l'âge (voir les modèles proposées par J. W. Brown & Jaffe, 1975 ; Cabeza, 2002 ; C. Davis et al., 2008) et les caractéristiques génétiques et anatomiques (voir Perrone-Bertolotti, Tzourio-Mazoyer, Hoyau, Mazoyer, & Baciù, 2016 ; Tzourio-Mazoyer et al., 2017) ainsi que des facteurs intra-individuels, tels que les opérations langagières (Bradshaw, Thompson, Wilson, Bishop, & Woodhead, 2017 ; Perrone-Bertolotti et al., 2016 ; Tzourio-Mazoyer et al., 2017 ; Vigneau et al., 2011). Ces différences de spécialisation hémisphérique ne sont pas systématiquement démontrées (voir Nenert et al., 2017 ; Sato, 2020 ; Sommer, Aleman, Somers, Boks, & Kahn, 2008 ; Tzourio-Mazoyer, Crivello, & Mazoyer, 2018 ; Tzourio-Mazoyer et al., 2017).

2.2 Connectivité des réseaux cérébraux

Comme nous l'avons mentionné, les modèles récents proposent une vision hodotopique et dynamique, dans laquelle le fonctionnement du langage est sous-tendu par de larges réseaux et sous-réseaux réalisant un traitement parallèle du langage (Duffau, 2008 ; Duffau et al., 2014). Ainsi, des études se sont intéressées à la connectivité existant au sein des réseaux du langage et de la parole.

Au niveau cérébral, les théories récentes postulent qu'il existe des connexions anatomiques et fonctionnelles qui sont organisées afin de permettre un traitement optimal de l'information. Ainsi, les réseaux cérébraux sont constitués de régions, spatialement distribuées et fonctionnellement connectées, permettant de traiter l'information (Lang, Tomé, Keck, Górriz-Sáez, & Puntinet,

2012). On distingue la connectivité structurelle (ou anatomique), la connectivité fonctionnelle et la connectivité effective. Il est possible, à l'aide de l'étude de la connectivité fonctionnelle et/ou structurelle, de former un « connectome », c'est-à-dire la cartographie des connexions neuronales⁵ (Sporns et al., 2005).

La connectivité structurelle⁶ est utilisée afin d'identifier l'organisation des faisceaux de substance blanche et donc d'étudier les connexions anatomiques qui existent entre différentes régions cérébrales. Ces fibres sont assemblées en faisceau et nommées en fonction des connexions qu'elles assurent, ce qui permet de distinguer : les fibres d'association qui connectent des régions corticales dans un même hémisphère; les fibres commissurales qui connectent des régions corticales d'un hémisphère à l'autre; et les fibres de projection qui connectent les régions corticales et sous-corticales (Catani & Thiebaut de Schotten, 2012 ; Meynert, 1885).

Des études se sont intéressées plus particulièrement aux réseaux impliqués dans le langage, notamment dans le cadre du modèle à double voie de Hickok et Poeppel (2007), proposé à l'origine pour décrire la perception du langage. Dans ce modèle, qui a par la suite été étendu à la production de la parole (voir Hickok, 2012a ; Tian & Poeppel, 2013), la voie dorsale met en jeu des régions fronto-temporo-pariétales qui seraient impliquées dans la mise en correspondance des représentations auditives avec les représentations articulatoires (motrices); tandis que la voie ventrale, qui implique des régions temporales antérieures et postérieures, met en lien les représentations auditives avec les représentations conceptuelles (le sens). Ce modèle a été repris par certaines équipes pour expliciter la connectivité à l'œuvre dans la production de parole et proposer des connectomes du langage (e.g., Dick et al., 2014 ; Duffau et al., 2014 ; Friederici & Gierhan, 2013 ; Monroy-Sosa et al., 2021). Ces équipes mentionnent l'implication du faisceau arqué (FA) et du faisceau longitudinal supérieur (FLS) dans la voie dorsale; tandis que le faisceau unciné (FU), la capsule extrême, le faisceau

5. Ces connexions peuvent être estimées à plusieurs échelles (Sporns, Tononi, & Kötter, 2005) : microscopique (niveau neuronal et synaptique), macroscopique (régions anatomiquement distinctes et connexions entre les régions) et mésoscopique (entre les échelles microscopique et macroscopique). Par ailleurs, l'analyse d'un « connectome fonctionnel » a permis d'identifier et de décrire les réseaux imbriqués, mettant en avant le concept de hiérarchie. La description de l'organisation fonctionnelle corticale suggère l'existence d'un *continuum* fonctionnel qui s'étend principalement des régions sensorimotrices unimodales jusqu'aux régions d'intégration transmodale (voir Margulies et al., 2016 ; Roger, 2020)

6. L'évolution des méthodes permettant d'étudier la connectivité anatomique a conduit au développement de l'imagerie par tenseur de diffusion (*Diffusion Tensor Imaging*, DTI), qui permet d'étudier la diffusion des molécules d'eau, et de la tractographie par imagerie du tenseur de diffusion, qui permet de reproduire la dissection virtuelle des trajets des fibres dans le cerveau *in vivo* en se basant sur la diffusion directionnelle des molécules d'eau dans la substance blanche (Beaulieu, 2002 ; Glasser & Rilling, 2008).

occipito-frontal inférieur (noté IFOF, pour *Inferior Fronto-Occipital Fasciculus*) et les faisceaux longitudinaux moyen et inférieur (FLM, FLI) sont impliqués dans la voie ventrale (voir Figure 1.4).

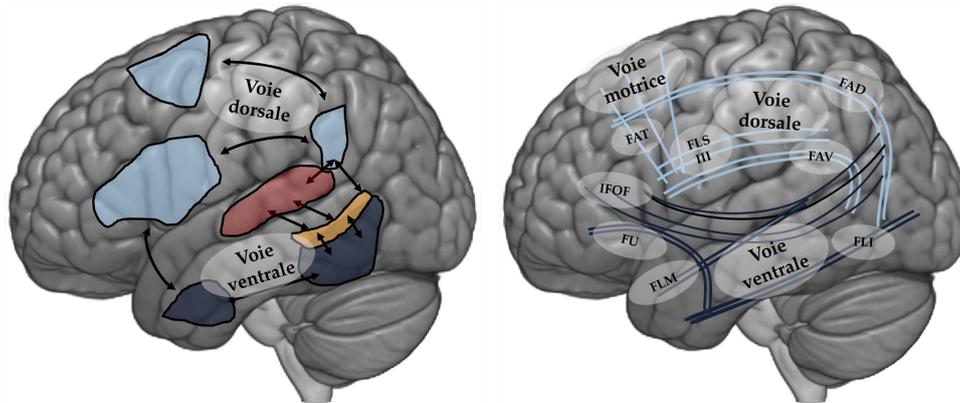


FIGURE 1.4 – Modèle double voie du langage. À gauche, les régions associées au modèle double voie proposé par Hickok et Poeppel (2007) avec : la voie dorsale (bleu clair) comprenant le réseau articulatoire et l'interface sensorimotrice; et la voie ventrale (bleu foncé) qui fait correspondre les représentations sensorielles ou phonologiques et les représentations conceptuelles lexicales. La partie dorsale du gyrus temporal supérieur (en rouge) est impliquée dans l'analyse spectro-temporelle et la partie postérieure du sillon temporal supérieur (en jaune) est impliquée dans le traitement phonologique. À droite, les faisceaux de substance blanche associés à ce modèle double voie, avec le faisceau arqué dorsal et ventral (FAD, FAV) et le faisceau longitudinal supérieur (FLS-III) impliqués dans la voie dorsale, et le faisceau unciné (FU), le faisceau occipito-frontal inférieur (IFOF) et les faisceaux longitudinaux moyen et inférieur (FLM, FLI) impliqués dans la voie ventrale. La voie motrice implique le faisceau frontal oblique (*frontal aslant tract*, FAT). Cette figure est adaptée de Banjac (2021), avec l'autorisation de l'auteure, et inspirée de Monroy-Sosa et al. (2021).

Plus spécifiquement, au niveau de la voie dorsale, le **FA** relie la partie postérieure du GFI (*pars opercularis*) au GTS postérieur et médian, tandis que le **FLS** relie le GTS/GSM au cortex prémoteur dorsal via le cortex pariétal. Ce FLS comprend 3 composantes : le FLS-II qui relie le cortex frontal au gyrus angulaire (GA); le FLS-III qui relie de cortex frontal au GSM; et le FLS-tp qui relie le GA au cortex temporal (Friederici & Gierhan, 2013). Selon ces équipes, le FA joue un rôle dans le traitement des informations phonologiques et syntaxiques complexes durant la production et la compréhension du langage (Dick et al., 2014).

La voie ventrale, quant à elle, contient le **FU** qui relie la partie antérieure et inférieure du lobe frontal au lobe temporal; l'**IFOF** qui relie le lobe occipital inférieur et médian au cortex frontal, en passant par le lobe temporal ventral où il a des projections; le **FLM** qui relie le GA et le lobule pariétal supérieur au GTS et STS antérieurs et au pôle temporal; le **FLI** qui relie le lobe occipital au lobe temporal, avec des projections vers le gyrus temporal inférieur (GTI), le GTM, le pôle temporal, le gyrus parahippocampique, l'hippocampe et les amygdales (pour plus de détails, voir

Dick et al., 2014). Dans le modèle hodotopique du langage proposé par Duffau et al. (2014) pour la dénomination d'images, cette voie ventrale est subdivisée en une voie directe qui implique l'IFOF et une voie indirecte, avec un relais au niveau du pôle temporal, qui implique le FLI et le FU. Le FLM est également impliqué dans cette voie ventrale en reliant le pôle temporal et le GA (Duffau et al., 2014). Selon ces équipes, l'IFOF est impliqué dans le traitement sémantique et le FLI dans le traitement visuo-orthographique. D'après Dick et al. (2014), le rôle du FLM dans le langage n'est pas clair, quant à la capsule extrême, sa localisation et sa fonction n'ont pas été clairement identifiées.

Outre la connectivité anatomique, les réseaux cérébraux peuvent également être décrits par la connectivité fonctionnelle (*i.e.*, un connectome fonctionnel). Cette connectivité fonctionnelle est définie comme « une dépendance temporelle de l'activité neuronale entre des régions cérébrales anatomiquement distinctes » (Lang et al., 2012). En neuroimagerie fonctionnelle, cette connectivité décrit la relation entre les activations neuronales de régions anatomiquement distinctes et ceci reflète la communication fonctionnelle qui existe entre les régions (van den Heuvel & Hulshoff Pol, 2010). Il est possible d'étudier cette connectivité fonctionnelle à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle de repos (*i.e.*, en l'absence de tâche) mais également lors de la réalisation d'une tâche. Cette connectivité fonctionnelle est différente de la connectivité anatomique. En effet, deux régions peuvent être connectées fonctionnellement sans qu'il y ait de connexion anatomique directe entre elles (Whitfield-Gabrieli & Ford, 2012).

Parmi les réseaux identifiés en connectivité fonctionnelle, on compte le réseau d'attention dorsal, le réseau d'attention ventral, le réseau de contrôle (fronto-pariétal), le réseau par défaut (*Default Mode Network*, DMN), le réseau de saillance, le réseau visuel, le réseau limbique et le réseau somato-moteur. Les réseaux d'attention, de contrôle et par défaut sont regroupés sous le terme de réseaux d'association (voir Yeo et al., 2011). Le DMN est l'un des premiers réseaux de repos identifié. Il est activé au repos (yeux fermés ou ouverts lors d'une tâche de vision passive) et il se désactive lorsque le participant réalise une tâche (Buckner, Andrews-Hanna, & Schacter, 2008 ; Greicius & Menon, 2004 ; Mevel et al., 2010 ; Raichle et al., 2001). Il a été montré que ce réseau est également activé lorsque les participants réalisent des tâches qui nécessitent la formation de pensée auto-générée (*i.e.*, sans stimuli externes ; voir Andrews-Hanna, Smallwood, & Spreng, 2014 ; Smallwood et al., 2021).

Enfin, à partir d'une base de données de neuroimagerie recueillies auprès de 150 adultes neurotypiques, une étude récente menée à Grenoble a mis en évidence un connectome fonctionnel du langage dépendant de la tâche. Dans cet atlas intitulé « LANG », quatre réseaux cruciaux ont été identifiés, sous-tendant des opérations langagières génériques : les fonctions d'encodage-décodage, de contrôle exécutif, d'abstraction sémantique et de traitement sensorimoteur (Roger, Rodrigues De Almeida, et al., 2022). Les auteurs considèrent que l'atlas LANG pourrait être utilisé comme référence pour les études cliniques impliquant des patients présentant diverses pathologies ou troubles du langage.

Résumé 1.2 : Réseaux cérébraux du langage

- La production de parole met en jeu des mécanismes d'intégration sensorimotrice impliquant un large réseau fronto-temporo-pariétal.
- La production de mot isolé implique les régions temporales médianes pour la récupération sémantique des lemmes, un réseau temporo-pariéto-cérébello-frontal pour la transformation des formes phonologiques auditives et somatosensorielles en représentations motrices (Grandchamp et al., 2019 ; Hickok, 2012a ; Løevenbruck, 2019 ; Løevenbruck et al., 2018).
- Des modèles internes prédictifs sont également impliqués, permettant ainsi une correction ou un ajustement des commandes motrices avant la production, si nécessaire.
- Ces réseaux du langage peuvent être intégrés dans un connectome du langage. La connectivité structurelle a mis en évidence l'implication du FA et du FLS dans la transformation acoustico-articulatoire et du FU, de l'IFO, du FLI et du FLM dans l'appariement entre les représentations auditives et les représentations conceptuelles (Dick et al., 2014 ; Duffau et al., 2014 ; Monroy-Sosa et al., 2021).

3 Une pathologie acquise du langage : l'aphasie

3.1 Historique et définition générale

L'aphasie a été décrite pour la première fois en 1861 par Paul Broca, sous le terme d'« aphémie », avec le cas du patient Louis Victor LeBorgne (voir Encadré 1.2). Initialement, elle était décrite comme « une perte de la parole, avant tout autre trouble intellectuel et avant toute paralysie », faisant suite à « une lésion de l'un des lobes antérieurs du cerveau », spécifiquement la troisième circonvolution frontale (Broca, 1861a, 1861c).

Encadré 1.2 : Le cas de Louis Victor LeBorgne

Paul Broca, médecin français, a été le premier à décrire l'aphasie (initialement appelé « aphémie », terme remplacé plus tard par Armand Trousseau), avec le cas du patient Louis Victor LeBorgne (aussi appelé « Tan »). Ce patient présentait des troubles sévères d'expression du langage et était capable de produire un seul monosyllabe « tan », souvent en double, qu'il associait à des gestes expressifs variés lui permettant d'exprimer la plupart de ses idées. Il produisait également des formules automatiques. Cependant, il ne semblait pas présenter de troubles de la compréhension, de la mémoire à long terme, de la mobilité de la langue, ou de troubles musculaires au niveau du larynx.

Plusieurs années après l'apparition des troubles de la parole, des troubles moteurs (d'abord le bras droit puis la jambe droite) sont survenus. À l'autopsie, Paul Broca a mis en évidence la présence d'une « malformation » au niveau des tissus de la 3^{ème} circonvolution frontale (GFI postérieur) gauche, qui serait à l'origine des troubles de la parole (Broca, 1861b, 1861c ; Domanski, 2013).

La définition de ce trouble a été enrichie, notamment par Carl Wernicke, qui mentionne l'existence d'autres régions pouvant être à l'origine d'une aphasie, telles que : la première convolution temporale, qui est le « centre des images auditives des mots », et la connexion entre les convolutions frontale et temporale, qui permet de faire le lien entre la forme auditive et motrice des mots (Wernicke, 1874). Notons que ces auteurs se plaçaient dans le cadre des anciens modèles localisationnistes (*i.e.*, une région = une fonction), aujourd'hui les modèles se placent plutôt dans un cadre connexionniste. Ainsi, dans l'aphasie de Broca (aphasie non fluente) la lésion ne se limite pas à une atteinte de la « troisième circonvolution frontale » mais elle s'étend au cortex frontal environnant, à la substance blanche sous-jacente, à l'insula, aux ganglions de la base et à certaines parties du GTS antérieur (voir Dronkers, Plaisant, Iba-Zizen, & Cabanis, 2007 ; Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Viader et al., 2010). De même dans l'aphasie de Wernicke où la lésion s'étend au GTS postérieur, au cortex pariétal inférieur (GA et GSM), au GTM et au GTI (Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Tippett & Hillis, 2016), notons qu'une atteinte au niveau thalamique peut également être observée (Viader et al., 2010).

L'évolution des connaissances et le développement des modèles de langage depuis le XIX^e siècle ont permis de proposer différentes définitions de l'aphasie. Une définition proposée par Damasio (1998) présente l'aphasie comme « une perturbation de la compréhension et de la formulation des messages verbaux qui résulte d'une affection nouvellement acquise du système nerveux central ».

Dans la plupart des définitions existantes, il est mentionné que l'aphasie est : (i) un trouble du langage; (ii) un trouble acquis (*i.e.*, survenant après une acquisition du langage normale); (iii) un trouble d'origine neurologique (*i.e.*, avec une atteinte du système nerveux central); (iv) un trouble survenant généralement après un dommage au niveau de l'hémisphère dominant pour le langage; et (v) un trouble qui peut affecter plusieurs modalités du langage (production et/ou compréhension du langage oral et/ou écrit) (voir Berg et al., 2022). En complément de ces différents éléments qui sont retrouvés dans la plupart des définitions, Berg et al. (2022) ont proposé une nouvelle définition⁷ qui intègre une notion importante et absente, selon eux, dans les définitions classiques : les conséquences de l'aphasie, notamment concernant le fonctionnement des patients dans la vie quotidienne. Ils ont donc proposé d'intégrer à la définition le fait qu'il s'agit d'un trouble qui peut « affecter la participation et la qualité de vie de la personne atteinte d'aphasie ainsi que de sa famille et de ses amis » et elle peut également « affecter le fonctionnement au sein des relations, dans la vie et dans les activités du quotidien » (Berg et al., 2022).

Les perturbations qui peuvent être observées dans l'aphasie sont : des troubles de l'expression orale (fluence verbale, déviation phonétique, mutisme, paraphasies); des stéréotypies, des persévérations, une écholalie et une palilalie; un agrammatisme; une apraxie bucco-faciale; une dysprosodie; des troubles de la lecture; des troubles de l'expression écrite; des troubles de la compréhension orale et écrite (Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Tippett & Hillis, 2016 ; Viader, 2015 ; Viader et al., 2010). Les troubles observés dans le cas de l'aphasie seront différents selon le type d'aphasie (voir Annexe A).

3.2 Les causes de l'aphasie

Comme mentionné dans la plupart des définitions, l'aphasie résulte « d'une affection nouvellement acquise du système nerveux central » (Berg et al., 2022 ; Damasio, 1998). Cette affection peut être : un accident vasculaire cérébral (AVC), une tumeur, une infection, une inflammation, un

7. La définition, en anglais, de l'aphasie proposée par Berg et al. (2022) est : « *a communication disability due to an acquired impairment of language modalities caused by focal brain damage. Aphasia may affect participation and quality of life of the person with aphasia as well as their family and friends. Aphasia masks competence and affects functioning across relationships, life roles and activities, thereby influencing social inclusion, social connectedness, access to information and services, equal rights, and wellbeing in family, community and culture* ». Dans cette définition, la partie concernant les conséquences de l'aphasie ne crée pas de désaccord, cependant la notion de « *communication disability* » (*vs.* « *language impairment* ») et de « *focal lesion* » (*vs.* « *focal or diffuse lesion* ») ne font pas consensus auprès des chercheurs membres de la *Collaboration of Aphasia Trialists* qui ont été interrogés dans cette étude.

traumatisme cérébral, une démence, une maladie neurodégénérative ou encore des pathologies telles que la schizophrénie ou l'épilepsie (Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Viader et al., 2010).

L'AVC est la première cause d'aphasie chez l'adulte avec 21-38% d'aphasie post-AVC (Brust et al., 1976 ; Engelter et al., 2006 ; Pedersen et al., 1995) et représente, avec 140 000 nouveaux cas chaque année en France, la première cause de handicap acquis chez l'adulte et la deuxième cause de mortalité (Inserm, 2019 ; Kuriakose & Xiao, 2020). De plus, la prévalence de l'aphasie post-AVC est en augmentation, en raison du vieillissement de la population et de l'amélioration des interventions cliniques entraînant une hausse du nombre de survivants d'AVC (Kuriakose & Xiao, 2020). L'AVC est défini par l'Organisation Mondiale de la Santé comme « un dysfonctionnement neurologique aigu d'origine vasculaire induisant l'apparition soudaine (en quelques secondes) ou rapide (en quelques heures) de symptômes et de signes correspondant à une atteinte focale du cerveau » (World Health Organization, 1989). On distingue deux types d'AVC : les infarctus et les hémorragies. Dans l'accident d'origine ischémique, on observe une réduction focale de l'apport sanguin, suite à l'occlusion d'un vaisseau sanguin par un caillot, entraînant une perturbation du métabolisme neuronal transitoire (accident ischémique transitoire) ou aboutissant à la destruction cellulaire (accident ischémique constitué ou infarctus cérébral). Les AVC ischémiques représentent environ 80% des AVC. L'accident d'origine hémorragique, quant à lui, est marqué par la présence de sang dans le parenchyme cérébral (hémorragie intra-cérébrale, 15% des AVC) ou dans les espaces sous-arachnoïdiens (hémorragie méningée, 5% des AVC), suite à la rupture d'un vaisseau sanguin (Agence nationale d'accréditation et d'évaluation en santé, 2002 ; Grysiewicz, Thomas, & Pandey, 2008 ; Inserm, 2019).

Au niveau cérébral, les structures nécessaires au fonctionnement du réseau langagier sont principalement situées dans le territoire Sylvien (vascularisé par l'artère Sylvienne ou artère cérébrale moyenne) ainsi que dans les zones périphériques vascularisées par les artères cérébrale antérieure, choroïdienne antérieure ou cérébrale postérieure gauche (Viader et al., 2010). Dans une étude récente, Fridriksson et al. (2018) proposent de redéfinir l'« anatomie de l'aphasie », en se basant sur le modèle double voie proposé par Hickok et Poeppel (2007). Ainsi, les troubles de production de la parole sont plutôt associés à une atteinte de la voie dorsale, incluant le GFI *pars opercularis* et *pars triangularis*, l'insula antérieur et postérieur, le gyrus précentral, le gyrus postcentral, le gyrus frontal médian (GFM), le GSM, le *globus pallidus* et le putamen; tandis que les troubles

de la compréhension sont associés à une atteinte de la voie ventrale, incluant le GTM, le GTS, le pôle temporal supérieur, le GA, le pôle temporal médian, le GFI *pars orbitalis*, le GTI et le gyrus occipital médian (Fridriksson et al., 2018). Notons qu'une atteinte des faisceaux de substance blanche sous-jacents peut également être associée aux troubles langagiers dans l'aphasie (e.g., voir Billot et al., 2022 ; Geller, Thye, & Mirman, 2019 ; Kim et al., 2021).

3.3 Classifications des aphasies

Il existe différentes façons de classifier l'aphasie, en fonction de la localisation de la lésion ou des différents troubles observés (voir Blumstein, 2016 ; Clough & Gordon, 2020 ; Damasio, 1998 ; Prince, 2017 ; Tippett & Hillis, 2016). Notons cependant que l'aphasie post-AVC est un processus dynamique. Ainsi, 30-60% des patients présentant un sous-type d'aphasie initialement présenteront les caractéristiques d'un autre sous-type au cours de la récupération (Lazar & Antonello, 2008).

Une des premières façons simples de classifier l'aphasie se base sur les modèles de traitement du langage et permet de distinguer : l'aphasie d'expression, avec une atteinte des aires cérébrales antérieures ; l'aphasie réceptive qui est liée à une atteinte des régions postérieures ; et l'aphasie de conduction qui est liée à un défaut au niveau des connexions entre les régions antérieures et postérieures (voir Stefaniak, Halai, & Lambon Ralph, 2020). Toutefois, cette classification est trop simpliste et différents sous-types d'aphasie peuvent être ajoutés, en considérant la localisation plus spécifique de la lésion et les troubles associés. Il est possible de distinguer 10 sous-types : l'aphasie de Broca, l'aphasie de Wernicke, l'aphasie globale, l'aphasie anomique, l'aphasie de conduction, l'aphasie transcorticale motrice, l'aphasie transcorticale sensorielle, l'aphasie transcorticale mixte, l'aphasie croisée et l'aphasie sous-corticale. Les caractéristiques de ces différents sous-types d'aphasie sont détaillées dans l'Annexe A (l'aphasie sous-corticale n'est pas mentionnée dans le tableau ; pour plus de détails, voir Tippett & Hillis, 2016 ; Viader et al., 2010).

D'autres classifications peuvent être décrites, telles que : la classification basée sur la fluence verbale (Clough & Gordon, 2020 ; Damasio, 1998 ; Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Tippett & Hillis, 2016) ; la classification basée sur les troubles de planification et de réalisation motrices, avec une distinction entre les troubles phonologiques et phonétiques⁸ (voir Blumstein, 2016 ; Prince, 2017 ;

8. Selon cette classification, il existe une association entre aphasie de Wernicke ou de Broca et les troubles phonologiques ou phonétiques, respectivement. Cependant, cette association n'est pas si nette. En effet, il est possible d'observer des troubles phonologiques chez des patients avec une aphasie de Broca ou des troubles phonétiques chez des patients avec une aphasie de Wernicke (Verhaegen, Delvaux, Fagniat, et al., 2020).

Verhaegen et al., 2018); et la classification basée sur les troubles phonologiques et sémantiques (voir Landrigan, Zhang, & Mirman, 2021).

Dans le cadre de cette thèse, nous décrirons uniquement la classification basée sur la fluence verbale qui permet de distinguer l'aphasie fluente de l'aphasie non fluente. L'aphasie **fluente** est caractérisée par une production de parole ininterrompue, des phrases de longueur normale ou supra-normale, une compréhension de parole erronée. Généralement, elle est associée à une lésion postérieure avec une atteinte des régions temporales (GTS, GTM, GTI), pariétales (GA, GSM), temporo-pariéto-occipitales (jonction temporo-occipitale, thalamus) et de la connexion entre les régions frontales et temporales (*via* le faisceau arqué). Parmi les aphasies fluentes, on retrouve l'aphasie de Wernicke, transcorticale sensorielle, de conduction, anomique et sous-corticale. L'aphasie **non fluente**, quant à elle, est caractérisée par une réduction de la production de parole, une production de parole laborieuse, un accès au vocabulaire limité, des phrases courtes, une prosodie altérée, des erreurs articulatoires et un agrammatisme. De manière générale, elle est associée à une lésion des territoires cérébraux antérieurs : les régions frontales telles que le GFI, les régions préfrontales, l'AMS, les régions prémotrices, l'insula et les régions temporales antérieures. Cette classe regroupe l'aphasie de Broca, l'aphasie globale, l'aphasie transcorticale motrice et l'aphasie transcorticale mixte (Clough & Gordon, 2020 ; Damasio, 1998 ; Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Tippett & Hillis, 2016). Notons que, dans l'aphasie non fluente, malgré l'atteinte de la parole à voix haute, la parole intérieure reste parfois préservée. Plus spécifiquement, il semblerait qu'elle soit davantage préservée pour les patients présentant une capacité de récupération des mots intacte et des difficultés principalement au niveau du traitement de la sortie vocale (pour une revue, voir Fama & Turkeltaub, 2020).

Clough et Gordon (2020) mettent en garde sur la différence de classification (fluente ou non fluente) qui peut apparaître entre la classification basée sur le diagnostic du clinicien et celle basée sur les scores issus des tests, dans leur cas la version révisée de la *Western Aphasia Battery* (WAB-R). En effet, ils proposent que la fluence devrait être évaluée en prenant en compte les autres déficits sous-jacents (recherche de mots, formulation grammaticale, production de parole, etc.) qui peuvent contribuer au profil de fluence, ce qui permettrait un diagnostic plus fiable et une meilleure adaptation de la rééducation au profil de chaque patient.

3.4 Troubles cognitifs associés

Les patients atteints d'aphasie post-AVC présentent également des troubles des fonctions cognitives qui peuvent être indépendants des troubles langagiers (Fonseca, Ferreira, & Pavão, 2017). Bonini et Radanovic (2015) ont montré que les performances des patients atteints d'aphasie étaient plus faibles que celles des patients ayant une lésion sans aphasie, pour les tâches d'empan de chiffre, de mémoire verbale et visuelle et les praxies gestuelles. De plus, Fonseca, Raposo, et Martins (2019) ont montré qu'un déficit en mémoire, un dysfonctionnement exécutif et une vitesse de traitement ralentie étaient associés à une augmentation de la sévérité de l'aphasie. Des études mentionnent également que les performances cognitives, telles que la mémoire à court terme (verbale et visuo-spatiale), la mémoire de travail, l'attention et le raisonnement, ont un impact sur les fonctions langagières, leur rééducation et leur récupération (Bonini & Radanovic, 2015 ; Dignam et al., 2017 ; Murray, 2012 ; Seniów, Litwin, & Leśniak, 2009). De plus, la rééducation de la parole est basée sur un apprentissage (ou réapprentissage) du langage, ce qui justifie l'importance de la préservation de l'intégrité des systèmes mnésiques. De même pour le traitement visuo-spatial (identification ou production du langage en se basant sur des images, des gestes ou des textes écrits), qui joue un rôle important dans le cadre de la rééducation (Fonseca et al., 2017).

Résumé 1.3 : L'aphasie

- L'aphasie est un trouble acquis du langage, faisant suite à une affection du système nerveux central (la plus fréquente est l'AVC), avec des conséquences sur les différentes modalités du langage et sur la qualité de vie et le fonctionnement des patients dans la vie quotidienne.
- L'aphasie non fluente (production de parole réduite et laborieuse, agrammatisme, altération de la prosodie et erreurs articulatoires) regroupe les aphasies globale, transcorticale mixte et motrice et de Broca.
- L'aphasie fluente (production de parole ininterrompue, phrases de longueur normale ou supra-normale, compréhension altérée) regroupe les aphasies transcorticale sensorielle, de conduction, de Wernicke, anomique et sous-corticale.
- Des troubles des fonctions cognitives (mémoire, fonctions exécutives, attention, raisonnement, etc.) peuvent survenir chez les patients présentant une aphasie post-AVC.

4 Rééducation du langage et de la parole

Les troubles du langage et de la parole tels que l'aphasie entravent les capacités de communication dans la vie quotidienne, ce qui peut avoir des conséquences au niveau de la qualité de vie, mais également dans le fonctionnement des patients dans la vie quotidienne au niveau familial, social et professionnel (Berg et al., 2022 ; Koleček et al., 2017 ; van de Sandt-Koenderman, 2011). Ainsi, il est important de mettre en place une rééducation des troubles langagiers très rapidement, dans les jours suivant l'AVC, afin de permettre au patient de retrouver ses capacités de communication, de production et de compréhension du langage (Brady et al., 2016). Notons qu'une rééducation précoce peut avoir un impact positif, en ayant un effet stimulant pour le patient et en lui permettant de récupérer ses fonctions langagières. Cependant, elle peut aussi avoir un effet négatif en étant à l'origine d'un stress pour le patient, ce qui entrave la récupération (Springer, 2008). Il a été montré qu'une rééducation intensive (plusieurs heures durant une courte période) semblait aider la récupération du langage et réduire la sévérité de l'aphasie, en comparaison à une rééducation peu intensive ou aucune rééducation (Brady et al., 2016).

Classiquement, c'est la rééducation orthophonique (qu'on nommera rééducation « classique » ou « conventionnelle ») qui est mise en place. Cependant, dans le but de pallier la diminution d'efficacité de cette rééducation en phase chronique (El Hachioui et al., 2013), de nouvelles méthodes de rééducation sont proposées. Nous détaillons ci-dessous certaines méthodes de rééducation proposées aux patients, classiques et nouvelles.

Article

Cette section est issue de Haldin, Løevenbruck, et Baciú (2022) (Annexe E).

Haldin, C., Løevenbruck, H., & Baciú, M. (2022). Complémenter la méthode orthophonique avec des nouvelles approches de rééducation du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC. *Revue de neuropsychologie*, 14(1), 43-58.

4.1 Rééducation orthophonique classique

La rééducation orthophonique s'appuie sur la répétition et l'observation des productions de l'orthophoniste. La préservation des capacités de flexibilité et d'apprentissage montre que, malgré les troubles de réalisation et de coordination articulatoires des patients, un réapprentissage et

une réappropriation des schémas articulatoires sont possibles (Verhaegen, Delvaux, Huet, et al., 2020). De plus, la rééducation orthophonique cherche à permettre au patient d'être adapté, le plus possible, à son environnement en optimisant les capacités de communication et d'échange avec autrui dans la vie quotidienne. Cette rééducation a des objectifs différents en fonction de la sévérité de l'aphasie, des perspectives de récupération ou encore du profil sémiologique du patient. Ainsi, lorsque l'aphasie est sévère, l'orthophoniste cherchera à développer des modes de communication palliatifs, tandis que dans les cas d'aphasie de sévérité plus modérée, l'orthophoniste ciblera la réorganisation des processus cognitifs du langage pour trouver un mode analogue à celui présent avant la survenue de l'AVC (Chomel-Guillaume, Leloup, & Bernard, 2010). La durée moyenne de la rééducation est généralement de deux ans avec une diminution de la fréquence des séances à partir du troisième mois. La fréquence des séances pourra varier selon les patients et selon leur degré d'autonomie (*i.e.*, le travail fourni par les patients eux-mêmes en dehors des séances de rééducation) (Viader et al., 2010).

Selon Chomel-Guillaume et al. (2010), deux stratégies existent pour la rééducation classique : la stratégie analytique et la stratégie d'approche fonctionnelle. La **stratégie analytique** se base sur les mécanismes de restauration et de réorganisation. La restauration vise à rétablir le fonctionnement des conduites linguistiques telles qu'elles étaient avant l'accident, en se basant sur le réapprentissage (en cas de dégradation des représentations et des procédures) et la facilitation (en cas de défaut d'accès à l'information). Lorsque la restauration ne fonctionne pas, les thérapeutes peuvent utiliser des stratégies de réorganisation afin de contourner le déficit en utilisation des voies ou des mécanismes préservés. La **stratégie d'approche fonctionnelle** est fondée sur des mécanismes palliatifs. Ces mécanismes palliatifs font appel à d'autres modes de communication non verbale (gestes, mimiques, dessins, etc.) s'appuyant sur les fonctionnalités restantes. Selon ces mécanismes, différentes stratégies seront également apprises à l'entourage du patient, telles que : adapter la parole en utilisant un débit de parole plus lent ; adapter son langage en faisant des phrases simples et courtes ; et exagérer les mimiques. Cette stratégie permet de retrouver une communication optimale en entraînant les comportements observables (habileté et activités de la vie quotidienne) (voir aussi Chomel-Guillaume et al., 2021 ; Viader et al., 2010). Enfin, le choix de la méthode de rééducation sera adapté en fonction du stade post-AVC (*i.e.*, en phase aiguë, subaiguë et chronique ; voir Springer, 2008).

4.2 Nouvelles méthodes de rééducation

Plus récemment, de nouvelles méthodes de rééducation ont été proposées. Ces méthodes sont issues du domaine de la recherche. Il s'agit d'approches comportementales telles que la thérapie par contrainte induite, la thérapie musicale ou les méthodes technologiques (Godlove, Anantha, Advani, Des Roches, & Kiran, 2019 ; Popescu et al., 2022 ; Wang, Ge, Zheng, Huang, & Xiang, 2020) et d'approches neurophysiologiques telles que la neurostimulation (stimulation magnétique transcrânienne ou stimulation transcrânienne à courant direct; Biou et al., 2019 ; Coslett, 2016) et la thérapie pharmacologique (Berthier, 2021 ; Small & Llano, 2009).

Dans cette section, je présenterai essentiellement les approches comportementales et en particulier la thérapie par contrainte induite, la thérapie musicale et la thérapie fondée sur des méthodes technologiques. Les études utilisant ces différentes méthodes sont présentées en détail dans Haldin et al. (2022). Ces méthodes ont été proposées à l'origine pour des patients en phase chronique lorsque le potentiel de récupération diminue et que l'accès aux soins est rendu plus difficile, pour des raisons de santé, géographiques ou financières (Allen, Mehta, Andrew McClure, & Teasell, 2012 ; Cichon et al., 2021). De plus, ces méthodes peuvent être utilisées en complément de l'orthophonie classique et sont faciles d'utilisation, non invasives, peu coûteuses et nécessitent un matériel facilement transportable.

4.2.1 Thérapie par contrainte induite

La thérapie par contrainte induite (TCI) est une adaptation de la thérapie par contrainte motrice qui a été proposée initialement pour permettre la récupération des capacités de mouvements des membres au-delà d'un an après l'AVC, lorsque les autres méthodes échouaient (Taub, Uswatte, & Pidikiti, 1999). La TCI a donc été adaptée et proposée pour la rééducation du langage chez des patients présentant une aphasie fluente ou non fluente post-AVC en phase chronique, avec une préservation partielle de leurs capacités de production du langage (Cichon et al., 2021 ; Pulvermüller et al., 2001). Ainsi, cette méthode se base sur plusieurs principes (Sickert, Anders, Munte, & Sailer, 2014 ; Wang et al., 2020) : (i) la contrainte, c'est-à-dire que les patients doivent utiliser uniquement la parole (production orale) et les autres moyens de communication (gestes, écriture, pointage, etc.) sont interdits ; (ii) l'intensité élevée (5 jours/semaine) ; et (iii) la personnalisation,

avec une augmentation progressive des difficultés des tâches en fonction des performances et des compétences des patients.

La TCI est fondée sur le postulat que l'échec, lors de la production de parole, entraîne une frustration chez les patients, ce qui entraîne une diminution des tentatives de production orale et une augmentation de l'utilisation de stratégies compensatoires. Ceci est associé à une diminution de la stimulation des régions cérébrales impliquées dans la production du langage. L'utilisation de la TCI à haute intensité encourage donc les patients à la production orale, ce qui permet de stimuler la réorganisation corticale et l'activation des régions cérébrales impliquées dans la production de la parole (Pulvermüller et al., 2001 ; Wang et al., 2020). En pratique, les séances de rééducation sont réalisées par groupes de deux à quatre patients. Durant les séances, les patients réalisent des exercices tels que des jeux de cartes. Prenons l'exemple d'un jeu dans lequel les cartes présentent des images et l'objectif est de former des paires d'images. Pour cela, chaque patient possède des cartes devant lui et il doit demander verbalement, sans utiliser de stratégies compensatoires (gestes, pointage), à l'un des autres patients s'il possède une certaine carte, afin de former une paire. L'autre patient devra alors donner une réponse verbale de type confirmation, demande de clarification ou négation (Pulvermüller et al., 2001).

Certaines études se sont intéressées à l'efficacité de la TCI et il semble que cette méthode permette une amélioration des compétences en dénomination, répétition, compréhension et communication dans la vie quotidienne (Kurland, Stanek, Stokes, Li, & Andrianopoulos, 2016 ; Nenert et al., 2017 ; Pulvermüller et al., 2001 ; Stahl, Mohr, Dreyer, Lucchese, & Pulvermüller, 2016 ; Szaflarski et al., 2015). Nenert et al. (2017) ont notamment montré qu'il existait une corrélation entre l'amélioration des performances en dénomination et la modification d'activité au niveau des gyri temporal, précentral et postcentral à droite et du thalamus et des gyri frontaux supérieur et médian à gauche. Toutefois, certaines études ont montré que la TCI n'était pas plus efficace que d'autres méthodes de rééducation (non contrainte) (Kurland et al., 2016) ou qu'aucune rééducation (Nenert et al., 2017).

Ainsi, une des caractéristiques de la TCI est son intensité importante (2-4 heures/jour, 5 jours/semaine) et ceci constitue un avantage du fait de la courte durée du programme de rééducation (1-2 semaines). En effet, il semble que les patients présentent des améliorations sur certaines tâches de langage même après une courte durée (Pulvermüller et al., 2001). De plus, la TCI présente

des avantages pour l'orthophoniste et pour les patients. Premièrement, les séances de rééducation se déroulent en groupe de deux à quatre patients, ce qui permet à l'orthophoniste de voir plusieurs patients en même temps. Deuxièmement, l'intensité et la durée de la rééducation donnent de nombreuses occasions aux patients de pratiquer et de progresser, avec de multiples opportunités de réorganisation au niveau cérébral (Szaflarski et al., 2015). Toutefois, un inconvénient de la TCI est qu'elle cible principalement la dénomination, ce qui induit une sous-représentation des autres capacités langagières. De plus, en travaillant la dénomination de nom d'objet, ceci induit une sous-représentation des autres items du lexique (Wang et al., 2020). Enfin, l'intensité importante, bien qu'étant un avantage en terme d'efficacité à court terme, peut être une contrainte pour les patients puisque cela nécessite que le patient se déplace sur le lieu de la rééducation plusieurs fois par semaine.

4.2.2 Thérapie par intonation musicale

La thérapie musicale a été développée à l'origine pour les patients atteints d'aphasie non fluente. Elle repose sur le postulat que, chez les patients atteints d'aphasie, les capacités musicales sont préservées. En effet, les patients atteints d'aphasie non fluente parviennent à produire les mots plus facilement lorsqu'ils sont chantés, que ce soit dans une chanson familière ou une nouvelle chanson en écoutant un modèle (Zumbansen & Tremblay, 2019). Cette méthode repose sur l'utilisation des éléments musicaux tels que la mélodie, le rythme, la dynamique, le tempo et la métrique, pour la rééducation de la parole (Hurkmans et al., 2012). Or, les régions cérébrales impliquées dans le traitement de la musique sont situées au niveau de l'hémisphère droit. Ainsi, l'utilisation des éléments musicaux et l'ajout de rythme avec la main gauche (ou *hand-tapping*) permettront de stimuler des régions au niveau de l'hémisphère droit et d'activer des réseaux sensorimoteurs impliqués dans le contrôle du mouvement des articulateurs de la parole et de la main (Leonardi et al., 2018).

Il existe différents types de thérapie musicale, basés sur les différents éléments musicaux. La plus courante est la thérapie par intonation musicale (*Musical Intonation Therapy*, MIT), qui utilise des composantes mélodiques (tons hauts et bas) et rythmiques (durées longues et courtes) pour la production de parole, avec une prosodie simplifiée et exagérée, afin de faciliter la production de parole et d'améliorer le langage propositionnel (Hurkmans et al., 2012). Cette thérapie a été

développée initialement en langue anglaise par Sparks, Helm, et Albert (1974), puis a été adaptée en différentes langues telles que le français, le néerlandais, l'espagnol et l'italien (Cortese, Riganello, Arcuri, Pignataro, & Buglione, 2015 ; Haro-Martínez, Lubrini, Madero-Jarabo, Díez-Tejedor, & Fuentes, 2019 ; Van Der Meulen, Van De Sandt-Koenderman, Heijenbrok, Visch-Brink, & Ribbers, 2016 ; Zumbansen, Peretz, & Hébert, 2014). La MIT semble plus adaptée pour les patients avec : une bonne compréhension orale, des capacités d'auto-correction, une production orale limitée, un empan attentionnel fonctionnel et une certaine stabilité émotionnelle (Helm-Estabrooks & Albert, 2004). Ainsi, ce type de thérapie est utilisé pour la rééducation des patients présentant une aphasie non fluente en phase précoce ou chronique (Cichon et al., 2021). Lors des séances de rééducation, l'orthophoniste demande au patient de répéter, en chœur avec lui ou elle, une série de phrases produites de façon mélodique. Cette rééducation peut également inclure la réalisation de rythme avec la main gauche (ou *hand-tapping*) ou la réduction du débit d'élocution. Les phrases intonées seront ensuite graduellement remplacées par de la parole normale (Van Der Meulen et al., 2016 ; Zumbansen & Tremblay, 2019).

Plusieurs études se sont intéressées à l'effet de la MIT pour la récupération des capacités langagières chez des patients présentant une aphasie non fluente chronique. Il semble que cette méthode soit partiellement efficace (pour une revue, voir Popescu et al., 2022). Selon certaines études, la MIT permet une amélioration des performances en répétition, dénomination, compréhension, production orale spontanée (Cortese et al., 2015), des capacités de communication dans la vie quotidienne (Haro-Martínez et al., 2019) et de la fluence verbale associée à une réduction de la fraction d'anisotropie⁹ de la substance blanche sous-jacente au GFI droit (Wan, Zheng, Marchina, Norton, & Schlaug, 2014). Certaines études montrent un maintien des performances à long terme (Cortese et al., 2015 ; Haro-Martínez et al., 2019), mais ce n'est pas le cas de toutes les études (e.g., voir Van Der Meulen et al., 2016). Les différents résultats montrent donc qu'au-delà de l'effet au niveau des performances langagières, il est possible d'observer des modifications fonctionnelles et structurelles à l'issue de la MIT (voir aussi Merrett, Peretz, & Wilson, 2014), ce qui est en faveur de l'hypothèse selon laquelle la MIT permet une réorganisation et un recrutement au niveau des réseaux langagiers de l'hémisphère droit permettant la récupération de certaines fonctions langagières (Leonardi et al., 2018).

9. La fraction d'anisotropie est un paramètre qui rend compte de la direction de la diffusion des molécules d'eau, reflétant les propriétés micro-structurelles des fibres de substance blanche (Le Bihan et al., 2001).

Ainsi, la MIT présente des avantages en termes de motivation et d'engagement des patients. En effet, l'utilisation des éléments musicaux permet d'augmenter la motivation des patients lors de la séance de rééducation, ce qui favorise la récupération (Merrett et al., 2014). De plus, la MIT est appréciée par les patients présentant une aphasie non fluente puisqu'elle leur « donne l'impression de parler » (Curtis, Nicholas, Pittmann, & Zipse, 2020). Cependant, elle présente des inconvénients liés à l'intensité de la rééducation, l'utilisation de ressources importantes et aux risques lors de la prédiction de l'efficacité de la méthode. En effet, la personnalisation de la méthode en fonction du patient, de ses troubles et de ses compétences permettra d'optimiser l'efficacité de la méthode et d'assurer la meilleure récupération possible pour le patient (Curtis et al., 2020).

4.2.3 Thérapie fondée sur les méthodes technologiques

Parmi les nouvelles méthodes fondées sur les méthodes technologiques, des études se sont intéressées à l'efficacité de la rééducation basée sur l'utilisation des nouvelles technologies (logiciels, applications, visioconférence) par rapport à la rééducation avec un(e) thérapeute. Ce type de méthode est généralement proposé aux patients atteints d'aphasie ayant un accès limité à la thérapie classique pour des raisons de santé, géographiques ou financières, avec une couverture d'assurance limitée, des difficultés de transport vers le lieu de la rééducation ou encore une fatigue importante (Cichon et al., 2021). En outre, depuis la pandémie de Covid-19, l'accès aux centres de rééducation était plus difficile en raison des restrictions sanitaires, ce qui a exacerbé les disparités en matière de soins de santé pour ces patients (Kong, 2021). Ainsi, afin d'éviter une rééducation irrégulière ou insuffisante, des méthodes de rééducation à domicile (télé-rééducation) ont été développées (Godlove et al., 2019). Deux types de télé-rééducation peuvent être proposés : la télé-rééducation asynchrone qui repose sur l'utilisation de jeux de langage, de logiciels ou d'applications sur ordinateur, dans lesquels le ou la thérapeute n'interagit pas avec les patients en temps réel ; et la télé-rééducation synchrone dans laquelle le patient interagit directement avec l'orthophoniste en distanciel (visioconférence) (Meltzer, Baird, Steele, & Harvey, 2018). Ce type de méthode s'adressait initialement aux patients atteints d'aphasie fluente ou non fluente en phase chronique, présentant des effets à long terme, avec une diminution des compétences de langage qui affecte leur participation dans les différentes activités sociales et dans la vie quotidienne (Godlove et al., 2019 ; Meltzer et al., 2018). Bien que la rééducation intensive soit bénéfique pour les patients

en phase chronique, il semble difficile d'envisager le maintien de la rééducation avec cinq séances par semaine avec un(e) orthophoniste (en personne) sur le long terme (Braley et al., 2021). Ainsi, différentes méthodes reposant sur des applications, logiciels ou encore la visioconférence ont été proposées pour la rééducation du langage chez ces patients atteints d'aphasie en phase chronique. Enfin, les méthodes de télé-rééducation et les exercices réalisés peuvent être personnalisés en fonction des troubles des patients, mais également en fonction de leur priorité et de leur but lors de la récupération (Meltzer et al., 2018).

Les études ont montré que la télé-rééducation synchrone est aussi efficace que la rééducation avec un(e) orthophoniste (en personne) (Meltzer et al., 2018) et plus efficace qu'aucune rééducation (Zheng, Lynch, & Taylor, 2016). Cependant, il semble que la présence d'une orthophoniste améliore davantage la confiance du patient en ses capacités de communication, par rapport à la télé-rééducation (Meltzer et al., 2018). De façon similaire, la télé-rééducation asynchrone présente un effet bénéfique (Braley et al., 2021 ; Stark, Geva, & Warburton, 2017 ; van Vuuren & Cherney, 2014). En effet, van Vuuren et Cherney (2014), ont mis en évidence une récupération plus importante et 2,3 fois plus rapide, après l'utilisation d'un logiciel fondé sur le principe de l'illustration visuelle des articulateurs de la parole chez un locuteur de référence, par rapport à la rééducation sans support. De même, les applications permettant de réaliser des exercices de langage sur tablette permettent une amélioration des performances en production orale (expression orale, nombre d'unités produites et fluence verbale ; Stark & Warburton, 2018) ainsi que des performances de langage (parole spontanée, compréhension, dénomination, répétition, lecture et écriture) et cognitives (apraxie, construction visuo-spatiale et calcul) (Braley et al., 2021). L'effet bénéfique de ces applications a été mis en évidence en comparaison à l'utilisation d'une application ciblant la conscience spatiale et la prise de décision (sans composante langagière) ou à des exercices sur papier. Enfin, Stark et Warburton (2018) ont montré un maintien de l'amélioration six mois après la fin du traitement.

Ainsi, ces méthodes de télé-rééducation permettent d'améliorer les performances de langage et présentent des avantages pour : (i) les patients, avec la possibilité de suivre la rééducation à domicile et de façon plus intensive puisqu'elle ne demande pas au patient de se déplacer sur le lieu de la rééducation (Godlove et al., 2019) et (ii) les orthophonistes qui sont soulagé(e)s du fait que les patients réalisent les exercices à domicile et non plus en séance. Notons que, même lors de la télé-rééducation asynchrone, les patients peuvent bénéficier de retours sur leurs performances et

les exercices sont adaptés en fonction de l'avancement et des difficultés des patients (Braley et al., 2021 ; Stark & Warburton, 2018). Il a été montré que la télé-rééducation asynchrone était associée à une baisse de confiance du patient en ces capacités (Meltzer et al., 2018) et ceci pourrait mener à une diminution de la motivation pour les interactions sociales, entraînant un isolement du patient (Babbitt & Cherney, 2010). Or, les interactions sociales avec l'entourage, y compris l'orthophoniste, jouent un rôle bénéfique dans le processus de récupération (van de Sandt-Koenderman, 2011). Enfin, un autre inconvénient pourrait être associé à l'utilisation de la technologie. Il conviendra, avant l'utilisation de ce type de méthode, de vérifier les compétences des patients afin d'éliminer tout obstacle potentiel lié à l'utilisation de la technologie (Cichon et al., 2021).

4.3 Bilan sur les méthodes de rééducation

Ainsi, les différentes méthodes que nous avons présentées (TCI, MIT, méthodes technologiques) peuvent être utilisées en complément de la rééducation orthophonique chez des patients en phase chronique, lorsque le potentiel de récupération diminue et que l'accès aux soins est plus limité. Comme nous l'avons souligné dans Haldin et al. (2022), le choix de la méthode de rééducation, qui permettra d'améliorer au mieux les capacités de communication des patients, se base sur trois principes : l'intensité, l'engagement social et la personnalisation. Sur la base de ces trois principes, nous proposons que la méthode de rééducation la plus adaptée est la télé-rééducation, au domicile du patient.

Premièrement, une rééducation **intensive** permet une meilleure récupération des capacités de communication (Brady et al., 2016). Cependant, les limites de la pratique clinique en termes de ressources humaines et financières rend impossible le maintien de la rééducation à un rythme soutenu de 5 séances/semaine pour tous les patients en phase chronique (Braley et al., 2021). Ainsi, la rééducation à domicile semble être une solution puisqu'elle limite les déplacements et les coûts, ce qui est en faveur de l'augmentation de l'intensité de la rééducation (Godlove et al., 2019).

Deuxièmement, la présence de l'orthophoniste, d'autres patients (dans le cas de la rééducation en groupe) ou de l'entourage favorise les interactions sociales et la communication, c'est le principe de l'**engagement social**. Lors de la télé-rééducation asynchrone, la communication avec l'orthophoniste n'est pas favorisée. Cependant, il est possible d'impliquer davantage l'entourage, en leur apprenant des techniques permettant de favoriser la communication avec le patient, et de

s'assurer qu'il suive le protocole de rééducation, ce qui permettra *in fine* de favoriser l'interaction et l'engagement social (Meltzer et al., 2018 ; Simmons-Mackie, Raymer, & Cherney, 2016).

Troisièmement, la méthode de rééducation doit être adaptée à chaque patient en fonction de ces troubles et ces objectifs, il s'agit du principe de **personnalisation**. Il sera donc nécessaire d'adapter la difficulté des exercices (*i.e.*, ni trop facile ni trop difficile) et de prendre en compte les objectifs des patients (*i.e.*, les compétences qu'ils souhaitent retrouver), afin de leur permettre de progresser (Chomel-Guillaume et al., 2010 ; Meltzer et al., 2018 ; Viader et al., 2010). Ainsi, la télé-rééducation, qu'elle soit synchrone ou asynchrone, permet cette personnalisation. Notons que lors de la télé-rééducation asynchrone, il est possible de gérer l'apport de retour sur les performances (*i.e.*, réponses correctes ou incorrectes), l'apport de retour personnalisé pour les patients et l'adaptation du niveau de difficultés.

Résumé 1.4 : Rééducation du langage et de la parole dans l'aphasie

- Mise en place précoce de la rééducation orthophonique afin de permettre aux patients de récupérer leurs capacités de communication via des méthodes de restauration et de réorganisation des fonctions langagières.
- Diminution de l'efficacité de la rééducation classique et difficulté d'accès aux soins en phase chronique, nécessitant le développement de nouvelles méthodes de rééducation.
- Le programme de rééducation le plus approprié est une combinaison de la rééducation classique et de la télé-rééducation, ce qui présente des avantages en termes d'intensité, d'engagement social et de personnalisation.

5 Récupération dans le cas de l'aphasie post-AVC

La récupération dans l'aphasie post-AVC comprend trois phases (Bernhardt et al., 2017) : aigüe (jusqu'à 7 jours), subaigüe (7 jours à 6 mois) et chronique (au-delà de 6 mois). Cette récupération est un processus non linéaire et dynamique avec des changements neurophysiologiques survenant de la phase aigüe à la phase chronique (Kiran & Thompson, 2019 ; Mohr, 2017).

Durant la phase **aigüe**¹⁰, la récupération est associée à : des mécanismes de plasticité neuronale,

10. Notons qu'une série d'événements surviennent immédiatement après l'AVC, tels que : l'excitotoxicité ; l'œdème ; l'hypométabolisme dans les régions intactes et potentiellement dans les régions éloignées de la lésion (appelé « *diaschisis* ») ; et l'hypoperfusion dans les deux hémisphères et plus particulièrement au niveau péri-lésionnel, dans les 24 heures après l'AVC (Kiran & Thompson, 2019). Je précise que dans l'approche connectomique, le *diaschisis* peut être redéfini comme des modifications de la connectivité structurelle et fonctionnelle entre des régions du cerveau distantes de la lésion (Carrera & Tononi, 2014).

la réduction de l'œdème et de l'hypertension intracrânienne, la diminution de l'inflammation locale, la perturbation du métabolisme (Cappa, 2008 ; Kiran, 2012 ; Stefaniak et al., 2020). Dans cette phase, Aghaz, Hemmati, et Ghasisin (2018) soulignent que les régions autour de la lésion et péri-sylvienne gauche présentent une activité réduite, voire aucune activité, ce qui est associé à une récupération réduite.

Durant la phase **subaiguë**, l'œdème est résorbé, plusieurs processus anormaux reviennent à la normale et on observe une synaptogenèse, une germination axonale et une neurogénèse¹¹ (Kiran & Thompson, 2019). De plus, un facteur important associé à la récupération du langage dans cette phase est la levée du *diaschisis* (Kiran, 2012 ; Kiran & Thompson, 2019). Par ailleurs, durant cette phase subaiguë, les activations sont bilatérales et les régions impliquées dans le langage au niveau de l'hémisphère droit (HD), plus spécifiquement les régions homologues, notamment le GFI droit ainsi que les régions complémentaires (*e.g.*, le cortex insulaire), sont activées (Aghaz et al., 2018 ; Saur et al., 2006). Les changements cérébraux qui surviennent, durant cette période, permettent la récupération dite spontanée¹² (Kiran & Thompson, 2019).

Enfin, durant la phase **chronique**, l'amélioration des fonctions langagières est due à la réorganisation des fonctions par le biais d'un phénomène compensatoire, même en l'absence de récupération neuronale (Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Kiran, 2012). Durant cette phase, on observe un réengagement des tissus au niveau de l'hémisphère lésé (niveau péri-lésionnel). Ces tissus peuvent être anatomiquement proches de la lésion, mais différents fonctionnellement, ou bien anatomiquement distants de la lésion, mais connectés fonctionnellement à la région lésée (Kiran, 2012). Cette réactivation des régions au niveau de l'hémisphère gauche (HG) est associée à la récupération des fonctions langagières (Aghaz et al., 2018 ; Kiran, 2012 ; Saur et al., 2006).

11. La synaptogenèse est la création de nouvelles connexions qui peuvent impliquer soit la révélation de connexions latentes, soit la formation de nouvelles connexions. De plus, lorsque le corps cellulaire des neurones reste fonctionnel, alors les axones et dendrites peuvent se régénérer, entraînant la germination et la neurogénèse (Kiran & Thompson, 2019).

12. La récupération spontanée fait référence à la récupération du langage et de la parole, indépendamment du traitement. Elle s'oppose à la récupération induite qui fait suite à la rééducation (Vochin, Brambati, & Saj, 2022). La neuroplasticité spontanée est définie comme le déroulement naturel des restaurations neurophysiologiques et de la réorganisation corticale des fonctions du langage (Berthier & Pulvermüller, 2011).

5.1 Profils de récupération en lien avec la neuroplasticité

La neuroplasticité est définie comme la capacité du cerveau à subir des modifications au niveau cérébral (plasticité neuronale) ou au niveau comportemental (plasticité comportementale¹³). Cette plasticité peut être adaptative (modifications efficaces) ou incompatible (mauvaise récupération due à une « reprogrammation » inefficace au niveau cérébral) (Aghaz et al., 2018) et elle peut être spontanée ou induite par la rééducation (Mohr, 2017). Comme nous l'avons mentionné précédemment, la réorganisation au niveau cérébral est un processus dynamique et non linéaire (Kiran & Thompson, 2019 ; Saur et al., 2006).

Dans la littérature, il a été montré qu'il existait différents profils de réorganisation (*e.g.*, voir Baciú & Perrone-Bertolotti, 2015 ; Hamilton, Chrysikou, & Coslett, 2011 ; Stefaniak et al., 2020 ; Wilson & Schneck, 2021). Selon Hamilton et al. (2011), on voit apparaître, après une lésion gauche, plusieurs phénomènes de plasticité : le recrutement bénéfique de certaines régions au niveau de l'HG (régions péri-lésionnelles) ; le recrutement bénéfique des régions impliquées dans le langage au niveau de l'HD, dû à la levée d'inhibition transcallosale de l'HG vers l'HD ; et le recrutement délétère des régions au niveau de l'HD, induisant une inhibition inter-hémisphérique de l'HD vers l'HG.

Récemment, Stefaniak et al. (2020) ont décrit deux principes au cœur de la récupération en phase subaigüe et chronique : la dégénérescence et le neuro-déplacement. La dégénérescence dans le cadre de la récupération post-AVC est le recrutement de réseaux neuronaux qui ne sont normalement pas impliqués dans la fonction étudiée, mais qui le deviennent après l'AVC. Elle est fondée sur : l'engagement de régions quiescentes (*e.g.*, le recrutement de régions homologues du langage dans l'HD) ; l'engagement de réseaux langagiers alternatifs (*e.g.*, le recrutement de la voie ventrale lorsque la voie dorsale est atteinte) ; et l'engagement de régions non langagières. Le neuro-déplacement, quant à lui, peut se faire par le biais du recrutement des régions péri-lésionnelles, des réseaux langagiers (*i.e.*, le recrutement d'un réseau quiescent ou l'ajustement du partage des fonctions entre les réseaux langagiers), ou des réseaux non langagiers (*i.e.*, recrutement du réseau « domaine-général » plutôt que du réseau « domaine-spécifique »). Il semble que le recrutement du réseau domaine-général soit associé à un effort cognitif supplémentaire,

13. Les changements biochimiques, physiologiques et structurels induisent des modifications au niveau comportemental. La plasticité neuronale joue un rôle dans l'apprentissage de nouveaux comportements, qui peuvent eux-mêmes entraîner des modifications au niveau cérébral et renforcer les comportements. Ainsi, la plasticité résulte et implique des changements au niveau comportemental.

fournit par le patient, lors du traitement du langage (Brownsett et al., 2014 ; Fedorenko, 2014 ; Geranmayeh, Brownsett, & Wise, 2014).

Ainsi, les deux hémisphères semblent impliqués dans la récupération du langage, après un AVC. Cependant, le recrutement des différents réseaux dépend de la phase de récupération (Kiran & Thompson, 2019 ; Saur et al., 2006). En effet, selon Saur et al. (2006), il semble que l'augmentation de l'activation à gauche soit continue de la phase aiguë à la phase chronique, tandis que l'activation à droite augmente dans les phases précoces et diminue en phase chronique. Selon un modèle hiérarchique de récupération (voir Hamilton et al., 2011 ; Heiss & Thiel, 2006), la récupération est la meilleure lorsque l'HG récupère son rôle pour les fonctions langagières (cas des petites lésions) ; elle est bonne lorsque les régions péri-lésionnelles sont recrutées (cas des lésions atteignant de façon plus importante les régions impliquées dans le langage) ; et elle est limitée lorsque l'HD est recruté (cas des lésions atteignant de façon plus importante les régions langagières).

Alors que l'implication de l'HG dans la récupération est associée à une meilleure récupération (voir Aghaz et al., 2018 ; Hamilton et al., 2011 ; Shah, Szaflarski, Allendorfer, & Hamilton, 2013), le rôle de l'HD semble plutôt discuté. En effet, certaines études mentionnent un effet bénéfique de son recrutement lors de la récupération (Kiran, Meier, Kapse, & Glynn, 2015 ; Menke et al., 2009 ; van Hees et al., 2014) alors que d'autres mentionnent un effet plutôt délétère (Heiss & Thiel, 2006 ; Saur et al., 2006). L'effet bénéfique est mis en lien notamment avec le rôle de l'HD dans le langage (Vigneau et al., 2006), en particulier chez les participants âgés (Cabeza, 2002). Par ailleurs, il semblerait qu'une activation transitoire de l'HD soit bénéfique. Le recrutement du GFI à droite et de l'AMS, dans les phases précoces, est associé à une amélioration du langage, cependant un maintien des activations à droite entrave la récupération à long terme (Saur et al., 2006). De plus, selon le modèle hiérarchique de récupération, la levée de l'inhibition transcallosale exercée par l'HG sur l'HD induit une augmentation de l'activation au niveau de l'HD. Ainsi, ce sont les régions droites qui vont exercer une action inhibitrice sur les régions gauches (inhibition inter-hémisphérique), ce qui est à l'origine d'une moins bonne récupération (Heiss & Thiel, 2006). Enfin, d'autres études suggèrent que le recrutement de l'HD est secondaire et qu'il n'a aucun effet, ni bénéfique, ni délétère, sur la récupération du langage (pour des revues, voir Aghaz et al., 2018 ; Hamilton et al., 2011).

5.2 Récupération du langage

Selon Hamilton et al. (2011), la majorité de la récupération spontanée survient dans les 2-3 mois suivant l'AVC (voir aussi Laska, Hellblom, Murray, Kahan, & Von Arbin, 2001). Toutefois, la récupération du langage semble ralentir et atteindre un plateau à 3-6 mois après l'AVC, même si la récupération peut se poursuivre au-delà de ces 6 mois (El Hachioui et al., 2013). En effet, la neuroplasticité peut survenir même en phase chronique, alors que les mécanismes de perturbation et de résolution sont terminés (*i.e.*, la reperfusion des tissus hypoperfusés et la résolution du *diaschisis*, induisant une réactivation ou une hyper-activation des régions épargnées bilatéralement et une modulation de la connectivité fonctionnelle) (voir Hartwigsen & Saur, 2019 ; Kiran & Thompson, 2019).

La récupération du langage dépend de plusieurs facteurs : biographiques, neuropsychologiques et neurobiologiques selon Kristinsson et al. (2022) ; neurophysiologiques, personnels et environnementaux selon Aghaz et al. (2018) ; intrinsèque et extrinsèque selon Kiran et Thompson (2019) ; lésion-dépendants, patient-dépendants et traitement-dépendants selon Watila et Balarabe (2015). Sur la base de ces différentes classifications, nous proposons de regrouper les facteurs en quatre classes : (i) les **mécanismes neurophysiologiques** tels que la levée du *diaschisis*, la plasticité cérébrale, la vicariance (*i.e.*, la capacité de certaines régions secondaires à compenser les régions atteintes), les processus au niveau cellulaire (régénérescence nerveuse, germination, modification de la neurotransmission, etc.) ; (ii) les **facteurs associés à la lésion** (ou lésion-dépendants) tels que la taille et la localisation de la lésion, la sévérité et le type d'aphasie et d'AVC ; (iii) les **facteurs individuels** tels que les caractéristiques sociodémographiques (sexe, âge au moment de l'AVC, préférence manuelle, niveau d'éducation, motivation, soutien, etc.) et cliniques (capacités cognitives au moment de l'AVC et après la survenue de l'AVC, affections associées, performances langagières post-AVC, etc.) ; et (iv) les **facteurs associés à la rééducation** (ou rééducation-dépendants) tels que le type de rééducation, sa durée, son intensité ou encore les traitements pharmacologiques utilisés. Nous détaillons ci-dessous uniquement les facteurs lésion-dépendants, individuels et rééducation-dépendants.

5.2.1 Facteurs lésion-dépendants

Parmi les facteurs lésion-dépendants, la **sévérité initiale de l'aphasie** est considérée comme étant le meilleur prédicteur de l'évolution de l'aphasie dans les stades précoces post-AVC, il s'agit

d'un prédicteur négatif (pour des revues, voir Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Plowman, Hentz, & Ellis, 2012 ; Watila & Balarabe, 2015). En effet, plus l'aphasie est sévère initialement et moins la récupération sera importante (Lahiri, Dubey, Ardila, Sanyal, & Ray, 2021 ; Lazar et al., 2010 ; Pedersen, Vinter, & Olsen, 2004 ; Ramsey et al., 2017). Récemment, Lahiri, Dubey, Ardila, Sanyal, et Ray (2021) ont identifié que la sévérité initiale de l'aphasie était le facteur le plus important permettant de déterminer la récupération de l'aphasie, à rééducation équivalente. Cependant, certaines études se sont intéressées au « gain » (en termes de performances) suite à la rééducation et des auteurs ont montré un gain plus important chez les patients avec une aphasie sévère initialement (J. B. Lee, Kaye, & Cherney, 2009 ; Osa García et al., 2020 ; Robey, 1998). Ceci s'explique par l'amplitude plus importante disponible pour la récupération chez les patients plus sévères.

Des études ont montré que la sévérité de l'aphasie ne permet pas, à elle seule, de prédire la récupération du langage. En effet, les caractéristiques lésionnelles, telles que la **taille et la localisation de la lésion**, jouent également un rôle (*e.g.*, voir Benghanem et al., 2019 ; Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Kiran & Thompson, 2019). Dans une étude récente, Benghanem et al. (2019) ont montré qu'une aphasie plus sévère, associée à une lésion large et une atteinte au niveau de la jonction temporo-pariétale, était associée à une mauvaise récupération à trois mois. D'autres études se sont intéressées à l'effet de la taille et de la localisation de la lésion sur la récupération du langage (*e.g.*, voir Harvey, Parchure, & Hamilton, 2022 ; Na, Jung, Tench, Auer, & Pyun, 2022 ; Sul et al., 2019 ; Thye & Mirman, 2018). Ainsi, une lésion large au niveau de l'HG laissera peu de régions disponibles pour une réorganisation efficace, entraînant donc une faible récupération; tandis qu'une lésion étroite laissera plus de régions disponibles pour la réorganisation des réseaux langagiers, entraînant une meilleure récupération (Kiran & Thompson, 2019).

Concernant la localisation de la lésion, parmi les régions associées à une mauvaise récupération du langage, on retrouve : les cortex frontal et temporo-pariétal, ainsi que les faisceaux de substance blanche sous-jacents (Harvey et al., 2022). Sul et al. (2019) ont montré qu'une atteinte du cortex rolandique, du gyrus de Heschl, de la *corona radiata* postérieure, du cortex supramarginal, du FLS, du GTS et de l'insula, était associée à une aphasie plus sévère un an après l'AVC. Dans une méta-analyse récente, Na et al. (2022) ont montré qu'il existe un lien entre la localisation de la lésion et l'atteinte des capacités de production et de compréhension du langage, en accord avec le modèle double voie de Hickok et Poeppel (2007). En effet, une atteinte au niveau du gyrus précentral, du

GTS et de l'insula, qui sont impliqués dans la voie dorsale, est associée à des troubles de production; tandis qu'une atteinte au niveau du GTS et du gyrus fusiforme, qui sont impliqués dans la voie ventrale, est associée à des troubles de la compréhension (Na et al., 2022).

En accord avec certaines études, il semble que la **sévérité de l'AVC** soit également un facteur associé à la récupération du langage, mais également à la présence d'aphasie. En effet, Pedersen et al. (2004) ont montré que la sévérité de l'aphasie et de l'AVC initialement étaient des prédicteurs de la récupération du langage : plus l'AVC et l'aphasie sont sévères, moins bonne est la récupération. D'autres auteurs, quant à eux, ont montré que l'AVC était significativement plus sévère chez les patients présentant une aphasie par rapport à ceux sans aphasie (Inatomi et al., 2008 ; Wilson, Eriksson, Brandt, et al., 2019).

Enfin, le **type d'aphasie** semble également jouer un rôle, en association avec d'autres facteurs tels que la taille et la localisation de la lésion (Kristinsson et al., 2022). De plus, Jung, Lim, Kang, Sohn, et Paik (2011) ont montré que le type d'aphasie est fortement lié à la sévérité de l'aphasie : la sévérité est plus importante pour les patients avec une aphasie non fluente. Le type d'aphasie est également associé à la récupération du langage avec une meilleure récupération pour les patients présentant une aphasie fluente par rapport à ceux atteints d'aphasie non fluente (Jung et al., 2011). Cependant, même si le type d'aphasie semble être un prédicteur de la récupération, l'effet des facteurs « confondants », tels que la taille et la localisation de la lésion et la sévérité de l'aphasie, doit être pris en compte (Kristinsson et al., 2022).

5.2.2 Facteurs individuels

Parmi les facteurs individuels, les **caractéristiques sociodémographiques** semblent jouer un rôle (pour des revues, voir Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Kristinsson et al., 2022 ; Wabila & Balarabe, 2015), avec une meilleure récupération pour : les participants jeunes, en lien avec la plasticité qui est plus importante chez les jeunes par rapport aux âgés (Boden-Albala, Litwak, Elkind, Rundek, & Sacco, 2005 ; Kiran & Thompson, 2019); les femmes, en lien avec la différence de spécialisation hémisphérique du langage entre hommes et femmes, avec une réduction de l'asymétrie inter-hémisphérique et une latéralisation atypique du langage chez les femmes (Labache et al., 2020 ; Tzourio-Mazoyer et al., 2017); et les gauchers, en lien avec la réduction de l'asymétrie inter-hémisphérique pour le langage chez les gauchers (Labache et al., 2020). En effet, une spécialisation

hémisphérique atypique pour le langage présenterait un avantage en termes de réorganisation et de récupération, avec une récupération meilleure et plus rapide chez les femmes et chez les gauchers, mais également pour les patients présentant une dominance hémisphérique atypique ou encore les patients avec une aphasie croisée (Cappa, 2008 ; Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Viader et al., 2010). Cependant, le rôle des facteurs démographiques (sexe, âge et préférence manuelle) ne semble pas systématiquement démontré (Ellis & Urban, 2016 ; Kristinsson et al., 2022 ; Wallentin, 2018). Concernant le niveau d'éducation, il semble jouer un rôle positif sur la récupération (*i.e.*, un plus haut niveau d'éducation est lié à une meilleure récupération). Cependant, il est possible que cet effet soit associé à la réserve cognitive, au niveau socio-économique ou encore au mode de vie (Cappa, 2008 ; Hillis & Tippett, 2014). Enfin, les facteurs psychosociaux, tels que l'état psychologique, la motivation (Bullier et al., 2020 ; Cappa, 2008 ; Sturm et al., 2004) et le soutien social ou familial (Boden-Albala et al., 2005 ; Chapey et al., 2000 ; Koenig-Bruhin, Kolonko, At, Annoni, & Hunziker, 2013), semblent jouer un rôle sur la récupération, avec également une influence sur la qualité de vie ou le degré de handicap. Cependant, comme le mentionne Kristinsson et al. (2022), d'autres facteurs peuvent influencer ces facteurs psychosociaux. Il est donc nécessaire de mieux définir ces facteurs afin de déterminer comment ils influencent indépendamment la récupération du langage.

Enfin, concernant les **facteurs cliniques**, il semble que les capacités cognitives modulent la récupération du langage. Plus spécifiquement, la mémoire à court terme (verbale et non verbale), la mémoire de travail, l'attention et les capacités de raisonnement ont un impact sur la récupération du langage (Bonini & Radanovic, 2015 ; Dignam et al., 2017). De plus, Glize et al. (2017) ont montré que les compétences phonologiques, telles que les performances en répétition, permettaient de prédire la récupération du langage à trois mois post-AVC.

5.2.3 Facteurs rééducation-dépendants

Dans une méta-analyse, il a été montré que la rééducation orthophonique permettait une amélioration de la production du langage, de la compréhension et des capacités de communication « fonctionnelle », par rapport à aucune rééducation (Brady et al., 2016). Ces auteurs ont également montré le rôle important de l'intensité de la rééducation : une rééducation intensive (plusieurs heures sur une courte période) permet une meilleure amélioration des capacités de communication qu'une rééducation peu intensive, en lien avec les mécanismes de neuroplasticité

(voir Dignam, Rodriguez, & Copland, 2016 ; Kiran & Thompson, 2019 ; Stefaniak et al., 2020). Dans une autre étude, Brady et al. (2022b) ont montré qu'une meilleure récupération était associée à une rééducation fréquente, adaptée au patient et basée sur la production et la compréhension avec des exercices à domicile.

Résumé 1.5 : Récupération dans l'aphasie post-AVC

- La récupération du langage après un AVC dépend de la phase dans laquelle le patient se trouve (aiguë, subaiguë ou chronique) et elle est associée à différentes modifications cérébrales.
- La récupération du langage implique les deux hémisphères, avec une réactivation de l'HG entre les phases aiguë et chronique et une activation de l'HD plus importante dans les phases précoces et qui diminue en phase chronique.
- L'implication de l'HD est considérée comme bénéfique selon certaines études (recrutement lorsque les régions gauches sont indisponibles) et délétère selon d'autres études (en lien avec l'inhibition exercée par l'HD sur l'HG).
- La récupération du langage dépend de facteurs neurophysiologiques, individuels (sociodémographiques et cliniques) et associés à la lésion ou à la rééducation.

6 Problématique et objectifs

Dans cette revue de littérature, nous avons présenté les bases théoriques de la production de la parole au niveau linguistique et cérébral. Puis, nous avons présenté les conséquences qu'une pathologie du langage, l'aphasie, peut avoir et la façon dont elle est prise en charge. Cette prise en charge vise à permettre aux patients de retrouver leurs capacités de communication, de production et de compréhension du langage. Cette récupération du langage est associée à une réorganisation au niveau cérébral. Cependant, il existe une grande variabilité en termes de sévérité initiale des troubles langagiers et de leur récupération ultérieure.

Ainsi, une meilleure compréhension des déterminants de l'aphasie nous paraît essentielle, pour mieux comprendre les profils de réorganisation anatomo-fonctionnelle du langage dans le contexte de la plasticité spontanée ou induite par la rééducation. En effet, la mise en place précoce de la rééducation des troubles du langage est essentielle pour faciliter la mise en œuvre des mécanismes de compensation et de restructuration cérébrale efficace des réseaux langagiers. Cependant, malgré son effet bénéfique durant les premiers mois suivant l'AVC, l'efficacité de

la rééducation orthophonique classique atteint un plateau après quelques mois. Il nous paraît donc important de compléter les méthodes de rééducation orthophonique classique avec des nouvelles méthodes fondées sur des hypothèses théoriques solides et des modèles théoriques actuels, afin de permettre une récupération du langage, même en phase chronique.

Nous nous plaçons donc dans le cadre des modèles théoriques récents qui postulent que le contrôle de la production du langage met en jeu des processus perceptifs multisensoriels. Ainsi, selon notre hypothèse générale, ces mécanismes multisensoriels, mettant en œuvre des représentations auditives, visuelles et somatosensorielles, pourraient contribuer à la réorganisation des réseaux langagiers et à la compensation des déficits de planification et programmation motrices qui peuvent être observés dans l'aphasie suite à un AVC. Afin de répondre à notre objectif, nous poursuivons une double démarche, en effectuant : (i) une partie observationnelle afin de définir les déterminants de l'aphasie (sa sévérité initiale et sa récupération) et (ii) une partie interventionnelle afin de proposer et d'évaluer un nouveau programme de rééducation renforcée de la parole.

Dans la première partie de la thèse, nous nous intéresserons à l'impact de différents facteurs sur la sévérité de l'aphasie mais également sa récupération. Nous identifierons **les déterminants sociaux, comportementaux et cérébraux de la sévérité initiale de l'aphasie et de la récupération du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC.**

Malgré le nombre important d'études visant à identifier les facteurs sociodémographiques, cliniques, associés à la lésion ou à la rééducation qui sont des prédicteurs de la récupération du langage dans l'aphasie post-AVC, aucune n'a permis d'identifier de façon robuste ces déterminants (Kristinsson et al., 2022). Or, leur connaissance est essentielle afin de donner aux cliniciens les facteurs à prendre en compte afin de déterminer quels patients auront une meilleure récupération. Par ailleurs, il existe un lien étroit entre la sévérité initiale de l'aphasie et la récupération du langage et de la parole. En effet, la sévérité de l'aphasie est le meilleur prédicteur de la récupération. Cependant, peu d'études se sont intéressées aux facteurs déterminants de la sévérité de l'aphasie elle-même. Or, la connaissance de ces facteurs est nécessaire pour adapter la rééducation aux patients, afin de permettre la meilleure récupération possible.

Ainsi, dans cette première partie, nous présenterons deux études : la première concernant l'influence des facteurs sociodémographiques, cliniques et associés à la lésion, sur la sévérité initiale de l'aphasie, et la seconde sur l'influence de ces mêmes facteurs ainsi que des facteurs associés à la

rééducation sur la récupération du langage et de la parole. Pour cela, nous avons réalisé une étude sur une cohorte de patients ayant eu un AVC et présentant une lésion au niveau de l'hémisphère gauche, avec ou sans aphasie, et qui ont été évalués dès le début de leur pathologie et suivis durant les premiers mois après l'AVC, plus précisément durant la phase subaiguë. Nous supposons qu'une meilleure connaissance des facteurs prédictifs de la sévérité de l'aphasie et de la récupération du langage pourrait nous permettre de choisir le type de méthode de rééducation, ainsi que sa durée et son intensité, afin de garantir la meilleure récupération possible (Doogan, Dignam, Copland, & Leff, 2018). En effet, la mise en place de la rééducation est fondamentale pour faciliter la mise en œuvre des mécanismes de compensation et la restructuration cérébrale efficace des réseaux langagiers. Ceci nous conduit donc à la seconde partie de cette thèse qui a une visée clinique.

Lors du choix de la méthode de rééducation, nous savons que la rééducation orthophonique classique, malgré ses effets favorables indéniables sur la récupération du langage durant les premiers mois post-AVC, présente des limites en termes d'efficacité après quelques mois (El Hachioui et al., 2013). Le type de rééducation ainsi que son intensité et sa durée peuvent jouer un rôle dans la récupération (Brady et al., 2022b, 2016). En nous appuyant sur notre hypothèse que la planification et la programmation motrices déficitaires lors de l'aphasie pourraient être étayées par des mécanismes perceptifs multisensoriels (auditifs, visuels et somatosensoriels), nous évaluons une nouvelle méthode de rééducation ciblant l'interaction sensorimotrice en utilisant un logiciel d'illustration visuelle de la dynamique articulatoire (*Ultraspeech-player*; Hueber, 2013). Cette méthode se base sur l'observation et l'exécution de mouvements articulatoires habituellement non visibles. En effet, le logiciel permet de visualiser les mouvements de la langue (vue sagittale) et des lèvres (vue frontale), pré-enregistrés chez un locuteur standard, lors de la production de consonnes et voyelles. Ainsi, les patients ont accès aux informations auditives (sons produits par le locuteur standard et retour sur leurs propres productions), visuelles (visualisation des mouvements de la langue et/ou des lèvres du locuteur standard) et somatosensorielles (sensations ressenties par les patients de leurs propres mouvements articulatoires).

Dans la seconde partie de la thèse, nous examinerons donc **l'effet au niveau langagier, cognitif et cérébral d'une nouvelle méthode de rééducation du langage, fondée sur des représentations phonologiques multisensorielles augmentées**. Pour cela, nous avons évalué l'efficacité et la faisabilité d'une rééducation renforcée (comprenant la rééducation orthophonique classique associée à

l'utilisation du logiciel *Ultraspeech-player*) puis nous avons comparé l'efficacité de cette rééducation renforcée à celle de la rééducation orthophonique classique seule, en proposant un nouveau protocole expérimental. L'efficacité de ce nouveau programme de rééducation a été évaluée de façon multimodale aux niveaux langagier (bilan orthophonique, évaluation des productions de parole avec le pourcentage de productions correctes et une analyse des erreurs), cognitif (bilan neuropsychologique), acoustique (mesure de paramètres acoustiques pour les voyelles et les consonnes) et cérébral (IRMf de tâche et de repos).

Enfin, dans la dernière partie de la thèse, nous discuterons des enjeux théoriques et cliniques de ces travaux.

Problématique

1. Quels sont les déterminants sociaux, comportementaux et cérébraux de la sévérité initiale de l'aphasie et de la récupération du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC?
2. Quel est l'effet sur les plans langagier, cognitif et cérébral d'une nouvelle méthode de rééducation de la production de parole, fondée sur des représentations phonologiques multisensorielles augmentées, dans le cadre de l'aphasie non fluente post-AVC?



CHAPITRE 2

Les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie post-AVC

Table des Matières

1	Méthode	61
1.1	<i>Design</i> de l'étude et participants	61
1.2	Mesure principale : sévérité initiale de l'aphasie	62
1.3	Facteurs à l'étude	63
1.3.1	Facteurs sociodémographiques	63
1.3.2	Facteurs cliniques	63
1.3.3	Facteurs lésion-dépendants	65
1.4	Analyses statistiques	67
1.5	Analyses <i>Voxel-based Symptom Mapping</i>	68
2	Résultats	69
2.1	Participants	69
2.2	Déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie	71
2.3	Déterminants lésionnels de la sévérité initiale de l'aphasie	76
3	Discussion	79

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1 (Section 5.2), la récupération du langage peut être influencée par différents facteurs (pour des revues, voir Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Kiran & Thompson, 2019 ; Kristinsson et al., 2022 ; Wтила & Balarabe, 2015), tels que les mécanismes neurophysiologiques (degré de plasticité neuronale, en lien avec la capacité de réserve cognitive), les facteurs sociodémographiques (sexe, âge, préférence manuelle, niveau d'éducation, statut socio-professionnel, interactions sociales) et cliniques (performances langagières et plus largement cognitives), ainsi que des facteurs associés à la lésion cérébrale (type et sévérité de l'AVC, taille et localisation de la lésion, type et sévérité de l'aphasie) et à la rééducation orthophonique (durée, intensité, type de rééducation).

La sévérité initiale de l'aphasie est décrite comme le meilleur prédicteur de la récupération du langage (Lahiri, Dubey, Ardila, Sanyal, & Ray, 2021). En effet, des études ont montré qu'une aphasie sévère initialement est associée à une mauvaise récupération du langage (*e.g.*, Lahiri, Dubey, Ardila, Sanyal, & Ray, 2021 ; Lazar et al., 2010 ; Ramsey et al., 2017). Cependant, certaines études se sont intéressées au « gain » (en termes de performances langagières) suite à la rééducation et des auteurs ont montré un gain plus élevé chez les patients présentant une aphasie sévère initialement (J. B. Lee et al., 2009 ; Osa García et al., 2020 ; Robey, 1998). Ceci peut s'expliquer par une marge d'amélioration possible plus importante chez les patients avec une aphasie sévère, tandis que ceux avec une aphasie modérée ont une marge d'amélioration moindre.

Connaissant le lien étroit qui existe entre la sévérité initiale de l'aphasie et la récupération du langage, quelques études se sont intéressées aux déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie elle-même (*e.g.*, Døli, Andersen Helland, Helland, & Specht, 2021 ; Forkel & Catani, 2018 ; Kim et al., 2021 ; Lahiri, Dubey, Ardila, & Ray, 2021 ; J.-K. Lee, Ko, Park, & Kim, 2021). Dans une étude récente, Lahiri, Dubey, Ardila, et Ray (2021) ont montré que la taille de la lésion, le type d'AVC et le type d'aphasie sont des prédicteurs de la sévérité initiale de l'aphasie (évaluée entre 3 et 7 jours post-AVC). Selon les auteurs, une lésion large et une aphasie non fluente suite à un AVC hémorragique sont associées à une aphasie plus sévère initialement.

Parmi les déterminants de la sévérité de l'aphasie ou plus généralement des performances du langage, d'autres études ont évalué l'influence de la localisation de la lésion (*e.g.*, Døli et al., 2021 ; Dronkers, Wilkins, Van Valin, Redfern, & Jaeger, 2004 ; Fridriksson, Guo, Fillmore, Holland, & Rorden, 2013 ; Mirman et al., 2015 ; Park, Kim, Nam, Choi, & Kim, 2021 ; Schwartz, Faseyitan,

Kim, & Coslett, 2012). Pour étudier le lien entre la localisation de la lésion et un « comportement », les études se basent sur les analyses de type *Voxel-based Lesion-Symptom Mapping* (VLSM). Plus spécifiquement, dans ces analyses VLSM, pour chaque voxel, les patients sont divisés en deux groupes selon qu'ils présentent ou non une lésion sur ce voxel. Une analyse statistique permet d'effectuer une comparaison entre les scores comportementaux pour les deux groupes au niveau du voxel. Cette procédure sera ensuite répétée pour chaque voxel lésé chez un ou plusieurs patients. Bates et al. (2003) ont été les premiers à utiliser des statistiques paramétriques et à réaliser des analyses VLSM pour relier la localisation des lésions et des troubles comportementaux spécifiques. Ils ont montré, chez des patients présentant une lésion au niveau de l'hémisphère gauche, qu'une atteinte au niveau de l'insula et du FA était associée à des déficits en fluence verbale ; tandis qu'une atteinte au niveau du GTM, du cortex pré-frontal dorso-latéral et du cortex pariétal associatif est associée à des troubles de la compréhension orale (Bates et al., 2003). Des études récentes ont montré que la taille et la localisation de la lésion sont associées à la sévérité initiale de l'aphasie mesurée à 7 jours post-AVC (Døli et al., 2023, 2021). Plus spécifiquement, Døli et al. (2021) ont montré qu'une lésion au niveau de l'insula, du gyrus frontal inférieur *pars opercularis* et *pars triangularis* (GFI-op, GFI-tri), du GTS et du gyrus de Heschl est associée à une aphasie plus sévère initialement, avec des troubles en répétition, dénomination et lecture à haute voix.

Des études se sont également intéressées au lien entre la sévérité des troubles du langage et les atteintes des faisceaux de substance blanche : une interruption de ces réseaux joue un rôle dans l'aphasie (e.g., voir Basilakos et al., 2014 ; Bates et al., 2003 ; Forkel & Catani, 2018 ; Fridriksson et al., 2013 ; Geller et al., 2019 ; Kim et al., 2021 ; Marchina et al., 2011). Ainsi, selon certains auteurs, l'intégrité du FU, de l'IFOE, du faisceau frontal oblique (noté FAT, pour *frontal aslant tract*), du FA, du FLS, du corps calleux, de la *corona radiata* aux niveaux frontal et temporal est associée à la sévérité initiale de l'aphasie (Forkel & Catani, 2018 ; Kim et al., 2021 ; Zavanone et al., 2018). Cependant, plutôt que de s'intéresser à la proportion des faisceaux endommagés, certaines études ont proposé d'évaluer la déconnexion des faisceaux (Billot et al., 2022 ; Hope, Seghier, Prejawa, Leff, & Price, 2016). L'intérêt d'utiliser les probabilités de déconnexion dans les analyses *Voxel-based Disconnectome-Symptom Mapping* (VDSM) a été soulevé par Billot et al. (2022). Ils ont montré que les troubles en compréhension, répétition et traitement syntaxique sont associés à une déconnexion dans les zones superposées à la lésion et au-delà de la lésion, tandis que les troubles des capacités

linguistiques globales (sévérité de l'aphasie et dénomination) s'expliquent par une atteinte focale. Ainsi, les probabilités de déconnexion donnent une information supplémentaire pour expliquer les troubles observés dans l'aphasie (Billot et al., 2022).

En comparaison aux nombreuses études s'intéressant aux déterminants de la récupération du langage (*e.g.*, Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Harvey et al., 2022 ; Lahiri, Dubey, Ardila, Sanyal, & Ray, 2021 ; Plowman et al., 2012 ; Watila & Balarabe, 2015) et connaissant le lien entre la sévérité initiale de l'aphasie et la récupération du langage, peu d'études se sont intéressées directement aux déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie elle-même, comme l'ont souligné Lahiri, Dubey, Ardila, et Ray (2021). Par ailleurs, en supposant que la récupération du langage soit fortement associée à la sévérité initiale de l'aphasie, comme le mentionnent certaines études évoquées précédemment, nous proposons qu'il existe des facteurs indirects qui sont associés à la sévérité initiale de l'aphasie et influencent donc la récupération du langage. Ainsi, il semble nécessaire d'identifier les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie, étant donné l'intérêt que cela représente pour déterminer le pronostic à long-terme et pour adapter le programme de rééducation afin de favoriser la récupération en fonction de la sévérité des troubles du patient (Fridriksson & Hillis, 2021 ; Lahiri, Dubey, Ardila, & Ray, 2021).

L'objectif de ce chapitre est donc d'identifier, parmi des facteurs sociodémographiques, cliniques et associés à la lésion, lesquels influencent, de manière conjointe, la sévérité initiale de l'aphasie. En effet, nous savons que tester l'effet des facteurs déterminants de manière isolée (un facteur à la fois) est moins pertinent que d'utiliser des données multimodales (Pustina et al., 2017), c'est pourquoi nous évaluerons les facteurs de façon conjointe (à l'exception de la localisation de la lésion). Ceci nous permettra de considérer la pathologie dans toute sa complexité en combinant différentes informations afin de tirer des conclusions plus robustes concernant les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie (Lai et al., 2021 ; Pustina et al., 2017).

Pour répondre à notre objectif, nous avons donc réalisé une étude observationnelle rétrospective sur une cohorte de 96 patients présentant une lésion gauche post-AVC, avec ou sans aphasie. Nous avons évalué l'impact des facteurs sociodémographiques, cliniques et associés à la lésion (nommés « lésion-dépendants ») sur la sévérité initiale de l'aphasie. La sévérité de l'aphasie a été mesurée par l'échelle d'évaluation de la sévérité de l'aphasie (*Aphasia Severity Rating Scale*, ASRS, issue du *Boston Diagnostic Aphasia Examination*, BDAE; Goodglass & Kaplan, 1983 ; Mazaux &

Orgogozo, 1981). Des analyses statistiques univariées et multivariées nous ont permis d'évaluer les facteurs associés conjointement à la sévérité initiale de l'aphasie. Parmi les facteurs lésion-dépendants, nous avons évalué séparément la relation entre les structures cérébrales endommagées et la sévérité initiale de l'aphasie, à l'aide d'analyses de type « *Voxel-based Symptom Mapping* ». Ces analyses nous ont permis d'évaluer le lien entre la sévérité initiale de l'aphasie et les structures lésées (VLSM) puis entre la sévérité initiale de l'aphasie et les probabilités de déconnexion des faisceaux de substance blanche (VDSM).

Article

Les données présentées dans ce chapitre sont issues, en partie, d'un article en préparation : Haldin et al. (in prep) (Annexe E).

Haldin, C., Dai, S., Piscicelli, C., Marcon, V., Lœvenbruck, H., Pérennou, D., & Baciou, M. (in prep). *Multifactorial interplay on language recovery after left-hemispheric stroke. A retrospective study.*

1 Méthode

1.1 Design de l'étude et participants

L'étude que nous présentons ici est une étude observationnelle rétrospective monocentrique, dans laquelle nous avons inclus des patients qui ont été admis dans le service de rééducation neurologique du CHU Grenoble Alpes, suite à un AVC survenu entre janvier 2012 et octobre 2019. Ces patients ont été évalués deux fois : initialement, dans les deux premiers mois suivant leur AVC (« évaluation initiale », EI) et à la sortie du service de rééducation (« évaluation finale », EF).

Les patients inclus dans l'étude répondaient aux critères d'inclusion suivants : âgés de 18 à 80 ans et ayant eu un AVC au niveau de l'hémisphère gauche (confirmé par les images IRM). Les critères d'exclusion étaient les suivants : patients âgés de plus de 80 ans; AVC récurrent; complications durant la phase aiguë; démence; conditions médicales instables ou troubles psychiatriques; incapacité à parler français; données IRM non disponibles; pas d'évaluation initiale du langage ou une évaluation effectuée après 60 jours post-AVC. Ces informations ont été obtenues à partir du fichier électronique de l'hôpital décrivant l'historique de chaque patient, en interrogeant les patients et leurs proches, et par les comptes rendus des examens cliniques. Tous les patients éligibles

ont été informés (oralement et par écrit) que leurs données seraient utilisées pour la recherche et ceux qui ont refusé de participer ont signé un formulaire d'objection ¹.

Ainsi, la cohorte de patients que nous considérons dans cette étude est constituée de 96 patients ayant eu un AVC au niveau de l'hémisphère gauche et ayant eu une évaluation initiale dans les deux premiers mois suivant leur admission à l'hôpital (voir Figure 2.1). Parmi ces patients : 72 présentent une aphasie (Aph) et 24 ne présentent pas d'aphasie (N-Aph).

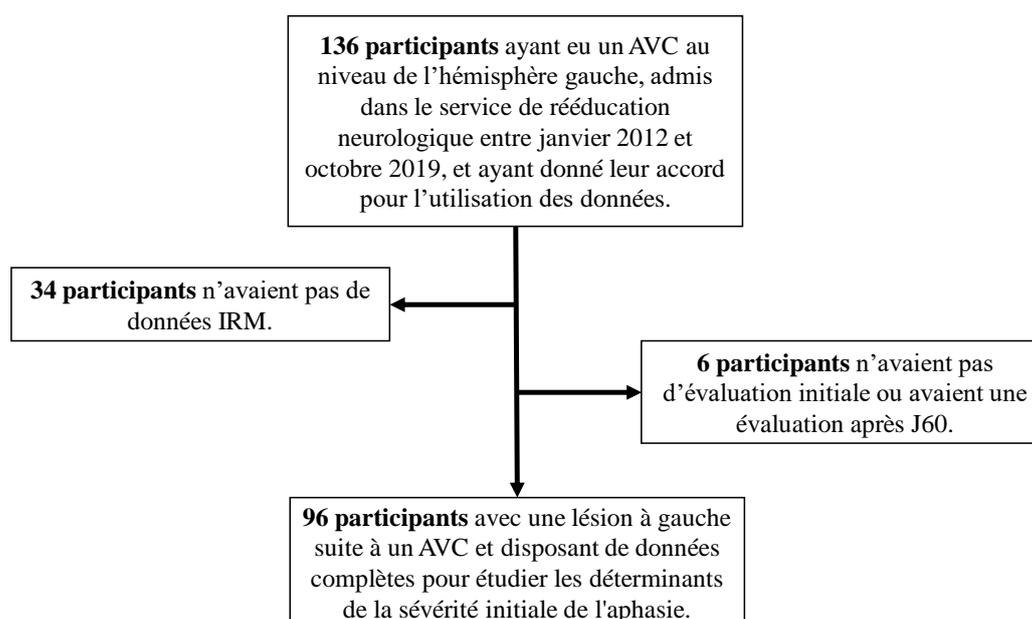


FIGURE 2.1 – Participants inclus dans l'étude sur les déterminants de la sévérité de l'aphasie.

1.2 Mesure principale : sévérité initiale de l'aphasie

La sévérité initiale de l'aphasie a été évaluée à l'aide de l'échelle d'évaluation de la sévérité de l'aphasie (ASRS, issue du BDAE ; Goodglass & Kaplan, 1983 ; Mazaux & Orgogozo, 1981). Ce score est compris entre 0 et 5. Un score de 0 correspond à « aucune expression intelligible et aucune compréhension orale », 1 correspond à une « expression très fragmentée », 2 à une « conversation sur des sujets familiers et concrets possible avec l'aide de l'auditeur », 3 à une « conversation sur certains sujets difficile ou impossible », 4 à une « diminution de la fluence verbale ou de la

1. Notons que, selon la loi française, les études observationnelles rétrospectives ne nécessitent pas l'approbation d'un comité d'éthique, tant que les participants ont été informés de l'objectif de la recherche et ne s'opposent pas à l'utilisation de leurs données.

facilité et de la rapidité de compréhension » et 5 à un « handicap linguistique à peine perceptible ». L'évaluation de la sévérité initiale a été effectuée lors de l'EI.

Parmi les patients atteints d'aphasie, sur la base de ce score de sévérité, nous avons constitué deux groupes : les patients avec une aphasie sévère ($ASRS_{EI} \leq 2$) et les patients avec une aphasie légère ou modérée ($ASRS_{EI} \geq 3$). Un groupe supplémentaire comprend les patients présentant une lésion gauche sans aphasie.

1.3 Facteurs à l'étude

Dans cette étude, nous avons considéré trois types de facteurs : sociodémographiques, cliniques et lésion-dépendants. Pour chacun des facteurs, les informations ont été récupérées à partir des bilans orthophonique et neuropsychologique, de l'examen ou de l'entretien avec le patient et des données de neuroimagerie. Ces informations ont été mesurées ou récupérées lors de l'EI. Les évaluations du langage ont été réalisées par des orthophonistes et les évaluations neuropsychologiques ont été réalisées par des neuropsychologues.

1.3.1 Facteurs sociodémographiques

Les facteurs sociodémographiques ont été déterminés durant l'examen ou l'entretien avec le patient. Parmi les facteurs démographiques, nous avons récupéré : l'**âge**, le **sexe** (homme ou femme) et la **préférence manuelle** (droitier ou gaucher) mesurée par la version française du test d'Edinburgh (Oldfield, 1971).

Nous avons également récupéré des facteurs « sociaux », tels que : le **niveau d'éducation** (0 pour un niveau inférieur ou égal au baccalauréat et 1 pour supérieur), le **statut professionnel** (0 pour retraité ou sans emploi et 1 pour les patients ayant un emploi) et le **niveau d'isolement** du patient. Le niveau d'isolement a été évalué à l'aide de deux items : le patient vit seul (0 pour non, 1 pour oui) et la présence de l'entourage (0 pour aucun ou un faible entourage et 1 pour une forte présence de l'entourage).

1.3.2 Facteurs cliniques

Les facteurs cliniques comprennent : le handicap général, la faiblesse musculaire, les troubles dépressifs, les compétences langagières et cognitives (fonctions exécutives, apraxie des membres supérieurs et négligence spatiale) et le délai entre l'évaluation de la sévérité de l'aphasie (à l'EI)

et la survenue de l'AVC. Ces facteurs ont été mesurés lors de l'EI durant les bilans orthophonique ou neuropsychologique.

Le **handicap général** après l'AVC a été évalué à l'aide de l'échelle de Rankin modifiée (mRS; van Swieten, Koudstaal, Visser, Schouten, & van Gijn, 1988). Le score va de 0 (aucun symptôme) à 6 (décédé). Un score de 1 indique « l'absence de handicap significatif », 2 correspond à un « handicap léger », 3 à un « handicap modéré », 4 à un « handicap modéré à sévère » et 5 à un « handicap sévère ». Les patients ont été divisés en deux groupes (*cut-off* à 2) : aucun handicap ou handicap léger (0) et handicap sévère ou modéré (1).

La **faiblesse musculaire** des membres supérieurs et inférieurs a été évaluée par un examen standard de la force musculaire (Benaim, Pérennou, Villy, Rousseaux, & Pelissier, 1999 ; Pérennou, Amblard, Leblond, & Pélissier, 1998). Le score varie entre 0 et 80. Un score supérieur à 64 suggère une faiblesse légère, un score entre 32 et 64 suggère une faiblesse modérée, et un score inférieur à 32 suggère une faiblesse sévère. Les patients ont été classés en fonction de la faiblesse musculaire de la façon suivante : sans ou légère (0) et modérée ou sévère (1).

Les **troubles dépressifs** ont été évalués à l'aide de l'*Aphasia Depression Rating Scale* (ADRS; Benaim, Cailly, Pérennou, & Pelissier, 2004). Le score varie de 0 à 32 et un score plus élevé est associé à davantage de symptômes dépressifs (*cut-off* à 9).

Les capacités de **dénomination** ont été évaluées, pour les patients atteints d'aphasie uniquement, durant du bilan orthophonique lors de l'EI et l'EF. Les capacités de dénomination ont été évaluées à l'aide du test de dénomination d'images du BDAE (Mazaux & Orgogozo, 1981) ou d'une tâche de dénomination d'images (DO80; Deloche & Hannequin, 1997). Le score de dénomination est représenté en pourcentage de réponses correctes lors de la réalisation de la tâche. Dans cette étude, nous ne considérerons que le score obtenu lors de l'EI, nommé « Dénomination-EI ».

Le **dysfonctionnement exécutif** a été évalué à l'aide de plusieurs tests évaluant les processus exécutifs : le *Trail Making Test* (Reitan & Wolfson, 1985), le test de Stroop (Stroop, 1935), le *Wisconsin Card Sorting Test* (Grant & Berg, 1948), la fluence verbale, l'empan de chiffre et le test de Code (Wechsler, 2008), la tour de Hanoï ou de Londres (Shallice, 1982 ; Simon, 1975), et/ou la figure complexe de Rey (Rey & Osterrieth, 1993). Sur la base des résultats obtenus lors de ces tests, les neuropsychologues ont réalisé une échelle permettant d'évaluer le dysfonctionnement exécutif. Le

score varie de 0 (aucun trouble) à 3 (troubles exécutifs sévères). Les patients ont ensuite été regroupés selon leur dysfonctionnement exécutif (*cut-off* à 1) : aucun ou léger (0) et modéré ou sévère (1).

L'**apraxie des membres supérieurs** a été évaluée avec l'*Apraxia Screen of TULIA* (AST; Vanbelingen et al., 2011). Le score varie de 0 à 12 et un score faible indique la présence d'une apraxie. Les patients ont ensuite été divisés en deux groupes (*cut-off* à 9) : aucune apraxie ou apraxie légère (0) et apraxie modérée ou sévère (1).

La **négligence spatiale** a été évaluée par le biais d'une batterie de plusieurs tests évaluant la négligence spatiale du corps ou non : l'Echelle Catherine Bergego, la recherche du pouce, le test du peigne et du rasoir, le test de Fluff et le test des cloches, la bissection des lignes, la copie d'un paysage et la lecture de texte (Azouvi et al., 2006 ; Beis et al., 2004 ; Rode, Pagliari, Huchon, Rossetti, & Pisella, 2017). La négligence spatiale était considérée comme : absente ou légère si tous les résultats des tests étaient normaux ou si le résultat d'un seul test montrait une altération légère ; sévère si les résultats d'au moins deux tests montraient une altération importante ; et modérée dans les autres cas. Ainsi, nous avons distingué les patients sans négligence spatiale ou avec une négligence spatiale légère (0) et ceux avec une négligence spatiale modérée ou sévère (1).

Enfin, nous avons évalué la durée entre l'évaluation initiale de la sévérité de l'aphasie et la survenue de l'AVC. Ce facteur, exprimé en jours post-AVC, est nommé « **Délai sévérité-EI** ».

1.3.3 Facteurs lésion-dépendants

Parmi les facteurs associés à la lésion, la **sévérité de l'AVC** a été mesurée par le *National Institutes of Health Stroke Scale* (NIHSS² ; Brott et al., 1989) 24 heures après l'AVC. Ce score est compris entre 0 et 42, un score élevé indiquant un AVC plus sévère. Le **type d'AVC** (ischémique ou hémorragique) a également été déterminé.

Pour les patients atteints d'aphasie uniquement, le **type d'aphasie** a été déterminé sur la base des conclusions du bilan orthophonique initial. Les patients ont été séparés en deux groupes : aphasie fluente (*i.e.*, aphasie de Wernicke, transcorticale sensorielle, de conduction, anomique ou sous-corticale) ou non fluente (*i.e.*, aphasie de Broca, transcorticale motrice ou globale).

2. Le NIHSS permet d'évaluer le niveau de conscience, les mouvements extra-oculaires et le champ de vision, le fonctionnement des muscles faciaux, la motricité des membres supérieurs et inférieurs, le fonctionnement sensoriel, la coordination, le langage, le discours et la négligence. Un score inférieur à 5 correspond à des déficits neurologiques légers, de 5 à 15 à des déficits modérés, de 16 à 20 à des déficits modérés à sévères et supérieur à 20 à des déficits sévères.

Sur la base des données de neuroimagerie, nous avons extrait des informations concernant les hyperintensités de la substance blanche³ (*White Matter Hyperintensities*, WMHs) ainsi que la taille et la localisation de la lésion.

Des examens IRM de contrôles ont été réalisés chez les patients dans les deux premiers mois suivant l'AVC à l'aide de l'imageur 1,5T (Magnetom Aera MR, Siemens) du CHU Grenoble Alpes. Une séquence d'acquisition GRE (*Gradient Recalled Echo*) pondérée en T1 a été utilisée. Cent-soixante coupes adjacentes, parallèles au plan bi-commissural, ont été acquises. La taille des voxels était de $0,9 \times 0,9 \times 0,9$ mm, le TR de 1,9 s, le TE de 3,67 ms et l'angle de bascule de 15°. Des images T2-FLAIR (*Fluid Attenuated Inversion Recovery*) ont également été acquises avec 30 coupes, une taille de voxels de $0,7 \times 0,7 \times 4$ mm, un TR de 9 s, un TE de 74 ms.

Les **WMHs** ont été évaluées lors de l'EI à l'aide de l'échelle de Fazekas (Fazekas, Chawluk, Alavi, Hurtig, & Zimmerman, 1987), basée sur l'analyse des séquences T2-FLAIR des IRM des patients. Deux examinateurs indépendants formés ont examiné l'absence, la présence et la sévérité des WMHs. En cas de désaccord, les différences ont été résolues par consensus. Le score de Fazekas va de 0 (aucune lésion) à 3. Les WMHs légères (score de 1) sont associées à des lésions focales; les WMHs modérées (score de 2) sont définies par des lésions confluentes précoces; les WMHs sévères (score de 3) sont définies par une implication étendue avec de larges zones confluentes. Les patients ont ensuite été classés comme ayant : des WMHs légères ou aucune WMH (0) ou des WMHs modérées ou sévères (1).

Concernant la **taille et la localisation de la lésion**, les lésions ont été reconstruites à l'aide du logiciel MRICron (Rorden, 2019) à partir de coupes axiales des IRMs des patients (coupes axiales parallèles au plan bicommissural, T2-FLAIR, 4 mm d'épaisseur). Les lésions ont été dessinées manuellement, par un examinateur formé, sur les coupes axiales d'un modèle anatomique standard d'IRM pondéré en T1 de l'Institut neurologique de Montréal (*Montreal Neurological Institute*, MNI) fourni dans le logiciel MRICron (ch2, www.bic.mni.mcgill.ca/ServicesAtlases/Colin27). La délimitation des lésions a été contrôlée par un second examinateur formé et les différences ont été résolues par consensus. Ainsi, nous obtenons un « masque » de la lésion de chaque participant, ce qui nous a permis de récupérer la taille de la lésion (en nombre de voxels).

3. Les hyperintensités de la substance blanche sont des zones au niveau desquelles le signal est plus intense que celui de la substance blanche environnante sur une séquence T2-FLAIR (*Fluid Attenuated Inversion Recovery*).

Des cartes de déconnexion (*disconnectome*) ont été réalisées à l'aide de l'outil « *disconnectome map* » intégré dans le logiciel BCBToolkit (Foulon et al., 2018). Ces cartes fournissent une estimation indirecte du degré de déconnexion structurelle au niveau de chaque voxel. Afin de réaliser ces cartes de déconnexion, la première étape consiste à identifier les fibres de substance blanche qui passent par la lésion de chaque patient en comparant à un jeu de données d'imagerie de diffusion de participants sains contrôles (Thiebaut de Schotten et al., 2017). Pour chaque patient, le masque de la lésion dans l'espace MNI a été utilisé pour suivre les fibres de substance blanche des participants sains contrôles passant par la lésion. Ceci permet ensuite d'obtenir une carte de pourcentage de chevauchement qui est produite à partir du calcul, pour chaque voxel de l'espace MNI, de la proportion de participants contrôles dont le faisceau traverse la zone lésée. Ainsi, dans la carte de déconnexion qui en résulte, la valeur de chaque voxel tient compte de la variabilité inter-individuelle de la reconstruction du faisceau dans le jeu de données des participants sains contrôles et indique la probabilité de déconnexion, comprise entre 0% et 100%, pour une lésion donnée (Thiebaut de Schotten et al., 2015). Cette probabilité de déconnexion représente donc la probabilité de suivre, à l'échelle du voxel, une fibre de substance blanche des participants contrôles qui entre dans la zone lésée lorsqu'on superpose la carte de la lésion du patient. Chaque carte comprend donc : les faisceaux de substance blanche qui chevauchent la zone lésée (*i.e.*, les faisceaux atteints) et la partie des faisceaux qui s'étend au-delà de la zone lésée (*i.e.*, les faisceaux apparemment épargnés) (Billot et al., 2022).

Les cartes de « superposition » des lésions et des déconnexions ont été réalisées en superposant les masques des lésions ou les cartes de probabilités de déconnexion de tous les patients sur un cerveau modèle (mni152, www.bic.mni.mcgill.ca/ServicesAtlases/ICBM152NLin2009) à l'aide du logiciel MRICroGL (Rorden, 2022).

1.4 Analyses statistiques

Dans cette étude, nous avons évalué les facteurs associés conjointement à la sévérité initiale de l'aphasie post-AVC. Nous avons d'abord réalisé des analyses statistiques univariées pour évaluer la différence entre les groupes au niveau des différents facteurs mesurés (sociodémographiques, cliniques et lésion-dépendants, à l'exception de la localisation de la lésion). Pour cela, nous avons comparé les trois groupes de patients (aphasie sévère, modérée/légère et sans

aphasie) en utilisant des tests omnibus (*Kruskal-Wallis* ou χ^2) avec un seuil de significativité de 0,05. Lorsque les résultats étaient significatifs, nous avons évalué la différence entre chacun des groupes à l'aide d'un test *U* de *Mann-Whitney* ou d'un test du χ^2 . Des tests statistiques bilatéraux (*two-tailed*) ont été effectués et la p-valeur a été ajustée en utilisant la correction de Bonferroni ($p_{\text{corrigé}} = p \times \text{nombre de tests statistiques réalisés pour la variable indépendante d'intérêt}$). Le seuil de significativité est fixé à 0,05.

Les variables jugées significatives dans les analyses univariées ont ensuite été incluses pas-à-pas dans une analyse de régression logistique ordinaire multivariée⁴, couplée avec du *bootstrap*⁵ (ré-échantillonnage avec 1000 répliques), afin d'explorer davantage l'association de ces différents facteurs avec la sévérité initiale de l'aphasie. Les résultats du *bootstrap* nous fournissent différentes valeurs : (i) le pourcentage de fois où une variable est sélectionnée dans le modèle (pour les 1000 répliques), (ii) le pourcentage de fois où le signe du coefficient de régression est positif ou négatif pour chaque variable et (iii) le pourcentage de fois où la variable est significative dans le modèle. Ainsi, la technique du *bootstrap* a été utilisée pour réduire le biais ou l'erreur dans l'estimation des coefficients de régression (risques de faux positifs ou de faux négatifs), en raison des comparaisons multiples effectuées dans la régression logistique pas-à-pas. Le *bootstrap* réduit donc ces erreurs et garantit une meilleure fiabilité de nos interprétations. Notons que, ces différentes analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel *R* (RStudio Team, 2020).

1.5 Analyses *Voxel-based Symptom Mapping*

Dans cette étude, nous avons identifié la relation entre les structures cérébrales endommagées, au niveau de la substance grise ou de la substance blanche, et la sévérité initiale de l'aphasie. Plus spécifiquement, nous avons évalué : (i) la relation entre les dommages au niveau de la substance

4. Dans ce type d'analyse nommée *stepwise forward regression*, en anglais, la sélection des variables commence par un modèle qui ne contient aucune variable, puis celles-ci sont ajoutées les unes après les autres, jusqu'à ce qu'une règle d'arrêt pré-spécifiée soit atteinte ou que toutes les variables considérées soient incluses dans le modèle. La règle d'arrêt est satisfaite lorsque les effets de toutes les variables restantes à considérer, si celles-ci sont incluses dans le modèle, présentent une p-valeur supérieure à un certain seuil pré-spécifié ou déterminé par un critère d'ajustement (e.g., *Bayesian Information Criterion* ou *Akaike Information Criterion*). Lorsque nous atteignons cet état, la sélection se termine et renvoie un modèle qui ne contient que des variables avec des p-valeurs inférieures au seuil. Dans notre étude, ce seuil est défini par l'AIC (*Akaike Information Criterion*) afin de prendre en compte la qualité de l'ajustement (*goodness-of-fit*) et la simplicité des modèles.

5. La technique du *bootstrap* est une procédure qui consiste à créer des « nouveaux échantillons » statistiques, à l'aide d'un tirage avec remise, à partir de l'échantillon initial. Dans le cas du *bootstrap* avec 1000 répliques, on répète l'opération de ré-échantillonnage 1000 fois afin de constituer 1000 nouveaux échantillons sur lesquels les analyses statistiques seront effectuées.

grise (à l'aide des masques des lésions) et la sévérité initiale de l'aphasie, *via* des analyses de type VLSM; et (ii) la relation entre les cartes de déconnexion des faisceaux de substance blanche et la sévérité initiale de l'aphasie, *via* des analyses de type VDSM. Pour faire ces analyses, nous avons utilisé la *toolbox* NiiStat (www.nitrc.org/projects/niistat/), qui fonctionne sous Matlab (R2019b, Mathworks Inc., Sherborn, MA, USA).

La sévérité initiale de l'aphasie a été traitée comme une variable ordinaire (aphasie sévère, modérée/légère et sans aphasie) et la relation entre les structures cérébrales endommagées (lésion ou déconnexion) et la sévérité de l'aphasie a été évaluée à l'aide d'analyses univariées « massives », c'est-à-dire qu'un test statistique est effectué pour chaque voxel. Ainsi, pour corriger le problème des comparaisons multiples, nous avons effectué 5000 permutations⁶, avec un seuil de $p < 0,05$. De plus, dans ce type d'analyses, la puissance statistique est très faible pour les régions qui sont rarement lésées. Ainsi, afin de prendre en compte cette limite, les analyses sont effectuées sur les voxels pour lesquels au moins 10% des patients partagent une lésion, ici $N = 10$.

Les atlas AAL (Tzourio-Mazoyer et al., 2002) et HCP1065 (Yeh, 2022) ont été utilisés pour identifier les structures mises en évidence lors des analyses VLSM et VDSM, au niveau de la substance grise et des faisceaux de substance blanche, respectivement. Les résultats ont été visualisés à l'aide des logiciels MRIcroGL (Rorden, 2022) et BrainNet Viewer (Xia, Wang, & He, 2013, www.nitrc.org/projects/bnv/)

2 Résultats

2.1 Participants

Les facteurs sociodémographiques, cliniques et lésion-dépendants sont présentés dans le Tableau 2.1 pour tous les patients ($N = 96$). Les patients ont été séparés en trois groupes : les patients avec une aphasie légère ou modérée (M-Aph, $ASRS_{EI} \geq 3$, $N = 31$), les patients avec une aphasie sévère (S-Aph, $ASRS_{EI} \leq 2$, $N = 41$) et les patients sans aphasie (N-Aph, $N = 24$).

L'âge médian pour tous les patients est de 65,59 ans (Q1-Q3=55,22-71,37), 61 (63,54%) sont des hommes, 90 (93,75%) sont droitiers, 30 (32,61%) ont un niveau d'éducation supérieur au baccalauréat, 31 (33,33%) ont un emploi, 27 (29,35%) vivent seuls et 72 (78,26%) ont un soutien

6. La permutation permet de randomiser l'ordre des scores comportementaux afin de voir si les effets observés ne sont pas des « faux-positifs ». Cette méthode permet donc de contrôler les erreurs de type FWE (*familywise error*).

Tableau 2.1 – Facteurs sociodémographiques, cliniques et lésion-dépendants des patients. Les données sont représentées pour tous les patients ($N = 96$) et pour les trois groupes : sans aphasie (N-Aph, $N = 24$), avec une aphasie légère ou modérée (M-Aph, $N = 31$) et avec une aphasie sévère (S-Aph, $N = 41$).

	Aph & N-Aph($N = 96$)	S-Aph($N = 41$)	M-Aph($N = 31$)	N-Aph($N = 24$)	
<i>Facteurs sociodémographiques</i>	Âge (années)	65,59 (55,22-71,37)	65,51 (59,75-72,38)	59,02 (49,72-69,47)	67,55 (58,23-72,65)
	Sexe, homme (%)	61 (63,54)	30 (73,17)	17 (54,84)	14 (58,33)
	Préférence manuelle, droitiers (%)	90 (93,75)	38 (92,68)	30 (96,77)	22 (91,67)
	Niveau d'éducation, > baccalauréat (%)	30 (32,61)	12 (30,77)	12 (38,71)	6 (27,27)
	Statut professionnel, avec emploi (%)	31 (33,33)	15 (37,50)	13 (41,94)	3 (13,64)
	Isolement, vit seul (%)	27 (29,35)	13 (32,50)	6 (20,00)	8 (36,36)
	Entourage, présence forte (%)	72 (78,26)	29 (72,5)	26 (86,67)	17 (77,27)
<i>Facteurs cliniques</i>	Handicap général, modéré ou sévère (%)	66 (68,75)	34 (82,93)	20 (64,52)	12 (50,00)
	Faiblesse MS et MI, modérée ou sévère (%)	38 (39,58)	22 (53,66)	9 (29,03)	7 (29,17)
	Dépression, ADRS (0-32)	8,5 (6-12)	8 (5,75-12)	8 (6-10,5)	10 (4-12)
	Dysfonctionnement exécutif, modéré ou sévère (%)	53 (55,21)	34 (82,93)	16 (51,61)	3 (12,50)
	Apraxie MS, modérée ou sévère (%)	26 (28,57)	19 (48,72)	6 (20,69)	1 (4,35)
	Négligence spatiale, modérée ou sévère (%)	28 (29,47)	17 (41,46)	8 (25,81)	3 (13,04)
	Dénomination-EI (0-100%)*		30,24 (7,50-74,30)	81,25 (68,75-96,25)	
<i>Facteurs lésion-dépendants</i>	Délai sévérité-EI (en jours post-AVC)*		21 (15-25)	16 (8,50-27)	
	Type d'aphasie, fluente (%)*		20 (48,78)	27 (87,10)	
	Type d'AVC, ischémique (%)	75 (78,13)	36 (87,80)	21 (67,74)	18 (75,00)
	Sévérité de l'AVC, NIHSS (0-42)	11 (7-17,5)	16 (12-21)	10,5 (7-15,75)	7 (5,75-9)
	WMHs, modérées ou sévères (%)	38 (39,58)	14 (34,15)	11 (35,48)	13 (54,17)
	Taille de la lésion (en voxels)	13 364 (2674-37 824)	41 127 (19 224-82 276)	11 689 (3412-21 556)	1656,5 (941,5-3050,5)

Les données sont présentées sous forme de médiane avec les premiers et troisièmes quartiles (Q1-Q3) ou sous forme de nombre avec le pourcentage associé.

* Les facteurs sont présentés pour les patients atteints d'aphasie uniquement.

MS, membres supérieurs; MI, membres inférieurs; ADRS, *Aphasia Depression Rating Scale*; EI, évaluation initiale; AVC, accident vasculaire cérébral; NIHSS, *National Institutes of Health Stroke Scale*; WMHs, *White Matter Hyperintensities* (hyperintensités de la substance blanche).

important de la part de leur entourage. Parmi les facteurs cliniques, le score médian de dépression est de 8,5 (6-12), suggérant l'absence de dépression. Soixante-six patients (68,75%) présentent un handicap modéré ou sévère, 38 (39,58%) ont une faiblesse musculaire modérée ou sévère pour les membres supérieurs et inférieurs, 53 (55,21%) ont un dysfonctionnement exécutif modéré ou sévère, 26 (28,57%) présentent une apraxie modérée ou sévère des membres supérieurs et 28 (29,47%) ont une négligence spatiale modérée ou sévère. Enfin, la majorité des patients ont eu un AVC ischémique (78,13%) et cet AVC est modéré (NIHSS médian à 11 [7-17,5]). Trente-huit patients (39,58%) présentent des WMHs modérées ou sévères et la taille médiane de la lésion

est de 13 364 voxels (2674-37 824).

Parmi les patients atteints d'aphasie uniquement, 47 (65,28%) présentent une aphasie fluente, leur pourcentage médian de réponses correctes lors de la dénomination est de 70% (18,75-85), la sévérité de l'aphasie initialement est de 2 (1-3) et elle a été mesurée à 19 jours post-AVC (11,75-26,50).

Il y a des données manquantes dans ce jeu de données ($N_{total} = 40$; 2,16%) : niveau d'éducation ($N = 4$), statut professionnel ($N = 3$), vit seul ($N = 4$), présence de l'entourage ($N = 4$), dépression ($N = 7$), dénomination-EI ($N = 11$), apraxie MS ($N = 5$), négligence spatiale ($N = 1$), sévérité de l'AVC ($N = 1$).

La superposition des lésions des patients est présentée dans la Figure 2.2. Les régions pour lesquelles il y a le plus de superposition sont situées dans la partie antérieure de l'hémisphère gauche, incluant l'insula, le putamen, le GFI et l'opercule rolandique.

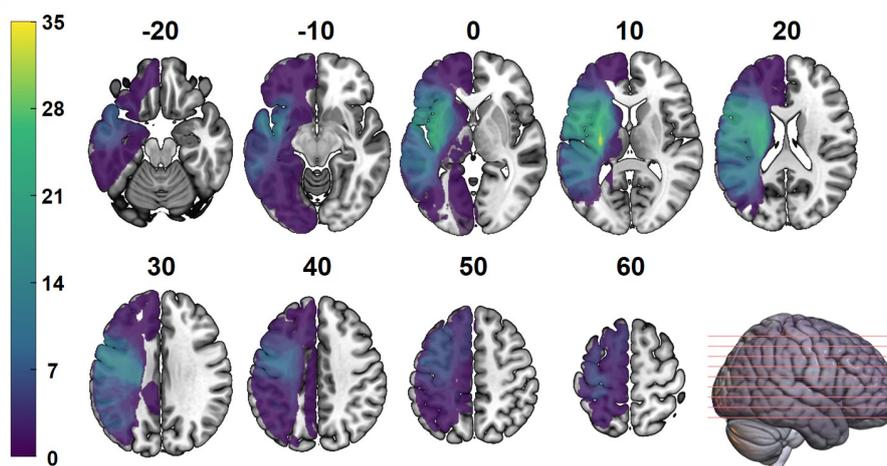


FIGURE 2.2 – Superposition des lésions de tous les patients ($N=96$). Les coupes axiales sont présentées et les coordonnées z dans l'espace MNI sont mentionnées au-dessus de chaque coupe. Les couleurs plus claires (vert, jaune) indiquent les voxels lésés pour le plus grand nombre de patients.

La superposition des cartes de déconnexion est présentée dans la Figure 2.3. Les faisceaux pour lesquels il y a le plus de superposition sont l'IFOE, le FLS, le FA, le FAT, les radiations thalamiques et le faisceau cortico-spinal à gauche et le corps calleux.

2.2 Déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie

Les résultats des analyses univariées sont présentés dans le Tableau 2.2. Concernant les facteurs sociodémographiques, il n'existe aucune différence significative entre les trois groupes. En effet, lors de la comparaison entre les groupes (test omnibus), il semble que l'âge soit significativement

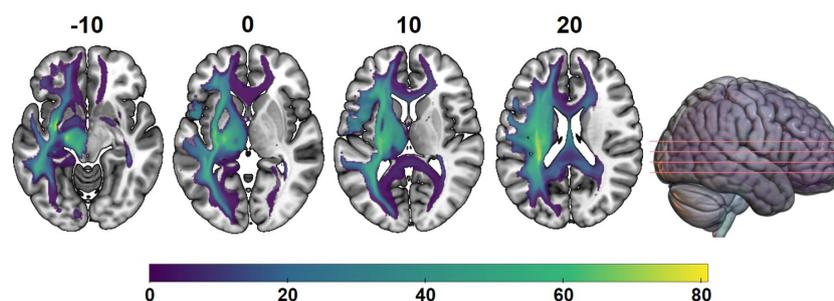


FIGURE 2.3 – Superposition des cartes de déconnexion de tous les patients (N=96). Les coupes axiales sont présentées et les coordonnées z dans l'espace MNI sont mentionnées au-dessus de chaque coupe. Les couleurs plus claires (vert, jaune) indiquent les voxels pour lesquels un plus grand nombre de patients présentent une déconnexion.

différent. Cependant, lorsque l'on compare les groupes un à un (comparaison inter-groupe), on ne retrouve aucune différence significative.

Concernant les facteurs cliniques et lésion-dépendants, les patients atteints d'aphasie diffèrent des patients sans aphasie, avec : un AVC plus sévère pour les groupes S-Aph ($Z = 4,47$; $p < 0,001$; $r = 0,56$) et M-Aph ($Z = 2,66$; $p = 0,024$; $r = 0,36$); une lésion plus large pour les groupes S-Aph ($Z = 5,71$; $p < 0,001$; $r = 0,71$) et M-Aph ($Z = 3,82$; $p < 0,001$; $r = 0,52$); plus de patients présentant un handicap modéré ou sévère dans le groupe S-Aph ($\chi^2 = 7,93$; $p = 0,015$; $v = 0,29$); plus de patients présentant un dysfonctionnement exécutif modéré ou sévère dans les groupes S-Aph ($\chi^2 = 30,62$; $p < 0,001$; $v = 0,56$) et M-Aph ($\chi^2 = 9,15$; $p = 0,007$; $v = 0,31$); plus de patients présentant une apraxie des membres supérieurs modérée ou sévère dans le groupe S-Aph ($\chi^2 = 13,03$; $p < 0,001$; $v = 0,38$). De plus, les patients avec une aphasie sévère présentent un AVC plus sévère ($Z = 2,40$; $p = 0,049$; $r = 0,47$), une lésion plus large ($Z = 4,00$; $p < 0,001$; $r = 0,47$) et des troubles en dénomination plus importants ($Z = -3,89$; $p < 0,001$; $r = 0,50$), que les patients avec une aphasie modérée/légère. Il y a plus de patients avec une aphasie fluente dans le groupe M-Aph que dans le groupe S-Aph ($\chi^2 = 11,43$; $p < 0,001$; $v = 0,40$). Enfin, il y a plus de patients avec un dysfonctionnement exécutif modéré ou sévère dans le groupe S-Aph par rapport aux M-Aph ($\chi^2 = 8,16$; $p = 0,013$; $v = 0,29$).

Tableau 2.2 – Résultats des analyses statistiques univariées issues de la comparaison entre les groupes (N-Aph, M-Aph, S-Aph). Les différences entre les 3 groupes (test omnibus avec *Kruskal-Wallis* ou χ^2) et inter-groupes (test *U* de *Mann-Whitney* ou test du χ^2) ont été évaluées. Les valeurs de $p < 0,05$, pour les tests omnibus, et $p_{\text{corrigé}} < 0,05$, pour la différence inter-groupes, sont considérées comme statistiquement significatives. Lorsque les analyses statistiques ne sont effectuées que pour les patients atteints d'aphasie (représenté par « * » dans le tableau) le seuil de $p < 0,05$ est considéré. Les résultats significatifs sont notés en gras.

		Test omnibus	N-Aph vs. M-Aph	N-Aph vs. S-Aph	M-Aph vs. S-Aph
Facteurs sociodémographiques	Âge (années)	$\chi^2 = 6,99, p = 0,03, \eta^2 = 0,054$	$Z = -2,29, p = 0,065$	$Z = -0,49, p = 1$	$Z = 2,25, p = 0,073$
	Sexe, homme (%)	$\chi^2 = 2,94, p = 0,23$			
	Préférence manuelle, droitiers (%)	$\chi^2 = 0,74, p = 0,69$			
	Niveau d'éducation, > baccalauréat (%)	$\chi^2 = 0,87, p = 0,65$			
	Statut professionnel, employé (%)	$\chi^2 = 5,19, p = 0,075$			
	Isolement, vit seul (%)	$\chi^2 = 1,97, p = 0,37$			
	Entourage, présence forte (%)	$\chi^2 = 2,04, p = 0,36$			
Facteurs cliniques	Handicap général, modéré ou sévère (%)	$\chi^2 = 8,02, p = 0,018, v = 0,29$	$\chi^2 = 1,17, p = 0,84$	$\chi^2 = 7,93, p = 0,015, v = 0,29$	$\chi^2 = 3,19, p = 0,22$
	Faiblesse MS et MI, modérée ou sévère (%)	$\chi^2 = 5,93, p = 0,052$			
	Dépression, ADRS (0-32)	$\chi^2 = 0,19, p = 0,91$			
	Dysfonctionnement exécutif, modéré ou sévère (%)	$\chi^2 = 30,60, p < 0,001, v = 0,56$	$\chi^2 = 9,15, p = 0,007, v = 0,31$	$\chi^2 = 30,62, p < 0,001, v = 0,56$	$\chi^2 = 8,16, p = 0,013, v = 0,29$
	Apraxie MS, modérée ou sévère (%)	$\chi^2 = 15,25, p < 0,001, v = 0,41$	$\chi^2 = 2,94, p = 0,26$	$\chi^2 = 13,03, p < 0,001, v = 0,38$	$\chi^2 = 5,62, p = 0,053$
	Négligence spatiale, modérée ou sévère (%)	$\chi^2 = 6,02, p = 0,049, v = 0,25$	$\chi^2 = 1,33, p = 0,75$	$\chi^2 = 5,54, p = 0,056$	$\chi^2 = 1,91, p = 0,50$
Facteurs lésion-dépendants	Dénomination-EI (0-100%)*				$Z = -3,89, p < 0,001, r = 0,50$
	Délai sévérité-EI (en jours post-AVC)*				$Z = 2,19, p = 0,14$
	Type d'aphasie, fluente (%)*				$\chi^2 = 11,43, p < 0,001, v = 0,40$
	Type d'AVC, ischémique (%)	$\chi^2 = 4,34, p = 0,11$			
	Sévérité de l'AVC, NIHSS (0-42)	$\chi^2 = 22,02, p < 0,001, \eta^2 = 0,22$	$Z = 2,66, p = 0,024, r = 0,36$	$Z = 4,47, p < 0,001, r = 0,56$	$Z = 2,40, p = 0,049, r = 0,29$
Facteurs lésion-dépendants	WMHs, modérées ou sévères (%)	$\chi^2 = 2,86, p = 0,24$			
	Taille de la lésion (en voxels)	$\chi^2 = 41,71, p < 0,001, \eta^2 = 0,43$	$Z = 3,82, p < 0,001, r = 0,52$	$Z = 5,71, p < 0,001, r = 0,71$	$Z = 4,00, p < 0,001, r = 0,47$

N-Aph, sans aphasie; M-Aph, aphasie légère/modérée; S-Aph, aphasie sévère; MS, membres supérieurs; MI, membres inférieurs; ADRS, *Aphasia Depression Rating Scale*; EI, évaluation initiale; AVC, accident vasculaire cérébral; NIHSS, *National Institutes of Health Stroke Scale*; WMHs, hyperintensités de la substance blanche.

Tous les facteurs significatifs dans ces analyses univariées ont été conservés pour les analyses multivariées, à l'exception de la dénomination et du type d'aphasie. En effet, ces données sont présentées uniquement pour les patients atteints d'aphasie puisque la dénomination est évaluée uniquement chez les patients présentant une aphasie et que le type d'aphasie ne s'applique pas aux patients sans aphasie. Pour ces facteurs significatifs issus des analyses univariées et conservés dans les analyses multivariées, nous avons testé la colinéarité à l'aide du calcul du facteur d'inflation de la variance, VIF (*Variance Inflation Factor*). Les différents facteurs ne semblent pas colinéaires puisque le VIF est inférieur à 10 (voir Tableau 2.3)

Tableau 2.3 – Valeurs du facteur d'inflation de la variance (VIF, *Variance Inflation Factor*) pour les facteurs significatifs issus des analyses univariées et conservés pour les analyses multivariées. AVC, accident vasculaire cérébral; NIHSS, *National Institutes of Health Stroke Scale*.

	VIF
Âge	1,16
Handicap général	1,49
Dysfonctionnement exécutif	1,19
Négligence spatiale	1,44
Apraxie des membres supérieurs	1,47
Sévérité de l'AVC, NIHSS	1,20
Taille de la lésion (normalisée)	1,16

Pour les analyses multivariées, nous avons effectué une analyse de régression logistique pas-à-pas (*forward stepwise analyses*), couplée avec du *bootstrap* (1000 échantillons), en testant les variables significatives issues des analyses univariées : âge, sévérité de l'AVC, taille de la lésion, handicap général, dysfonctionnement exécutif, apraxie des membres supérieurs et négligence spatiale. La taille de la lésion a été normalisée et les patients pour lesquels il y avait des données manquantes pour l'une des variables indépendantes d'intérêt ont été retirés de l'échantillon avant d'effectuer les analyses multivariées ($N_{final} = 89$).

Ainsi, à l'aide du *bootstrap*, nous avons montré que les facteurs les plus souvent sélectionnés (> 60% des fois; Austin & Tu, 2004) sont : la taille de la lésion (99,9% des fois), le dysfonctionnement exécutif (99,6% des fois) et la sévérité de l'AVC (67,2% des fois) (voir Tableau 2.4). Le signe du coefficient de régression pour ces trois variables est toujours négatif (100% des fois), ce qui traduit la stabilité du modèle. Ces facteurs sont significatifs plus de 50% du temps dans le modèle (à

2. Les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie post-AVC

un seuil $\alpha = 0,05$) : 99,6% pour la taille de la lésion, 99,3% pour le dysfonctionnement exécutif, et 76,19% pour la sévérité de l'AVC.

Tableau 2.4 – Résultats de l'analyse de régression pas-à-pas couplée avec le *bootstrap* (ré-échantillonnage avec 1000 répliques) pour identifier les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie. Les résultats du *bootstrap* nous fournissent : le pourcentage de fois où une variable est sélectionnée dans le modèle, le pourcentage de fois où le signe du coefficient de régression est positif ou négatif pour chaque variable et le pourcentage de fois où la variable est significative dans le modèle final.

	Variable sélectionnée (%)	Signe du coefficient		Variable significative (%)
		Positif (%)	Négatif (%)	
Taille de la lésion (normalisée)	99,9	0,00	100,00	99,60
Dysfonctionnement exécutif	99,6	0,00	100,00	99,30
Sévérité de l'AVC, NIHSS	67,2	0,00	100,00	76,19
Handicap général	48,4	99,38	0,62	66,12
Âge	26,5	87,17	12,83	41,89
Négligence spatiale	24,2	18,60	81,40	58,26
Apraxie des membres supérieurs	21,9	41,10	58,90	52,51

AVC, accident vasculaire cérébral; NIHSS, *National Institutes of Health Stroke Scale*.

Le modèle final proposé par l'analyse de régression pas-à-pas comprend donc la taille de la lésion, la sévérité de l'AVC, le dysfonctionnement exécutif, mais également le handicap. Cependant, le handicap est un déterminant « parasite » (identifié par erreur) puisqu'il est sélectionné moins de 60% du temps (voir Tableau 2.4). Ainsi, la taille de la lésion, la sévérité de l'AVC et le dysfonctionnement exécutif sont des déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie (voir Tableau 2.5).

Tableau 2.5 – Résultats de l'analyse multivariée permettant d'explorer l'association entre les facteurs lésion-dépendants et cliniques et la sévérité initiale de l'aphasie. Les valeurs de $p < 0,05$ sont considérées comme statistiquement significatives. Les résultats significatifs sont notés en gras.

Variable dépendante	Variabiles indépendantes (déterminants)	OR	IC (95%)	p-valeur
Groupe de patients (S-Aph, M-Aph, N-Aph)	Sévérité de l'AVC, NIHSS	0,90	0,82 – 0,99	0,041
	Dysfonctionnement exécutif	0,068	0,018 – 0,22	< 0,001
	Taille de la lésion (normalisée)	0,068	0,013 – 0,24	< 0,001
	Handicap	2,25	0,74 – 7,36	0,16

OR, Odds Ratio; IC, intervalle de confiance; S-Aph, aphasie sévère; M-Aph, aphasie modérée/légère; N-Aph, sans aphasie; AVC, accident vasculaire cérébral; NIHSS, *National Institutes of Health Stroke Scale*.

Plus spécifiquement, nous montrons que : (i) une augmentation de 1 point dans le score de sévérité d'AVC (NIHSS), qui traduit une augmentation de la sévérité, diminue les chances d'avoir une aphasie modérée/légère ou aucune aphasie de 10% ($OR = 0,90$; $IC(95\%) = 0,82 - 0,99$; $p = 0,041$); la présence d'un dysfonctionnement exécutif modéré ou sévère diminue les chances d'avoir une

aphasie modérée/légère ou aucune aphasie de 93,2% ($OR = 0,068$; $IC(95\%) = 0,018 - 0,22$; $p < 0,001$); et une augmentation de 1 écart type dans la taille de la lésion, qui traduit une augmentation de la taille, diminue les chances d'avoir une aphasie modérée/légère ou aucune aphasie de 93,2% ($OR = 0,068$; $IC(95\%) = 0,013 - 0,24$; $p < 0,001$). Ainsi, une aphasie plus sévère initialement est associée à un AVC plus sévère, un dysfonctionnement exécutif plus important et une lésion plus large.

2.3 Déterminants lésionnels de la sévérité initiale de l'aphasie

Les résultats des analyses VLSM nous ont permis d'identifier, dans la substance grise, un unique *cluster* (36 683 voxels), avec une valeur de z allant de $-3,74$ à $-5,86$, situé principalement au niveau de l'insula gauche (voir Figure 2.4). Les coordonnées MNI du pic sont $-30,0 \times 11,7 \times 13,8$ ($z = -5,6$) et les coordonnées du centre de ce *cluster* sont $-41,8 \times 7,2 \times 12,3$. À l'aide de l'atlas AAL (Tzourio-Mazoyer et al., 2002), nous avons identifié les régions qui constituent ce *cluster*.

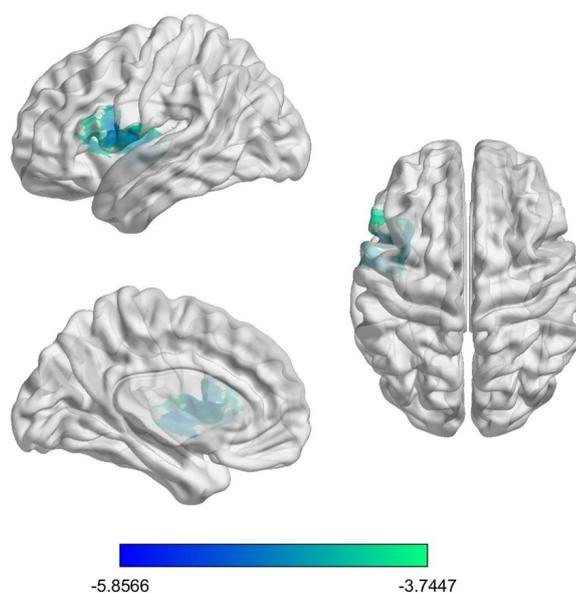


FIGURE 2.4 – Résultat des analyses VLSM permettant d'identifier l'association entre les structures de la substance grise lésées et la sévérité initiale de l'aphasie. Les images représentent une vue latérale et médiale gauche (à gauche) et dorsale (à droite). Les valeurs de z plus négatives (*i.e.*, les couleurs qui tendent vers le bleu) indiquent une association plus forte entre le statut lésionnel des voxels et la sévérité initiale de l'aphasie. Seulement les *clusters* d'un volume > 20 voxels sont présentés.

Ces régions ainsi que la proportion qu'elles représentent dans le *cluster* total sont présentées dans le Tableau 2.6. Considérant uniquement les régions représentant plus de 5% du volume total du *cluster*, il comprend l'insula (26%), le GFI-tri (15%), le GFI-op (15%) et l'opercule rolandique (14%).

Tableau 2.6 – Régions cérébrales lésées, identifiées à l'aide de l'atlas AAL (Tzourio-Mazoyer et al., 2002), associées à la sévérité initiale de l'aphasie. Ces régions, situées au niveau de l'hémisphère gauche, composent un *cluster* de 36 683 voxels.

Volume total (en voxels)	36 683
Insula	26%
Gyrus frontal inférieur triangularis	15%
Gyrus frontal inférieur opercularis	15%
Opércule rolandique	14%
Gyrus postcentral	2%
Gyrus temporal supérieur	2%
Gyrus précentral	2%
Gyrus de Heschl	1%
Putamen	1%

Les résultats des analyses VDSM nous ont permis d'identifier, dans la substance blanche, un *cluster* (50 527 voxels) avec une valeur de z allant de $-4,06$ à $-7,13$ situé principalement au niveau du faisceau arqué à gauche (voir Figure 2.5). Les coordonnées MNI du pic sont $-41,1 \times -37,8 \times 27,1$ ($z = -7,0$) et les coordonnées du centre de ce *cluster* sont $-32,3 \times -2,4 \times 13,8$.

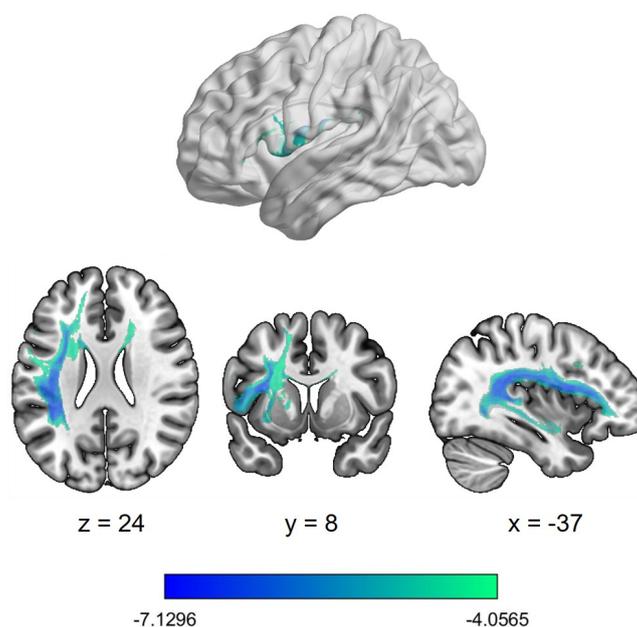


FIGURE 2.5 – Résultat des analyses VDSM permettant d'identifier l'association entre les faisceaux de substance blanche déconnectés et la sévérité initiale de l'aphasie. Les images représentent une vue latérale gauche (en haut) et des coupes axiale, coronale et sagittale (en bas, de gauche à droite). Les valeurs de z plus négatives (*i.e.*, les couleurs qui tendent vers le bleu) indiquent une association plus forte entre les déconnexions de la substance blanche et la sévérité initiale de l'aphasie. Seulement les *clusters* d'un volume > 20 voxels sont présentés.

Les faisceaux qui constituent ce *cluster* ont été identifiés à l'aide de l'atlas HCP1065 (Yeh, 2022) et ils sont présentés dans le Tableau 2.7 avec la proportion qu'ils représentent dans le *cluster*. Nous avons distingué les faisceaux d'association, de projection et commissuraux. Ainsi, considérant uniquement les faisceaux représentant plus de 5% du volume total du *cluster*, on retrouve le corps calleux bilatéralement (26%), l'IFOF (16%), le FA (8%), le FAT (6%) et les radiations thalamiques supérieures (RTS, 6%) à gauche.

D'autres *clusters*, constitués de 48, 40 et 28 voxels, ont été identifiés. Cependant, leur taille est moindre comparée au *cluster* de 50 527 voxels, nous ne les prendrons donc pas en compte dans cette étude.

Tableau 2.7 – Faisceaux de substance blanche identifiés à l'aide de l'atlas HCP1065 (Yeh, 2022) et associés à la sévérité initiale de l'aphasie. Ces faisceaux composent le *cluster* de 50 527 voxels identifié. Sauf pour les faisceaux commissuraux (bilatéraux), seuls des faisceaux au niveau de l'hémisphère gauche ont été identifiés.

	Volume total (en voxels)	50 527
Faisceaux d'association	Faisceau occipito-frontal inférieur	16%
	Faisceau arqué	8%
	Faisceau frontal oblique	6%
	Faisceau longitudinal supérieur - III	3%
	Faisceau longitudinal supérieur - I	2%
	Faisceau unciné	1%
	Faisceau longitudinal inférieur	1%
	Faisceau longitudinal moyen	1%
	Faisceau longitudinal supérieur - II	1%
Faisceaux de projection	Radiations thalamiques supérieures	6%
	Faisceau cortico-striatal antérieur	3%
	Faisceau cortico-striatal postérieur	3%
	Radiations thalamiques antérieures	2%
	Radiations optiques	2%
	Faisceau cortico-pontal frontal	2%
	Faisceau réticulo-spinal	1%
	Radiations acoustiques	1%
	Faisceau cortico-bulbaire	1%
	Fornix	1%
Faisceau cortico-spinal	1%	
Faisceaux commissuraux	Corps calleux	26%
	Commissure antérieure	1%

Ainsi, une aphasie plus sévère initialement est associée à une atteinte de l'insula, du GFI-tri, du GFI-op et de l'opercule rolandique à gauche, ainsi qu'à des déconnexions au niveau du FA, de l'IFOF, du FAT, des RTS à gauche et du corps calleux.

3 Discussion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux facteurs associés à la sévérité initiale de l'aphasie. Nos analyses ont révélé que le dysfonctionnement exécutif, la sévérité de l'AVC et la taille de la lésion sont associées à une aphasie plus sévère initialement. De plus, une atteinte de l'insula, du GFI-tri, du GFI-op et de l'opercule rolandique gauche et des déconnexions au niveau de l'IFOF, du FA, du FAT, des RTS à gauche et du corps calleux sont associées à une aphasie plus sévère initialement.

Dans cette étude, parmi les facteurs lésion-dépendants, nous avons mis en évidence qu'un AVC plus sévère et une lésion plus large sont associés à une aphasie plus sévère initialement. D'après certaines études, la sévérité de l'AVC est associée à la présence d'aphasie (Inatomi et al., 2008 ; Wilson, Eriksson, Brandt, et al., 2019) mais également à la récupération du langage : la sévérité de l'AVC, en complément de la sévérité initiale de l'aphasie, permet de mieux prédire la récupération à long terme (Pedersen et al., 2004). De plus, il existe un lien entre la taille de la lésion, d'une part, et la récupération du langage et la sévérité initiale de l'aphasie, d'autre part. En effet, une lésion plus large est associée à une mauvaise récupération ou une récupération plus lente (Benghanem et al., 2019 ; Plowman et al., 2012) et à une aphasie plus sévère initialement (Døli et al., 2021) et 3 mois après l'AVC (Døli et al., 2023). Enfin, Lahiri, Dubey, Ardila, et Ray (2021) ont montré que la taille de la lésion ainsi que le type d'AVC et d'aphasie sont associés à la sévérité initiale de l'aphasie : une lésion plus large, un AVC hémorragique et une aphasie non fluente sont associés à une aphasie plus sévère initialement.

Nous avons également mis en évidence une association entre le dysfonctionnement exécutif et la sévérité de l'aphasie. Nos analyses univariées montrent que le dysfonctionnement exécutif est plus sévère chez les patients atteints d'aphasie par rapport aux patients sans aphasie et chez les patients présentant une aphasie sévère par rapport à ceux présentant une aphasie modérée/légère. Ces résultats, en accord avec des précédentes études (Bonini & Radanovic, 2015 ; Fonseca et al., 2019), soulignent que les fonctions exécutives font partie des compétences cognitives affectées chez les patients présentant une aphasie. Ceci pourrait être expliqué par la localisation de la lésion. En effet, Olsson, Arvidsson, et Blom Johansson (2019) ont rapporté que l'atteinte des fonctions exécutives pourrait être due à une extension de la lésion responsable de l'aphasie à d'autres régions

associées aux processus exécutifs et au contrôle des fonctions cognitives. En effet, les fonctions exécutives sont sous-tendues par un large réseau fronto-pariétal gauche impliquant des régions du lobe frontal, le cortex pariétal inférieur et supérieur ainsi que les faisceaux de substance blanche associés (FLS/FA, faisceau occipito-frontal supérieur et FU) (Barbey et al., 2012). Ainsi, les fonctions exécutives et les capacités linguistiques sont étroitement liées (voir aussi Herbet & Duffau, 2020 ; Roger, Rodrigues De Almeida, et al., 2022). Plus généralement, le fonctionnement exécutif peut être considéré comme un indicateur approprié des capacités de communication (Gonçalves et al., 2018).

Ainsi, le lien entre la sévérité de l'AVC, le dysfonctionnement exécutif et la sévérité de l'aphasie peut être expliqué par la taille de la lésion, mais également par sa localisation. En effet, un AVC plus sévère et un dysfonctionnement exécutif plus important sont associés à une lésion plus large avec une forte probabilité d'impliquer des régions cruciales pour le langage et d'autres processus domaine-généraux, ce qui est associé à une aphasie plus sévère (Inatomi et al., 2008 ; Kiran & Thompson, 2019 ; Lahiri, Dubey, Ardila, & Ray, 2021).

Pour étudier le lien entre la localisation de la lésion et un comportement, les études se basent sur les analyses VLSM (Bates et al., 2003). Ainsi, des études se sont intéressées au lien entre la localisation de la lésion et les troubles du langage (fluence verbale, répétition, dénomination, compréhension) (e.g., Døli et al., 2021 ; Dronkers et al., 2004 ; Fridriksson et al., 2013 ; Mirman et al., 2015 ; Park et al., 2021 ; Schwartz et al., 2012). Parmi ces études, des auteurs ont montré un lien entre les performances en fluence verbale et l'intégrité des structures telles que le GFI, l'insula, le GFM et le gyrus précentral (Fridriksson et al., 2013 ; Park et al., 2021), ainsi que l'opercule rolandique (Fridriksson et al., 2013) et le LPI (Park et al., 2021). Yourganov, Smith, Fridriksson, et Rorden (2015) ont également montré que l'atteinte du GFI, de l'opercule rolandique, du GFM, de l'insula, des gyri précentral et postcentral, du putamen et des régions temporales est associée à une aphasie non fluente (*i.e.*, une aphasie de Broca ou globale). L'intégrité des structures telles que le GTM postérieur, le GTS antérieur, le STS, le gyrus angulaire, les aires de Brodmann 46 et 47, le cortex insulaire, le LPI, le GFI et le GFM est associée aux performances en compréhension du langage (Dronkers et al., 2004 ; Park et al., 2021). Dans une autre étude, Mirman et al. (2015) ont montré que le traitement phonologique est associé aux régions péri-sylviennes comprenant les régions infra-sylviennes (GTS, aire de Wernicke, *planum temporale*) associées à la reconnaissance et les régions supra-sylviennes (gyrus supramarginal, cortex précentral, postcentral inférieur et pré-moteur) associées à la production de la parole. Enfin,

dans une étude récente, Døli et al. (2021) se sont intéressés au lien entre la localisation de la lésion et la sévérité de l'aphasie en phase aiguë. Ils ont montré qu'une atteinte des régions frontales (GFI, insula, opercule rolandique), temporales (GTS et gyrus de Heschl) et pariétales (gyrus postcentral et LPI) est associée à une aphasie plus sévère initialement. Ils ont également déterminé les régions associées aux troubles de la répétition, de la dénomination et de la lecture. Ainsi, ils ont conclu que cinq régions communes sont associées à la sévérité initiale de l'aphasie, avec une atteinte des différentes compétences langagières associées (lecture, dénomination, répétition) : le GFI-op, le GFI-tri, l'insula, le GTS et le gyrus de Heschl (Døli et al., 2021).

Dans notre étude, nous avons mis en évidence qu'une lésion touchant principalement l'insula, le GFI-tri, le GFI-op et l'opercule rolandique gauche (>5% du *cluster* total) est associée à une aphasie plus sévère initialement. Rappelons que, la sévérité initiale de l'aphasie est mesurée par l'ASRS. Selon ce score, un ASRS faible est associé à une aphasie plus sévère avec une fluence verbale très réduite, tandis qu'un ASRS élevé est associé à une aphasie légère avec une meilleure fluence verbale (Mazaux & Orgogozo, 1981). Ainsi, nos principaux résultats sont en accord avec les études qui mentionnent l'association entre, d'une part, l'intégrité de l'insula, du GFI et de l'opercule rolandique et, d'autre part, la fluence verbale (Bates et al., 2003 ; Fridriksson et al., 2013 ; Park et al., 2021 ; Yourganov et al., 2015) ou la sévérité initiale de l'aphasie (Døli et al., 2021 ; Zavanone et al., 2018).

D'après le modèle hiérarchique de contrôle moteur proposé par Hickok (2012a), le GFI (*pars opercularis* et *pars triangularis*) est impliqué dans la planification de l'articulation et donc l'élaboration de la forme motrice de la syllabe (Dronkers et al., 2007 ; Hickok, 2012a). D'autres études mentionnent également son rôle dans la génération et l'extraction du sens, la sélection d'informations parmi des sources concurrentes, la construction syntaxique, l'unification entre les composantes du langage (phonologie, sémantique, syntaxe) ou encore la mémoire de travail (voir Ardila, Bernal, & Rosselli, 2016b).

Parmi les régions que nous avons identifiées, l'insula joue également un rôle clé dans la production et la compréhension du langage, avec un rôle dans le contrôle et la coordination, à plusieurs niveaux de la production du langage, notamment en connectant les systèmes lexico-sémantique et grammatical, ainsi que dans la planification articulatoire (Ardila, Bernal, & Rosselli, 2016a ; Dronkers, 1996). Une lésion au niveau de l'insula, notamment l'insula antérieur, est associée à un déficit en fluence verbale et une faible complexité lors de la production de parole (Borovsky,

Saygin, Bates, & Dronkers, 2007). L'opercule rolandique joue également un rôle dans l'articulation, plus spécifiquement dans les mouvements linguaux (S. Brown et al., 2009). Une étude plus récente souligne le rôle de l'opercule rolandique gauche, des gyri précentral gauche et postcentral, du GFI-op, du GTS et du LPI à gauche dans le traitement phonologique, la planification et l'exécution articulatoire (Nakamichi et al., 2018). Selon certaines études, une lésion de l'opercule rolandique, entre autres, est un prédicteur d'une aphasie non fluente (Triarhou, 2021 ; Yourganov et al., 2015).

Nous avons également montré qu'une déconnexion au niveau du FA, de l'IFOE, du FAT, des RTS à gauche et du corps calleux est associée à une aphasie plus sévère initialement. Des études se sont intéressées au lien entre les troubles du langage et les atteintes des faisceaux de substance blanche. Ainsi, l'IFOE, le FU et le forceps mineur (partie antérieure du corps calleux) sont plus atteints chez les patients présentant une aphasie par rapport aux patients sans aphasie (Kim et al., 2021). De plus, une atteinte au niveau du FA est associée à des troubles de la fluence, de l'« efficacité » de la parole, de la dénomination, de l'informativité du discours et à une aphasie plus sévère (Basilakos et al., 2014 ; Bates et al., 2003 ; Fridriksson et al., 2013 ; Geller et al., 2019 ; Marchina et al., 2011). Plus spécifiquement, l'intégrité du segment antérieur du FA, mais également du FAT et du FU, est associée à de meilleures performances en fluence verbale (Basilakos et al., 2014 ; Fridriksson et al., 2013). Des études ont également montré qu'une atteinte au niveau du FA (Forkel & Catani, 2018 ; Kim et al., 2021), du FAT (Forkel & Catani, 2018), du FLS, du corps calleux, de la *corona radiata* au niveau des lobes frontal et temporal (Kim et al., 2021), du FU et de l'IFOE (Zavanone et al., 2018) est associée à une aphasie plus sévère initialement. Par ailleurs, il semble que l'intégrité micro-structurelle, évaluée par la mesure de la fraction d'anisotropie, du FA, de l'IFOE, du FLS et du faisceau longitudinal inférieur soit associée à la sévérité de l'aphasie ainsi qu'aux performances dans différents domaines de langage (compréhension, lecture et dénomination, répétition, parole spontanée) (Braun et al., 2022 ; J.-K. Lee et al., 2021 ; Zhang et al., 2021). Enfin, Geller et al. (2019) ont montré qu'une déconnexion au niveau du FA est associée à une diminution des capacités de production de parole, de la fluence verbale et de dénomination (voir aussi Hope et al., 2016) ainsi qu'à une augmentation de la sévérité de l'aphasie. Selon Hope et al. (2016), une déconnexion au niveau du FU est également associée à une atteinte des capacités de fluence verbale et de dénomination.

Si l'on se place dans le cadre du modèle double voie de Hickok et Poeppel (2007), le FA est impliqué dans la voie dorsale et l'IFOE est impliqué dans la voie ventrale (Dick et al., 2014).

Plus spécifiquement, le FA joue un rôle dans le traitement des informations phonologiques et syntaxiques complexes durant la production et la compréhension du langage, ainsi que dans la transformation acoustico-articulatoire mise en jeu dans la répétition par exemple (Dick et al., 2014 ; Friederici & Gierhan, 2013). De plus, comme le mentionne Basilakos et al. (2014), le rôle du FA dans la fluence verbale passe par son implication dans la boucle de rétroaction auditive permettant l'intégration des informations sensorimotrices pour le contrôle en temps réel de la production de parole complexe (voir aussi Hickok & Poeppel, 2007). L'IFOF, quant à lui, constitue une voie ventrale directe (Duffau et al., 2014) et il joue un rôle dans le traitement sémantique (couche superficielle) et dans l'intégration sensorimotrice multimodale (couche profonde) (Friederici & Gierhan, 2013 ; Zhang et al., 2021).

Le FAT, qui relie le GFI-op à l'aire cingulaire antérieure, la pré-AMS et le cortex cingulaire antérieur, joue un rôle dans l'initiation de la parole et la fluence (Catani et al., 2012, 2013). Il pourrait également être impliqué dans le modèle DIVA (*Directions Into Velocities of Articulators*; Guenther & Vladusich, 2012), dans les étapes de sélection et de récupération au niveau lexical (Dick, Garic, Graziano, & Tremblay, 2019).

Le corps calleux, quant à lui, est une structure qui permet la connexion entre les régions corticales d'un hémisphère à l'autre (Catani & Thiebaut de Schotten, 2012). Plus spécifiquement, il est associé à la spécialisation hémisphérique du langage avec l'inhibition transcallosale exercée par l'hémisphère gauche (HG) sur l'hémisphère droit, qui permet de maintenir la dominance de l'HG pour le langage (Tzourio-Mazoyer et al., 2017). L'atteinte du corps calleux, observée dans le cas d'une agénésie complète ou partielle (*i.e.*, l'absence complète ou partielle du corps calleux), induit une limitation ou une incapacité de l'HG à inhiber les régions homotopiques droites, ce qui entraîne une diminution des performances de langage (Hinkley et al., 2016). Parmi les études évaluant le lien entre le corps calleux et le langage, Civier, Kronfeld-Duenias, Amir, Ezrati-Vinacour, et Ben-Shachar (2015) ont montré que le corps calleux antérieur (forceps mineur) est associé à une diminution de la fluence dans le bégaiement. Il semble également que le corps calleux antérieur ait un rôle dans le traitement sémantique (Fang et al., 2015). Enfin, Friederici, von Cramon, et Kotz (2007) ont montré que le tiers postérieur du corps calleux est impliqué dans l'interaction inter-hémisphérique des informations prosodiques supra-segmentales et des informations syntaxiques, lors du traitement d'une phrase entendue.

Enfin, les radiations thalamiques sont subdivisées en quatre voies : antérieure, postérieure, inférieure et supérieure. Ces radiations connectent le thalamus au cortex cérébral (George & Das, 2022). Les RTS, identifiées dans cette étude, relient les noyaux ventraux du thalamus aux gyri précentral et postcentral et à certaines régions frontales et pariétales adjacentes (George & Das, 2022 ; Younes et al., 2019). Les RTS constituent la partie médiane de la *corona radiata* supérieure (Younes et al., 2019), qui a été identifiée comme étant associée à certaines fonctions langagières et exécutives (e.g., voir Cristofori et al., 2015). Une déconnexion des radiations thalamiques a également été mise en évidence dans une étude de Billot et al. (2022). Ils ont montré que la déconnexion de ces radiations thalamiques est associée à une diminution des performances dans différentes tâches de langage (répétition, compréhension et production).

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous supposons, dans cette étude, que la localisation de la lésion explique le lien entre le dysfonctionnement exécutif et la sévérité de l'aphasie. En effet, il existe un lien fort entre les fonctions exécutives et les compétences langagières (Herbet & Duffau, 2020 ; Olsson et al., 2019 ; Roger, Rodrigues De Almeida, et al., 2022). Ainsi, un dysfonctionnement exécutif plus important est associé à une diminution des capacités de communication (Fridriksson, Nettles, Davis, Morrow, & Montgomery, 2006 ; Gonçalves et al., 2018). Ce lien peut être expliqué par les régions communes aux fonctions exécutives et aux processus langagiers. En effet, parmi les fonctions exécutives, la fluence verbale implique un réseau fronto-temporo-pariétal gauche, la flexibilité implique un réseau fronto-pariétal bilatéral et le raisonnement implique un réseau frontal gauche (Cristofori et al., 2015). Des régions communes à ces trois fonctions peuvent être déterminées. Ainsi, Cristofori et al. (2015) ont identifié une association entre le dysfonctionnement exécutif, mesuré par la fluence, le raisonnement et la flexibilité, et l'intégrité des gyri frontaux supérieur, médian et inférieur à gauche, de la *corona radiata* antérieure et supérieure et du FLS gauche. De plus, des études ont mis en évidence un rôle de l'insula dans la flexibilité et la mémoire (Moore & Demeyere, 2022 ; Varjačić et al., 2018). Parmi les faisceaux de substance blanche, le FA/FLS, le faisceau occipito-frontal supérieur et le FU sont associés aux fonctions exécutives (Barbey et al., 2012). Ainsi, on retrouve des régions communes entre les réseaux sous-tendant les fonctions langagières et ceux sous-tendant les fonctions exécutives.

Dans cette étude, nous proposons d'identifier les facteurs permettant de déterminer la sévérité initiale de l'aphasie, ce qui permettrait de personnaliser le programme de rééducation (type et/ou

intensité) afin de permettre la meilleure récupération possible (Brady et al., 2022b ; Doogan et al., 2018). En effet, lors de la mise en place de la rééducation, les orthophonistes prennent en compte un certain nombre de facteurs tels que : la sévérité de l'aphasie, les perspectives de récupération ou le profil sémiologique du patient (Chomel-Guillaume et al., 2010). Les patients avec une aphasie sévère présentent de sévères atteintes au niveau des capacités de communication (Darrigrand et al., 2011), ce qui a un impact sur l'état psychologique et la qualité de vie du patient (Koleck et al., 2017). L'amélioration des capacités de communication permettra donc une amélioration de la participation à la vie sociale (van de Sandt-Koenderman, 2011). Or, une étude récente a montré que le fonctionnement exécutif était fortement lié aux capacités de communication fonctionnelle chez les patients présentant une aphasie sévère (Olsson et al., 2019). Ainsi, Olsson et al. (2019) suggèrent qu'une évaluation des fonctions exécutives est nécessaire et importante à prendre en compte dans la mise en place d'une rééducation personnalisée (voir aussi Gilmore, Meier, Johnson, & Kiran, 2019 ; Simic et al., 2020 ; Simic, Rochon, Greco, & Martino, 2019). En effet, il a été montré que le dysfonctionnement exécutif peut entraver la récupération du langage (Olsson et al., 2019 ; Simic et al., 2020). Notamment, les capacités de transfert des mécanismes compensatoires, acquis durant la rééducation, aux activités de la vie quotidienne (*e.g.*, les capacités de communication) dépendent de l'intégrité du système de contrôle exécutif (Simic et al., 2020, 2019). Dans la revue proposée par Simic et al. (2019), ils mettent en évidence une association entre le contrôle exécutif et/ou les compétences cognitives et la « réussite » de la rééducation, notamment chez les patients présentant une aphasie modérée ou sévère. Pour expliquer ce résultat, ils proposent que les patients présentant une aphasie plus sévère recrutent davantage de ressources cognitives extra-linguistiques afin de réaliser les tâches liées à la rééducation. Ainsi, la capacité d'utiliser ces ressources extra-cognitives permettrait de déterminer la réussite de la rééducation (Simic et al., 2019). L'évaluation des capacités de contrôle exécutif semble donc être une étape importante lors du diagnostic de l'aphasie et pour déterminer l'issue de la rééducation.

Ainsi, nous proposons que l'évaluation des fonctions exécutives, de la sévérité initiale de l'AVC, de la taille et de la localisation de la lésion permettrait de déterminer la sévérité initiale de l'aphasie. Ces facteurs pourraient donc être pris en compte par les cliniciens lors de la mise en place de la rééducation, afin de proposer une rééducation permettant la meilleure récupération possible. En effet, comme le mentionne Fridriksson et Hillis (2021), la sévérité de l'aphasie et les troubles de

la parole ou du langage sont pris en compte dans la personnalisation de la rééducation afin d'en augmenter l'efficacité. Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser aux déterminants de la récupération, c'est-à-dire aux facteurs qui sont associés à une récupération plus importante du langage chez les patients présentant une aphasie post-AVC. Ainsi, ces deux chapitres (Chapitres 2 et 3) nous permettront, lors de la discussion générale de cette thèse, de proposer des pistes pour les cliniciens dans le cadre de la prise en charge des patients.

Notre étude présente plusieurs limitations. Premièrement, les groupes (S-Aph, M-Aph, N-Aph) ne sont pas parfaitement équilibrés en nombre de patients et il y a des valeurs manquantes pour certains patients, ainsi les résultats devraient être confirmés sur un plus grand nombre de patients ayant des données complètes. Deuxièmement, cette étude prend en compte uniquement les patients admis dans les services hospitaliers. Or, il a été suggéré que certaines personnes ayant un statut socio-économique inférieur sont moins susceptibles de rechercher des soins hospitaliers (Allain, Naouri, & de Peretti, 2022). Par conséquent, l'influence du statut socio-économique peut être plus importante que ne le révèlent les données de notre étude. Enfin, troisièmement, dans les analyses VLSM et VDSM, nous n'avons pas pris en compte la taille de la lésion ou d'autres facteurs en tant que co-variables. Or, une étude récente suggère l'importance des co-variables telles que la taille de la lésion, l'âge et le délai post-AVC de l'imagerie, dans les analyses VLSM (Rajashekar et al., 2020). Cependant, dans notre cas, nous n'avons pas considéré la taille de la lésion comme co-variable étant donné la « petite » taille de notre échantillon et de nos groupes (comme suggéré par Shahid et al., 2017). Nous proposons toutefois qu'une évaluation des déterminants de la sévérité de l'aphasie prenant en compte conjointement les facteurs sociodémographiques, cliniques et associés à la lésion, dont la localisation de la lésion, permettrait de proposer un modèle complet des déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie. En effet, ici, nous avons évalué le rôle de la localisation de la lésion séparément. Une future étude pourrait être envisagée dans ce sens.

Résumé 2.1 : Conclusion

- Le dysfonctionnement exécutif, la sévérité de l'AVC et la taille de la lésion sont associés à la sévérité initiale de l'aphasie.
- Une lésion localisée au niveau de l'insula, du gyrus frontal inférieur *pars opercularis* et *pars triangularis* et de l'opercule rolandique et une déconnexion du faisceau arqué, du faisceau occipito-frontal inférieur, du faisceau frontal oblique, des radiations thalamiques supérieures à gauche et du corps calleux sont associées à une aphasie plus sévère initialement.
- Nous proposons que l'évaluation des fonctions exécutives, de la sévérité initiale de l'AVC, de la taille et de la localisation de la lésion, permettrait de déterminer la sévérité initiale de l'aphasie. Ces facteurs pourraient donc être pris en compte par les cliniciens, lors de la mise en place de la rééducation, afin de proposer une rééducation adaptée permettant la meilleure récupération possible.

CHAPITRE 3

Les déterminants de la récupération du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC

Table des Matières

1	Méthode	93
1.1	<i>Design</i> de l'étude et participants	93
1.2	Mesure principale : gain relatif	93
1.3	Facteurs à l'étude	94
1.3.1	Facteurs sociodémographiques	95
1.3.2	Facteurs cliniques	95
1.3.3	Facteurs lésion-dépendants	96
1.3.4	Facteurs rééducation-dépendants	96
1.4	Analyses statistiques	97
1.5	Analyses <i>Voxel-based Symptom Mapping</i>	97
2	Résultats	98
2.1	Participants	98
2.2	Déterminants de la récupération du langage et de la parole	101
2.3	Déterminants lésionnels de la récupération du langage	104
3	Discussion	104

Dans la littérature, un certain nombre de facteurs influençant la récupération du langage chez les patients présentant une aphasie, ont été décrits (voir Chapitres 1, Section 5.2). Parmi ces facteurs, on retrouve : les facteurs sociodémographiques, cliniques, associés à la lésion et à la rééducation. Nous rappelons ci-dessous, brièvement, les différents facteurs.

Parmi les facteurs sociodémographiques, certaines études suggèrent que la plasticité cérébrale plus importante observée chez les individus jeunes (Boden-Albala et al., 2005) et la réduction de l'asymétrie inter-hémisphérique observée chez les gauchers et les femmes (Labache et al., 2020 ; Tzourio-Mazoyer et al., 2017) seraient à l'origine d'une meilleure récupération (pour des revues, voir Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Wabila & Balarabe, 2015). De plus, un niveau d'éducation plus important serait associé à une meilleure récupération (Hillis & Tippett, 2014). Cependant, le rôle de ces facteurs ne semble pas systématiquement démontré et certaines études suggèrent qu'il existe des facteurs confondants (*e.g.*, voir Ellis & Urban, 2016 ; Kristinsson et al., 2022 ; Wallentin, 2018).

Parmi les facteurs cliniques, les capacités cognitives telles que la mémoire de travail visuo-spatiale (Seniów et al., 2009), la mémoire à court terme verbale (Dignam et al., 2017 ; Gilmore et al., 2019) et les fonctions exécutives (Fillingham, Sage, & Lambon Ralph, 2006 ; Gilmore et al., 2019 ; Simic et al., 2020 ; Yeung & Law, 2010) modulent la récupération du langage. Plus spécifiquement, Simic et al. (2020) ont montré que le maintien des capacités de flexibilité et de mise à jour en mémoire de travail était associé à une meilleure récupération. Maas et al. (2012) ont également montré un lien entre le niveau de handicap avant l'AVC et la récupération. Enfin, Godecke et al. (2013) ont montré que le degré de handicap, en association avec la sévérité initiale de l'aphasie et l'intensité de la rééducation, permettait de prédire la récupération du langage.

Parmi les facteurs associés à la lésion, la sévérité initiale de l'aphasie est décrite comme le meilleur prédicteur de la récupération : plus l'aphasie est sévère initialement, moins la récupération sera importante (Lahiri, Dubey, Ardila, Sanyal, & Ray, 2021). Cependant, certaines études ont montré que les patients avec une aphasie sévère initialement présentaient un gain élevé au niveau des performances de langage après la rééducation (*e.g.*, voir Osa García et al., 2020 ; Robey, 1998). La taille et la localisation de la lésion sont également des prédicteurs de la récupération (Harvey et al., 2022 ; Maas et al., 2012 ; Sul et al., 2019). En effet, une lésion plus large avec une atteinte des régions clés pour le langage serait associée à une faible récupération (Kiran & Thompson, 2019). Parmi les régions clés, l'intégrité des régions frontales, du cortex temporo-pariétal et de

la substance blanche sous-jacente est associée à la récupération du langage en phase chronique (Harvey et al., 2022 ; Hauwelle et al., 2018 ; Zavanone et al., 2018). Plus spécifiquement, des études ont montré le rôle de la jonction temporo-pariétale (Benghanem et al., 2019), du cortex rolandique, du gyrus de Heschl, de la *corona radiata* postérieure, du cortex supramarginal, du FLS, du GTS et de l'insula (Sul et al., 2019). La sévérité de l'AVC joue également un rôle sur la récupération : plus l'AVC est sévère initialement, plus l'aphasie est sévère et moins bonne est la récupération (Pedersen et al., 2004). Enfin, le type d'aphasie semble également jouer un rôle, avec une meilleure récupération chez les patients présentant une aphasie fluente (Jung et al., 2011). Cependant, ce dernier facteur semble fortement lié à d'autres facteurs lésion-dépendants, tels que la taille et la localisation de la lésion (Kristinsson et al., 2022). En effet, il existe une association entre la localisation de la lésion et les troubles en fluence verbale (*e.g.*, pour des revues, voir Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Watila & Balarabe, 2015). Notamment, l'intégrité du GFI, de l'insula, du GFM, du gyrus précentral (Fridriksson et al., 2013 ; Park et al., 2021), ainsi que de l'opercule rolandique (Fridriksson et al., 2013) et du LPI (Park et al., 2021) est associée au maintien de la fluence verbale. Yourganov et al. (2015) ont également montré que l'atteinte du GFI, de l'opercule rolandique, du GFM, de l'insula, des gyri précentral et postcentral, du putamen et des régions temporales est associée à une aphasie non fluente (*i.e.*, une aphasie de Broca ou globale). De plus, une atteinte au niveau du FA et du FU (*e.g.*, Basilakos et al., 2014 ; Fridriksson et al., 2013 ; Hope et al., 2016 ; Yourganov et al., 2015) est associée à des troubles de la fluence verbale.

Enfin, parmi les facteurs associés à la rééducation, on retrouve notamment son type, son intensité et sa durée. En effet, une rééducation orthophonique intensive est associée à une meilleure récupération (Brady et al., 2016). De plus, une rééducation personnalisée (*i.e.*, adaptée au patient, prenant en compte la sévérité de l'aphasie et les troubles associées) avec l'ajout d'exercices à domicile (*i.e.*, l'utilisation de la télé-rééducation pour favoriser l'accès à la rééducation) permet une meilleure récupération (Brady et al., 2022b ; Fridriksson & Hillis, 2021). Fridriksson et Hillis (2021) mentionnent également que l'augmentation de la durée de la rééducation (*e.g.*, avec l'utilisation d'applications) permettrait d'augmenter l'efficacité de la rééducation. Enfin, le type d'aphasie peut également influencer la récupération du langage (pour une revue, voir Fridriksson & Hillis, 2021). Cependant, l'effet du type d'aphasie est associé à d'autres facteurs tels que la localisation de la lésion ou la sévérité de l'aphasie (*e.g.*, Fridriksson, Basilakos, Hickok, Bonilha, & Rorden, 2015 ; Kristinsson

et al., 2021). Par exemple, Kristinsson et al. (2021) ont mis en évidence l'effet bénéfique d'une thérapie sémantique chez les patients atteints d'aphasie légère, tandis que les patients présentant une aphasie sévère tirent un bénéfice plus important d'une thérapie phonologique.

Nous l'avons montré dans le Chapitre 2, le dysfonctionnement exécutif, la sévérité de l'AVC, la taille et la localisation de la lésion sont des déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie. Plus spécifiquement, une aphasie plus sévère initialement est associée à un AVC plus sévère, un dysfonctionnement exécutif plus important, une lésion plus large, une atteinte au niveau de l'insula, du GFI-tri, du GFI-op, de l'opercule rolandique gauche et une déconnexion au niveau de l'IFOE, du FA, du FAT, des RTS à gauche et du corps calleux.

Dans ce chapitre, nous souhaitons déterminer, parmi les facteurs sociodémographiques, cliniques, associés à la lésion et à la rééducation, lesquels sont associés à une récupération plus importante du langage. Nous supposons, qu'une meilleure connaissance de ces facteurs influençant directement la récupération ainsi que des facteurs indirects qui influencent la sévérité initiale de l'aphasie, identifiés dans le chapitre précédent, nous permettra de proposer des pistes pour la prise en charge orthophonique de l'aphasie. Par ailleurs, une connaissance des facteurs permettant de prédire la récupération présente des intérêts : (i) au niveau clinique, en permettant aux cliniciens de proposer une rééducation personnalisée qui sera plus efficace et donc permettra une meilleure récupération et (ii) pour la recherche, en permettant de déterminer le type de rééducation le plus adapté ou l'intensité de rééducation optimale et de comprendre les mécanismes sous-tendant la récupération des fonctions langagières (Kristinsson et al., 2022).

Pour cela, nous avons réalisé une étude sur une cohorte de 53 patients présentant une aphasie post-AVC, provenant de la cohorte présentée dans le Chapitre 2. À l'aide du score de sévérité d'aphasie (*Aphasia Severity Rating Scale*, ASRS) mesuré lors des évaluations initiale et finale, nous avons calculé un gain relatif permettant de déterminer l'amplitude de la récupération (élevée ou faible). Des analyses statistiques univariées et multivariées nous ont permis d'évaluer les facteurs associés conjointement à la récupération du langage et de la parole. Parmi les facteurs lésion-dépendants, nous avons évalué séparément la relation entre les structures cérébrales endommagées et la récupération du langage à l'aide d'analyses de type *Voxel-based Symptom Mapping*. Ces analyses nous

ont permis d'évaluer l'association entre la récupération et les structures lésées (*Voxel-based Lesion-Symptom Mapping*, VLSM) et l'association entre la récupération et les probabilités de déconnexion des faisceaux de substance blanche (*Voxel-based Disconnectome-Symptom Mapping*, VDSM).

Article

Les données présentées dans ce chapitre sont issues, en partie, du même article que le chapitre précédent : [Haldin et al. \(in prep\)](#) (Annexe E).

Haldin, C., Dai, S., Piscicelli, C., Marcon, V., Løevenbruck, H., Pérennou, D., & Baciou, M. (in prep). *Multifactorial interplay on language recovery after left-hemispheric stroke. A retrospective study.*

1 Méthode

1.1 Design de l'étude et participants

Dans cette étude observationnelle retrospective monocentrique, nous avons inclus 53 patients parmi les 96 patients présentés dans le Chapitre 2. Ainsi, il s'agit de patients qui ont été admis dans le service de rééducation neurologique du CHU Grenoble Alpes, suite à un AVC survenu entre janvier 2012 et octobre 2019. Ces patients ont eu une évaluation initiale (EI, avant 60 jours post-AVC) et une évaluation finale (EF, avant 180 jours post-AVC). Les critères d'inclusion et d'exclusion sont identiques à ceux présentés dans la Section 1.1 du Chapitre 2. Toutefois, nous avons ajouté trois critères d'exclusion : les patients sans aphasie, les patients n'ayant pas eu d'EF du langage ou ayant eu une évaluation après 180 jours post-AVC, et les patients ayant un score de sévérité d'aphasie ne permettant pas le calcul du gain (voir détails dans la section suivante).

Ainsi, parmi les 96 patients présentés dans le Chapitre 2, nous avons exclu 24 patients cérébro-lésés sans aphasie, 16 patients n'ayant pas eu d'évaluation finale ou une évaluation après 180 jours post-AVC et 3 patients ayant un score de sévérité initiale ne permettant pas le calcul du gain. Dans cette étude, nous avons donc inclus 53 patients présentant une aphasie post-AVC au niveau de l'hémisphère gauche (voir Figure 3.1).

1.2 Mesure principale : gain relatif

Afin d'évaluer la récupération du langage et de la parole pour chacun des patients, nous avons calculé un gain relatif. Pour rappel, la sévérité de l'aphasie a été évaluée à l'aide de l'ASRS ([Goodglass](#)

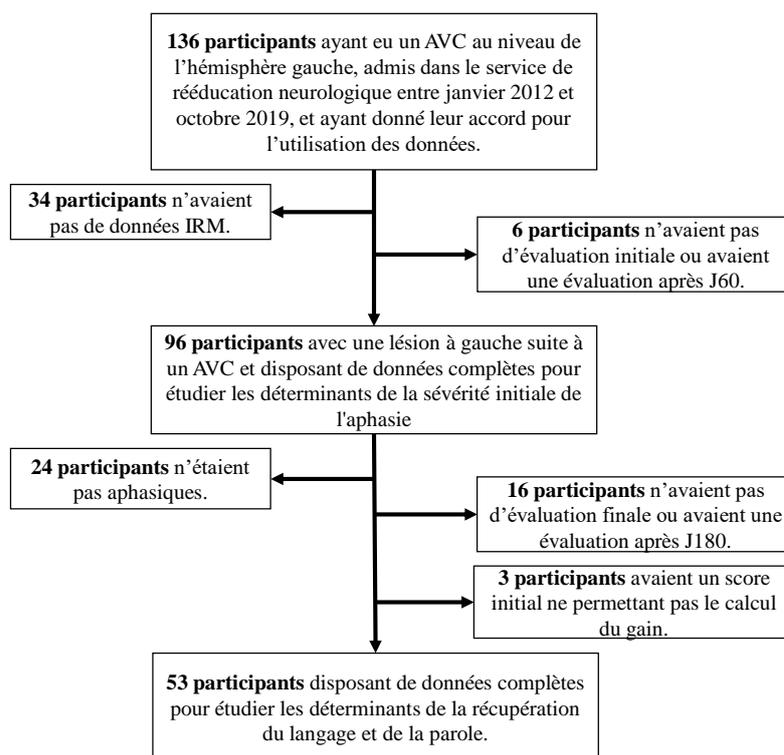


FIGURE 3.1 – Participants inclus dans l'étude sur les déterminants de la récupération du langage.

& Kaplan, 1983 ; Mazaux & Orgogozo, 1981), lors de l'EI et de l'EF. Nous avons donc calculé un gain relatif à l'aide de ces scores : $\frac{ASRS_{EF} - ASRS_{EI}}{ASRS_{EI}}$.

Sur la base de ce calcul de gain, et en observant la distribution de la variable (voir Figure 3.2), nous avons constitué deux groupes : les patients avec une récupération élevée ($Gain \geq 0,5$) et une récupération faible ($Gain < 0,5$).

1.3 Facteurs à l'étude

Pour chacun des patients, nous avons récupéré des données concernant les facteurs sociodémographiques, cliniques, associés à la lésion (nommés « lésion-dépendants ») et à la rééducation (nommés « rééducation-dépendants »). Les détails concernant ces scores sont présentés dans le Chapitre 2. Toutefois, nous les rappellerons ici brièvement, ainsi que d'autres scores mesurés dans le cadre de cette étude.

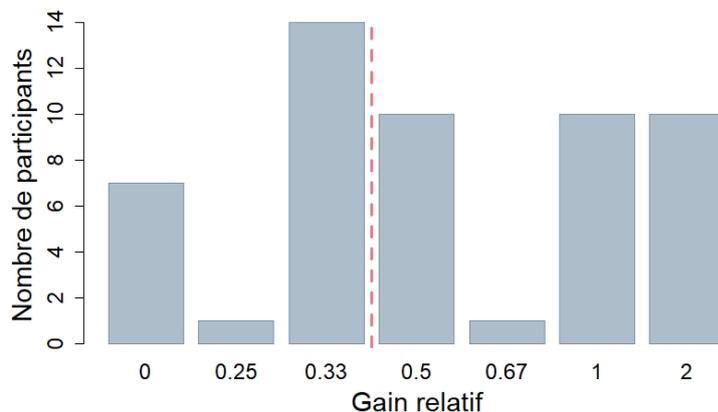


FIGURE 3.2 – Distribution de la variable « gain relatif ». En rose, le *cut-off* choisi permettant de séparer les patients avec une récupération élevée ($Gain \geq 0,5$) et ceux avec une récupération faible ($Gain < 0,5$).

1.3.1 Facteurs sociodémographiques

Parmi les facteurs sociodémographiques déterminés durant l'examen ou l'entretien avec le patient, nous avons récupéré des données concernant : l'âge, la **préférence manuelle** (Oldfield, 1971), le **sexe**, le **niveau d'éducation**, le **statut professionnel** et le **niveau d'isolement** (le participant vit seul et la présence de l'entourage).

1.3.2 Facteurs cliniques

Parmi les facteurs cliniques, nous avons récupéré les données issues de l'EI telles que : le **handicap général**; la **faiblesse musculaire** des membres supérieurs et inférieurs; les **troubles dépressifs**; le **dysfonctionnement exécutif**; l'**apraxie** des membres supérieurs; et la **négligence spatiale**. Pour le handicap, la faiblesse musculaire, le dysfonctionnement exécutif, l'apraxie et la négligence spatiale, nous avons constitué deux groupes : avec un trouble léger ou aucun trouble (0) et avec un trouble modéré ou sévère (1).

Les capacités de **dénomination** des patients ont été évaluées, lors des évaluations initiale et finale, à l'aide d'un test de dénomination d'images du BDAE (Goodglass & Kaplan, 1983 ; Mazaux & Orgogozo, 1981) ou de la DO80 (Deloche & Hannequin, 1997). Nous avons donc mesuré l'évolution des capacités de dénomination entre l'EI et l'EF. Pour cela, nous avons déterminé le pourcentage de réussite lors de la tâche de dénomination (pourcentage de réponses correctes, %RC) et nous avons calculé la différence entre le %RC à l'EF et l'EI : $\Delta_{Dénomination} = \%RC_{EF} - \%RC_{EI}$.

Enfin, nous avons mesuré le délai entre la survenue de l'AVC et la mesure de sévérité de l'aphasie lors de l'EF, appelé « **Délai sévérité-EF** » (en jours post-AVC). Ainsi que le délai entre les deux évaluations (EI et EF), appelé « **Délai EI-EF** » (en jours).

1.3.3 Facteurs lésion-dépendants

Parmi les facteurs lésion-dépendants, nous avons récupéré les données concernant : la **sévérité de l'AVC**, mesurée par le NIHSS (Brott et al., 1989) ; le **type d'AVC** (ischémique ou hémorragique) ; et le **type d'aphasie** (fluente ou non fluente).

À l'aide des données de neuroimagerie, nous avons déterminé la sévérité des hyperintensités de la substance blanche (*White Matter Hyperintensities*, WMHs) ainsi que les paramètres lésionnels (taille et localisation de la lésion).

Concernant les **WMHs**, les patients sont classés en deux groupes : WMHs légères ou aucune (0) et WMHs modérées ou sévères (1).

Concernant la **localisation de la lésion**, nous avons réalisé des masques des lésions de chaque patient, ce qui nous permet d'avoir des informations sur la localisation et la **taille de la lésion**. Nous avons également extrait des cartes de déconnexion avec, pour chaque patient, une probabilité de déconnexion pour chaque voxel au niveau des fibres de substance blanche. Les détails concernant l'obtention de ces masques et des cartes de déconnexion sont présentés dans la Section 1.3.3 du Chapitre 2.

Les cartes de « superposition » des lésions et des déconnexions ont été réalisées en superposant les masques des lésions ou les cartes de probabilités de déconnexion de tous les patients sur un cerveau modèle (mni152, www.bic.mni.mcgill.ca/ServicesAtlases/ICBM152NLin2009) à l'aide du logiciel MRICroGL (Rorden, 2022).

1.3.4 Facteurs rééducation-dépendants

Entre les deux évaluations (EI et EF), les patients ont suivi un programme de rééducation orthophonique avec un(e) orthophoniste. Ainsi, nous avons mesuré : l'**intensité de la rééducation** (en nombre moyen de séances/semaine) et le **début de la rééducation** (en jours post-AVC). L'intensité de la rééducation a été calculée à partir de la durée de la rééducation (en jours) et du nombre de séances réalisées.

1.4 Analyses statistiques

Dans cette étude, nous souhaitons évaluer les déterminants de la récupération du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC. Ainsi, à partir du calcul du gain relatif, nous avons constitué deux groupes de patients avec une récupération élevée ou une récupération faible. Nous avons ensuite réalisé des analyses statistiques univariées afin d'évaluer la différence entre les groupes. Pour cela, nous avons comparé les deux groupes à l'aide d'un test U de *Mann-Whitney* ou d'un test du χ^2 et nous avons défini un seuil de significativité à 0,05.

Les variables jugées significatives ont ensuite été incluses pas-à-pas dans une analyse de régression logistique binaire multivariée, couplée avec du *bootstrap* (ré-échantillonnage avec 1000 répliques), afin d'explorer davantage leur association avec la récupération, définie par les deux groupes (récupération élevée et faible). À l'issue de cette analyse, nous présenterons les résultats du *bootstrap* avec : (i) le pourcentage de fois où une variable est sélectionnée dans le modèle (pour les 1000 répliques), (ii) le pourcentage de fois où le signe du coefficient de régression est positif ou négatif pour chaque variable et (iii) le pourcentage de fois où la variable est significative dans le modèle. Puis, nous donnerons le modèle final le plus stable comprenant le ou les facteur(s) associé(s) à la récupération du langage et de la parole dans l'aphasie. Notons que, l'ensemble des analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel *R* ([RStudio Team, 2020](#)).

1.5 Analyses *Voxel-based Symptom Mapping*

Pour étudier la relation entre les structures cérébrales endommagées et la récupération, évaluée par le gain relatif, nous avons utilisé : (i) des analyses VLSM pour évaluer la relation entre les dommages au niveau de la substance grise (en utilisant les masques des lésions) et la récupération; et (ii) des analyses VDSM pour évaluer la relation entre les cartes de déconnexion des faisceaux de substance blanche et la récupération. Ces analyses ont été réalisées à l'aide de la *toolbox* NiiStat (www.nitrc.org/projects/niistat/), qui fonctionne sous Matlab (R2019b, Mathworks Inc., Sherborn, MA, USA).

La récupération a été traitée comme une variable catégorielle (récupération élevée ou faible). Nous avons créé un masque à partir des résultats du Chapitre 2, ce qui permet de concentrer les analyses sur des régions spécifiques. Ici, nous avons restreint les analyses aux voxels lésés significativement associés à la sévérité initiale de l'aphasie pour les analyses VLSM et aux voxels

présentant des déconnexions significativement associés à la sévérité initiale de l'aphasie pour les analyses VDSM. La relation entre les structures cérébrales endommagées (lésion ou déconnexion) et la récupération a été évaluée à l'aide d'analyses univariées massives. Un test statistique est effectué pour chaque voxel, ainsi pour corriger les comparaisons multiples nous avons effectué 5000 permutations, avec un seuil de $p < 0,05$. De plus, dans ce type d'analyses, la puissance statistique est très faible pour les régions qui sont rarement lésées. Ainsi, afin de prendre en compte cette limite, les analyses sont effectuées sur les voxels pour lesquels au moins 10% des patients partagent une lésion, ici $N = 5$.

Les atlas AAL (Tzourio-Mazoyer et al., 2002) et HCP1065 (Yeh, 2022) ont été utilisés pour identifier les structures mises en évidence lors des analyses VLSM et VDSM, au niveau de la substance grise et des faisceaux de substance blanche, respectivement. Les résultats ont été visualisés à l'aide des logiciels MRICroGL (Rorden, 2022) et BrainNet Viewer (Xia et al., 2013, www.nitrc.org/projects/bnv/)

2 Résultats

2.1 Participants

Les données sociodémographiques et cliniques des patients sont présentées dans le Tableau 3.1. Nous avons présenté les données pour tous les patients ($N = 53$) mais également pour chaque groupe de patients, défini selon leur niveau de récupération : récupération faible ($Gain < 0,5$, $N = 22$) et récupération élevée ($Gain \geq 0,5$, $N = 31$). Notons que, parmi les 53 patients de cette étude, 33 (62,3%) présentent une aphasie sévère initialement, dont 30 (96,8%) sont dans le groupe « récupération élevée »

L'âge médian pour tous les patients est de 62,5 ans (54-70,6), 36 (67,92%) sont des hommes, 50 (94,34%) sont droitiers, 15 (28,85%) ont un niveau d'éducation supérieur au baccalauréat, 23 (44,23%) ont un emploi, 15 (29,41%) vivent seuls et 40 (78,43%) ont un soutien important de la part de leur entourage. Le score médian de dépression est de 8 (5,25-11), suggérant l'absence de dépression, et la variation du pourcentage de réponses correctes en dénomination est de 17,5% (3,75-40). Trente-neuf patients (73,58%) présentent un handicap modéré ou sévère, 21 (39,62%) ont une faiblesse musculaire modérée ou sévère des membres supérieurs et inférieurs, 37 (69,81%) ont un dysfonctionnement exécutif modéré ou sévère, 16 (32,65%) présentent une apraxie modérée ou sévère des membres supérieurs et 16 (30,19%) ont une négligence spatiale

3. Les déterminants de la récupération du langage et de la parole

Tableau 3.1 – Facteurs sociodémographiques, cliniques, lésion-dépendants et rééducation-dépendants. Les données sont représentées pour tous les patients ($N = 53$) et pour les deux groupes de patients ayant une récupération faible ($N = 22$) ou élevée ($N = 31$).

	Tous les patients ($N = 53$)	Récupération faible ($N = 22$)	Récupération élevée ($N = 31$)	
<i>Facteurs sociodémographiques</i>	Âge (années)	62,5 (54-70,6)	57,15 (49,10-70,45)	64,30 (59,20-70,50)
	Sexe, homme (%)	36 (67,92)	12 (54,55)	24 (77,42)
	Préférence manuelle, droitiers (%)	50 (94,34)	21 (95,45)	29 (93,54)
	Niveau d'éducation, > baccalauréat (%)	15 (28,85)	7 (31,82)	8 (26,67)
	Statut professionnel, employé (%)	23 (44,23)	10 (45,45)	13 (43,33)
	Isolement, vit seul (%)	15 (29,41)	5 (23,81)	10 (33,33)
	Entourage, présence forte (%)	40 (78,43)	18 (85,71)	22 (73,33)
	<i>Facteurs cliniques</i>	Handicap, modéré ou sévère (%)	39 (73,58)	14 (63,64)
Faiblesse MS et MI, modérée ou sévère (%)		21 (39,62)	6 (27,27)	15 (48,39)
Dépression, ADRS (0-32)		8 (5,25-11)	7,5 (5,75-9,25)	8 (5,25-11,75)
Dysfonctionnement exécutif, modéré ou sévère (%)		37 (69,81)	12 (54,55)	25 (80,65)
Apraxie MS, modérée ou sévère (%)		16 (32,65)	6 (30,00)	10 (34,48)
Négligence spatiale, modérée ou sévère (%)		16 (30,19)	6 (27,27)	10 (32,36)
Δ <i>Dénomination</i>		17,5 (3,75-40)	17,08 (1,88-26,46)	21,25 (7,19-49,07)
Délai sévérité-EF (en jours post-AVC)		82 (62-123)	81 (64,75-105)	82 (61,5-135,50)
<i>Facteurs lésion-dépendants</i>	Délai EI-EF (en jours)	59 (44-101)	60 (45,25-92,25)	59 (43-106,50)
	Type d'aphasie, fluente (%)	36 (67,92)	18 (81,82)	18 (58,06)
	Type d'AVC, ischémique (%)	45 (84,91)	17 (77,27)	28 (90,32)
	Sévérité de l'AVC, NIHSS (0-42)	13 (8,75-18)	11 (8-20)	13 (9-17,5)
	WMHs, modérées ou sévères (%)	15 (28,30)	6 (27,27)	9 (29,03)
<i>Facteurs rééducation-dépendants</i>	Taille de la lésion (en voxels)	23 300 (7833-45 637)	17 646 (5012-31 529)	33484 (13 530-75 011)
	Début de la rééducation (en jours post-AVC)	17 (13-24)	14,5 (1,25-22,25)	21 (15-24)
	Intensité de la rééducation (en séances/semaine)	4,4 (2,4-5)	3,5 (1,53-4,63)	5 (4-5)

Les données sont présentées sous forme de médiane avec les premiers et troisièmes quartiles (Q1-Q3) ou sous forme de nombre avec le pourcentage associé.

MS, membres supérieurs; MI, membres inférieurs; ADRS, *Aphasia Depression Rating Scale*; EF, évaluation finale; EI, évaluation initiale; AVC, accident vasculaire cérébral; NIHSS, *National Institutes of Health Stroke Scale*; WMHs, *White Matter Hyperintensities* (hyperintensités de la substance blanche).

modérée ou sévère. Enfin, l'évaluation finale a été réalisée 82 (62-123) jours après l'AVC et il y a eu 59 (44-101) jours entre l'EI et l'EF.

La majorité des patients ont eu un AVC ischémique (84,91%) et cet AVC est modéré (NIHSS médian à 13 [8,75-18]) et trente-six (67,92%) présentent une aphasie fluente. Quinze patients (28,30%) présentent des WMHs modérées ou sévères et la taille médiane de la lésion est de

23 300 voxels (7833-45637).

Enfin, parmi les facteurs associés à la rééducation, la rééducation suivie par les patients a débuté 17 (13-24) jours après l'AVC et l'intensité médiane était de 4,4 (2,4-5) séances/semaine.

Ce jeu de données comporte des données manquantes ($N = 30$, 2,46%) : niveau d'éducation ($N = 1$), statut professionnel ($N = 1$), vit seul ($N = 2$), présence de l'entourage ($N = 2$), NIHSS ($N = 1$), début de la rééducation ($N = 2$), intensité de la rééducation ($N = 2$), $\Delta_{Dénomination}$ ($N = 12$), apraxie des membres ($N = 4$), ADRS ($N = 3$).

La superposition des lésions des patients est présentée dans la Figure 3.3 et la superposition des cartes de déconnexion dans la Figure 3.4. Les régions pour lesquelles il y a le plus de superposition sont l'insula, le GFI, l'opercule rolandique, le putamen, le gyrus de Heschl et les régions temporales supérieures. Concernant les cartes de déconnexions, les faisceaux pour lesquelles il y a le plus de superposition sont les radiations thalamiques, l'IFOE, le FLS, le FA, le FAT et le faisceau cortico-spinal à gauche et le corps calleux.

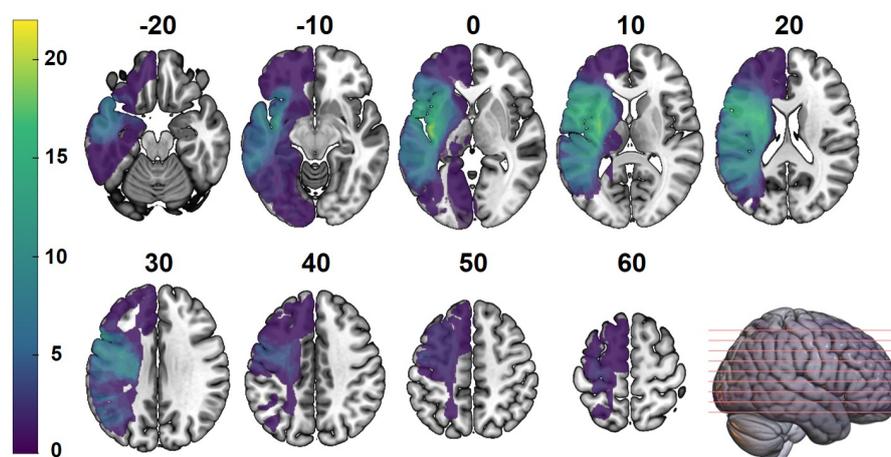


FIGURE 3.3 – Superposition des lésions de tous les patients ($N=53$). Les coupes axiales sont présentées et les coordonnées z dans l'espace MNI sont mentionnées au-dessus de chaque coupe. Les couleurs plus claires (vert, jaune) indiquent les voxels lésés pour le plus grande nombre de patients.

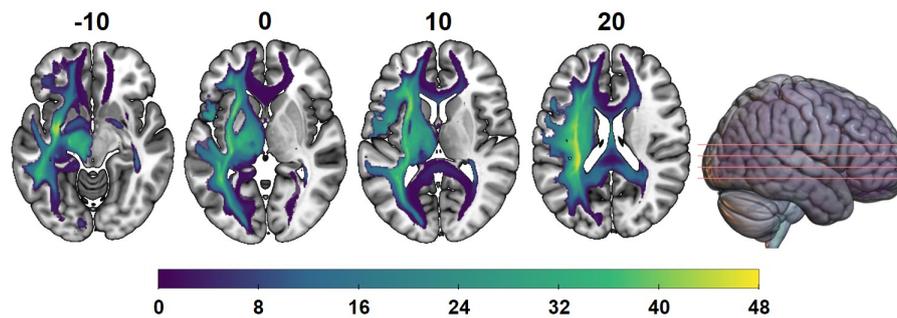


FIGURE 3.4 – Superposition des cartes de déconnexions de tous les patients ($N=53$). Les coupes axiales sont présentées et les coordonnées z dans l'espace MNI sont mentionnées au-dessus de chaque coupe. Les couleurs plus claires (vert, jaune) indiquent les voxels pour lesquels un plus grand nombre de patients présentent une déconnexion.

2.2 Déterminants de la récupération du langage et de la parole

Les résultats des analyses statistiques univariées sont présentés dans le Tableau 3.2. Ces résultats montrent qu'aucun facteur sociodémographique n'est différent entre les deux groupes. Cependant, parmi les facteurs cliniques, lésion-dépendants et rééducation-dépendants, trois facteurs sont statistiquement différents entre les patients avec une récupération élevée et faible : le dysfonctionnement exécutif, la taille de la lésion et l'intensité de la rééducation. En effet, parmi les patients ayant une récupération élevée, un plus grand nombre présentaient un dysfonctionnement exécutif ($\chi^2 = 4,16$; $p = 0,041$; $v = 0,28$) et ils présentaient une taille de lésion plus importante ($Z = -2,31$; $p = 0,020$; $r = 0,32$)¹ et une intensité de la rééducation plus importante ($Z = -3,04$; $p = 0,0023$; $r = 0,43$).

Pour les analyses multivariées, nous avons effectué une analyse de régression logistique binaire pas-à-pas (« *forward stepwise analyses* »), couplée avec du *bootstrap* (ré-échantillonnage avec 1000 répliques), en testant les variables significatives issues des analyses univariées : taille de la lésion, dysfonctionnement exécutif et intensité de la rééducation. La taille de la lésion a été normalisée et les patients pour lesquels il y avait des données manquantes pour l'une des variables indépendantes d'intérêt ont été retirés de l'échantillon avant d'effectuer les analyses multivariées ($N_{final} = 51$). Avant d'effectuer les analyses, nous avons testé la colinéarité entre les facteurs à

1. Rappelons que les patients du groupe « récupération élevée » ont un gain élevé et ce gain est plus élevé chez les patients présentant initialement une aphasie sévère. Les patients avec un gain élevé présentaient donc une aphasie plus sévère initialement, et la sévérité est associée à la taille de la lésion et au dysfonctionnement exécutif, ce qui explique le dysfonctionnement exécutif plus sévère et la taille de la lésion plus importante chez les patients avec une récupération élevée.

Tableau 3.2 – Résultat des analyses statistiques univariées issues de la comparaison entre les groupes de patients ayant une récupération élevée ou faible. La différence entre les groupes est évaluée à l'aide d'un test *U* de *Mann-Whitney* ou d'un test du χ^2 et une valeur de *p* inférieure à 0,05 est considérée comme statistiquement significative. Les résultats significatifs sont notés en gras.

		Récupération faible vs. élevée
Facteurs sociodémographiques	Âge (années)	$Z = -1,60, p = 0,11$
	Sexe, homme (%)	$\chi^2 = 3,09, p = 0,079$
	Préférence manuelle, droitiers (%)	$\chi^2 = 0,088, p = 0,77$
	Niveau d'éducation, > baccalauréat (%)	$\chi^2 = 0,16, p = 0,69$
	Statut professionnel, employé (%)	$\chi^2 = 0,023, p = 0,88$
	Isolement, vit seul (%)	$\chi^2 = 0,054, p = 0,46$
	Entourage, présence forte (%)	$\chi^2 = 1,12, p = 0,29$
Facteurs cliniques	Handicap, modéré ou sévère (%)	$\chi^2 = 1,92, p = 0,17$
	Faiblesse MS et MI, modérée ou sévère (%)	$\chi^2 = 2,40, p = 0,12$
	Dépression, ADRS (0-32)	$Z = -0,43, p = 0,67$
	Dysfonctionnement exécutif, modéré ou sévère (%)	$\chi^2 = 4,16, p = 0,041, v = 0,28$
	Apraxie MS, modérée ou sévère (%)	$\chi^2 = 0,11, p = 0,74$
	Négligence spatiale, modérée ou sévère (%)	$\chi^2 = 0,15, p = 0,70$
	Δ Dénomination	$Z = -0,99, p = 0,33$
Délai sévérité-EF (en jours post-AVC)	$Z = -0,60, p = 0,55$	
Délai EI-EF (en jours)	$Z = -0,53, p = 0,59$	
Facteurs lésion-dépendants	Type d'aphasie, fluente (%)	$\chi^2 = 3,33, p = 0,068$
	Type d'AVC, ischémique (%)	$\chi^2 = 1,71, p = 0,19$
	Sévérité de l'AVC, NIHSS (0-42)	$Z = -0,13, p = 0,90$
	WMHs, modérées ou sévères (%)	$\chi^2 = 0,020, p = 0,89$
	Taille de la lésion (en voxels)	$Z = -2,31, p = 0,020, r = 0,32$
Facteurs rééducation-dépendants	Début de la rééducation (en jours post-AVC)	$Z = -1,91, p = 0,058$
	Intensité de la rééducation (en séances/semaine)	$Z = -3,05, p = 0,0023, r = 0,43$

MS, membres supérieurs; MI, membres inférieurs; ADRS, *Aphasia Depression Rating Scale*; EF, évaluation finale; EI, évaluation initiale; AVC, accident vasculaire cérébral; NIHSS, *National Institutes of Health Stroke Scale*; WMHs, hyperintensités de la substance blanche.

l'aide du calcul du facteur d'inflation de la variance (VIF). Les différents facteurs ne semblent pas colinéaires puisque le VIF est inférieur à 10 (voir Tableau 3.3).

Ainsi, à l'aide du *bootstrap*, nous avons montré que toutes les variables sont sélectionnées plus de 60% des fois (Austin & Tu, 2004) : 83,5% pour l'intensité de la rééducation, 72,1% pour le dysfonctionnement exécutif et 67,5% pour la taille de la lésion (voir Tableau 3.4). Pour ces trois variables, le coefficient de régression est positif la plupart du temps (entre 99,72% et 100%), ce qui suggère une stabilité du modèle. Cependant, seulement deux de ces facteurs sont significatifs plus

3. Les déterminants de la récupération du langage et de la parole

de 50% du temps : l'intensité de la rééducation (68,26%) et le dysfonctionnement exécutif (67,55%).

Tableau 3.3 – Valeurs du facteur d'inflation de la variance (VIF, *Variance Inflation Factor*) pour les facteurs significatifs issus des analyses univariées et conservés pour les analyses multivariées.

	VIF
Taille de la lésion (normalisée)	1,04
Dysfonctionnement exécutif	1,01
Intensité de la rééducation	1,04

Tableau 3.4 – Résultats de l'analyse de régression pas-à-pas couplée avec le *bootstrap* (ré-échantillonnage avec 1000 réplifications) pour identifier les déterminants de la récupération du langage. Les résultats du *bootstrap* nous fournissent : le pourcentage de fois où une variable est sélectionnée dans le modèle (pour les 1000 réplifications), le pourcentage de fois où le signe du coefficient de régression est positif ou négatif pour chaque variable et le pourcentage de fois où la variable est significative dans le modèle final.

	Variables sélectionnées (%)	Signe du coefficient		Variable significative (%)
		Positif (%)	Négatif (%)	
Intensité de la rééducation	83,5	100,00	0,00	68,26
Dysfonctionnement exécutif	72,1	99,72	0,28	67,55
Taille de la lésion (normalisée)	67,5	99,85	0,15	45,04

Sur la base de l'analyse de régression pas-à-pas (voir Tableau 3.5), seulement l'intensité de la rééducation est significative dans le modèle final (la p-valeur est tendancielle pour le dysfonctionnement exécutif, avec $p = 0,052$). Ainsi, une augmentation d'1 point de l'intensité de la rééducation, c'est-à-dire une augmentation de 1 session/semaine, est associée à une augmentation de 47% des chances d'avoir une récupération élevée ($OR = 1,47$; $IC(95\%) = 1,04 - 2,21$; $p = 0,043$). Ces résultats suggèrent donc qu'une rééducation plus intensive est associée à une récupération plus importante.

Tableau 3.5 – Modèle issu de l'analyse multivariée permettant d'explorer l'association entre les facteurs cliniques, lésion-dépendants et rééducation-dépendants et la récupération du langage.

Variable dépendante	Variables indépendantes (déterminants)	OR	IC (95%)	p-valeur
Groupes de patients (récupération élevée ou faible)	Intensité de la rééducation	1,47	1,04-2,21	0,043
	Dysfonctionnement exécutif	4,07	1,03-18,45	0,052
	Taille de la lésion (normalisée)	1,00	0,99-1,00	0,11

$p < 0.05$ est considéré comme statistiquement significatif. Les résultats significatifs sont notés en gras.
OR, Odds Ratio; IC, intervalle de confiance.

2.3 Déterminants lésionnels de la récupération du langage

Les résultats des analyses VLSM nous ont permis d'identifier, dans la substance grise, deux *clusters*. Le premier *cluster* (109 voxels) est situé au niveau du GFI-op gauche. Les coordonnées MNI du pic sont $-58,1 \times 15,3 \times 14,5$ ($z = 3,7$) et les coordonnées du centre de ce *cluster* sont $-55,1 \times 16,1 \times 13,0$. Le second *cluster* (53 voxels) est situé principalement au niveau du GFI-op gauche. Les coordonnées MNI du pic sont $-61,0 \times 5,8 \times 10,1$ ($z = 3,7$) et les coordonnées du centre de ce *cluster* sont $-61,0 \times 9,4 \times 10,8$.

À l'aide de l'atlas AAL (Tzourio-Mazoyer et al., 2002), nous avons identifié les régions qui constituent ces *clusters*. Ces régions ainsi que la proportion qu'elles représentent dans les *clusters* sont présentées dans le Tableau 3.6. Le premier cluster est constitué uniquement de voxels dans le GFI-op (100%) et le second cluster est constitué de voxels situés dans le GFI-op (96%) et l'opercule rolandique (4%).

Tableau 3.6 – Régions cérébrales identifiées à l'aide de l'atlas AAL (Tzourio-Mazoyer et al., 2002) et associées à la récupération du langage et de la parole. Ces régions, situées au niveau de l'hémisphère gauche, composent les deux *clusters* identifiés.

Volume total (en voxels)	109	53
Frontal inférieur opercularis	100%	96%
Opercule rolandique	0%	4%

Les résultats des analyses VDSM n'ont pas permis d'identifier une association entre la déconnexion des faisceaux de substance blanche et la récupération. En effet, aucun *cluster* d'une taille supérieure à 20 voxels ne ressort de ces analyses.

3 Discussion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux facteurs associés à la récupération du langage dans l'aphasie post-AVC. Nous avons identifié que l'intensité de la rééducation est associée à une récupération du langage plus importante (gain élevé). De plus, une atteinte au niveau du GFI-op est associée à une récupération plus importante. Cependant, aucune association entre la déconnexion des faisceaux de substance blanche et la récupération n'a été mise en évidence.

De nombreuses études ont évalué l'impact des facteurs sociodémographiques, cliniques, lésion-dépendants ou rééducation-dépendants sur la récupération du langage. Parmi ces facteurs, certains

sont plus consistants, tels que la sévérité de l'aphasie (e.g., Lahiri, Dubey, Ardila, Sanyal, & Ray, 2021 ; Lazar et al., 2010 ; Ramsey et al., 2017), la taille et la localisation de la lésion (e.g., Benghanem et al., 2019 ; Harvey et al., 2022 ; Maas et al., 2012 ; Sul et al., 2019 ; Zavanone et al., 2018), et d'autres plus discutés, tels que le sexe, l'âge, la préférence manuelle, le niveau d'éducation (e.g., voir Ellis & Urban, 2016 ; Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Kristinsson et al., 2022 ; Wallentin, 2018 ; Watila & Balarabe, 2015). Notons que, dans notre étude, en raison de l'utilisation de la sévérité initiale de l'aphasie dans le calcul du gain relatif, nous ne pouvons pas évaluer directement le rôle de la sévérité initiale sur la récupération du langage. En revanche, dans cette étude, nous avons quantifié la récupération avec la valeur du gain relatif. Le groupe avec un gain élevé est constitué de 96,8% de patients présentant une aphasie sévère initialement, ce qui suggère un gain plus élevé chez les patients avec une aphasie sévère initialement. Ceci peut s'expliquer par la marge d'amélioration potentielle plus importante chez les patients avec une aphasie sévère initialement, tandis que ceux avec une aphasie modérée ou légère ont une marge d'amélioration potentielle moindre (J. B. Lee et al., 2009 ; Osa García et al., 2020). En effet, pour les patients avec une aphasie sévère initialement, l'ASRS est faible (entre 0 et 2) et il peut ainsi augmenter de 1 à 5 points lors de l'EF; tandis que, pour les patients avec une aphasie modérée/légère, l'ASRS est plus élevé (3 ou 4) et ils peuvent donc s'améliorer uniquement de 1 à 2 points.

Dans cette étude, nous avons mis en évidence une association entre l'intensité de la rééducation orthophonique et la récupération. En effet, nous avons montré qu'une rééducation plus intensive est associée à une récupération plus importante (gain élevé) en phase subaiguë. Dignam et al. (2016) mentionnent deux points de vue existant concernant l'intensité de la rééducation. Selon les neurosciences, une rééducation intensive est nécessaire pour permettre les modifications neurologiques qui sous-tendent la récupération; tandis que la psychologie cognitive suggère qu'un entraînement non intensif ou distribué dans le temps favorise l'apprentissage à long terme et la rétention des compétences et des comportements entraînés. Cependant, dans cet article, les auteurs mentionnent que de futures études sont nécessaires pour confirmer le rôle de l'intensité de la rééducation sur la récupération (Dignam et al., 2016).

Toutefois, des études ont mis en avant les bienfaits de la rééducation (e.g., Brady et al., 2016 ; Breitenstein et al., 2017 ; Fridriksson & Hillis, 2021) et notamment certaines études mentionnent les effets bénéfiques de la rééducation intensive (e.g., Brady et al., 2016 ; Breitenstein et al., 2017 ;

Dignam et al., 2016 ; Haldin et al., 2022). Dans une méta-analyse, Brady et al. (2016) ont montré qu'une rééducation plus intensive (plusieurs heures sur une courte période) permettait d'améliorer les capacités de communication et de réduire la sévérité de l'aphasie, par rapport à une rééducation peu intensive. Ces auteurs ont également montré que la rééducation permet d'améliorer la production du langage, la compréhension et la communication fonctionnelle chez les patients présentant une aphasie, par rapport à ceux qui n'ont pas accès à la rééducation. Une étude récente a également montré qu'une meilleure récupération du langage était associée à une rééducation fréquente, adaptée au patient, mixte (*receptive-expressive therapy*) et complémentée par des exercices à domicile (Brady et al., 2022b). Plus précisément, ils ont montré que le gain le plus important au niveau des performances de langage (niveau global), de la compréhension orale et de la communication fonctionnelle était associé à une fréquence de 3 à 5 jours/semaine et à une intensité de 2 à 4 heures/semaine. Pour la compréhension orale et le langage, les gains les plus importants ont également été observés pour une intensité supérieure à 9 heures/semaine, avec un total de 20 à 50 heures de rééducation (Brady et al., 2022b). Enfin, dans une étude menée par J. B. Lee et al. (2009), les auteurs ont montré que l'intensité du traitement est associée à une meilleure récupération en termes de contenu (pourcentage de mots présents dans le script d'entraînement) et de taux (nombre de mots présents dans le script produits par minute). De plus, ils ont montré que les patients les plus sévères suivent une rééducation plus intensive, ce qui est corrélé à une meilleure récupération en termes de contenu uniquement (J. B. Lee et al., 2009). Selon Glize et al. (2017), la sévérité initiale de l'aphasie ne devrait pas être une condition empêchant l'inclusion des patients dans les thérapies intensives. En effet, la connaissance du pronostic de récupération peut encourager l'inclusion de certaines personnes dans ces thérapies intensives.

Nous avons également montré, dans cette étude, qu'une lésion au niveau du GFI-op est associée à une récupération plus importante. Ce résultat peut sembler surprenant, cependant la relation entre la localisation/taille de la lésion et la récupération est complexe (Kristinsson et al., 2022). En effet, bien que des études mentionnent l'importance de maintenir les régions frontales et temporo-pariétales intactes pour garantir une meilleure récupération (Benghanem et al., 2019 ; Harvey et al., 2022 ; Hauwelle et al., 2018 ; Hillis et al., 2018 ; Zavanone et al., 2018), d'autres études semblent montrer que les dommages localisés au niveau de certaines régions sont fortement associés à une meilleure récupération induite par la rééducation (Fridriksson, Basilakos, et al., 2015 ; Hillis

et al., 2018 ; Parkinson, Raymer, Chang, FitzGerald, & Crosson, 2009). En effet, Parkinson et al. (2009) ont montré qu'une lésion au niveau des régions corticales antérieures, avec le maintien de l'intégrité des ganglions de la base, est associée à une meilleure réponse à la rééducation basée sur la dénomination. Une autre étude menée par Hillis et al. (2018) a permis de mettre en évidence qu'une lésion au niveau du gyrus postcentral, du gyrus cingulaire antérieur et du thalamus était associée à une meilleure récupération des capacités de dénomination; tandis qu'une atteinte du GTS et du FA est associée à de mauvaises performances en dénomination. Enfin, Fridriksson, Basilakos, et al. (2015) ont montré que les patients présentant une lésion au niveau des GFI-op et GFI-tri tirent plus de bénéfice des informations visuelles lors d'une tâche d'imitation assistée (imitation de parole synchronisée avec une vidéo labiale), par rapport à une tâche de parole spontanée. De plus, l'atteinte de la voie dorsale, accompagnée d'une préservation des régions associées à la voie ventrale (*i.e.*, le GTM postérieur) et des faisceaux de substance blanche sous-jacents (*i.e.*, le FU et l'IFOF), est associée à une amélioration de la fluence verbale lors de la tâche d'imitation de parole assistée, par rapport à la tâche de production spontanée (Bonilha et al., 2019). Selon Johnson, Yourganov, et al. (2022), la tâche d'imitation de parole assistée, qui guide la production par la présentation de stimuli audiovisuels, permettrait de restaurer le mécanisme de copie d'efférence qui serait défaillant dans l'aphasie non fluente, en recrutant les régions postérieures résiduelles (*i.e.*, le GTM postérieur qui est impliqué dans l'intégration audio-visuelle; Venezia et al., 2016), ce qui permettrait de produire une parole plus fluente. Ainsi, une lésion au niveau du GFI-op, mais un maintien du fonctionnement des régions postérieures et des faisceaux de substance blanche sous-jacents, permet une récupération plus importante, en lien avec les mécanismes de plasticité cérébrale.

Les résultats obtenus dans cette étude offrent des perspectives intéressantes pour une meilleure compréhension des résultats à long terme et des enjeux de la rééducation (Doogan et al., 2018). En effet, comme nous l'avons mentionné précédemment, une connaissance des facteurs permettant de prédire la récupération présente des intérêts au niveau clinique (*i.e.*, personnalisation de la rééducation par les cliniciens) et pour la recherche (*i.e.*, déterminer le type, l'intensité ou l'objectif de la rééducation la plus adaptée) (Kristinsson et al., 2022).

Ainsi, sur la base des résultats obtenus dans ce chapitre et le chapitre précédent, et pour répondre aux intérêts pour la clinique et la recherche proposés par Kristinsson et al. (2022), nous

supposons qu'une rééducation personnalisée et intensive permettra une récupération plus importante (voir Brady et al., 2022b ; Fridriksson, Basilakos, et al., 2015 ; Fridriksson & Hillis, 2021 ; Olsson et al., 2019). En effet, Fridriksson et Hillis (2021) suggèrent qu'il est possible d'augmenter l'efficacité de la rééducation en augmentant la durée de la rééducation (*e.g.*, avec l'utilisation d'applications), en la personnalisant (*e.g.*, en prenant en compte la sévérité de l'aphasie et les troubles de la parole et du langage associés) et en favorisant l'accès à la rééducation (*e.g.*, avec l'utilisation de la télé-rééducation). D'après nos résultats, une rééducation intensive permet d'augmenter le potentiel de récupération, d'autant plus chez les patients présentant une aphasie sévère initialement.

Ainsi, dans le cadre de la prise en charge des patients, les deux études présentées dans ce chapitre et le précédent, mettent en évidence la nécessité de prendre en compte les facteurs associés à la sévérité initiale de l'aphasie afin de proposer une rééducation personnalisée pour les patients, c'est-à-dire adaptée en fonction des difficultés des patients et de la localisation et de la taille de la lésion. De plus, cette rééducation, lorsqu'elle est intensive (*i.e.*, 5 séances par semaine, correspondant à la médiane dans le groupe « récupération élevée »), permet une récupération plus importante pour les patients présentant une aphasie sévère. Dans la discussion générale de ce travail de thèse (voir Chapitre 6), nous discuterons les résultats de ces deux chapitres à la lumière des modèles théoriques neurolinguistiques, ce qui nous permettra de proposer des recommandations concrètes pour la rééducation orthophonique.

De façon similaire au Chapitre 2, cette étude présente quelques limites : (i) le nombre de patients, (ii) le statut socio-économique des patients inclus dans l'étude, (iii) l'absence de co-variables dans les analyses VLSM et VDSM. Dans cette étude, nous avons constaté que le dysfonctionnement exécutif pourrait être inclus dans le modèle final issu des analyses statistiques, toutefois la *p*-valeur associée dans ce modèle est « tendancielle ». Il est possible qu'une étude similaire, sur un plus grand nombre de participants, inclue le dysfonctionnement exécutif parmi les facteurs déterminants de la récupération. Enfin, nous proposons également que de futures études devraient s'intéresser aux déterminants de la récupération en prenant en compte conjointement les facteurs sociodémographiques, cliniques, associés à la lésion, dont la localisation de la lésion, et à la rééducation, afin de proposer un modèle complet des déterminants de la récupération du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC.

Résumé 3.1 : Conclusion

- L'intensité de la rééducation est associée à la récupération du langage : une rééducation plus intense est associée à une récupération plus importante.
- Une lésion localisée au niveau du gyrus frontal inférieur *pars opercularis* est associée à une récupération plus importante (gain élevé).
- Un patient présentant une aphasie sévère avec une lésion du GFI-op présentera une récupération plus importante à l'issue d'une rééducation intensive et personnalisée en fonction de ses difficultés et de la localisation et de la taille de sa lésion.



CHAPITRE 4

Une nouvelle méthode de rééducation de la parole dans l'aphasie non fluente post-AVC

Table des Matières

1	Étude de cas : patientes P1 et P2	115
1.1	Méthode	116
1.1.1	Participant	116
1.1.2	Rééducation	116
1.1.3	Évaluation du langage et de la parole	119
1.1.4	IRM fonctionnelle de tâche	119
1.1.5	Analyse des données	120
1.2	Résultats	123
1.2.1	Évaluation du langage et de la parole	123
1.2.2	IRMf d'activation	131
1.3	Discussion intermédiaire	132
2	Étude de cas : patient P3	136
2.1	Méthode	136
2.1.1	Participant	136
2.1.2	Rééducation	138
2.1.3	Évaluation neuropsychologique	139
2.1.4	Évaluation du langage et de la parole	139
2.1.5	Analyse de données	140
2.1.6	Analyses statistiques	142
2.2	Résultats	143
2.2.1	Évaluation neuropsychologique	143
2.2.2	Évaluation du langage et de la parole	143
2.3	Discussion intermédiaire	151
3	Conclusion	157

Dans les Chapitres 2 et 3, nous avons montré que : (i) les patients avec un dysfonctionnement exécutif sévère, un AVC sévère et une lésion de taille importante, localisée au niveau de l'insula, du GFI (GFI-op, GRI-tri) et de l'opercule rolandique à gauche, avec une déconnexion de l'IFOF, du FA, du FAT, des RTS gauches et du corps calleux, présentent une aphasie plus sévère initialement ; (ii) pour les patients présentant une aphasie sévère, avec une atteinte au niveau du GFI-op, il semble qu'une rééducation intensive permette une récupération plus importante. Ces résultats offrent des perspectives intéressantes pour mieux comprendre la récupération à long-terme pour les patients. Étant donné le lien entre la sévérité initiale de l'aphasie et la récupération du langage, avoir plus d'informations sur la sévérité initiale de l'aphasie pourrait aider à mieux choisir la méthode de rééducation pour garantir le meilleur résultat à long terme.

Classiquement, dans les premiers mois suivant l'AVC, la rééducation orthophonique est mise en place. Nous savons que l'effet de cette rééducation atteint un plateau après quelques mois (El Hachioui et al., 2013). C'est dans ce cadre que certains chercheurs ont proposé de développer de nouvelles méthodes permettant d'enrichir la rééducation orthophonique classique afin que les patients puissent continuer à progresser, et ce même en phase chronique (voir Chapitre 1, Section 4.2). C'est le cas des méthodes comportementales telles que la thérapie par contrainte induite, la thérapie par intonation musicale ou la thérapie basée sur des méthodes technologiques (Godlove et al., 2019 ; Popescu et al., 2022 ; Wang et al., 2020) et des approches neurophysiologiques telles que les méthodes de neurostimulation ou la thérapie pharmacologique (Berthier, 2021 ; Biou et al., 2019 ; Coslett, 2016 ; Small & Llano, 2009). Comme nous l'avons mentionné, il semble que les méthodes de rééducation fondées sur les nouvelles technologies, qui peuvent être utilisées à domicile, présentent de nombreux avantages en terme d'intensité, de personnalisation et d'engagement social (voir aussi Brady et al., 2022b ; Haldin et al., 2022).

D'autre part, d'un point de vue théorique, nous savons que le contrôle de la production de la parole met en jeu des processus perceptifs et que la planification et la programmation motrices reposent sur des représentations multisensorielles, auditives, somatosensorielles et visuelles, ainsi que des connaissances articulatoires (Grandchamp et al., 2019 ; Hickok, 2012a ; Løevenbruck, 2019). C'est dans ce cadre-là que nous avons proposé que ces représentations multisensorielles pourraient contribuer à la réorganisation des réseaux langagiers et à la compensation des déficits de planification et de programmation motrices qui peuvent être observés dans l'aphasie suite à un AVC.

Ainsi, nous avons proposé une méthode de rééducation de la production de parole fondée sur la visualisation des articulateurs de la parole, en complément d'autres informations sensorielles (auditives, somesthésiques), qui permettrait de compléter et d'enrichir la représentation des articulateurs de la parole et de mieux spécifier les objectifs phonologiques. En effet, l'apport d'informations visuelles lors de la répétition des sons de parole pourrait améliorer la planification et la programmation motrices et restaurer un contrôle moteur de la parole fluide chez les patients présentant des troubles de la parole. Cette nouvelle méthode de rééducation dite « augmentée » ou « augmentée visuellement » (cf. Encadré 4.1) est fondée sur l'intégration sensorimotrice avec le logiciel *Ultraspeech-player* (Hueber, 2013). Ce logiciel permet aux patients de visualiser les mouvements de la langue habituellement non visibles (vue sagittale, enregistrée *via* une sonde à échographie) et des lèvres (vue frontale, enregistrée grâce à une caméra), pré-enregistrés chez un locuteur standard, lors de la production de sons (voyelles et/ou consonnes).

Encadré 4.1 : Définition des termes

- **Méthode de rééducation** : ce terme est utilisé pour définir l'utilisation d'une méthode unique pour la rééducation de la parole (*e.g.*, l'utilisation de la rééducation orthophonique classique seule). On note que l'utilisation du terme « méthode unique » est au sens large, même si l'orthophoniste utilise plusieurs stratégies, on nommera la méthode « rééducation orthophonique classique ».
- **Programme de rééducation** : ce terme est utilisé pour définir l'utilisation de plusieurs méthodes conjointement pour la rééducation de la parole (*e.g.*, l'utilisation d'une autre méthode en complément de la rééducation orthophonique classique).
- **Rééducation augmentée** (ou augmentée visuellement) : ce terme est utilisé pour qualifier la rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player* qui apporte des informations visuelles supplémentaires, entre autres, sur les articulateurs tels que la langue (habituellement non visible) ou les lèvres.
- **Rééducation renforcée** : ce terme est utilisé spécifiquement dans cette thèse pour parler de la rééducation fondée sur le logiciel *Ultraspeech-player* en complément de la rééducation orthophonique classique. Ce terme résume le fait qu'il s'agit d'une rééducation augmentée et intensive. On parlera donc d'un « programme de rééducation renforcée ».

Ainsi, ce logiciel, se base sur le principe même du renforcement de l'intégration sensorimotrice qui est mise en jeu dans la production de parole. En effet, lors de la rééducation, le patient aura accès aux informations visuelles (mouvements de la langue ou des lèvres du locuteur standard), auditives (son produit par le locuteur standard via le logiciel et retour sur ses propres productions) et

somesthésiques (ressenti de ses propres mouvements articulatoires). De plus, le logiciel répond aux différents principes que nous avons proposés pour une rééducation optimale (Haldin et al., 2022) :

1. L'intensité : ce logiciel peut être utilisé en autonomie par les patients et donc possiblement à domicile, ce qui favorise une rééducation intensive en diminuant les limites liées à la pratique clinique en termes de ressources humaines et financières.
2. L'engagement social : l'implication de l'entourage du patient peut favoriser cet engagement social en favorisant les interactions.
3. La personnalisation : les exercices peuvent être adaptés en fonction des difficultés des patients et de leurs objectifs.

Dans ce chapitre, nous proposerons une évaluation de l'efficacité d'une rééducation dite « renforcée », fondé sur l'utilisation de la rééducation augmentée en complément de la rééducation orthophonique classique, au niveau comportemental et cérébral. Nous nous focaliserons sur la rééducation de patients présentant une aphasie non fluente caractérisée par une réduction de la production de parole, une production de parole laborieuse, un accès au vocabulaire limité, des phrases courtes, une prosodie altérée, des erreurs articulatoires et un agrammatisme, la compréhension du langage restant préservée (Tippett & Hillis, 2016 ; Viader, 2015 ; Viader et al., 2010). Les troubles observés dans ce type d'aphasie sont associés à une altération au niveau des processus associés à la production de parole, tels que : la sélection et la planification de la production de la parole, la mise en place articulatoire des segments de parole sélectionnés et planifiés, la mise en place articulatoire des paramètres phonétiques de la parole et la coordination des articulateurs de la parole (Kurowski, Hazen, & Blumstein, 2003 ; Nespoulous, Baqué, Rosas, Marczyk, & Estrada, 2013). Enfin, il a été proposé que la diminution de la fluence pouvait être causée par des difficultés lors de la génération et de l'utilisation de la copie d'efférence impliquée dans le contrôle moteur de la parole (Feenaughty et al., 2017).

Ce chapitre sera composé de deux sections, présentant deux études différentes. La première étude est une étude de cas réalisée afin d'évaluer l'efficacité, sur les plans langagier et anatomo-fonctionnel, d'un programme de rééducation renforcée chez deux patientes présentant une aphasie non fluente en phase chronique (issue de Haldin et al., 2018, 2019). Dans cette étude, les patientes ont été guidées par une orthophoniste dans la phase initiale du programme, puis ont pratiqué la rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player* à domicile, sans l'aide de l'orthophoniste. La

seconde étude est une étude de cas réalisée afin d'évaluer l'efficacité, sur le plan langagier, d'un programme de rééducation renforcée appliqué pour la rééducation de la parole d'un patient présentant une aphasie non fluente en phase chronique (issue de Haldin et al., 2021). Dans cette deuxième étude, le patient a été guidé par nous-mêmes tout au long de la rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player*.

Article

La première étude de cas est issue de Haldin et al. (2018) et Haldin et al. (2019); tandis que la seconde étude de cas est issue de Haldin et al. (2021). Ces articles sont présents dans l'Annexe E.

Haldin, C., Acher, A., Kauffmann, L., Hueber, T., Cousin, E., Badin, P., ... Baciù, M. (2018). Speech recovery and language plasticity can be facilitated by sensori-motor fusion training in chronic non-fluent aphasia. A case report study. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 32(7), 595–621.

Haldin, C., Acher, A., Kauffmann, L., Hueber, T., Cousin, E., Badin, P., ... Baciù, M. (2019). Effet de la rééducation perceptivomotrice sur la récupération de la parole chez deux patientes avec aphasie non fluente chronique post-AVC. *Revue de neuropsychologie*, 11(1), 44–59.

Haldin, C., Loevenbruck, H., Hueber, T., Marcon, V., Piscicelli, C., Perrier, P., ... Baciù, M. (2021). Speech rehabilitation in post-stroke aphasia using visual illustration of speech articulators : A case report study. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 35(3), 253–276.

1 Étude de cas : patientes P1 et P2

Dans cette première étude de cas, nous avons évalué l'efficacité d'un programme de rééducation renforcée, fondé sur la rééducation augmentée avec le logiciel *Ultraspeech-player* en complément de la rééducation orthophonique, chez deux patientes (P1 et P2). L'étude présentée ici est issue de Haldin et al. (2019) et Haldin et al. (2018). Cette évaluation se base sur une comparaison de performances avant et après rééducation. Nous avons utilisé une approche multimodale basée sur : (i) l'évaluation des scores de langage issus d'un bilan orthophonique, il s'agit d'une évaluation qualitative; (ii) l'analyse du signal de parole et des paramètres acoustiques, il s'agit d'une évaluation quantitative; et (iii) l'évaluation des réseaux cérébraux impliqués dans des tâches de langage afin d'évaluer les *patterns* de réorganisation de ces réseaux suite à la rééducation. Notons que cette étude a été approuvée par le comité d'éthique local (CPP-ISIS-07PHR04, n°DCIC/06/25).

1.1 Méthode

1.1.1 Participantes

Les données démographiques et cliniques des deux patientes sont présentées dans le Tableau 4.1 et la Figure 4.1 permet de visualiser les lésions des deux patientes. La patiente P1 présentait une lésion au niveau du lobe frontal gauche avec une atteinte du GFI et des structures sous-corticales (ganglions de la base), ce qui est caractéristique d'une aphasie de Broca. La patiente P2 présentait une lésion plus large et localisée, au-delà de la région frontale, au niveau temporo-pariétal, ce qui est caractéristique d'une aphasie globale. En effet, la patiente P2 présentait une aphasie globale initialement, mais au moment de l'étude elle présentait une aphasie de Broca, comme la patiente P1. Les patientes étaient toutes les deux en phase chronique (> 6 mois post-AVC).

Tableau 4.1 – Données démographiques et cliniques des patientes P1 et P2.

	P1	P2
Sexe, âge	Femme, 64 ans	Femme, 52 ans
Préférence manuelle	Droitière	Droitière
Niveau d'éducation	Baccalauréat +3	Baccalauréat
Âge de survenue de l'AVC	61 ans	48 ans
Cause et localisation de la lésion	AVC ischémique au niveau du territoire antérieur de l'artère sylvienne gauche (superficiel et profond)	AVC ischémique au niveau de l'artère sylvienne gauche (territoire superficiel)
Type d'aphasie	<i>Initialement</i> : aphasie de Broca <i>Actuellement</i> : aphasie de Broca	<i>Initialement</i> : aphasie globale <i>Actuellement</i> : aphasie de Broca
Symptômes	Déficits en dénomination, paraphasies phonétiques, phonologiques et sémantiques (rares)	Anomie, paraphasies phonétiques et phonologiques
Autres déficits associés	<i>Initialement</i> : hémiplégie droite (faciobrachiale) et hémiparésie droite (faciobrachiale)	Aucun déficit moteur
Rééducation orthophonique classique	<i>Durant la première année</i> : 5 séances par semaine <i>Après 1 an</i> : séances périodiques	<i>Durant la première année</i> : 5 séances par semaine <i>Après 1 an</i> : séances périodiques

1.1.2 Rééducation

Les patientes ont suivi, en complément de la rééducation orthophonique classique, une rééducation à l'aide du logiciel *Ultraspeech-player* (pour une illustration, voir Figure 4.2; Hueber, 2013). Durant la rééducation, elles étaient assises devant un écran d'ordinateur sur lequel elles pouvaient visualiser, via le logiciel, les mouvements de la langue ou des lèvres, associés à des sons, chez un locuteur standard. Le logiciel *Ultraspeech-player* comprend plusieurs sons (voyelles ou consonnes du français, isolées ou combinées) et enregistrements vidéo, réalisés sur plusieurs locuteurs de

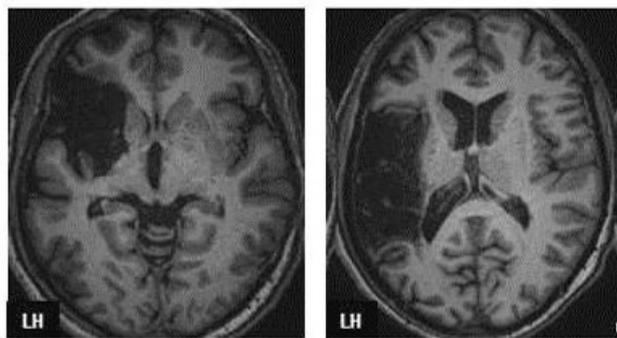


FIGURE 4.1 – Coupes axiales issues des IRMs (T1) des patientes P1 (à gauche) et P2 (à droite) permettant de visualiser leurs lésions post-AVC. Cette lésion est localisée au niveau de l'hémisphère gauche, dans les régions frontales et les ganglions de la base pour P1 et fronto-temporopariétales pour P2. « LH » (*Left Hemisphere*) indique le côté correspondant à l'hémisphère gauche sur l'image.

référence (orthophonistes, phonéticiens). Dans le cadre de cette rééducation, les enregistrements d'une phonéticienne ont été utilisés. Les mouvements sagittaux médians de la langue de la locutrice ont été enregistrés par imagerie ultrasonore et les mouvements des lèvres (vue frontale) ont été capturés *via* une caméra vidéo. Les deux capteurs étaient maintenus fixes par rapport à la tête de la locutrice à l'aide d'une version personnalisée du casque fabriqué par [Articulate Instruments](#). Notons que, sur le logiciel, il est également possible de ralentir à la fois les mouvements articulatoires et leur réalisation acoustique correspondante, ceci permettant une visualisation plus intuitive.

Durant la première séance, après vérification des capacités de compréhension des patientes, l'orthophoniste décrivait le logiciel en expliquant son fonctionnement et en détaillant les mouvements de la langue affichés, pour bien situer la racine, le dos et la pointe de la langue, ainsi que le contour du palais (pour une explication de l'image échographique, voir Encadré 4.2). La rééducation a débuté après cette première séance de présentation. Les patientes ont effectué cette rééducation en autonomie à leur domicile (environ 45 minutes par séance). Lors des séances, après la présentation synchrone du son et de la vidéo des mouvements linguaux et/ou labiaux, les patientes devaient répéter le son entendu. La patiente P1 a effectué 13 séances en autonomie, et 3 séances accompagnées par une orthophoniste (deux fois 20 minutes et une fois 10 minutes) et la patiente P2 a effectué 9 séances en autonomie. Les phonèmes travaillés étaient : les voyelles /i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a, ɑ̃, ɔ̃, ɛ̃/ et les consonnes /p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, l, ʁ/, isolées ou combinées (voyelle-consonne-voyelle).

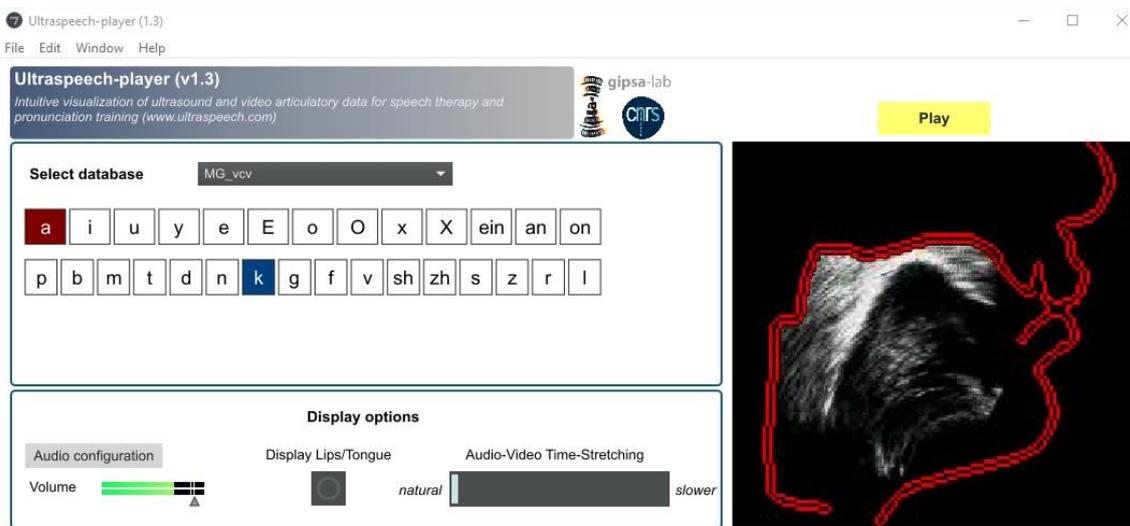


FIGURE 4.2 – Illustration de l’interface du logiciel *Ultraspeech-player* (Hueber, 2013) qui permet au patient de visualiser les mouvements de la langue, enregistrés grâce à une sonde échographique, ou des lèvres, enregistrés grâce à une caméra, synchronisés avec des sons produits par une locutrice de référence. En rouge : le contour sagittal du conduit vocal, avec les lèvres à droite. Le tracé blanc à l’intérieur du conduit vocal représente le contour externe de la langue. La séquence vidéo est arrêtée sur le point de contact entre le dos de la langue et l’arrière du palais, lors de la production de la séquence /aka/.

Encadré 4.2 : Lecture d’une image échographique

La langue est l’articulateur principal de la parole. La partie postérieure, la racine de la langue, est rattachée à l’os hyoïde et fait face aux parois postérieures du pharynx dans la partie verticale du conduit vocal. La partie antérieure, le corps de la langue, est rattachée à la mandibule. Le corps de la langue comprend l’apex (ou la pointe de la langue) dans sa partie antérieure et le dos de la langue qui fait face au palais mou et au palais dur dans la partie horizontale du conduit vocal (Perrier & Schwartz, 2016).

Lorsque la sonde à échographie est orientée dans le sens de la longueur de la langue, on obtient une coupe sagittale médiane de la cavité buccale. La Figure 4.3 ci-dessous présente les différentes structures visibles sur une image échographique du conduit vocal.

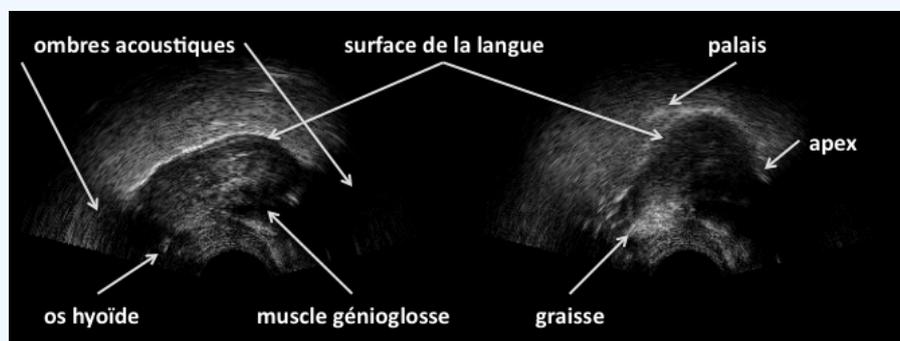


FIGURE 4.3 – Vue sagittale du conduit vocal capturée à l’aide d’une sonde à échographie. Figure issue de la documentation d’Ultraspeech player.

1.1.3 Évaluation du langage et de la parole

Lors de l'évaluation du langage et de la parole, avant et après la rééducation, les patientes ont réalisé un bilan orthophonique (évaluation globale du langage) et un bilan acoustique (évaluation de la parole). Le bilan orthophonique comprenait une évaluation de : la production lexicale avec une tâche de dénomination d'images (DO80; [Deloche & Hannequin, 1997](#)); l'accès au lexique phonologique de sortie, l'encodage phonétique et la mémoire de travail à l'aide d'une tâche de répétition (de logatomes, mots et phrases); la dénomination de lettres écrites avec une tâche de lecture (de lettres, syllabes et mots); l'accès au lexique phonologique d'entrée avec une tâche de détection de rimes ([Baudo & Vernisse, 2001](#)); la disponibilité lexicale avec une tâche de fluence verbale (alphabétique et catégorielle; [Cardebat, Doyon, Puel, Goulet, & Joannette, 1990](#)); la compréhension du langage avec une tâche de désignation d'images et d'évaluation de la morphosyntaxe (Protocole Montréal-Toulouse d'examen linguistique de l'aphasie, MT86; [Nespoulous et al., 1992](#)); et les praxies bucco-faciales (sur ordre ou sur imitation, MT86; [Nespoulous et al., 1992](#)).

Le bilan acoustique réalisé avant et après la rééducation, quant à lui, était constitué d'une tâche de répétition de monosyllabes ou bi-syllabes sémantisés, incluant les phonèmes du français. Les patientes devaient répéter les monosyllabes ou bi-syllabes produits par l'orthophoniste, ceux-ci étaient également présentés à l'écrit. Les phonèmes travaillés étaient les voyelles /i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a, ã, õ, ê/ et les consonnes et semi-consonnes /p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, ɲ, l, ʁ, j/ du français. Les consonnes et semi-consonnes étaient accompagnées du phonème /a/ et elles étaient placées en position initiale ([Ca] ou [CaCa]) ou médiane ([aCa]). Les voyelles ainsi que les consonnes et semi-consonnes en condition [Ca] étaient répétées trois fois, les consonnes et semi-consonnes en condition [CaCa] et [aCa] étaient répétées une seule fois. Les réponses produites lors de la répétition de syllabes étaient enregistrées à l'aide d'un microphone. Les items utilisés lors du bilan acoustique sont présentés dans le Tableau B.1 (Annexe B).

1.1.4 IRM fonctionnelle de tâche

Les patientes ont réalisé, avant et après la rééducation, un examen en IRM fonctionnelle (IRMf) comprenant deux tâches : répétition de syllabes et jugement de rimes.

Lors de la répétition de syllabes (RS), elles devaient répéter 20 monosyllabes sémantisés composés des voyelles /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/ et des consonnes /t, d, k, g, s, z, ʃ, ʒ, l, ʁ/ suivies de

/a/. Les monosyllabes étaient présentés en modalité auditive et la réponse orale était enregistrée à l'aide d'un microphone compatible IRM (FOMRI™ III). La condition contrôle associée à cette tâche était un bruit blanc que les patientes devaient seulement écouter.

Lors de la tâche de détection de rimes (DR; [Nespoulous et al., 1992](#)), les patientes devaient juger si deux mots, présentés en modalité visuelle, rimaient ou non. Ces mots étaient présentés par paire (l'un en dessous de l'autre) et écrits en noir. Vingt paires étaient présentées dont 10 paires de mots qui rimaient et dont la rime s'écrivait de la même façon et 10 paires qui ne rimaient pas et dont la rime ne s'écrivait pas de la même façon. Si les deux mots rimaient, les patientes devaient appuyer sur une clé de réponse (réponse manuelle). La condition contrôle associée à cette tâche était constituée de deux lignes horizontales présentées l'une en dessous de l'autre et les patientes devaient simplement les regarder.

La présentation des stimuli lors des deux tâches et l'enregistrement de la réponse pour la tâche de DR ont été effectués à l'aide du logiciel E-Prime (Psychology Software Tools, Pittsburgh, PA). Les tâches étaient réalisées selon un paradigme en bloc avec une alternance de 5 périodes de tâche et contrôle. Chaque condition (tâche et contrôle) durait 24 secondes et 4 stimuli étaient présentés par condition. La durée totale de l'acquisition pour ces deux tâches était d'environ 10 minutes.

Les acquisitions IRMf ont été réalisées avec l'imageur 3T corps entier (Philips Achieva, TX) de la plateforme IRMaGe du CHU de Grenoble. Une séquence d'acquisition FE-EPI pondérée en T2* a été utilisée. Cinquante-deux coupes adjacentes, parallèles au plan bicommissural et d'une épaisseur de 2,75 mm chacune, ont été acquises en mode séquentiel. La taille des voxels était de 2,5 × 2,5 × 3 mm avec un champ de vue de 220 × 220 × 156 mm et encodés par une matrice d'acquisition de 88 × 85. Le TR était de 3 s, le TE de 30 ms et l'angle de bascule de 80°. Une image anatomique pondérée en T1 avec une haute résolution spatiale (1 × 1 × 1 mm) a été également acquise.

1.1.5 Analyse des données

Évaluation du langage Afin d'évaluer l'évolution des performances des patientes lors des tâches de langage (bilan orthophonique), nous avons calculé un indice d'évolution (IE) basé sur un score déterminé pour chaque item de chaque tâche du bilan orthophonique. Ce score prend une valeur de +1 lorsque la réponse pour un item donné était incorrecte avant rééducation et correcte après; -1 lorsque la réponse était correcte avant et incorrecte après rééducation; et 0 lorsque la réponse

était correcte avant et après ou incorrecte avant et après la rééducation. Ainsi, en sommant les scores pour chaque item, nous obtenons un IE pour chacune des tâches du bilan orthophonique.

Évaluation de la parole Lors de l'analyse des données issues de la répétition de syllabes (bilan acoustique) nous avons annoté les phonèmes comme « corrects », « incorrects », « émergents »¹ ou avec une « erreur de voisement »². Cette annotation a été réalisée à l'aide du logiciel *Praat* (Boersma & Weenink, 2010), qui a permis également l'analyse acoustique (cf. ci-dessous).

Ainsi, nous avons déterminé un pourcentage de productions correctes, incorrectes, émergentes ou avec une erreur de voisement lors de la répétition de syllabes. Nous avons déterminé ces pourcentages pour les voyelles, les consonnes (lors des productions [Ca], [CaCa], [aCa]) et pour tous les phonèmes (regroupant les consonnes et les voyelles).

Concernant l'analyse acoustique, le signal obtenu avant et après rééducation a été enregistré à 44,1 kHz et rééchantillonné à 12 kHz pour faciliter les analyses acoustiques. Pour les phonèmes jugés comme corrects ou émergents, nous avons extrait : les formants F1 et F2 pour les voyelles orales (/i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a/); les deux premiers moments spectraux (centre de gravité et écart type) pour les consonnes fricatives (/f, s, ʃ/, v, z, ʒ/); et le délai d'établissement du voisement (*Voice Onset Time*, VOT) pour les consonnes occlusives (/p, t, k, b, d, g/). L'extraction de ces paramètres acoustiques a été effectuée à l'aide du logiciel *Praat* (Boersma & Weenink, 2010) et les représentations graphiques ont été effectuées à l'aide du logiciel *R* (RStudio Team, 2020).

Les valeurs des formants ont été obtenues à l'aide d'un script permettant de détecter les formants (entre 0 et 5500 Hz) avec un pas de 0,01 s, une fenêtre gaussienne d'analyse de 0,025 s et une pré-emphase de 50 Hz. Ensuite, nous avons représenté les triangles vocaliques (F1 en fonction de F2) pour chacune des patientes avant et après la rééducation. Afin d'évaluer la stabilité des productions acoustiques pour les répétitions de chaque voyelle ainsi que la différence acoustique entre les voyelles, nous avons évalué de façon subjective les distances intra-voyelle et inter-voyelles, respectivement. La distance intra-voyelle doit être la plus petite possible, traduisant une meilleure stabilité entre les productions d'une même voyelle. La distance inter-voyelles, quant à elle, doit être grande, traduisant une bonne distinction acoustique entre les voyelles.

1. La patiente produit un phonème avant de produire le phonème cible (e.g., pour produire /ʃ/ la patiente produit initialement /s/ qui se transforme progressivement en /ʃ/).

2. Le mode et le lieu d'articulation sont corrects, mais le voisement est incorrect (e.g., /t/ au lieu de /d/).

Les deux premiers moments spectraux (centre de gravité et écart type) ont été extraits, en prenant une fenêtre de 40 ms centrée sur le milieu du bruit de friction engendré par la consonne. Nous avons ensuite représenté ces moments spectraux avec des *boxplots*. Le centre de gravité (CG) permet de montrer la distinction faite entre les fricatives alvéolaires /s, z/ et post-alvéolaires /ʃ, ʒ/ et doit respecter l'ordre suivant : alvéolaires > labiodentales > post-alvéolaires. L'écart type (ET), quant à lui, permet de montrer la distinction faite entre les labiodentales /f, v/ et les alvéolaires. Cette valeur d'ET doit suivre l'ordre suivant : labiodentales > alvéolaires > post-alvéolaires (Li et al., 2009 ; Nissen & Fox, 2005).

Le VOT a été extrait pour les consonnes occlusives. La valeur du VOT est déterminée en calculant le temps entre le moment de l'explosion consonantique (ou *burst*) et le début du voisement (Lisker & Abramson, 1964). Nous avons ensuite calculé un VOT moyen, avant et après la rééducation, séparément pour les consonnes occlusives voisées /b, d, g/ et les non voisées /p, t, k/. Une valeur standard de VOT a également été calculée lors des productions de l'orthophoniste durant la tâche de répétition de syllabes de la patiente P1.

IRMf de tâche L'analyse des données d'IRMf a été effectuée en utilisant un modèle linéaire généralisé avec le logiciel SPM12 (*Wellcome Department of Imaging Neuroscience*, London, UK, www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm) sous MATLAB (Mathworks, Natick, MA, Etats-Unis). Les images ont d'abord été pré-traitées temporellement et spatialement. Ce pré-traitement comprend plusieurs étapes : (i) le *slice timing* afin de corriger les *artefacts* causés par le délai d'acquisition entre les coupes; (ii) le réalignement spatial afin de corriger les mouvements de tête; (iii) la normalisation dans l'espace MNI du volume anatomique et des volumes fonctionnels; (iv) le lissage spatial (*smoothing*) à l'aide d'un filtre Gaussien (8 mm FWHM), afin de limiter les biais liés à la corrélation spatiale entre les voxels. Notons que les séries temporelles de chaque voxel ont été filtrées par un filtre passe-haut (1/128 Hz) afin d'éliminer le bruit de basse fréquence et la dérive du signal. Un masque de la lésion a été réalisé (la lésion a été délimitée à la main par un neurologue).

Les analyses statistiques ont ensuite été réalisées pour les tâches de DR et RS. Pour chaque tâche, deux régresseurs d'intérêt (tâche et contrôle) ont été déclarés et convolués avec la réponse hémodynamique canonique, avec les dérivées spatiales et temporelles associées (trois *hemodynamic response function*, HRF). Les paramètres de mouvements et les paramètres comportementaux

ont été modélisés comme des régresseurs de non-intérêt, ce qui a permis de prendre en compte ces régresseurs dans le signal BOLD, sans tester directement leur effet, et d'avoir une meilleure estimation du signal et de l'erreur résiduelle. Le modèle linéaire généralisé a été utilisé pour générer des paramètres estimés d'activation pour chaque voxel, chaque condition et chaque patiente. Nous avons donc déterminé pour chaque tâche : les contrastes principaux (tâche *vs.* contrôle) pour identifier les réseaux cérébraux impliqués dans ces tâches et les contrastes avant *vs.* après rééducation pour identifier l'effet de la rééducation sur ces réseaux cérébraux. Ici, nous présenterons uniquement les contrastes avant *vs.* après rééducation pour chaque tâche.

1.2 Résultats

1.2.1 Évaluation du langage et de la parole

Évaluation du langage Les résultats du bilan orthophonique sont présentés dans le Tableau 4.2. D'après ces résultats, il semble qu'avant la rééducation, les patientes présentaient des troubles en répétition de syllabes et de mots, en lecture, en dénomination et en fluence verbale ; cependant elles ne présentaient aucun trouble de compréhension ni aucun trouble des praxies bucco-faciales.

Tableau 4.2 – Résultats obtenus par P1 et P2 lors des bilans orthophoniques effectués avant et après la rééducation. L'indice d'évolution (IE) est présenté et montre le déclin (en rouge) ou l'amélioration (en bleu) des patientes sur les différentes tâches.

	Patiente P1			Patiente P2		
	Avant rééducation	Après rééducation	IE	Avant rééducation	Après rééducation	IE
Répétition	Syllabes : 18/30	Syllabes : 21/30	+3	Syllabes : 1/30	Syllabes : 4/30	+3
	Mots simples : 13/20	Mots simples : 13/20	+1	Mots simples : 5/20	Mots simples : 4/20	-1
	Mots complexes : 6/20	Mots complexes : 9/20	+3	Mots complexes : 0/20	Mots complexes : 0/20	0
			Total : +7			Total : +2
Lecture	Lettres, sons : 13/20	Lettres, sons : 17/20	+4	Lettres, sons : 7/20	Lettres, sons : 4/20	-3
	Syllabes : 6/20	Syllabes : 6/20	0	Syllabes : 7/20	Syllabes : 10/20	+3
	Mots réguliers : 7/10	Mots réguliers : 5/10	-2	Mots réguliers : 3/10	Mots réguliers : 2/10	-1
	Mots irréguliers : 6/10	Mots irréguliers : 6/10	0	Mots irréguliers : 2/10	Mots irréguliers : 2/10	0
		Total : +2			Total : -1	
Dénomination (DO80)	67/80	69/80	+2	21/80	31/80	+10
Répétition de phrases	10/10	10/10	Normal	0/10	0/10	Troubles
Fluence verbale (2min)	Catégorielle : 8	Catégorielle : 9	+1	Catégorielle : 4	Catégorielle : 3	-1
	Alphabétique : 7	Alphabétique : 3	-4	Alphabétique : 0	Alphabétique : 1	+1
		Total : -3			Total : 0	
Compréhension	Désignation d'images : 34/36	Désignation d'images : 36/36	+1	Désignation d'images : 35/36	Désignation d'images : 36/36	+1
	Morphosynthaxe : 7/8	Morphosynthaxe : 8/8	+2	Morphosynthaxe : 7/8	Morphosynthaxe : 7/8	0
		Total : +3			Total : +1	
Praxies bucco-faciales	15/15 (dont 3 sur imitation)	15/15 (dont 2 sur imitation)	Normal	15/15 (dont 4 sur imitation)	15/15 (dont 3 sur imitation)	Normal
Jugement de rimes	26/40	33/40	+7	32/40	28/40	-4

La patiente P1, semble s'améliorer en répétition de syllabes et de mots (+7), en lecture (+2), en dénomination (+2) et en jugement de rimes (+7) ; cependant ses performances se détériorent en fluence verbale (-3). La patiente P2, quant à elle, s'améliore en répétition (+2) et en dénomination (+10). Cependant, ses performances se détériorent en lecture (-1) et en jugement de rimes (-4) et elle présente des troubles en mémoire de travail (mesurée par la tâche de répétition de phrases) et en fluence verbale, qui persistent après la rééducation. Ainsi, les résultats semblent montrer que la patiente P1 s'améliore davantage par rapport à la patiente P2.

Performances de parole Lors de la répétition de syllabes (bilan acoustique), nous avons évalué les pourcentages de productions correctes, incorrectes, émergentes ou avec une erreur de voisement, avant et après la rééducation (voir Tableau 4.3).

Tableau 4.3 – Performances des patientes P1 et P2 lors de la tâche de répétition de syllabes, avant et après la rééducation. Le pourcentage de voyelles (/i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a, ã, õ, ê/), consonnes et semi-consonnes (/p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, ɲ, l, ʁ, j/, en condition [Ca], [CaCa] et [aCa]) et phonèmes (voyelles et consonnes) jugés par le transcripateur comme corrects, incorrects, émergents ou avec une erreur de voisement, est représenté, avant et après la rééducation. N/A, non applicable.

		Avant rééducation				Après rééducation			
		Correct	Émergent	Erreur de voisement	Incorrect	Correct	Émergent	Erreur de voisement	Incorrect
P1	Voyelles	94,87%	5,13%	N/A	0,00%	97,44%	2,56%	N/A	0,00%
	Consonnes	32,14%	0,93%	24,07%	42,59%	43,64%	0,00%	17,27%	39,09%
	Phonèmes	48,98%	2,04%	17,69%	31,29%	57,72%	0,67%	12,75%	28,86%
P2	Voyelles	48,72%	15,38%	N/A	35,90%	50,00%	7,89%	N/A	42,11%
	Consonnes	55,05%	0,00%	26,61%	18,35%	48,18%	2,73%	26,36%	22,73%
	Phonèmes	53,38%	4,05%	19,59%	22,97%	48,65%	4,05%	19,59%	27,70%

Pour la patiente P1, on constate une amélioration des performances après la rééducation avec une augmentation du pourcentage de productions correctes (de 48,98% à 57,72%) dont une amélioration pour les voyelles (de 94,87% à 97,44%) et les consonnes (de 32,14% à 43,64%). Cette amélioration s'accompagne d'une diminution du pourcentage : de phonèmes émergents (de 2,04% à 0,67%), suggérant une amélioration du contrôle dynamique des articulateurs de la parole; de phonèmes avec une erreur de voisement (de 17,69% à 12,75%), suggérant un meilleur contrôle du larynx; et de phonèmes incorrects (de 31,29% à 28,86%), suggérant un meilleur contrôle du mode et du lieu d'articulation.

Pour la patiente P2, on constate une amélioration des performances après la rééducation avec une augmentation du pourcentage de productions correctes pour les voyelles (de 48,72% à 50,00%).

Tandis que, le pourcentage de productions correctes diminue pour les consonnes (de 55,05% à 48,18%). Les pourcentages de phonèmes émergents ou avec une erreur de voisement restent inchangés, ne suggérant aucune amélioration au niveau du contrôle laryngé ou du contrôle de la dynamique des articulateurs de la parole. Enfin, le pourcentage de productions incorrectes, lui, augmente (de 22,97% à 27,70%), ce qui ne suggère aucune amélioration au niveau du contrôle du mode et du lieu d'articulation.

Évaluation acoustique Les paramètres acoustiques ont été mesurés lors de la répétition de syllabes (bilan acoustique), pour les phonèmes jugés corrects ou émergents. Nous avons extrait : les formants F1 et F2 pour les voyelles orales, le VOT pour les consonnes occlusives et les moments spectraux (CG et ET) pour les consonnes fricatives.

Pour l'analyse acoustique des voyelles orales, nous avons représenté les triangles vocaliques pour l'orthophoniste (Figure 4.4) et les patientes P1 et P2 (Figures 4.5 et 4.6). Étant donné que les patientes et l'orthophoniste sont toutes des femmes, nous avons pu comparer leurs triangles vocaliques respectifs. Pour l'orthophoniste, nous remarquons une bonne stabilité acoustique (distance intra-voyelle faible), une bonne distinction entre les voyelles, ainsi qu'une bonne différenciation acoustique des voyelles (distance inter-voyelles élevée) (voir Figure 4.4).

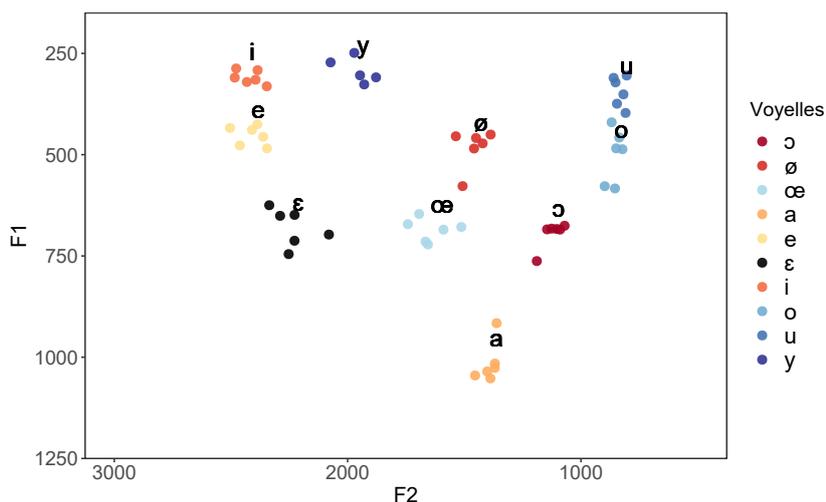


FIGURE 4.4 – Triangle vocalique de l'orthophoniste représentant les formants F1 en fonction de F2 lors de la production des voyelles orales. Les productions de l'orthophoniste correspondent aux répétitions des voyelles orales (/i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a/) réalisées lors de l'évaluation acoustique de la patiente P1, avant et après la rééducation.

La patiente P1 présente une amélioration lors de la production de /i, y/ avec une augmentation de la distance inter-voyelles (meilleure distinction) et une diminution de la distance intra-voyelle (meilleure reproductibilité), ce qui suggère un meilleur contrôle de l'arrondissement des lèvres (voir Figure 4.5). On observe également une amélioration de la distinction entre /u/ et /o/ (augmentation de la distance inter-voyelles), ce qui suggère un meilleur contrôle du positionnement postérieur de la langue. Cependant, on observe aussi une détérioration pour les voyelles /e, œ, a/ avec une augmentation de la distance intra-voyelle, ce qui suggère un contrôle encore imparfait du positionnement de la langue.

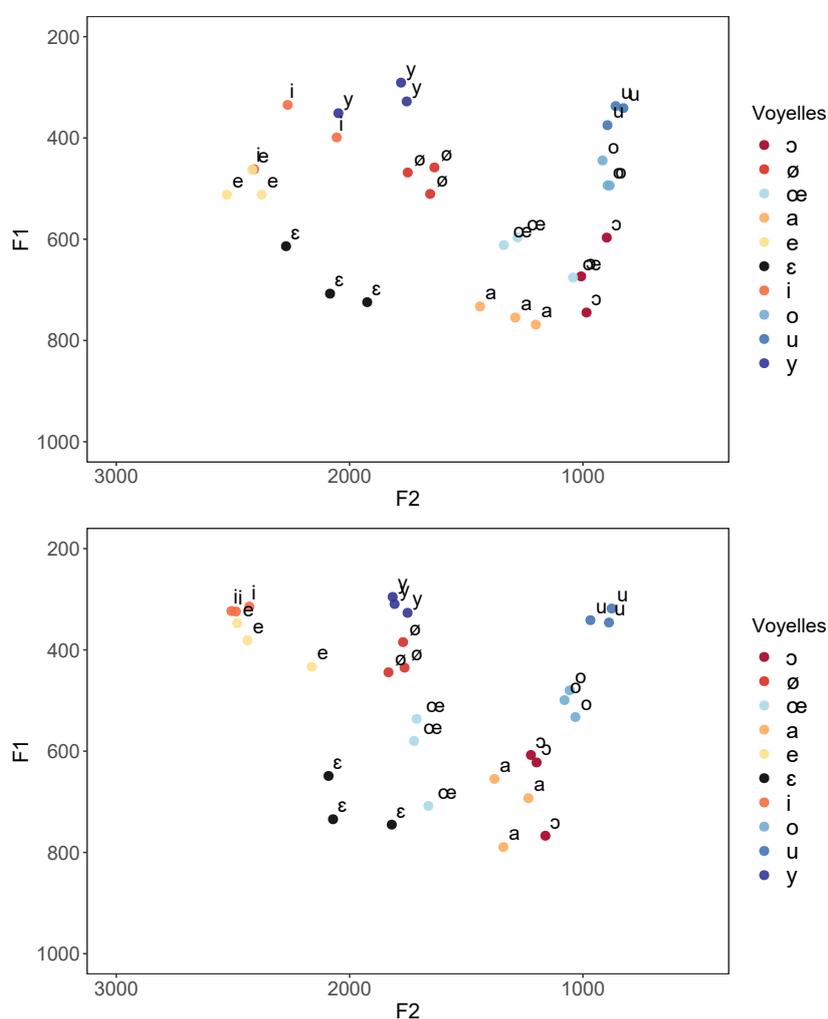


FIGURE 4.5 – Triangles vocaliques de la patiente P1 représentant les formants F1 en fonction de F2 lors de la production des voyelles orales avant (en haut) et après (en bas) la rééducation. La patiente a réalisé trois répétitions de chacune des voyelles orales (/i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a/) avant et après la rééducation. Seules les productions jugées comme correctes par le transcripneur sont représentées.

4. Une nouvelle méthode de rééducation de la parole

La patiente P2, quant à elle, présente une amélioration lors de la production de /i, y, e/ avec une augmentation de la distance inter-voyelles (meilleure distinction) et une diminution de la distance intra-voyelle (meilleure reproductibilité), ce qui suggère un meilleur contrôle de l'arrondissement des lèvres pour /i, y/ et un meilleur contrôle du positionnement antérieur de la langue pour /e/ (voir Figure 4.6). On constate également une amélioration lors de la production de /a/ avec une meilleure reproductibilité lors de la production de cette voyelle (diminution de la distance intra-voyelle).

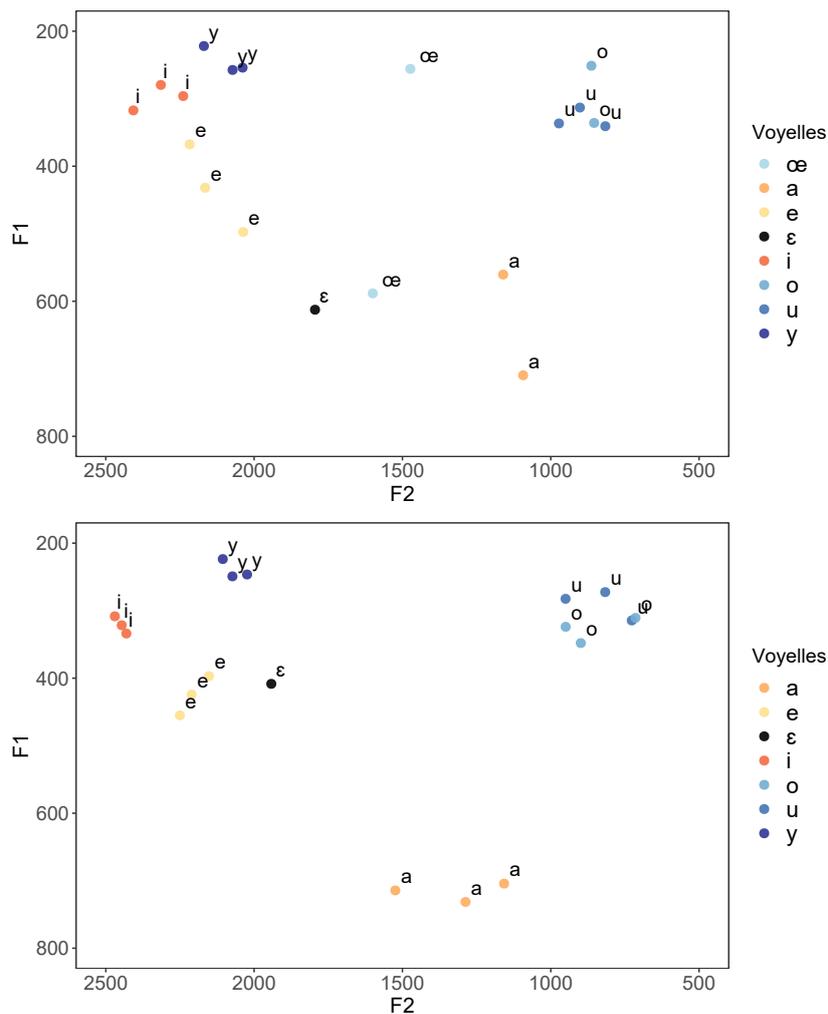


FIGURE 4.6 – Triangles vocaliques de la patiente P2 représentant les formants F1 en fonction de F2 lors de la production des voyelles orales avant (en haut) et après (en bas) la rééducation. La patiente a réalisé trois répétitions de chacune des voyelles orales (/i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a/) avant et après la rééducation. Seules les productions jugées comme correctes par le transcritteur sont représentées.

Cependant, on constate une incapacité de la patiente à produire certaines voyelles avant et/ou après la rééducation : /ø/ n'est produite ni avant ni après la rééducation et /œ/ est produite avant mais pas après la rééducation. Ceci suggère que le contrôle du positionnement des articulateurs est

encore imparfait. De plus, on constate une détérioration avec un chevauchement des voyelles /o/ et /u/ (diminution de la distance inter-voyelles), ce qui suggère un mauvais contrôle du positionnement postérieur de la langue.

Pour les consonnes occlusives, nous avons déterminé le délai d'établissement du voisement (VOT) pour les occlusives voisées /b, d, g/ et non voisées /p, t, k/ (voir Tableau 4.4). Nous avons indiqué le VOT moyen pour les patientes P1 et P2 lors du bilan acoustique avant et après rééducation et pour l'orthophoniste sur la base de ses productions lors du bilan acoustique de la patiente P1.

Les valeurs de VOT obtenues pour l'orthophoniste restent stables avant et après la rééducation et on retrouve la distinction classique avec un VOT positif pour les occlusives non voisées (27,15 ms et 26,66 ms lors des deux sessions) et négatif pour les voisées (-118,79 ms et -106,36 ms lors des deux sessions).

Tableau 4.4 – Délai d'établissement du voisement (VOT, en ms) obtenu lors de la répétition des consonnes occlusives pour P1, P2 et l'orthophoniste, avant et après la rééducation des patientes. Les données sont représentées pour les consonnes occlusives voisées /b, d, g/ et non voisées /p, t, k/. Les données de l'orthophoniste ont été obtenues avant et après la rééducation de P1.

	VOT (ms) pour les consonnes occlusives			
	Voisées		Non voisées	
	Avant rééducation	Après rééducation	Avant rééducation	Après rééducation
P1	-32,08 (11,59)	-59,37 (37,14)	31,11 (20,08)	30,61 (15,59)
P2	N/A	N/A	31,34 (16,08)	30,00 (11,91)
Orthophoniste	-118,79 (34,60)	-106,36 (56,66)	27,15 (9,07)	26,66 (11,81)

Les données sont présentées sous forme de moyenne avec l'écart type associé.

N/A est noté lorsque les consonnes ne sont pas produites par la patiente et que le VOT ne peut donc pas être calculé.

Pour la patiente P1, le VOT est positif, stable et proche des valeurs standard de l'orthophoniste pour les occlusives non voisées (31,11 ms avant et 30,61 ms après rééducation). Pour les occlusives voisées, la valeur de VOT est négative avant et après la rééducation. Cette valeur diminue après la rééducation et devient plus négative (de -32,08 ms à -59,37 ms), se rapprochant ainsi des valeurs standard de l'orthophoniste.

Pour la patiente P2, les valeurs de VOT pour les occlusives non voisées sont positives, stables et proches des valeurs standard (31,34 ms avant et 30,00 ms après rééducation). Concernant les occlusives voisées, la patiente ne les produit pas correctement, ni avant ni après la rééducation. En effet, elle réalise principalement des erreurs de voisement sur les consonnes occlusives voisées (e.g., /p/ au lieu de /b/).

4. Une nouvelle méthode de rééducation de la parole

Enfin, pour les consonnes fricatives (/f, s, ʃ, v, z, ʒ/), nous avons extrait les deux premiers moments spectraux (CG et ET) pour les patientes P1 et P2. Nous remarquons que la patiente P1 n'est pas capable de produire les fricatives alvéolaires /s, z/ avant rééducation, mais celle-ci y parvient après, avec uniquement deux productions de /s/ (voir Figure 4.7). D'après les valeurs de CG, il semble qu'après la rééducation, la patiente distingue bien la fricative alvéolaire /s/ des post-alvéolaires /ʃ, ʒ/ (ordre typique : alvéolaires > post-alvéolaires). Selon les valeurs d'ET, il semble aussi qu'après la rééducation, la patiente P1 distingue bien les fricatives labiodentales /f, v/ des alvéolaires et post-alvéolaires (ordre typique : labiodentales > alvéolaires > post-alvéolaires).

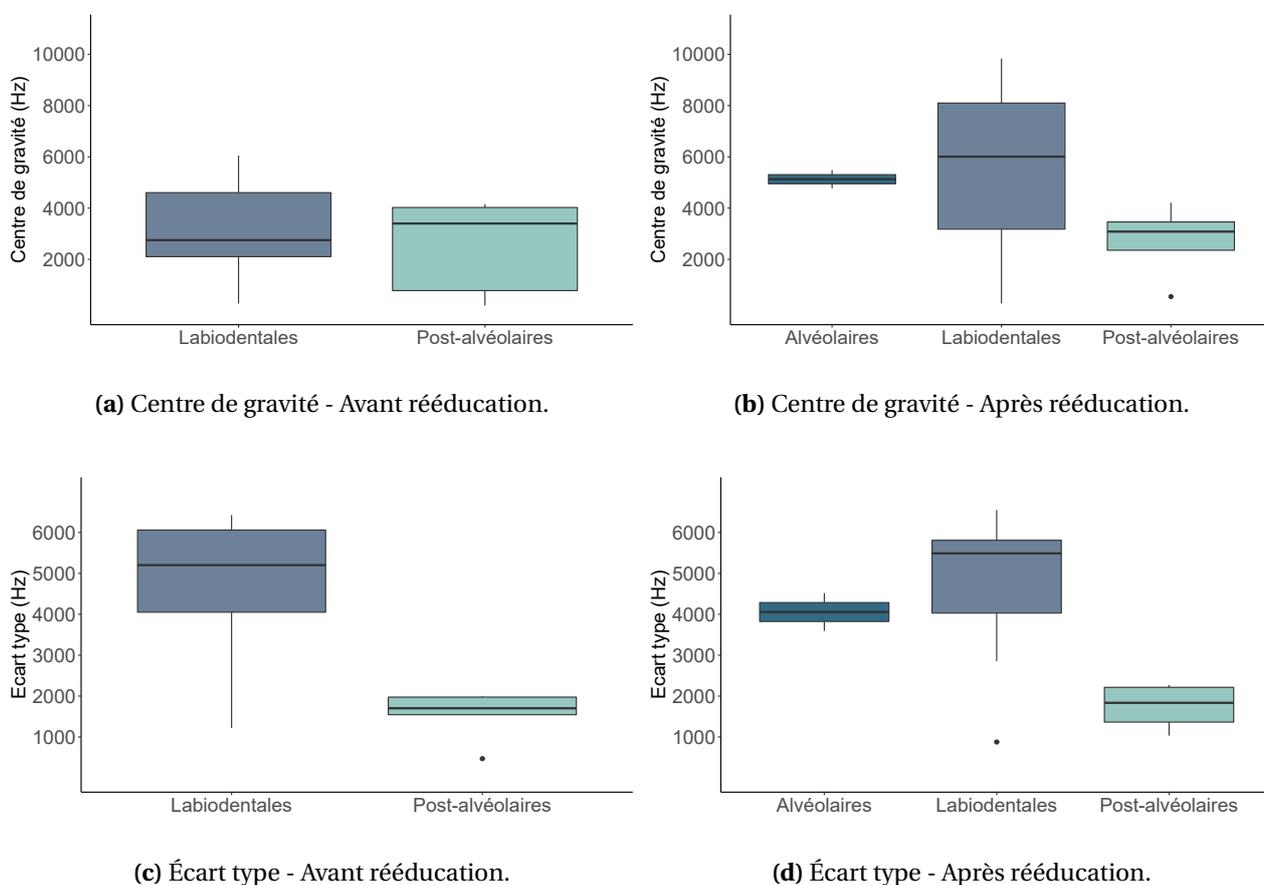


FIGURE 4.7 – Moments spectraux de la patiente P1 pour les consonnes fricatives, avant et après la rééducation. Les *boxplots* représentent le centre de gravité spectral (a, b) et l'écart type spectral (c, d). Les consonnes sont séparées en trois groupes : alvéolaires /s, z/, post-alvéolaires /ʃ, ʒ/ et labiodentales /f, v/.

Concernant la patiente P2, celle-ci est incapable de produire les fricatives post-alvéolaires /ʃ, ʒ/ avant ou après la rééducation (voir Figure 4.8). Les valeurs de CG montrent la distinction faite entre les fricatives alvéolaires /s, z/ et labiodentales /f, v/ après rééducation (alvéolaires > labiodentales).

Les valeurs d'ET, quant à elles, montrent une production atypique des fricatives alvéolaires et labiodentales puisque les valeurs ne respectent pas l'ordre typique avec un ET pour les alvéolaires supérieur à celui des labiodentales.

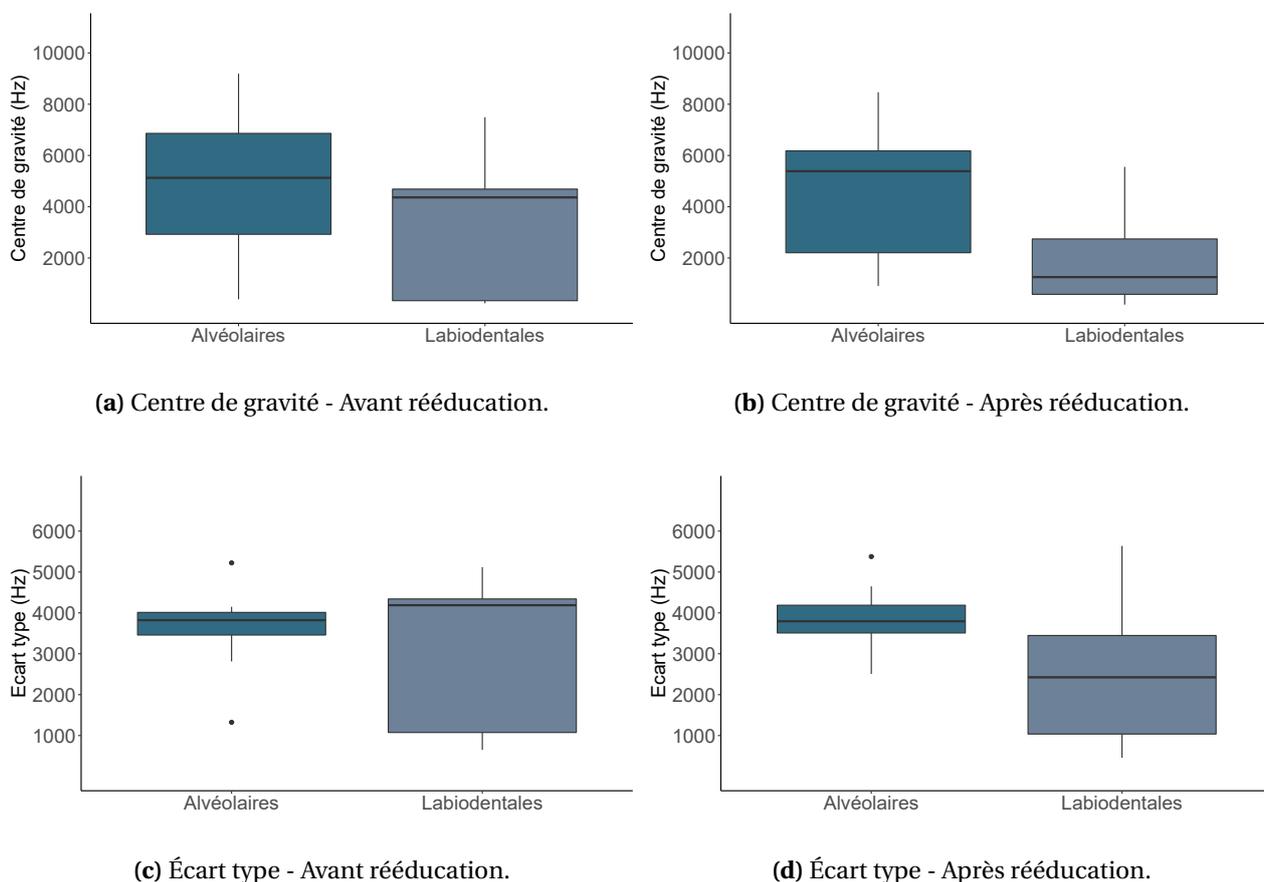


FIGURE 4.8 – Moments spectraux de la patiente P2 pour les consonnes fricatives, avant et après la rééducation. Les *boxplots* représentent le centre de gravité spectral (a, b) et l'écart type spectral (c, d). Les consonnes sont séparées en trois groupes : alvéolaires /s, z/, post-alvéolaires /ʃ, ʒ/ et labiodentales /f, v/.

Ainsi, ces résultats semblent suggérer que la patiente P1 progresse sur le plan langagier, avec une amélioration des performances lors de la répétition de syllabes (augmentation du pourcentage de productions correctes et diminution des erreurs), ainsi que sur le plan acoustique lors de la production de certaines voyelles et consonnes. La patiente P2, quant à elle, présente des résultats plus mitigés. En effet, elle semble progresser lors de la production de certaines voyelles, mais elle reste incapable de produire les consonnes occlusives voisées et les consonnes fricatives post-alvéolaires, après rééducation.

1.2.2 IRMf d'activation

Les résultats issus de l'IRMf de tâche pour la DR suggèrent un effet modulateur de la rééducation pour la patiente P1, avec des activations au niveau du gyrus précentral, du GFS médian à gauche, des GFS et GFM à droite et du cervelet droit (Crus I) (voir Tableau 4.5). Lors de la RS, on observe un effet de la rééducation avec une modulation des activations au niveau du GFI (*pars orbitalis*, GFI-orb) et de l'insula à gauche.

Tableau 4.5 – Activations cérébrales obtenues pour la patiente P1 lors des tâches de détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), avant et après la rééducation. Nous présentons les contrastes entre avant et après la rééducation : *avant* > *après* et *après* > *avant* rééducation.

	Avant > Après rééducation						Après > Avant rééducation					
	Régions (AAL)	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t	Régions (AAL)	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t
DR	Cerebellum_Crus1_L	12	-42	-43	-34	4,09	Frontal_Mid_R	206	39	14	50	4,48
	Poscentral_L	61	-27	-22	83	3,77	Temporal_Sup_R	11	45	-28	2	4,30
	Frontal_Sup_L	25	-30	-1	71	3,72	Frontal_Sup_Medial_L	45	-9	35	44	4,08
	Vermis_4_5_R	44	6	-58	-13	3,63	Cerebellum_Crus1_R	31	39	-67	-25	3,98
	Parietal_Sup_L	40	-21	-52	80	3,56	Precentral_L	48	-36	2	47	3,92
	Cerebellum_4_5_R	11	24	-37	-28	3,46	Frontal_Sup_R	20	24	5	68	3,78
	Cerebellum_6_L	14	-21	-52	-28	3,44						
RS	Precentral_L	1026	-27	-4	56	5,12	Frontal_Inf_Orb_L	101	-51	17	-4	4,73
	Temporal_Mid_L	17	-51	-22	-10	4,54	Insula_L	17	-36	-1	-1	3,63
	Frontal_Mid_R	140	48	-4	56	3,97						
	Precuneus_L	13	-15	-52	74	3,94						

Seuls les pics d'activation les plus significatifs au niveau de chaque groupe de voxels activés (k voxels) sont mentionnés.

Le nom des régions (issues de l'atlas AAL; Tzourio-Mazoyer et al., 2002), les coordonnées MNI (x, y, z) et les valeurs de t (pour $p < 0,001$ non corrigé, $k \geq 10$) sont fournis.

Pour la patiente P2, lors de la DR, on observe un effet de la rééducation avec une modulation des activations au niveau du gyrus lingual et du GFS (*pars orbitalis*) à gauche (voir Tableau 4.6). Lors de la RS, on observe un effet modulateur de la rééducation avec des activations au niveau de l'AMS et du gyrus postcentral à gauche et du GFI-orb et du GFM droits.

Tableau 4.6 – Activations cérébrales obtenues pour la patiente P2 lors des tâches de détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), avant et après la rééducation. Nous présentons les contrastes entre avant et après la rééducation : *avant* > *après* et *après* > *avant* rééducation.

	Avant > Après rééducation						Après > Avant rééducation					
	Régions (AAL)	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t	Régions (AAL)	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t
DR	Cerebellum_4_5_R	11	15	-40	-22	3,73	Lingual_L	11	-21	-52	-7	3,94
	Frontal_Mid_Orb_L	12	-21	44	-16	3,86	Frontal_Sup_Orb_L	59	-30	56	-4	4,37
	Temporal_Sup_L	314	-57	-37	11	5,32	Poscentral_L	397	-66	-4	14	5,56
RS	Rolandic_Oper_R	117	45	-13	20	5,15	Frontal_Inf_Orb_R	141	48	35	-4	4,70
	Cingulum_Post_L	146	-18	-46	11	4,94	Supp_Motor_Area_L	220	-6	8	68	4,37
	SupraMarginal_L	55	-45	-31	29	4,45	Frontal_Mid_R	59	39	41	8	4,32

Seuls les pics d'activation les plus significatifs au niveau de chaque groupe de voxels activés (k voxels) sont mentionnés.

Le nom des régions (issues de l'atlas AAL; Tzourio-Mazoyer et al., 2002), les coordonnées MNI (x, y, z) et les valeurs de t (pour $p < 0,001$ non corrigé, $k \geq 10$) sont fournis.

1.3 Discussion intermédiaire

Dans cette étude, nous avons évalué de façon multimodale l'effet de la rééducation augmentée avec le logiciel *Ultraspeech-player*, en complément de la rééducation classique, chez deux patientes présentant une aphasie non fluente post-AVC. Pour cela, nous avons réalisé une comparaison des performances de langage, des mesures acoustiques et une évaluation en neuroimagerie, avant et après la rééducation.

La patiente P1 présentait une aphasie de Broca (non fluente) suite à une lésion au niveau du GFI et des structures sous-corticales (ganglions de la base) (Figure 4.1). Après la rééducation, on observe une amélioration lors de la répétition des consonnes et des voyelles avec une augmentation de la proportion de productions correctes et une diminution des erreurs (erreurs de voisement, productions incorrectes ou émergentes). Ceci suggère un meilleur contrôle du larynx, du positionnement de la langue (mode et lieu d'articulation) et de la dynamique des articulateurs de la parole (Tableau 4.3). Les mesures acoustiques suggèrent également : un meilleur arrondissement des lèvres pour les voyelles, même si le contrôle du positionnement de la langue est encore imparfait (Figure 4.5) ; une meilleure distinction entre les consonnes fricatives (alvéolaires, labiodentales et post-alvéolaires) (Figure 4.7) ; et une augmentation de la durée du voisement pour les consonnes occlusives voisées, se rapprochant ainsi des valeurs standard (Tableau 4.4). Au niveau langagier, on constate une amélioration des performances lors des tâches de répétition, lecture, dénomination, jugement de rimes, cependant les performances déclinent en fluence verbale et en particulier en fluence alphabétique (Tableau 4.2). Ce dernier résultat suggère une difficulté dans la récupération des mots, ce qui pourrait être lié à un défaut des compétences lexicales ou encore à un déficit du contrôle cognitif et des fonctions exécutives (Brownsett et al., 2014).

Enfin, ces différents résultats observés sur les plans langagier et acoustique sont associés à un renforcement de l'interaction somato-sensorimotrice mise en évidence par le recrutement supplémentaire des régions impliquées dans cette boucle ainsi qu'à une amélioration de la programmation motrice et de l'attention, lors de la tâche de DR. En effet, on retrouve, lors de cette tâche, un recrutement du gyrus précentral gauche et de Crus I à droite qui sont impliqués dans la boucle somato-sensorimotrice du modèle de Hickok (2012a). Crus I est également impliqué dans la mémoire de travail verbale et les processus linguistiques (Hickok, 2012a ; Mariën et al., 2014 ; Stoodley & Schmahmann, 2009 ; Stoodley, Valera, & Schmahmann, 2012), ce qui signifie que

P1 recrute davantage les régions impliquées dans la mémoire de travail verbale pour réaliser la tâche. De plus, on observe une modulation de l'activation du GFM droit qui sert de passerelle entre les processus top-down et bottom-up du contrôle attentionnel (Japee, Holiday, Satyshur, Mukai, & Ungerleider, 2015). Par ailleurs, il est important de noter que les régions impliquées dans la boucle somato-sensorimotrice sont associées à la configuration du conduit vocal (Hickok, 2012a). Ainsi, le renforcement de cette boucle confirme les résultats du bilan acoustique et suggère une amélioration du contrôle dynamique des articulateurs de la parole, du contrôle laryngé et du lieu et du mode d'articulation.

Nos résultats suggèrent également un renforcement de l'interaction auditivo-motrice, de la coordination articuloire et de la planification du langage, lors de la tâche de RS. En effet, on observe un recrutement du GFI-orb à gauche qui est impliqué dans l'encodage phonologique et l'interaction sensorimotrice avec l'activation des programmes moteurs syllabiques et la récupération des gestes articuloires de la parole (Guenther & Vladusich, 2012 ; Hickok, 2012a ; Indefrey, 2011). Ceci suggère, en accord avec les résultats du bilan orthophonique (Tableau 4.2), un meilleur contrôle de l'encodage phonétique avec une facilitation de l'accès au lexique phonologique de sortie sollicité dans cette tâche, et donc un renforcement de l'interaction auditivo-motrice. L'activation de l'insula gauche observée après la rééducation suggère une amélioration de la coordination des mouvements articuloires intra- et inter-syllabiques, durant la production de la parole (Baldo, Wilkins, Ogar, Willock, & Dronkers, 2011 ; Dronkers, 1996). Notons également que l'insula gauche et le GFI sont impliqués dans le réseau de planification du langage (Acher et al., 2016).

La patiente P2, quant à elle, présentait une aphasie globale initialement, suite à une lésion fronto-temporo-pariétale (Figure 4.1). L'aphasie ayant évolué, la patiente présentait une aphasie de Broca (non fluente) au moment de l'étude. Au niveau de la tâche de répétition de syllabes, on constate que la patiente présente des améliorations pour certaines voyelles (légère augmentation du pourcentage de productions correctes) mais aucune amélioration pour les consonnes (Tableau 4.3). D'un point de vue acoustique, on remarque, lors de cette tâche, un meilleur contrôle de la langue et des lèvres pour certaines voyelles, même si le contrôle est encore imparfait (Figure 4.6) ; en revanche, on ne constate aucune amélioration pour les consonnes avec une production atypique des fricatives labiodentales et une incapacité à produire les fricatives post-alvéolaires et les occlusives voisées (Figures 4.8 et 4.4). Ceci suggère donc un mauvais positionnement de la langue et un défaut de

contrôle laryngé. Lors du bilan orthophonique, nous avons montré un déficit en mémoire de travail avant et après la rééducation chez cette patiente. La patiente semble s'améliorer lors des tâches de dénomination et répétition, mais elle décline lors des tâches de jugement de rimes et de lecture (Tableau 4.2).

Ces différents résultats peuvent être mis en lien avec les modulations d'activité cérébrale que l'on observe en IRMf. Lors de la DR, l'activation du GFS *pars orbitalis* à gauche, combinée au déclin lors de la tâche de jugement de rimes du bilan orthophonique, suggère l'échec de la patiente pour recruter les régions nécessaires pour réaliser le traitement phonologique impliqué dans cette tâche. L'activation du gyrus lingual, quant à elle, suggère que la patiente fait appel à des stratégies visuo-graphiques pour la réalisation de la tâche (Kuriki, Takeuchi, & Hirata, 1998).

Enfin, lors de la RS, l'activation de l'AMS gauche, impliquée dans la programmation motrice, et du gyrus postcentral gauche, correspondant à l'aire somesthésique primaire, suggèrent un renforcement de l'interaction somato-sensorimotrice et un effort pour la programmation motrice lors de la réalisation des phonèmes (Hickok, 2012a ; Løevenbruck et al., 2018). L'activation du GFM droit suggère un recrutement des ressources attentionnelles et celle du GFI droit est associée à la prise de décision au niveau phonologique (Hartwigsen et al., 2010). En accord avec l'amélioration lors de la répétition de syllabe dans le bilan orthophonique, ces résultats suggèrent un meilleur contrôle de l'interaction somato-sensorimotrice, de l'encodage phonétique et du traitement du lexique phonologique de sortie.

La méthode de rééducation que nous proposons dans cette étude demande aux patientes de faire une association entre : le son (retour auditif via le logiciel et retour de leurs propres productions), la vision (visualisation des mouvements de la langue et des lèvres pré-enregistrés chez un locuteur standard), et les mouvements articulatoires correspondants (retours somesthésiques et proprioceptifs de leurs propres productions). Ainsi, nous supposons que la visualisation des articulateurs permettra une amélioration de la représentation de la langue et un meilleur contrôle moteur lorsqu'on y ajoute les informations auditives et somesthésiques. Or, nous avons constaté que chez la patiente P2, la lésion est plus étendue (au niveau des régions fronto-temporo-pariétales) et nous savons que l'intégrité des régions temporales et pariétales est nécessaire pour l'intégration multisensorielle. En effet, le cortex pariétal est impliqué dans la représentation corporelle et il reçoit les informations multisensorielles (vision, audition, somesthésie et proprioception) qui

sont intégrées et permettent de générer un signal qui est transmis aux cortex moteur et pré-moteur. Il s'agit donc d'une région qui est impliquée dans la coordination et l'intégration vision-proprioception-audition-articulation (Culham, Cavina-Pratesi, & Singhal, 2006 ; Ishida, Nakajima, Inase, & Murata, 2010). Ainsi la lésion de la patiente P2, pourrait être à l'origine de l'incapacité d'associer l'image des articulateurs, les informations somesthésiques et proprioceptives et le son correspondant, ce qui entraînerait la faible efficacité de la méthode et donc l'absence de progression dans certaines tâches évaluées ici.

Cette première étude de cas nous permet donc de montrer l'intérêt et l'efficacité de la rééducation augmentée *via* le logiciel *Ultraspeech-player*. En effet, cette méthode semble efficace pour permettre la récupération du langage chez des patients présentant une aphasie non fluente en phase chronique et elle peut être utilisée en autonomie (au domicile des patients). Cependant, elle est à privilégier chez les patients présentant une lésion frontale avec les régions temporo-pariétales préservées. Nous avons également démontré l'intérêt d'utiliser une évaluation multimodale (bilan orthophonique, bilan acoustique et imagerie fonctionnelle), pour évaluer l'efficacité de la méthode sur différents aspects.

Toutefois, certaines limites peuvent être soulevées, nous permettant de proposer des améliorations du protocole pour de futures études : (i) les résultats des comparaisons avant/après rééducation sont essentiellement qualitatifs et il pourrait être intéressant de proposer des analyses permettant de comparer statistiquement les performances avant et après rééducation ou encore d'évaluer quantitativement la distance entre les voyelles; (ii) il s'agit d'une étude de cas et les résultats doivent être validés sur un plus grand nombre de patients; (iii) la rééducation à l'aide du logiciel *Ultraspeech-player* est réalisée en complément de la rééducation classique et il serait intéressant de proposer un protocole permettant de comparer la rééducation augmentée à l'aide du logiciel *Ultraspeech-player* et la rééducation orthophonique classique.

Résumé 4.1 : Tableau récapitulatif - Étude de cas, patientes P1 et P2

Patiente	Localisation de la lésion	Comparaison avant/après rééducation		
		Bilan orthophonique	Bilan acoustique	IRMF de tâche
P1	GFI et structures sous-corticales (ganglions de la base)	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Dénomination, répétition, lecture et jugement de rimes ▼ Fluence verbale 	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Performances pour les voyelles et consonnes ▲ Contrôle dynamique des articulateurs ▲ Contrôle laryngé et du lieu/mode d'articulation 	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Interaction auditivo-motrice ▲ Interaction somato-sensorimotrice
P2	Fronto-temporo-pariétale	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Dénomination et répétition ▶ Déficit en mémoire de travail ▼ Lecture et jugement de rimes 	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Performances pour les voyelles ▲ Position antérieure de la langue et arrondissement des lèvres pour les voyelles ▶ Contrôle laryngé et dynamique des articulateurs pour les consonnes ▼ Contrôle du mode/lieu d'articulation pour les consonnes et position postérieure de la langue pour les voyelles 	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Interaction somato-sensorimotrice

2 Étude de cas : patient P3

Dans cette deuxième étude de cas, nous avons évalué l'efficacité de la rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player* chez un patient présentant une aphasie non fluente chronique (Haldin et al., 2021). Nous avons proposé des améliorations du protocole suite à l'étude de cas présentée précédemment. Ainsi, nous avons utilisé une approche multimodale basée sur : (i) l'évaluation des performances de langage lors d'une évaluation du langage (avec une validation statistique); (ii) l'analyse des erreurs et l'étude des productions du patient avec des matrices de confusion et une évaluation des processus phonologiques identifiés dans les erreurs lors d'une tâche de répétition de syllabes; et (iii) l'évaluation acoustique issue de l'analyse du signal de parole (calcul des moments spectraux et du VOT pour les consonnes et mesure des formants et des distances intra-voyelle pour les voyelles).

2.1 Méthode

2.1.1 Participant

Les données démographiques et cliniques du patient P3 sont présentées dans le Tableau 4.7 et la Figure 4.9 permet de visualiser la lésion du patient. Le patient P3 présentait une lésion plutôt

4. Une nouvelle méthode de rééducation de la parole

antérieure avec une atteinte du GFI, de l'insula, des cortex moteur primaire et pré-moteur et une atteinte partielle au niveau temporal (GTS). Ce patient présentait initialement une aphasie globale, mais au moment de l'étude (en phase chronique, > 6 mois post-AVC), il présentait une aphasie de Broca (non fluente).

Tableau 4.7 – Données démographiques et cliniques du patient P3.

Patient	P3
Sexe, âge	Homme, 41 ans
Préférence manuelle	Droitier
Âge de survenue de l'AVC	40 ans
Cause et localisation de la lésion	AVC ischémique au niveau de l'artère sylvienne gauche (territoire superficiel)
Type d'aphasie	<i>Initialement</i> : aphasie globale <i>Actuellement</i> : aphasie de Broca
Symptômes	<i>Initialement</i> : stéréotypies, langage écrit préservé, compréhension préservée, mutisme. Communication non verbale (mimes, gestes, mimiques faciales), écriture de mots isolés sans syntaxe <i>Actuellement</i> : compréhension orale et écrite préservée (sauf pour les textes longs et complexes), troubles arthriques, nombreuses persévérations, déficit important en lecture (sauf syllabes simples avec tâtonnement), expression écrite préservée (avec la main gauche)
Autres déficits associés	Hémi-parésie droite
Rééducation orthophonique classique	3 séances par semaine

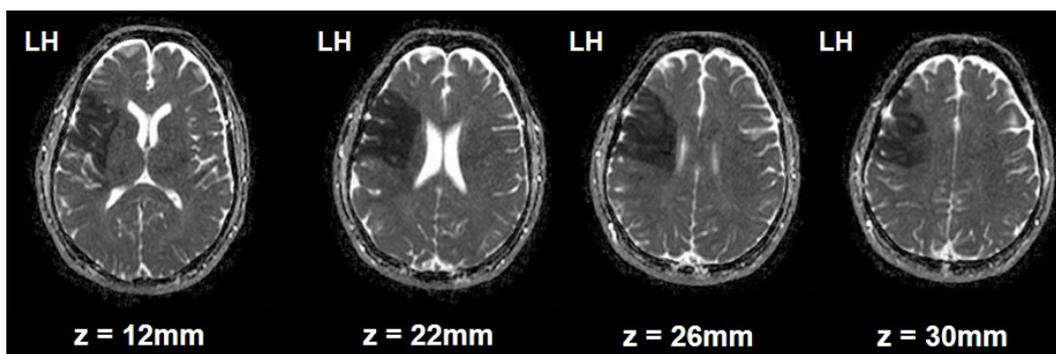


FIGURE 4.9 – Coupes axiales issues de l'IRM (T1) du patient P3 permettant de visualiser la lésion post-AVC : au niveau frontal et partiellement temporel à gauche. « LH » (Left Hemisphere) indique le côté correspondant à l'hémisphère gauche sur l'image.

Avant de participer à l'étude, un bilan orthophonique et une évaluation neuropsychologique ont été réalisés permettant de valider plusieurs critères d'inclusion : l'absence de troubles de la compréhension (compréhension orale et écrite du BDAE, *Boston Diagnostic Aphasia Examination*;

Goodglass & Kaplan, 1983), afin de s'assurer que le patient peut comprendre les explications concernant le logiciel; l'absence d'apraxie bucco-faciale (MT86; Nespoulous et al., 1992); l'absence d'apraxie gestuelle des membres supérieurs ou au moins un membre sans apraxie (*Apraxia Screen of TULLIA*, AST; Vanbellingen et al., 2011), afin de vérifier la capacité du patient à utiliser la souris de l'ordinateur; l'absence de négligence spatiale (test des cloches et bissection de lignes; GEREN, 2002), afin de s'assurer que le patient aura accès à toutes les informations visibles sur le logiciel; et l'utilisation des outils informatiques (test élaboré par la neuropsychologue du CHU Grenoble Alpes), afin d'évaluer la familiarité du patient par rapport aux outils numériques. Les résultats de ces évaluations sont présentés dans l'Annexe C (Section 1) et les scores obtenus permettent de valider les critères d'inclusion ci-dessus.

Le bilan orthophonique réalisé avant l'étude (voir Tableau C.3, Annexe C) comprenait également une évaluation des capacités d'expression orale et écrite et de répétition et de lecture de mots (BDAE; Goodglass & Kaplan, 1983). Le patient présentait des difficultés d'expression orale avec la présence de nombreuses persévérations et des troubles arthriques sévères qui semblaient entraver le fonctionnement moteur. L'expression écrite était préservée, elle était le mode de communication préféré du patient. Cependant, il avait des difficultés pour l'écriture des mots longs et peu fréquents et il présentait une dyssyntaxie à l'écrit. Lors de la répétition, le patient parvenait à répéter les mots monosyllabiques sans groupes de consonnes complexes, mais il avait des difficultés lors de la répétition des mots longs et complexes qui généraient de nombreux tâtonnements phonétiques n'aboutissant pas au mot cible. Enfin, la lecture à haute voix de mots était impossible, le patient était incapable d'accéder aux représentations articulatoires des formes écrites.

2.1.2 Rééducation

Le patient a suivi, en complément de la rééducation orthophonique classique, une rééducation à l'aide du logiciel *Ultraspeech-player* (Hueber, 2013). Durant la rééducation, il était assis devant un écran d'ordinateur sur lequel il pouvait visualiser, *via* le logiciel, les mouvements de la langue et des lèvres, associés à des sons, chez un locuteur standard. Le logiciel *Ultraspeech-player* est présenté plus en détail dans la Section 1.1.2 de ce chapitre.

Durant la première séance, l'expérimentatrice décrivait le logiciel au patient en expliquant le fonctionnement de celui-ci ainsi qu'en détaillant les mouvements de la langue affichés, pour bien

situer la racine, le dos et la pointe de la langue, ainsi que le contour du palais. La rééducation a débuté après cette première séance de présentation. Durant les séances, après la présentation synchrone du son et de la vidéo des mouvements linguaux et/ou labiaux, le patient devait répéter le son entendu 5 fois avant de passer au son suivant, avec l'accord de l'expérimentatrice. Le patient a effectué onze séances de rééducation (3 séances/semaine, 30 minutes par séance) durant lesquelles il a travaillé : les voyelles /i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a, ã, õ, ê/ ; les consonnes /p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, l, ʁ/ ; et semi-consonnes /j, w/, isolées ou combinées (voyelle-consonne-voyelle, VCV). Le contenu détaillé des séances de rééducation est présenté dans le Tableau C.4 (Annexe C). Durant chaque séance, seuls certains phonèmes sont ciblés, ainsi une illustration de l'interface du logiciel pour l'exercice 1 est présentée dans la Figure C.1 (Annexe C).

2.1.3 Évaluation neuropsychologique

Une évaluation neuropsychologique a été effectuée avant et après la rééducation. Celle-ci a permis d'évaluer : les performances cognitives (*Cognitive Assessment Scale for Stroke Patients*, CASP; Barnay et al., 2012); les fonctions exécutives (empan visuo-spatial, fluence graphique et *Trail Making Test*, TMT; Godefroy & GREFEX, 2008 ; Ruff, Light, & Evans, 1987 ; Wechsler, 2012); la mémoire épisodique visuelle (Batterie d'Efficiences Mnésiques de Signoret, BEM84; Signoret, 1991); les capacités de rotation mentale (Albaret & Aubert, 1996 ; Vandenberg & Kuse, 1978); et l'anxiété et la dépression (*Hospital Anxiety and Depression scale*, HAD; Zigmond & Snaith, 1983).

2.1.4 Évaluation du langage et de la parole

L'évaluation du langage du patient comprenait un bilan langagier et un bilan acoustique, avant et après rééducation. Le bilan langagier a permis d'évaluer : l'accès au lexique phonologique de sortie et l'encodage phonétique avec une tâche de répétition de mots (mots simples, Batterie d'Évaluation Clinique de la Dysarthrie, BECD; Auzou & Rolland-Monnoury, 2006); la dénomination de lettres écrites avec une tâche de lecture de syllabes (développée par les orthophonistes du CHU Grenoble Alpes); et la discrimination phonémique (Batterie Analytique du Langage Écrit, BALE; Jacquier-Roux, Lequette, Pouget, Valdois, & Zorman, 2010). Durant la tâche de répétition de mots, l'orthophoniste produisait le mot et le patient devait le répéter. Durant la tâche de lecture, les syllabes étaient présentées sur une feuille de papier, les unes en dessous des autres, et le patient devait les lire à haute voix. Enfin, durant la tâche de discrimination phonémique, l'orthophoniste

produisait deux syllabes et le patient devait indiquer si elles étaient similaires ou non en montrant sur une feuille de papier les mots « Pareil » ou « Pas pareil ». Durant cette tâche, le patient ne pouvait pas lire sur les lèvres de l'orthophoniste. La tâche de lecture était effectuée trois fois et les deux autres tâches une seule fois.

Lors du bilan acoustique, le patient devait répéter des phonèmes ou syllabes produits par une orthophoniste. Les phonèmes ou syllabes travaillés étaient : les voyelles isolées (/i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a, ā, ã, ã/, les semi-consonnes accompagnées des voyelles /a/ ou /i/ (/w, j, ɥ/) et les consonnes (/p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, ɲ, l, ʁ/) accompagnées de /a/. Les consonnes étaient placées en position initiale [CV] ou médiane [VCV] et les semi-consonnes en position initiale uniquement (notées également « [CV] » dans cette thèse). Cette tâche de répétition était effectuée trois fois. Les réponses produites étaient enregistrées à l'aide d'un microphone (enregistreur ZOOM H2N).

Le contenu des épreuves utilisées lors de l'évaluation du langage (bilan langagier et bilan acoustique) est présenté dans le Tableau C.5 (Annexe C). Dans la suite de ce chapitre, la tâche de répétition des voyelles isolées, consonnes en condition [CV] et [VCV] et semi-consonnes en condition [CV] sera appelée « répétition de syllabes ».

2.1.5 Analyse de données

Afin d'évaluer l'effet de la rééducation sur les tâches comprises dans l'évaluation du langage et de la parole, nous avons évalué : (i) les performances avec une mesure d'un pourcentage de réponses correctes et d'un indice d'évolution (IE) ; (ii) les productions du patient avec une analyse des erreurs lors de la tâche de répétition de syllabes ; (iii) les paramètres acoustiques pour les consonnes et voyelles produites lors de la répétition de syllabes.

Performances À l'aide du logiciel *Phon* (Hedlund & Rose, 2018 ; Rose & MacWhinney, 2014 ; Rose et al., 2006), nous avons calculé, les pourcentages de phonèmes corrects (PPC) et le PPC dans les mots pour les tâches de répétition de syllabes et de mots, respectivement. Pour la tâche de lecture et la discrimination phonémique, nous avons extrait le pourcentage moyen de syllabes correctement lues et le pourcentage de paires de syllabes correctement discriminées.

Afin d'évaluer l'évolution des performances du patient lors des tâches des bilans langagier et acoustique, nous avons calculé un IE basé sur un score déterminé pour chaque item de chaque tâche du bilan. Pour la lecture et la discrimination phonémique, ce score prend une valeur de +1

lorsque la réponse pour un item donné était incorrecte avant la rééducation et correcte après; -1 lorsque la réponse était correcte avant et incorrecte après rééducation; et 0 lorsque la réponse était correcte avant et après ou incorrecte avant et après rééducation. Pour la répétition de syllabes et de mots, le score par item était de : +1 lorsque le PPC pour un item donné avant la rééducation était inférieur à celui après rééducation; -1 lorsque le PPC pour un item donné avant la rééducation était supérieur à celui après rééducation; et 0 lorsque le PPC pour un item donné était équivalent avant et après rééducation. Ainsi, en sommant les scores pour chaque item, nous obtenons un IE pour chacune des tâches des bilans langagier et acoustique.

Analyse des erreurs Nous avons également fait une analyse des erreurs observées lors de la tâche de répétition de syllabes. Premièrement, nous avons réalisé, à l'aide du logiciel *R* (RStudio Team, 2020), des matrices de confusion. Elles représentent le phonème cible en fonction du phonème produit et nous avons réalisé ces matrices pour les données obtenues avant et après la rééducation. Une description détaillée de ces matrices sera fournie dans la Section 2.2.2. Nous avons réalisé les matrices de confusion pour : les voyelles avec les archiphonèmes³ (/ɛ/ = /œ, ø/, /o/ = /o, ɔ/ et /E/ = /e, ε/); les consonnes et semi-consonnes en condition [CV]; et les consonnes en condition [VCV].

Deuxièmement, nous avons déterminé les processus phonologiques identifiés dans les erreurs lors de la répétition des consonnes et semi-consonnes en condition [CV] et [VCV]. Le logiciel *Phon* (Hedlund & Rose, 2018 ; Rose & MacWhinney, 2014 ; Rose et al., 2006) nous a permis de comparer le phonème cible et le phonème produit et d'extraire ces processus phonologiques. Nous avons donc extrait sept processus : le **dévoisement** (production d'une consonne non voisée au lieu d'une voisée, e.g., /t/ au lieu de /d/); le **voisement** (production d'une consonne voisée au lieu d'une non voisée, e.g., /b/ au lieu de /p/); l'**antériorisation des consonnes vélares** (production d'une consonne alvéolaire /t, d/ au lieu d'une vélaire /k, g/); l'**occlusion d'une fricative** (production d'une occlusive au lieu d'une fricative, e.g., /p/ au lieu de /f/); la **postériorisation des consonnes coronales** (production d'une consonne postérieure au lieu d'une coronale, e.g., /k/ au lieu de /t/); la **latéralisation** (production d'une consonne latérale à la place de la consonne cible, e.g., /l/ au lieu de /n/); et l'**erreur de nasalisation** (production d'une consonne orale à la place d'une nasale, e.g., /b/ au lieu de /m/).

3. Ces archiphonèmes ont été utilisés étant donné que les voyelles mi-ouvertes et mi-fermées sont souvent confondues, et ce même par des locuteurs standards (Durand, Laks, & Lyche, 2014).

Évaluation acoustique Le signal de parole obtenu avant et après rééducation a été enregistré à 44,1 kHz et rééchantillonné à 12 kHz pour faciliter les analyses acoustiques. Les paramètres acoustiques ont été extraits à l'aide du logiciel *Praat* (Boersma & Weenink, 2010) et l'annotation des données a été réalisée avec le logiciel *Phon* (Hedlund & Rose, 2018 ; Rose & MacWhinney, 2014 ; Rose et al., 2006) pour la tâche de répétition de syllabes. Nous avons annoté les phonèmes comme « corrects », « incorrects », « émergents » ou avec une « erreur de voisement ». Pour les phonèmes jugés comme corrects ou émergents, nous avons extrait : les formants F1 et F2 pour les voyelles orales (/i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a/) ; les deux premiers moments spectraux (centre de gravité, CG et écart type, ET) pour les consonnes fricatives non voisées (/f, s, ʃ/) ; et le délai d'établissement du voisement (VOT) pour les consonnes occlusives (/p, t, k, b, d, g/). La transcription et l'annotation des données ont été effectuées par un transcripateur formé, de langue maternelle française. Notons qu'une partie des données a été retranscrite par un second transcripateur de langue maternelle française, avec un accord de plus de 70%, ce qui est la norme dans la transcription des données audio des patients. Les différentes représentations graphiques des résultats ont été réalisées avec le logiciel *R* (RStudio Team, 2020).

Les valeurs des formants ont été obtenues à l'aide d'un script permettant de détecter les formants (entre 0 et 5000 Hz) avec un pas de 0,01 s, une fenêtre gaussienne d'analyse de 0,025 s et une pré-emphase de 50 Hz. Ensuite, nous avons réalisé les triangles vocaliques (représentation graphique de F1 en fonction de F2) pour le patient avant et après la rééducation. Nous avons également déterminé la distance intra-voyelle afin d'évaluer la stabilité des productions acoustiques pour chaque voyelle à travers les répétitions. Cette distance doit être la plus petite possible. Cette mesure fait référence, au sein de chaque voyelle, à la distance entre son point de coordonnées (F2, F1) et le barycentre correspondant. Ce barycentre est calculé pour chaque voyelle comme la moyenne arithmétique des coordonnées (F2, F1) des différentes répétitions de cette voyelle.

Les deux premiers moments spectraux (CG et ET) ainsi que le VOT ont été extraits. Les détails concernant leur extraction sont présentés dans la Section 1.1.5 de ce chapitre.

2.1.6 Analyses statistiques

Des analyses statistiques ont été effectuées pour déterminer s'il existait une différence significative entre avant et après la rééducation dans les tâches de langage (bilan langagier et bilan acous-

tique). Une régression logistique a été utilisée pour évaluer l'association entre les performances lors des tâches et la rééducation. Ainsi, nous avons effectué cinq régressions logistiques pour : la tâche de répétition de consonnes et semi-consonnes en condition [CV]; la tâche de répétition de consonnes en condition [VCV]; la tâche de répétition de voyelles; la tâche de répétition de mots; et la tâche de lecture. Ces analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel *R* (RStudio Team, 2020). Pour effectuer chaque régression logistique, nous avons défini deux variables : une variable dépendante binaire, qui est la performance (réponse correcte ou incorrecte à la tâche) et une variable indépendante binaire, qui est le moment de la mesure (avant ou après la rééducation).

2.2 Résultats

2.2.1 Évaluation neuropsychologique

Les résultats du bilan neuropsychologique, réalisé avant et après la rééducation, sont présentés dans le Tableau 4.8. Le patient présente des compétences cognitives préservées (CASP) malgré des déficits en dénomination, avant et après la rééducation. Il présente également des performances correctes, avant et après la rééducation, en mémoire de travail et en mémoire visuo-spatiale à court terme.

Cependant, on observe des difficultés au niveau de la flexibilité avec un score faible puis pathologique, avant et après la rééducation, lors de la fluence graphique et un score pathologique uniquement avant la rééducation pour le TMT (partie B). Le patient présente également des troubles de la mémoire épisodique visuelle avec un score pathologique avant et faible après la rééducation. Ses capacités de rotation mentale sont intactes avec, toutefois, une augmentation de la durée de traitement. Enfin, on observe une aggravation de l'anxiété et la dépression, avec des scores pathologiques, après la rééducation.

2.2.2 Évaluation du langage et de la parole

Performances Les performances du patient P3 lors de l'évaluation du langage et de la parole sont présentées dans le Tableau 4.9. Nous avons présenté les performances pour les tâches de répétition de syllabes (pour les conditions voyelles seules, [CV], ou [VCV]) et de mots, de lecture et de discrimination phonémique.

Tableau 4.8 – Scores obtenus par le patient P3 lors du bilan neuropsychologique effectué avant et après rééducation.

	Tâches	Avant rééducation	Après rééducation
CASP	Dénomination (/3)	0,5	1
	Compréhension (/3)	3	3
	Reproduction d'un cube en copie (/4)	3	3
	Séries graphiques (/2)	2	2
	Inhibition/Flexibilité (total : /4)	4	4
	<i>Ordres contraires (/2)</i>	2	2
	<i>Go/NoGo (/2)</i>	2	2
	Bissection d'une ligne (/2)	2	2
	Rappel d'images (/6)	6	6
	Praxies (total : /6)	6	6
	<i>Gestes non symboliques, imitation (/2)</i>	2	2
	<i>Gestes symboliques, pantomimes (/2)</i>	2	2
	<i>Reconnaissance (/2)</i>	2	2
	Calendrier (/6)	6	6
	Score global (CASP, /36)	32,5	33
Évaluation des fonctions exécutives	Empan visuo spatial		
	<i>Empan endroit</i>	6	6
	<i>Empan envers</i>	6	6
	Fluence graphique (RFFT)		
	<i>Nombre de figures uniques réalisées</i>	26	24
	<i>Pourcentage de répétitions (cut-off: 15%)</i>	15,4*	16,6**
	Trail Making Test (TMT)		
	<i>Partie A : temps, en secondes (cut-off: 67)</i>	33s	29s
	<i>Partie A : erreur (cut-off: 2)</i>	0	1
	<i>Partie B : temps en secondes (cut-off: 151)</i>	161s**	117s
	<i>Partie B : erreur (cut-off: 3)</i>	1	1
<i>Partie B-A : temps, en secondes (cut-off: 120)</i>	128s**	88s	
<i>Partie B-A : erreur (cut-off: 1)</i>	1*	0	
Mémoire épisodique visuelle (BEM84)	Rappel immédiat (/12)	10 (-0,3 σ)	8,5 (-1,45 σ)*
	Rappel différé (/12)	7,5 (-1,97 σ)**	8 (-1,6 σ)*
Capacités de rotation mentale	Score	22 (norme)	22 (norme)
	Temps total	3 min 35	8 min 06
Évaluation de l'anxiété et la dépression (HAD)	Score d'anxiété (total, cut-off : 7)	5	15**
	Score de dépression (total, cut-off : 7)	0	13**

* score faible; ** score pathologique

CASP, *Cognitive Assessment for Stroke Patients*; RFFT, *Ruff Figural Fluency Test*; TMT, *Trail Making Test*; BEM84, *Batterie d'efficience mnésique*; HAD, *Hospital Anxiety and Depression scale*.

Le patient s'améliore significativement entre avant et après la rééducation lors de la répétition de consonnes en condition [CV] (de 57,30% à 80,30%; $z = 2,95$, $p = 0,0032$) et [VCV] (de 32,65% à 65,67%; $z = 4,09$, $p < 0,001$). Cependant, il ne semble pas qu'il y ait d'amélioration significative pour les voyelles. Durant la répétition de mots, le patient s'améliore significativement avec un IE de +13 (de 43,04% à 56,27%; $z = 3,06$, $p = 0,0022$). Concernant la tâche de lecture, ses performances augmentent significativement après la rééducation (de 39,22% à 66,67%; $z = 2,74$, $p = 0,0061$).

4. Une nouvelle méthode de rééducation de la parole

Enfin, les performances du patient sont à 100% avant et après la rééducation pour la tâche de discrimination phonémique.

Tableau 4.9 – Performances du patient P3 lors de l'évaluation du langage et de la parole, avant et après rééducation. Nous avons présenté les pourcentages de phonèmes corrects (PPC) durant la répétition de syllabes; le PPC dans les mots durant la tâche de répétition de mots; le pourcentage de syllabes lues correctement durant la tâches de lecture; et le pourcentage de paires correctement discriminées durant la tâche de discrimination phonémique. Nous avons également calculé un indice d'évolution (IE) pour chaque tâche et effectué une régression logistique pour chaque tâche afin d'évaluer si l'évolution du patient entre avant et après la rééducation est significative. Les résultats significatifs sont présentés en gras.

		Avant rééducation	Après rééducation	IE	z	p-valeur
Répétition de syllabes	[CV]	57,30%	80,30%	+8	2,95	0,0032
	[VCV]	32,65%	65,67%	+12	4,09	< 0,001
	[V]	34,48%	39,68%	+1	0,59	0,55
Répétition de mots		43,04%	56,27%	+13	3,06	0,0022
Lecture		39,22%	66,67%	+11	2,74	0,0061
Discrimination phonémique		100,00%	100,00%	0		

Lors de la répétition de syllabes : les voyelles sont /i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a, ā, ð, ē/ et les consonnes et semi-consonnes sont /p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, ɲ, l, ʁ, w, j, ɥ/. Les voyelles sont produites de façon isolées [V], consonnes et semi-consonnes en condition [CV] et les consonnes en condition [VCV].

Analyse des erreurs L'analyse des erreurs produites par le patient se base sur : (i) une évaluation des processus phonologiques observés dans les erreurs effectuées lors de la répétition en condition [CV] et [VCV] et (ii) des matrices de confusion permettant de comparer les phonèmes cibles et les phonèmes produits réellement lors de la tâche de répétition de syllabes.

Les processus phonologiques identifiés sont présentés dans le Tableau 4.10. Nous avons effectué une analyse qualitative de ces résultats. Le pourcentage de dévoisement diminue entre avant et après rééducation (de 24,8% à 13,5%), ce qui suggère un meilleur contrôle de la coordination des mouvements laryngés et supra-laryngés. Le pourcentage d'antériorisation des consonnes vélaires diminue également (de 50,0% à 11,1%), suggérant un meilleur contrôle du positionnement antérieur de la langue. Enfin, le pourcentage d'erreurs de nasalisation diminue aussi (de 58,0% à 18,2%), ce qui suggère une meilleure coordination entre les articulateurs de la parole. Cependant, il ne semble pas qu'il y ait de changement entre avant et après la rééducation pour les erreurs de voisement, d'occlusion des fricatives, de postériorisation des coronales et de latéralisation.

Tableau 4.10 – Pourcentages de processus phonologiques identifiés parmi les erreurs effectuées lors de la répétition de consonnes en condition [CV] et [VCV], avant et après rééducation.

	Avant rééducation	Après rééducation
Dévoisement	24,8%	13,5%
Voisement	1,9%	2,3%
Antériorisation des consonnes vélares	50,0%	11,1%
Occlusion des consonnes fricatives	1,6%	2,0%
Postériorisation des consonnes coronales	4,0%	4,1%
Latéralisation	1,5%	0,3%
Erreur de nasalisation	58,0%	18,2%

Les matrices de confusion sont présentées pour les consonnes et semi-consonnes en condition [CV], les consonnes en condition [VCV] et les voyelles, avant et après la rééducation. Les phonèmes cibles sont présentés en ligne et les phonèmes produits en colonne. Chaque cellule de cette matrice contient donc le rapport entre le nombre de fois qu'un phonème est produit sachant le nombre de fois qu'un phonème cible est présenté. Ainsi, une matrice avec des valeurs de 1 sur la diagonale correspondrait au cas théorique où aucune erreur n'est produite (aucune confusion entre les phonèmes cibles et produits). De plus, lorsque la valeur diminue ou que la plus grande valeur ne se situe pas sur la diagonale de la matrice, nous pouvons déduire qu'il y a davantage de confusion entre les phonèmes cibles et produits⁴.

Les matrices de confusion pour les voyelles sont présentées dans la Figure 4.10 et prennent en compte les archiphonèmes /œ, O, E/. Les voyelles /a, i, u/ sont produites correctement avant et après la rééducation. La production de /E/ s'améliore après la rééducation, mais reste imparfaite avec des substitutions par [i] et [a]. Les productions de /y, œ/ semblent se détériorer après la rééducation avec une substitution de /y/ par [i] (lieu d'articulation correct mais arrondissement des lèvres incorrect) et de /œ/ par [O, y] (arrondissement des lèvres correct mais lieu d'articulation incorrect) ou [a, E] (lieu et mode d'articulation incorrects). On observe une légère amélioration après la rééducation pour les voyelles nasales /õ/ et /ẽ/, même si celles-ci ne sont pas encore parfaitement maîtrisées puisqu'elles sont substituées par [O] et [a], respectivement. La voyelle nasale /ã/ n'est pas maîtrisée après la rééducation avec une substitution par [a]. Ces résultats

4. Prenons un exemple hypothétique. Si le phonème cible, demandé trois fois, est /a/ et que le patient produit systématiquement /a/ alors le rapport sera de $\frac{3}{3} = 1$. Cependant, si le phonème cible, demandé trois fois, est /a/ et que le patient produit une fois /o/ et deux fois /a/ alors le rapport sera de $\frac{1}{3} = 0,3$ pour la colonne correspondant à /o/ et $\frac{2}{3} = 0,7$ pour la colonne correspondant à /a/.

4. Une nouvelle méthode de rééducation de la parole

concernant les voyelles nasales suggèrent que, même si le patient contrôle le lieu d'articulation, la nasalisation n'est pas maîtrisée.

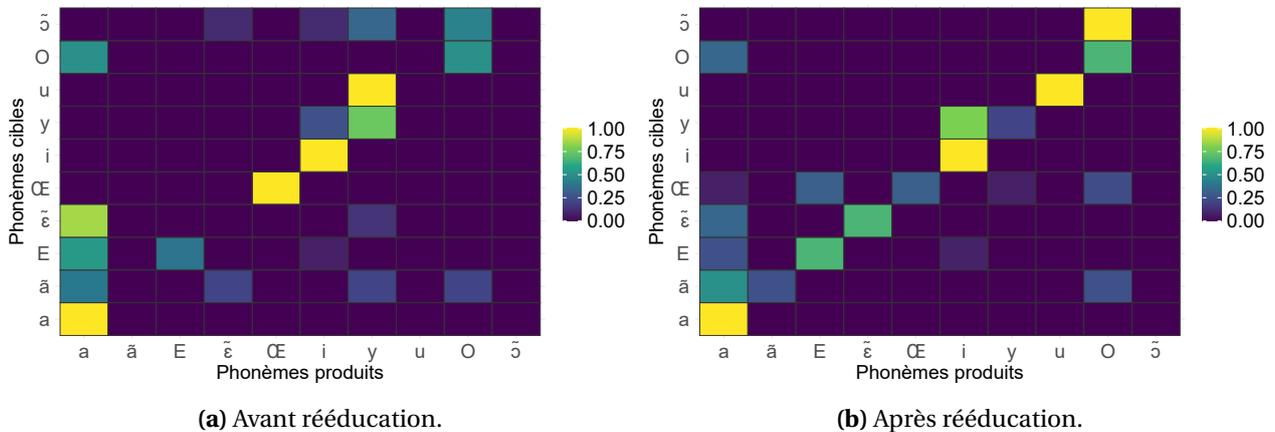


FIGURE 4.10 – Matrices de confusion présentant le phonème cible en fonction du phonème produit pour les voyelles isolées, avant et après rééducation. L'échelle de couleur indique la valeur du rapport entre le nombre de fois qu'un phonème est produit et le nombre de fois qu'un phonème cible est présenté. Les valeurs plus élevées tendent vers le jaune.

Pour les consonnes et semi-consonnes en condition [CV] (Figure 4.11), il y a une confusion entre les occlusives /t, d, k, g/ et entre les fricatives /f, v, s, z/ avant la rééducation. Après la rééducation, le patient produit correctement les phonèmes /t, d, k, s/ et on constate une amélioration pour /g/ qui n'était jamais produit correctement avant rééducation.

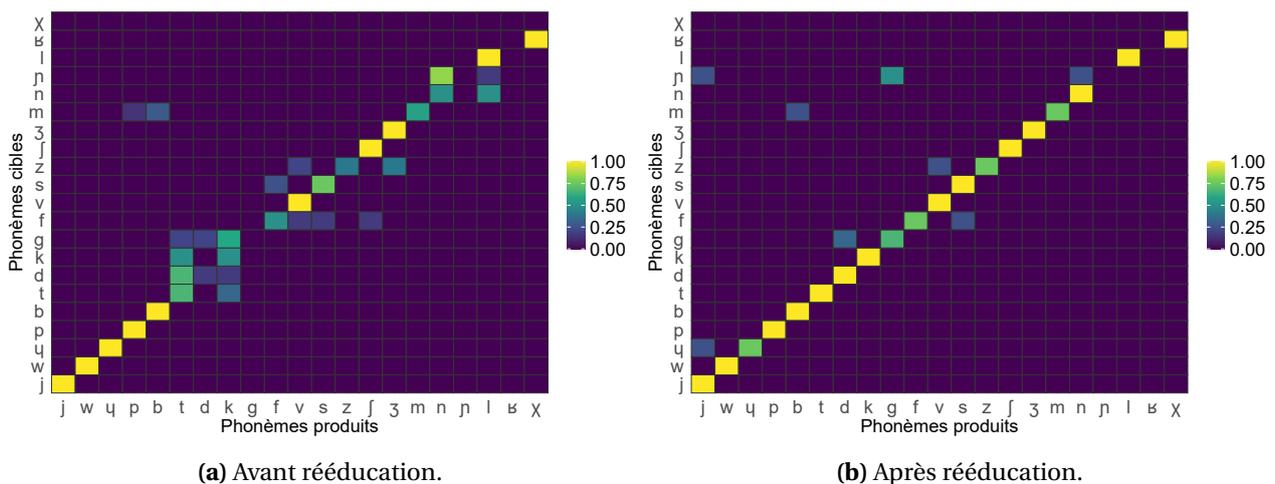


FIGURE 4.11 – Matrices de confusion présentant le phonème cible en fonction du phonème produit pour les consonnes et semi-consonnes en condition [CV], avant et après rééducation. L'échelle de couleur indique la valeur du rapport entre le nombre de fois qu'un phonème est produit et le nombre de fois qu'un phonème cible est présenté. Les valeurs plus élevées tendent vers le jaune.

Après rééducation, la production de /g/ n'est pas parfaitement maîtrisée puisqu'il est substitué par [d], ce qui suggère que le voisement est correct, mais le positionnement de la langue est imparfait (antériorisation de la langue). On constate également une amélioration pour /z/ et /m/ mais le lieu et le mode d'articulation sont encore imparfaitement maîtrisés puisque ces phonèmes sont substitués par [f] et [b], respectivement. Le phonème /n/ est parfaitement maîtrisé après rééducation, tandis qu'on observe une détérioration pour /f/ avec une substitution par [s], suggérant une maîtrise du mode d'articulation, mais pas du lieu d'articulation. Enfin, les semi-consonnes /j, w, ɥ/ sont parfaitement maîtrisées avant rééducation, mais on constate une substitution de /ɥ/ par [j] après la rééducation, ce qui suggère un contrôle imparfait de la dynamique des articulateurs.

Pour les consonnes en condition [VCV] (Figure 4.12), on relève un nombre important de persévérations avant rééducation avec une substitution de /p, b, t, g/ par [k]; /d, k, g, f/ par [t]; et /z, ʒ, m, n, ɲ/ par [v]. Après la rééducation, le patient produit parfaitement /p, b, k, ʃ, z, m, ɲ/ et il améliore sa production pour /t, d, g, v, ʒ, n/, même si le mode et/ou le lieu d'articulation ainsi que le voisement ne sont pas encore parfaitement maîtrisés. Notons que le phonème /ɲ/ est parfaitement maîtrisé après la rééducation alors qu'il n'était pas produit avant la rééducation. Enfin, dans les conditions [CV] et [VCV], il semble que le patient ne parvienne pas à produire le phonème /ʁ/, il le substitue par [χ], ce qui correspond à un lieu d'articulation correct mais un voisement incorrect.

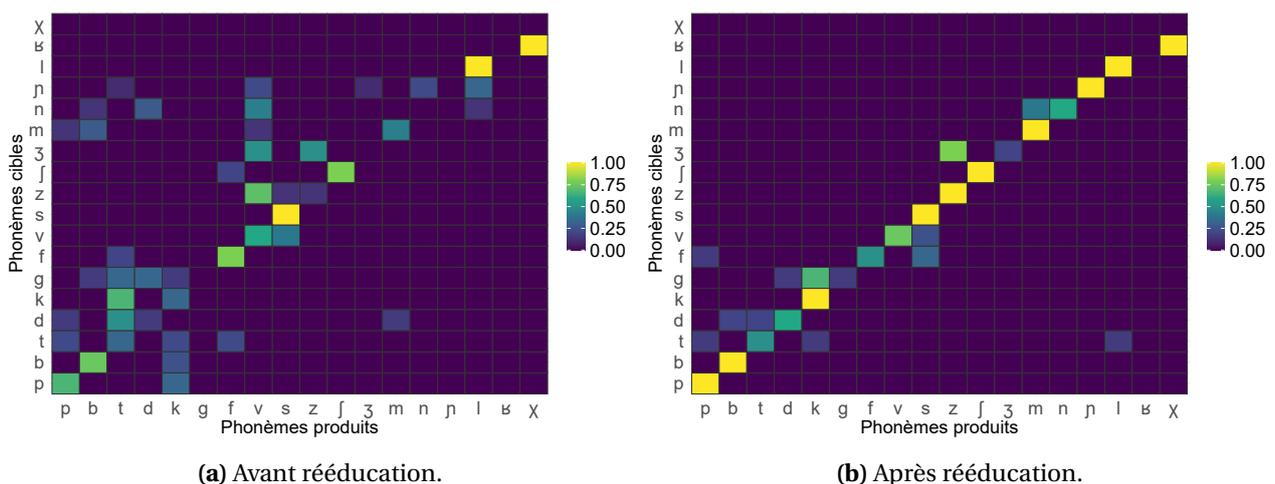


FIGURE 4.12 – Matrices de confusion présentant le phonème cible en fonction du phonème produit pour les consonnes en condition [VCV], avant et après rééducation. L'échelle de couleur indique la valeur du rapport entre le nombre de fois qu'un phonème est produit et le nombre de fois qu'un phonème cible est présenté. Les valeurs plus élevées tendent vers le jaune.

Évaluation acoustique Pour les voyelles orales /i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a/, les consonnes occlusives /p, t, k, b, d, g/ et les fricatives non voisées /f, s, ʃ/ jugées comme correctes ou émergentes, nous avons déterminé les paramètres acoustiques caractérisant ces phonèmes. Pour les voyelles orales, nous avons également mesuré la distance intra-voyelle moyenne. Pour les voyelles, les triangles vocaliques du patient sont présentés dans la Figure 4.13.

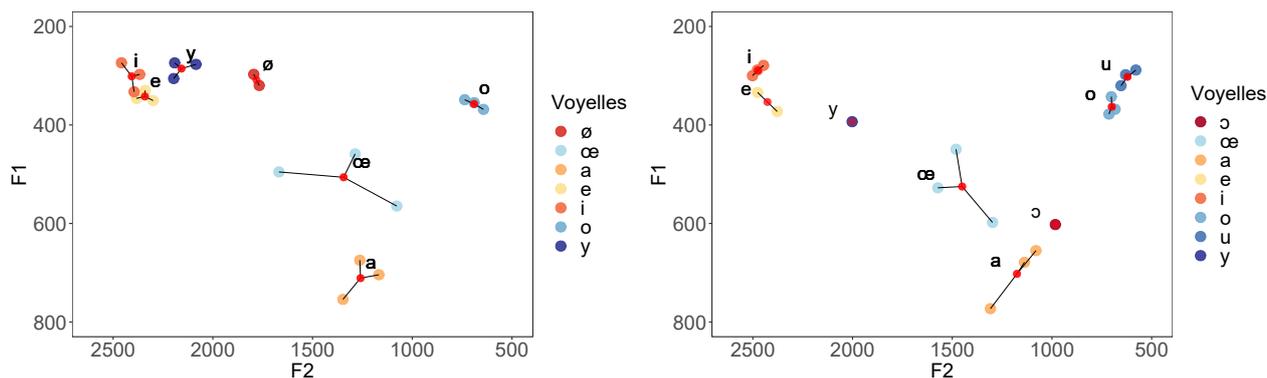


FIGURE 4.13 – Triangles vocaliques représentant F1 en fonction de F2 pour les voyelles orales avant (à gauche) et après (à droite) la rééducation. Les voyelles orales sont /i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a/. Le barycentre (point rouge) est représenté pour chaque voyelle.

Il semble que le patient soit capable de produire certaines voyelles uniquement après la rééducation, mais on observe aussi une détérioration avec une incapacité à produire certaines voyelles après la rééducation alors qu'elles étaient produites avant. En effet, il semble que la voyelle /ø/ soit correctement produite avant la rééducation, mais elle n'est pas produite après et la voyelle /y/ est produite trois fois avant et une fois seulement après la rééducation. La voyelle /ε/ n'est jamais produite, ni avant ni après la rééducation. Enfin, les voyelles /u, ɔ/, quant à elles, sont produites uniquement après la rééducation.

Concernant la distance intra-voyelle (Figure 4.14), celle-ci semble diminuer pour les voyelles /i, œ, o/, ce qui suggère une meilleure reproductibilité entre les répétitions d'une même voyelle. Cependant, cette distance augmente pour d'autres voyelles /e, a/, ce qui suggère une augmentation de la variabilité acoustique entre les productions d'une même voyelle.

Pour les consonnes occlusives, les valeurs de VOT sont présentées dans le Tableau 4.11 pour le patient et l'orthophoniste, avant et après la rééducation. Les valeurs de l'orthophoniste sont issues d'une précédente étude (Haldin et al., 2018). Ces données montrent, chez l'orthophoniste, la distinction typiquement attendue entre les occlusives voisées et non voisées, avec un VOT

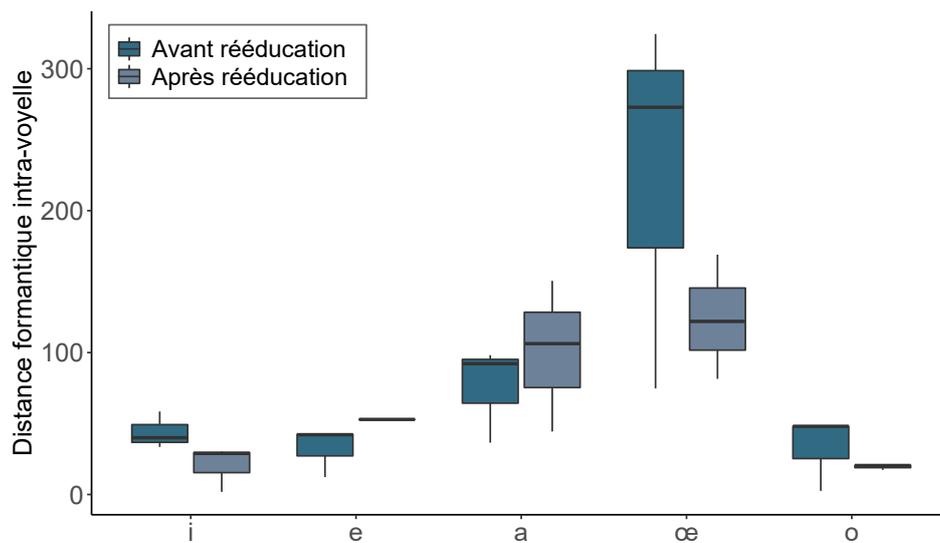


FIGURE 4.14 – Distance intra-voyelle représentée pour chaque voyelle avant et après rééducation. Cette distance est calculée, pour chaque voyelle, comme la distance entre son point de coordonnées (F2, F1) et le barycentre correspondant. Seules les voyelles produites correctement ou émergentes avant et après la rééducation sont représentées dans les graphiques.

négatif pour les voisées ($-118,79$ ms et $-106,36$ ms, lors des deux sessions) et positif pour les non voisées ($27,15$ ms et $26,66$ ms lors des deux sessions). Le patient P3 présente, avant et après la rééducation, un VOT positif pour les occlusives non voisées avec une valeur proche des valeurs standard observées chez l'orthophoniste ($28,77$ ms et $31,64$ ms, avant et après rééducation). Pour les occlusives voisées, le patient présente des valeurs plus négatives que les valeurs standard, avant et après la rééducation ($-314,04$ ms et $-264,48$ ms). Cependant, on observe, après la rééducation, une augmentation du VOT avec des valeurs moins négatives.

Tableau 4.11 – Délai d'établissement du voisement (VOT, en ms) obtenu lors de la répétition des consonnes occlusives pour P3 et l'orthophoniste, avant et après la rééducation. Les données sont représentées pour les occlusives voisées /b, d, g/ et non voisées /p, t, k/. Les données pour l'orthophoniste sont issues de Haldin et al. (2018).

	VOT (ms) pour les consonnes occlusives			
	Voisées		Non voisées	
	Avant rééducation	Après rééducation	Avant rééducation	Après rééducation
Patient P3	$-314,04$ (124,06)	$-264,48$ (69,46)	$28,77$ (20,73)	$31,64$ (23,48)
Orthophoniste	$-118,79$ (34,60)	$-106,36$ (56,66)	$27,15$ (9,07)	$26,66$ (11,81)

Les données sont présentées sous forme de moyenne avec l'écart type associé : $VOT_{moyen}(ecart-type)$.

Enfin, pour les consonnes fricatives, nous avons représenté les CG et ET spectraux dans la

Figure 4.15. Les valeurs du CG ne suivent pas l'ordre typique (alvéolaire > labiodentale > post-alvéolaire), ni avant ni après la rééducation. Cependant, la valeur du CG pour l'alvéolaire est supérieure à celle de la post-alvéolaire, ce qui suggère que le patient distingue bien la fricative alvéolaire /s/ de la post-alvéolaire /ʃ/. Concernant l'ET, les valeurs suivent l'ordre typique (labiodentale > alvéolaire > post-alvéolaire), avant et après la rééducation, ce qui signifie que le patient distingue bien la fricative labiodentale /f/ de l'alvéolaire /s/.

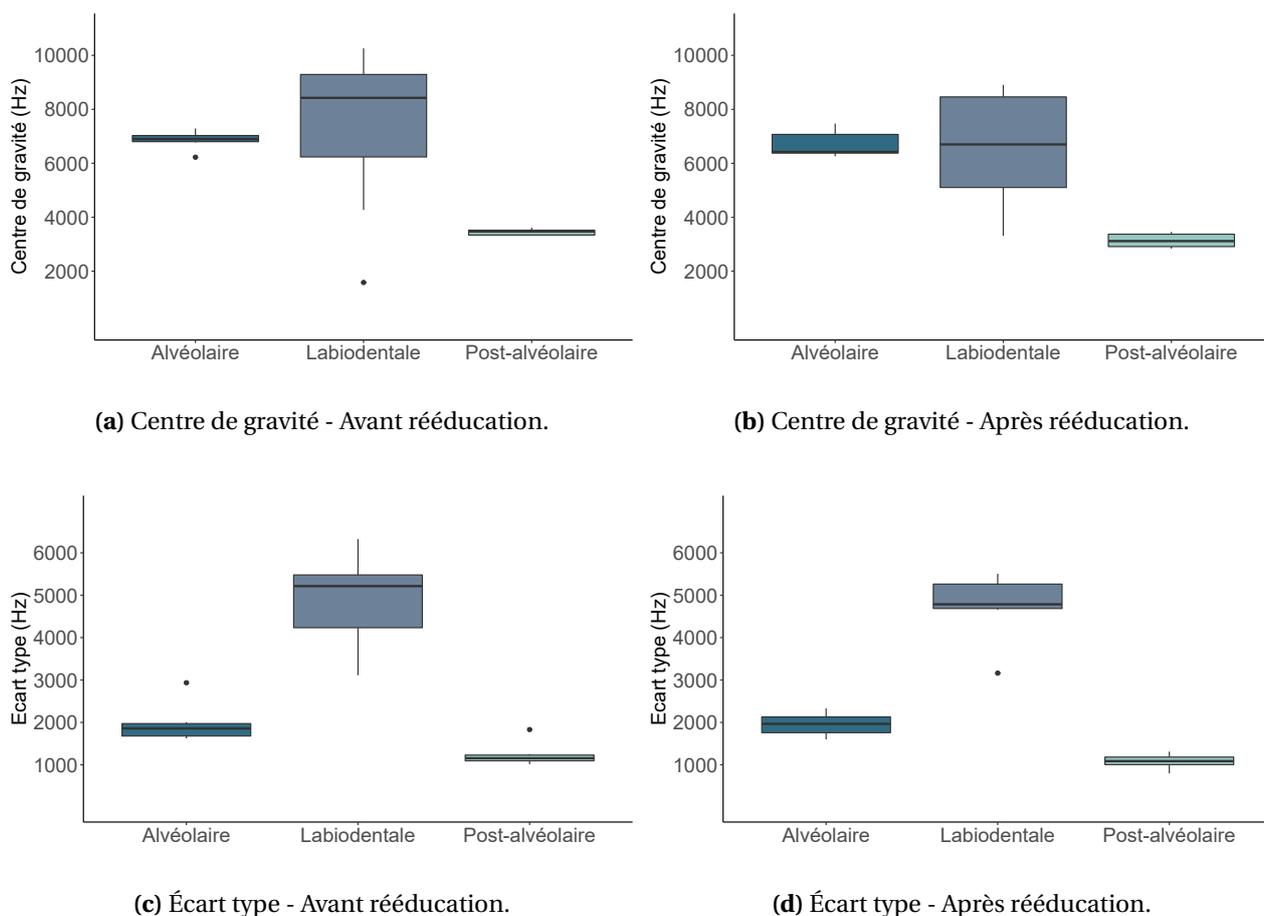


FIGURE 4.15 – Centre de gravité et écart type du patient P3 pour les consonnes fricatives non voisées, avant et après rééducation. Les consonnes sont séparées en trois groupes : alvéolaire /s/, post-alvéolaire /ʃ/ et labiodentale /f/.

2.3 Discussion intermédiaire

Dans cette étude de cas, nous avons évalué l'efficacité de la rééducation à l'aide du logiciel *Ultraspeech-player* chez un patient présentant une aphasie non fluente suite à un AVC ischémique au niveau du territoire superficiel de l'artère cérébrale moyenne gauche. Ce patient présente une

lésion au niveau de l'hémisphère gauche avec une atteinte du GFI, de l'insula, des cortex moteur primaire et prémoteur et partiellement du GTS. Nous avons effectué une évaluation multimodale, avec : (i) une mesure des performances lors de l'évaluation du langage, incluant des pourcentages de productions/réponses correctes, le calcul d'un IE, l'élaboration de matrices de confusion et une analyse des erreurs effectuées; et (ii) une mesure des paramètres acoustiques lors de la tâche de répétition de syllabes. En parallèle, nous avons évalué les compétences cognitives du patient.

Du point de vue du bilan neuropsychologique (Tableau 4.8), le patient ne présente globalement pas de troubles des compétences cognitives mesurées par la CASP (Barnay et al., 2012), sauf pour l'épreuve de dénomination dans laquelle le patient a de faibles performances. Ce trouble en dénomination peut être lié aux troubles arthriques que présente le patient, ce qui induit des difficultés lors de la production des mots de plus de deux syllabes (*e.g.*, « papillon » qui est présenté lors de l'épreuve de dénomination). Le patient présente un trouble des fonctions exécutives avec des performances faibles ou pathologiques lors de la fluence graphique (Ruff et al., 1987), avant et après la rééducation, et lors du TMT-B (Godefroy & GREFEX, 2008) avant la rééducation. Ce trouble pourrait s'expliquer par l'atteinte des compétences motrices que l'on observe chez les patients. En effet, associée à l'aphasie non fluente, on observe également une atteinte motrice (hémiparésie droite). Or, les tâches telles que la fluence graphique ou le TMT nécessitent une réponse motrice et dépendent donc des compétences motrices. Ainsi, les troubles moteurs, en plus des troubles langagiers, affectent négativement les performances mesurées lors de l'évaluation des capacités cognitives (Bonini & Radanovic, 2015 ; B. Lee & Pyun, 2014 ; Murray & Coppens, 2017).

De plus, le patient P3 présente également un déficit en mémoire épisodique visuelle lié à un défaut de consolidation, avant la rééducation. Bonini et Radanovic (2015) ont montré que les patients atteints d'aphasie présentaient des difficultés en mémoire visuelle plus importantes que les patients cérébro-lésés sans aphasie. Ce résultat, également observé dans notre étude, combiné aux bonnes performances du patient en reconnaissance d'images, suggère que l'encodage non verbal est préservé, mais les capacités de récupération des informations visuelles en mémoire sont déficitaires. Une explication possible de ces résultats est l'implication de la réponse verbale lors des tâches non verbales évaluant les performances cognitives ou encore la localisation de la lésion au niveau des régions impliquées dans la récupération en mémoire (Ardila & Rubio-Bruno, 2018 ; Fonseca et al., 2017). Enfin, le patient ne présente pas de trouble de la rotation mentale même si

le temps de traitement augmente. Cependant, ceci peut être mis en lien avec l'aggravation des scores d'anxiété et de dépression qui est associée à un événement survenue dans sa vie personnelle et qu'il a appris durant le bilan neuropsychologique.

Ainsi, l'intégrité des compétences cognitives (mémoire à court-terme verbale et visuo-spatiale, mémoire de travail, fonctions exécutives) est importante puisqu'elles sont associées à la sévérité de l'aphasie, aux fonctions langagières et à la récupération du langage (Dignam et al., 2017 ; Fonseca et al., 2017 ; Seniów et al., 2009). De plus, l'intégrité des capacités de rotation mentale est importante puisque le logiciel *Ultraspeech-player* demande au patient de visualiser les mouvements des articulateurs de la parole (langue et lèvres) chez un locuteur standard, de les reproduire et de corriger ses propres mouvements articulatoires, si nécessaire. L'intégrité de certaines compétences cognitives et des capacités de rotation mentale est donc en faveur de l'utilisation du logiciel *Ultraspeech-player* pour la rééducation du patient P3.

L'évaluation du langage montre une amélioration des compétences lors de la production du langage après la rééducation, tandis que la conscience phonologique (évaluée par la tâche de discrimination phonémique) reste intacte avant et après rééducation (Tableau 4.9). L'amélioration lors de la lecture suggère une amélioration de la conversion graphème-phonème, après la rééducation. Concernant la répétition de syllabes, on n'observe aucune amélioration lors de la production des voyelles isolées (Tableau 4.9), avec une amélioration pour certaines voyelles orales et nasales /O, u, E, ã, ã/ mais une détérioration pour d'autres /y, œ/ (Figure 4.10). Ceci est associé à une modification sur le plan acoustique. En effet, on observe une diminution de la distance intra-voyelle pour /i, œ, o/, suggérant une meilleure reproductibilité entre les productions, mais une augmentation pour /e, a/, suggérant une augmentation de la variabilité (Figure 4.14). En raison de la proximité visuelle au niveau de la configuration des lèvres et de la langue entre les voyelles /œ/ et /ø/ ; /o/ et /ɔ/ ; et /e/ et /ɛ/, elles ne constituent pas une cible privilégiée de la rééducation. Cependant, les consonnes et en particulier les consonnes occlusives /p, t, k, b, d, g/, fricatives /f, s, ʃ, v, z, ʒ/ et la consonne liquide /l/, sont des consonnes privilégiées et ciblées par la rééducation.

Les résultats semblent montrer une amélioration des performances lors de la répétition de syllabes avec une augmentation significative du pourcentage de productions correctes pour les consonnes en condition [CV] et [VCV] (Tableau 4.9) associée à une diminution de la confusion entre les consonnes fricatives et entre les occlusives en condition [CV] et [VCV] et une diminution

des persévérations dans la condition [VCV], après la rééducation (Figures 4.11 et 4.12). Enfin, l'analyse des erreurs (Tableau 4.10) montre une diminution des erreurs de type antériorisation des consonnes vélaires, dévoisement et erreurs de nasalisation, suggérant un meilleur contrôle des articulateurs. Plusieurs études ont également mis en évidence des erreurs de voisement et de nasalisation chez les patients présentant une aphasie de Broca (Blumstein, 2016 ; Kurowski, Blumstein, Palumbo, Waldstein, & Burton, 2007 ; Kurowski et al., 2003). Ces erreurs sont caractérisées par un défaut du contrôle laryngé pour les consonnes fricatives et un défaut dans la synchronisation et la coordination des articulateurs : entre le relâchement de la fermeture supra-glottique et le début de l'excitation glottique, pour les occlusives voisées ; et entre le relâchement de la fermeture dans la cavité orale et l'ouverture du velum, pour les consonnes nasales. Nos résultats sont également en accord avec les résultats Nespoulous et al. (2013) qui ont montré que les patients réalisent plus fréquemment des erreurs de dévoisement que des erreurs de voisement, même si des erreurs de voisement sont présentes (voir aussi Valdois & Nespoulous, 1994). La diminution des erreurs de dévoisement et de nasalisation suggère une amélioration de la synchronisation et de la coordination des articulateurs avec la fermeture de la cavité orale et l'ouverture du velum pour la nasalisation et la coordination entre les articulateurs laryngés et supra-laryngés pour le voisement. Ces améliorations que nous observons au niveau articuloire sont en faveur de l'utilisation de notre stratégie de rééducation (avec le logiciel *Ultraspeech-player*) chez des patients présentant une aphasie de Broca. De plus, les patients atteints d'aphasie présentent également des erreurs au niveau du lieu d'articulation pour les consonnes non voisées, ce qui conduit à des substitutions telles que /t/ au lieu de /k/ (Valdois & Nespoulous, 1994). La visualisation des mouvements cibles (corrects) de la langue peut donc aider le patient à corriger sa propre production. La diminution des erreurs d'antériorisation des consonnes vélaires suggère que notre patient a acquis un meilleur contrôle du positionnement de la langue.

Enfin, pour les analyses acoustiques des consonnes occlusives jugées comme correctes ou émergentes, on observe une production correcte des occlusives non voisées avec des valeurs standard de VOT (Tableau 4.11). Cependant, concernant les occlusives voisées on observe une amélioration avec une diminution du VOT, s'approchant des valeurs standard, même si cette valeur de VOT reste faible, suggérant un long pré-voisement. Ce résultat est en accord avec de précédentes études qui montrent un maintien de la distinction entre le VOT des occlusives voisées

et non voisées (Nespoulous et al., 2013 ; Ryalls, Provost, & Arsenault, 1995). La durée du pré-voisement, plus longue que la valeur standard, peut être associée à une stratégie mise en place par le patient afin d'anticiper et de préparer le voisement avant l'occlusion consonantique, ce qui pourrait faciliter la production des consonnes voisées. Cette mesure de VOT, semble indiquer un effet de la rééducation sur la coordination entre les mouvements laryngés et supra-laryngés, même si on ne retrouve pas la valeur typique.

Concernant les consonnes fricatives, il semble que le patient fasse la distinction entre les consonnes alvéolaire /s/ et post-alvéolaire /ʃ/ (valeurs de CG spectral : alvéolaire > post-alvéolaire) et entre la labiodentale /f/ et l'alvéolaire /s/ (valeurs d'ET spectral : labiodentale > alvéolaire > post-alvéolaire) (Li et al., 2009 ; Nissen & Fox, 2005). Ainsi, il semble que le lieu d'articulation soit mieux maîtrisé après la rééducation.

Ainsi, cette méthode de rééducation présente des avantages en termes d'autonomie. En effet, le patient était autonome lors de la rééducation. Une fois que l'exercice à réaliser durant la séance était sélectionné, le patient pouvait choisir le phonème à produire, qu'il répétait environ 5 fois puis il passait au phonème suivant. Il pouvait également choisir de visualiser les mouvements de la langue ou des lèvres et il pouvait ralentir les mouvements des articulateurs ainsi que le son associé afin de mieux visualiser les mouvements des articulateurs. De plus, l'expérimentatrice était présente lors de la rééducation afin de corriger le patient dans le cas où celui-ci persévérerait dans l'erreur, mais elle intervenait le moins possible, ce qui permettait de favoriser l'autonomie du patient. Cette autonomie lors de la rééducation est un facteur positif en faveur d'une augmentation de la motivation, mais aussi de l'engagement du patient dans la rééducation, ce qui est associé à une meilleure récupération (Kirmess & Maher, 2010). De plus, au moment de l'étude, le patient était relativement jeune, ce qui peut aussi être un facteur contribuant à une meilleure récupération de la parole. Plusieurs études mentionnent le rôle de l'âge dans la récupération, ainsi que la plus forte probabilité de récupération chez les patients plus jeunes (Boden-Albala et al., 2005 ; Ferro & Crespo, 1988 ; Holland, Greenhouse, Fromm, & Swindell, 1989 ; Kiran & Thompson, 2019 ; OGREZeanu, Voinescu, Mihăilescu, & Jipescu, 1994). Cependant, les résultats semblent contradictoires et des études n'ont pas montré d'influence de l'âge dans la récupération (pour une revue, voir Ellis & Urban, 2016). De plus, l'ajout d'une technique de rééducation basée sur l'illustration visuelle, en complément de la rééducation orthophonique classique, augmente la durée totale de la rééducation

(rééducation intensive), ce qui peut également contribuer à améliorer les capacités de production de la parole après la rééducation.

Ainsi, les résultats mis en évidence dans cette étude suggèrent une efficacité de la méthode de rééducation, avec une amélioration du contrôle, du positionnement et de la coordination des articulateurs (langue, velum, lèvres, etc.), notamment pour les consonnes occlusives et fricatives. Ceci est mis en évidence par l'amélioration des performances et la diminution des erreurs et par l'analyse acoustique. Ainsi, on observe une amélioration du positionnement de la langue, du contrôle du voisement pour les consonnes en condition [CV] et [VCV]. De plus, un élément important à souligner est l'efficacité de la méthode sur les consonnes en condition [VCV]. En effet, les séquences de type voyelle-consonne-voyelle ont été travaillées uniquement lors de la rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player* et non lors de la rééducation orthophonique classique. Ainsi, l'amélioration des performances lors de la répétition de consonnes en condition [VCV] est en faveur de l'efficacité de la rééducation augmentée. Toutefois, nous n'observons aucune amélioration pour les voyelles, ce qui indique un contrôle encore imparfait des articulateurs.

Certaines limites peuvent être soulevées dans cette étude : (i) c'est une étude de cas et nous prévoyons donc d'évaluer l'efficacité de la méthode sur un plus grand groupe de patients; (ii) nous utilisons les mêmes tâches avant et après la rééducation, ce qui pourrait induire un effet test-retest ou un effet d'apprentissage; (iii) le patient utilise la rééducation orthophonique classique en combinaison avec la nouvelle méthode de rééducation et il pourrait être intéressant de prévoir une étude dans laquelle nous pourrions distinguer l'efficacité de la rééducation augmentée de l'efficacité de la rééducation orthophonique classique. Cependant, le logiciel *Ultraspeech-player* cible les phonèmes pour lesquels la configuration sagittale de la langue ou la vue frontale des lèvres est bien visible, ce qui n'est pas le cas des voyelles. En effet, la configuration linguale sagittale associée aux voyelles du français diffère essentiellement en termes d'aperture (de fermées à mi-ouvertes /i, e, ε/ ou /u, o, ɔ/ ou /ø, œ/), ce qui n'est pas visible sur l'image échographique. Dans notre étude, l'amélioration plus importante du patient lors de la répétition des consonnes est principalement due à l'utilisation du logiciel *Ultraspeech-player*, plutôt qu'à l'orthophonie classique dont il a également bénéficié.

Résumé 4.2 : Tableau récapitulatif - Étude de cas, patient P3

Patient	Localisation de la lésion	Comparaison avant/après rééducation		
		Bilan neuropsychologique	Performances et erreurs	Analyse acoustique
P3	GFI, insula, cortex moteur primaire et prémoteur et GTS partiellement	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Flexibilité et vitesse de traitement (TMT) ▶ Troubles de la planification et du <i>monitoring</i> (fluence graphique) ▶ Compétences cognitives globales, mémoire de travail, mémoire à court-terme visuo-spatiale intactes ▼ Score d'anxiété et dépression 	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Lecture et répétition de mots ▲ Répétition de consonnes en condition [CV] et [VCV] ▲ Contrôle du voisement et du mode/lieu d'articulation ▶ Distinction entre les consonnes occlusives voisées et non voisées 	<ul style="list-style-type: none"> ▲ VOT se rapproche des valeurs normales pour les occlusives voisées ▶ Caractéristiques acoustiques des voyelles ▶ Distinction entre les consonnes fricatives et entre les consonnes occlusives

3 Conclusion

Dans ces deux études de cas, nous avons évalué la « faisabilité » de l'utilisation d'une nouvelle méthode de rééducation augmentée (le logiciel *Ultraspeech-player*), mais également l'efficacité de cette rééducation chez des patients présentant une aphasie non fluente suite à un AVC. Ces études nous ont permis de définir une série de critères pour l'application et l'évaluation de la méthode et de faire différentes améliorations afin de proposer un nouveau protocole expérimental, que nous présenterons dans le Chapitre 5.

Premièrement, il semble que cette méthode s'applique de préférence aux patients présentant une aphasie non fluente avec une atteinte des régions frontales, mais des régions temporo-pariétales préservées. En effet, nous l'avons mentionné dans la première étude de cas (Section 1), l'intégrité des régions temporales et pariétales est importante pour permettre l'intégration multisensorielle qui est ciblée dans le cadre de cette rééducation. Lors de la rééducation les patients reçoivent des informations visuelles (vidéos des mouvements de la langue et des lèvres), auditives (sons pré-enregistrés dans le logiciel et retour auditif de leurs productions), somesthésiques et proprioceptives (ressenti de leurs propres mouvements articulatoires). Ils doivent ensuite intégrer ces différentes informations et c'est cette intégration vision-proprioception-audition-articulation qui implique le cortex pariétal (Culham et al., 2006 ; Ishida et al., 2010). En effet, le cortex pariétal est impliqué dans la représentation corporelle et il reçoit les informations multisensorielles qui sont intégrées et permettent de générer un signal qui est transmis aux cortex moteur et pré-moteur.

Deuxièmement, nous avons montré l'intérêt d'effectuer une évaluation du langage avec une mesure des performances comprenant une évaluation des pourcentages de réponses/phonèmes corrects et une analyse des erreurs (matrices de confusion et étude des processus phonologiques identifiés dans les erreurs). En effet, dans la seconde étude de cas (Section 2), nous avons montré l'amélioration des performances du patient et nous avons aussi pu décrire les différentes tentatives du patient pour produire le phonème cible (avec les matrices de confusion) et évaluer les types de processus phonologiques identifiés parmi les erreurs (analyse des erreurs). Ceci permet une description détaillée des compétences articulatoires du patient. De plus, nous avons pu effectuer une analyse statistique de ces résultats, il ne s'agit plus seulement d'évaluation qualitative.

Troisièmement, ces études de cas sont intéressantes puisqu'elles permettent de réaliser une comparaison des productions intra-sujet. Or, ce type de comparaison est essentiel pour identifier les déficits sous-jacents et les stratégies mises en place après une période de rééducation (Nespoulous et al., 2013).

Malgré les différents développements et améliorations réalisés avec ces études de cas, il existe certaines limitations :

1. L'absence de comparaison entre l'efficacité de la rééducation augmentée (*via* le logiciel *Ultraspeech-player*) et de la rééducation orthophonique classique.
2. Il s'agit d'études de cas. Une étude en groupe permettrait de généraliser l'efficacité de la nouvelle méthode de rééducation.
3. Le manque d'un groupe contrôle d'âge équivalent pour les mesures acoustiques et cérébrales.

CHAPITRE 5

Un nouveau protocole expérimental pour la rééducation de la parole dans l'aphasie non fluente post-AVC

Table des Matières

1	Protocole SEMO	161
1.1	Critères d'inclusion	163
1.2	Évaluation multimodale	164
1.2.1	Évaluation du langage et de la parole	164
1.2.2	Évaluation neuropsychologique	165
1.2.3	Évaluation cérébrale : neuroimagerie	166
1.3	Résultats attendus	166
2	Étude préliminaire	168
2.1	Méthode	169
2.1.1	Participants	169
2.1.2	Rééducation	171
2.1.3	Évaluation neuropsychologique	172
2.1.4	Évaluation du langage et de la parole	172
2.1.5	IRM fonctionnelle	173
2.1.6	Analyse des données de langage et de parole	175
2.1.7	Analyse des données d'IRMf de tâche	180
2.2	Résultats	181
2.2.1	Évaluation neuropsychologique	181
2.2.2	Évaluation du langage et de la parole	182
2.2.3	IRMf de tâche	193
2.3	Discussion	197

Dans le Chapitre 4, nous avons évalué l'efficacité d'un programme de rééducation renforcée à l'aide du logiciel *Ultraspeech-player* pour la rééducation de la parole dans l'aphasie non fluente post-AVC. Nous avons mis en avant une efficacité de ce logiciel, avec une amélioration des performances de langage (augmentation du pourcentage de productions correctes et diminution des erreurs) et un meilleur positionnement des articulateurs de la parole (principalement pour les consonnes occlusives et fricatives). Nous avons également souligné le rôle des régions temporo-pariétales dans l'intégration entre les différentes modalités (auditive, visuelle et somesthésique), ce qui nous permet d'envisager l'utilisation du logiciel *Ultraspeech-player* plutôt chez les patients présentant une lésion frontale, mais des régions temporo-pariétales relativement préservées. Par ailleurs, nous avons montré l'intérêt d'une évaluation multimodale avec une analyse approfondie de la production de parole à travers l'analyse des erreurs et des matrices de confusion.

Ainsi, le logiciel *Ultraspeech-player* semble être un outil prometteur pour la rééducation de la parole chez les patients atteints d'aphasie non fluente. Cependant, nous avons aussi noté quelques limites dans les études de cas réalisées précédemment (cf. Section 3 du Chapitre 4) et nous souhaitons les corriger en proposant un nouveau protocole expérimental, intitulé SEMO¹.

Premièrement, dans les études de cas présentées dans le chapitre précédent, nous avons évalué uniquement l'efficacité d'une rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player* en complément de la rééducation orthophonique classique (*i.e.*, la « rééducation renforcée »). Une comparaison de la rééducation renforcée et de la rééducation classique seule nous permettra de déterminer les bénéfices de la rééducation renforcée par rapport à la rééducation classique et donc de déterminer l'impact de la rééducation augmentée visuellement (fondée sur l'utilisation du logiciel *Ultraspeech-player*).

Deuxièmement, nous avons réalisé des études de cas et, malgré leur intérêt évident (voir Nespoulous et al., 2013), l'évaluation de l'efficacité de la rééducation renforcée sur un groupe de patients permettra la généralisation de nos conclusions².

Enfin, troisièmement, nous souhaitons évaluer l'effet de la rééducation sur différents paramètres acoustiques ou au niveau cérébral, mais nous souhaitons également évaluer les conséquences de

1. Le nom du protocole SEMO fait référence au principe de l'interaction **SE**nsori**MO**trice sur lequel repose le logiciel *Ultraspeech-player*. Notons que nous faisons référence à ce protocole en tant que « nouveau protocole expérimental », dans le sens où nous proposons un nouveau protocole pour la recherche impliquant la rééducation classique (orthophonie) et un programme de rééducation renforcée (rééducation augmentée en complément de la rééducation orthophonique).

2. Dans cette thèse, nous parlons de généralisation pour différencier l'évaluation de la méthode faite au niveau d'un seul patient (étude de cas) par rapport à un groupe de patients.

l'aphasie sur ces différentes mesures. Pour cela, la présence d'un groupe contrôle de participants sains d'âge équivalent nous apportera les valeurs ou mesures standard qui pourront ensuite être comparées à celles des patients.

Ce chapitre sera composé de deux parties. Dans une première partie, nous présenterons le nouveau protocole expérimental (SEMO) que nous avons élaboré. Ce protocole permet d'évaluer, de façon multimodale (évaluation du langage, cognitive et cérébrale), l'efficacité de la rééducation renforcée, par rapport à la rééducation orthophonique classique seule, en intégrant un groupe contrôle pour avoir des valeurs standard aux niveaux langagier et cérébral. Dans une seconde partie, nous présenterons des résultats préliminaires obtenus suite à la mise en place récente de ce protocole. Plus spécifiquement, nous présenterons les données obtenues chez un patient et un groupe de participants sains. Notons qu'en raison des contraintes liées à la pandémie de Covid-19, entraînant une faible disponibilité des patients et limitant la possibilité des expérimentations, nous avons adapté le protocole afin que la rééducation augmentée avec le logiciel soit réalisée à domicile et que les évaluations (langagière, cognitive et cérébrale) soient réalisées sur une seule journée.

1 Protocole SEMO

Dans le protocole SEMO (Figure 5.1), nous proposons de réaliser une évaluation multimodale d'un programme de rééducation renforcée, fondé sur l'utilisation d'une méthode de rééducation augmentée visuellement (*via* le logiciel *Ultraspeech-player*) en complément de la rééducation orthophonique classique, en comparaison à la rééducation orthophonique classique seule (pour une représentation détaillée du protocole voir Figure D.1, Annexe D). Pour cela, nous proposons une étude comprenant 36 patients atteints d'aphasie et 36 participants sains. Les patients suivront deux types de rééducation : (i) une rééducation renforcée comprenant la rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player* en complément de la rééducation orthophonique classique et (ii) une rééducation simple comprenant la rééducation orthophonique classique uniquement. L'étude sera réalisée dans un *design* de type *cross-over*³. Les 36 patients seront répartis en deux groupes : un groupe suivant la rééducation simple puis la rééducation renforcée (Groupe-SR) et un groupe

3. Dans une étude de type *cross-over*, différents traitements sont appliqués aux mêmes personnes, mais dans des séquences différentes. Dans le plan le plus classique, un groupe de participants reçoit un traitement A suivi d'un traitement B, tandis qu'un second groupe reçoit un traitement B suivi d'un traitement A (American Psychological Association, 2022b).

suivant la rééducation renforcée puis la rééducation simple (Groupe-RS). Chaque rééducation aura une durée de 4 semaines.

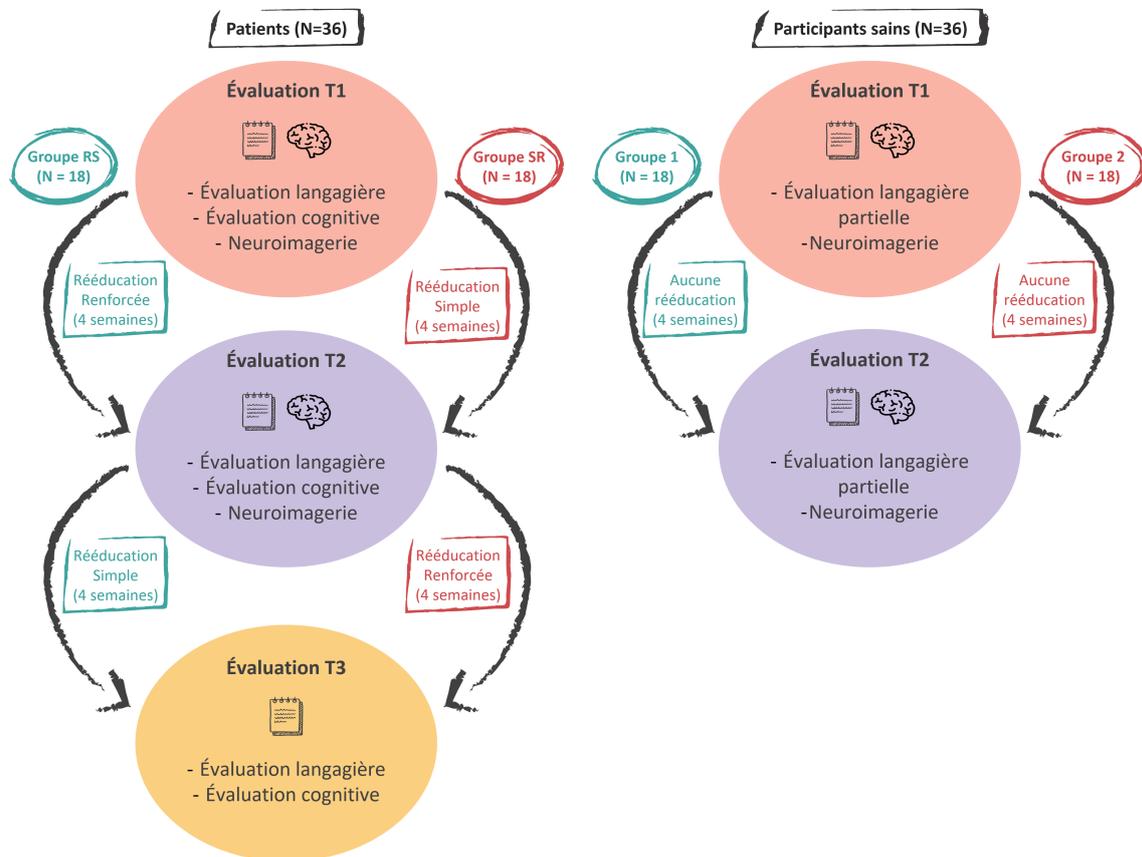


FIGURE 5.1 – Représentation du déroulement du protocole SEMO.

Afin d'évaluer l'effet de la rééducation, nous effectuerons une évaluation multimodale avant et après chaque rééducation (renforcée ou simple), comprenant : une évaluation du langage (bilan orthophonique, évaluation de la parole intérieure et bilan acoustique); une évaluation des compétences cognitives (bilan neuropsychologique); une évaluation au niveau cérébral à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) de tâche et de repos, et de l'IRM de diffusion (« *Diffusion Tensor Imaging* », DTI). Nous effectuerons donc trois évaluations : une première évaluation (T1) avant toute rééducation; une deuxième évaluation (T2) après la première rééducation; et une troisième évaluation (T3) après la seconde rééducation.

En parallèle, nous incluons des participants sains afin d'obtenir les valeurs standard des paramètres acoustiques ainsi que des normes pour la parole intérieure et pour la neuroimagerie. Ces participants sains seront appariés en nombre avec les patients et nous nous assurerons qu'il

n'y a pas de différence significative entre les groupes de patients et de participants sains au niveau de l'âge, du sexe et de la préférence manuelle. Ils seront évalués deux fois (T1 et T2) à 4 semaines d'intervalle. Il s'agit d'un groupe de participants sains contrôles, ils ne suivront donc aucune rééducation pendant ces 4 semaines.

Ainsi, ce protocole présente plusieurs avantages. D'une part, l'étude en *cross-over* (ou plan croisé) nous permet d'intégrer deux groupes de patients qui suivent deux types de rééducation (simple et renforcée ou renforcée et simple), ce qui permet de généraliser l'efficacité de la rééducation à l'échelle d'un groupe et de comparer la rééducation renforcée à la rééducation simple. De plus, l'utilisation d'un plan croisé permet de contrôler l'effet d'ordre en comparant les deux groupes (Groupe-SR et Groupe-RS) et d'effectuer une comparaison intra-sujet. En effet, les mesures pour chaque participant permettront de faire une comparaison directe entre les deux méthodes de rééducation. Ainsi, l'utilisation d'un plan croisé permet de limiter : l'influence des facteurs de confusion puisque chaque patient de l'étude sert également de « contrôle » ; et le déséquilibre entre les groupes en lien avec certaines covariables (Jones & Kenward, 1989). D'autre part, l'intégration des participants contrôle nous permet d'avoir des valeurs standard pour les différentes données de parole et de neuroimagerie.

1.1 Critères d'inclusion

Les critères d'inclusion communs aux patients et aux participants sains sont : l'âge entre 55 et 75 ans⁴, une vision normale ou corrigée, le français comme langue maternelle, droitiers ou gauchers et hommes ou femmes.

Les patients inclus présenteront une aphasie non fluente suite à un AVC mono-hémisphérique gauche⁵. Les critères de non-inclusion pour les patients et les participants sains sont : la présence de contre-indications pour l'utilisation de l'IRM et l'existence d'une affection sévère sur le plan général (cardiaque, respiratoire, hématologique, rénale, hépatique, cancéreuse). Pour les patients,

4. Ce choix du critère d'âge est justifié par le fait que plus de deux tiers des AVC surviennent après 65 ans (Ellis & Urban, 2016) et que l'aphasie post-AVC est plus susceptible de survenir chez des participants âgés de 55 à 70 ans (Azhar, Maqbool, Butt, Iftikhar, & Iftikhar, 2017). De plus, en France, l'âge moyen de survenue d'un AVC est de 74 ans, mais 25% des patients ont moins de 65 ans (Inserm, 2019).

5. Notons que dans ce critère d'inclusion, nous n'avons pas spécifié de localisation précise de la lésion afin de ne pas nous restreindre dans les patients inclus. De plus, nous ne nous focalisons pas exclusivement sur l'étendu et la localisation de la lésion, mais nous prenons en compte également le tableau clinique. En effet, nous nous intéressons spécifiquement aux patients présentant des troubles expressifs (aphasie non fluente).

les critères de non-inclusion comprennent également la présence de troubles de la compréhension, de négligence spatiale unilatérale, ou d'une apraxie des membres supérieurs. Ainsi, avant l'inclusion des patients, nous vérifierons l'absence de troubles de la compréhension (compréhension orale et écrite du BDAE; Goodglass & Kaplan, 1983), de négligence spatiale (test des cloches et bissection de lignes; GEREN, 2002) ou d'apraxie des membres supérieurs (au moins un membre sans apraxie, *Apraxia Screen of Tulia*; Vanbellingen et al., 2011).

1.2 Évaluation multimodale

Afin d'évaluer et de comparer l'efficacité de chaque méthode de rééducation, nous proposons une évaluation multimodale, comprenant des mesures langagières (*i.e.*, bilan orthophonique, évaluation de la parole à voix haute et de la parole intérieure), cognitives (*i.e.*, bilan neuropsychologique) et cérébrales (*i.e.*, IRMf de tâche, de repos et IRM de diffusion). Le détail de ces mesures est présenté ci-dessous.

1.2.1 Évaluation du langage et de la parole

L'évaluation du langage et de la parole comprend un bilan orthophonique, une évaluation de la parole à voix haute et de la parole intérieure. Cette évaluation sera réalisée à T1, T2 et T3 pour le patient et seules les évaluations de la parole intérieure et de la parole à voix haute seront réalisées chez les participants sains (à T1 et T2).

Bilan orthophonique La première évaluation (T1) comprend une évaluation du langage complète (bilan orthophonique long) avec une évaluation : des capacités de production orale et écrite (expression orale et écrite du BDAE; Goodglass & Kaplan, 1983); de l'accès au lexique phonologique de sortie, l'encodage phonétique et la mémoire de travail (répétition de mots et phrases du BDAE; Goodglass & Kaplan, 1983); de la dénomination de lettres écrites (lecture de mots et phrases du BDAE; Goodglass & Kaplan, 1983); des praxies bucco-linguo-faciales (Nespoulous et al., 1992); de l'accès au lexique phonologique d'entrée (jugement de rimes; Baudo & Vernisse, 2001); de la conscience phonologique (discrimination phonémique de la BALE; Jacquier-Roux et al., 2010); et de la disponibilité lexicale en lien avec les fonctions exécutives (fluence verbale alphabétique et catégorielle; Cardebat et al., 1990). Lors des deuxième et troisième évaluations (T2, T3), un bilan orthophonique court sera proposé. Ce bilan comprend uniquement : la dénomination orale

d'images (comprise dans le BDAE; Goodglass & Kaplan, 1983); la répétition et lecture de mots; la fluence verbale; la discrimination phonémique et le jugement de rimes.

Évaluation de la parole à voix haute L'évaluation de la parole à voix haute sera réalisée à l'aide d'une tâche de répétition de syllabes, comprenant les voyelles isolées, les consonnes et semi-consonnes accompagnées de voyelles⁶. Les consonnes sont situées en position initiale [CV] ou médiane [VCV] et les semi-consonnes en position initiale uniquement. Cette tâche permettra d'évaluer les capacités de production orale et de mesurer les caractéristiques acoustiques des patients et des participants sains.

Évaluation de la parole intérieure Afin d'évaluer le fonctionnement de la parole intérieure (*i.e.*, l'évaluation des représentations phonologiques), une mesure objective et subjective sera effectuée chez les patients et les participants sains. La mesure objective se base sur une épreuve de jugement d'homophones⁷, tandis que la mesure subjective est réalisée à l'aide d'un questionnaire⁸.

1.2.2 Évaluation neuropsychologique

Le bilan neuropsychologique sera réalisé chez les patients uniquement, à T1, T2 et T3. Lors de l'évaluation à T1, une mesure de la familiarité avec les outils numérique est réalisée à l'aide d'un test élaboré par les neuropsychologues. Ce test permet d'évaluer : l'utilisation des outils numériques (de jamais à la plupart du temps), la fréquence d'utilisation (de plusieurs fois par mois à plusieurs fois par heure) et le type d'activités (internet, recherche, mails, jeux, etc.).

Lors des trois évaluations, une mesure globale des fonctions cognitives sera effectuée, *i.e.*, les capacités de communication, de construction et visuo-construction, les fonctions exécutives, la mémoire à court terme, les praxies et l'orientation dans le temps (CASP; Barnay et al., 2012). Ce bilan comprendra également une évaluation des fonctions exécutives (*i.e.*, flexibilité, mémoire de travail, planification et inhibition avec l'empan visuo-spatial, la fluence graphique et le *Trail Making*

6. Les voyelles sont /a, œ, ø, e, ε, o, ɔ, y, u, î, ê, ã, õ/, les consonnes /p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, l, ɲ, ʁ/ et les semi-consonnes /j, w, ɥ/.

7. Dans la tâche de jugement d'homophones, le participant voit une image en haut de l'écran d'ordinateur et trois images en bas. Lors de l'épreuve, il est demandé au participant de sélectionner l'image du bas correspondant au mot qui se prononce de la même façon que celui associé à l'image du haut. Par exemple, l'image du haut représente un « coq » et les trois images du bas représentent un « code », une « coque » et un « lapin ». Le participant devra alors choisir l'image de la « coque ».

8. Ce questionnaire en ligne, réalisé avec LimeSurvey (LimeSurvey GmbH, 2012), permet d'identifier la composition de la parole intérieure des participants, lorsqu'elle est présente.

Test; Godefroy & GREFEX, 2008 ; Ruff et al., 1987 ; Wechsler, 2012), des capacités de mémorisation (BEM84; Signoret, 1991), des capacités de rotation mentale (Albaret & Aubert, 1996 ; Vandenberg & Kuse, 1978) et de l'anxiété et de la dépression (HAD; Zigmond & Snaith, 1983).

1.2.3 Évaluation cérébrale : neuroimagerie

Lors des deux premières évaluations (T1 et T2), les patients et les participants sains réaliseront une IRM fonctionnelle de tâche et de repos, ainsi qu'une évaluation de la connectivité structurelle avec l'IRM de diffusion.

Lors de l'IRMf de tâche, trois tâches seront réalisées : répétition de syllabes, détection de rimes et dénomination d'images. Pour la répétition, les participants devront répéter à voix haute des syllabes entendues à l'aide d'un casque. Lors de la détection de rimes, les participants verront deux images et ils devront juger si les mots associés riment ou non. Enfin, lors de la dénomination, les participants devront dénommer, dans leur tête, des images qui leur seront présentées. Le déroulement de ces différentes tâches sera présenté en détail dans la Section 2.1.5 de ce chapitre.

Lors de l'IRMf de repos, les participants devront rester allongés, les yeux ouverts et simplement regarder une croix de fixation (*i.e.*, sans réaliser de tâche particulière). Enfin, lors de l'IRM de diffusion, les participants ne seront impliqués dans la réalisation d'aucune tâche spécifique.

1.3 Résultats attendus

Sur le plan langagier, l'évaluation de la parole à voix haute nous permettra de mesurer les performances, les erreurs et les caractéristiques acoustiques des productions des patients. Ceci permettra de déterminer les modifications du contrôle des articulateurs de la parole, après la rééducation. De plus, les résultats du bilan orthophonique et de l'évaluation de la parole intérieure permettront de mieux décrire les troubles observés chez le patient et d'évaluer la capacité de généralisation de l'effet de la rééducation à d'autres tâches de langage. L'intégration de données chez des participants sains pour les mesures acoustiques et l'évaluation de la parole intérieure fournira un point de comparaison pour les patients et permettra d'enrichir la littérature dans le domaine du vieillissement. Ainsi, nous supposons que l'amélioration des performances sera supérieure lors de la rééducation renforcée et les paramètres acoustiques mesurés devraient se rapprocher des valeurs standard mesurées chez les participants sains, en particulier après la rééducation renforcée.

En effet, nous supposons que la visualisation des articulateurs de la parole, habituellement non visibles, permettra au patient de compléter ses représentations auditives et somatosensorielles afin de construire des objectifs phonologiques plus complets, ce qui sera associé à une amélioration de la planification et la programmation motrices et à un renforcement du *monitoring* interne lors de la production de parole. Ceci se traduira par une augmentation des productions correctes, une diminution des erreurs et un rapprochement des paramètres acoustiques vers les valeurs normales obtenues chez les participants sains, spécifiquement pour les phonèmes ciblés par le logiciel (*i.e.*, les phonèmes pour lesquels les articulateurs sont visibles sans ambiguïté, tels que les occlusives /p, t, k, b, d, g/, les fricatives /f, s, ʃ, v, z, ʒ/ et la liquide /l/). Une attention particulière pourra être portée sur les consonnes en condition [VCV], qui est généralement une condition travaillée avec le logiciel et non lors de la rééducation orthophonique classique.

Sur le plan cognitif, le bilan neuropsychologique nous permettra d'évaluer le fonctionnement cognitif du patient. Ces résultats pourront être directement mis en lien avec les performances sur le plan langagier chez les patients atteints d'aphasie, étant donné la forte interaction entre ces domaines (Herbet & Duffau, 2020 ; Roger, Rodrigues De Almeida, et al., 2022). Nous supposons, que le maintien du fonctionnement exécutif sera associé à une meilleure efficacité de la rééducation, comme cela a été montré précédemment (Gilmore et al., 2019 ; Olsson et al., 2019 ; Simic et al., 2020). Par ailleurs, nous pourrions évaluer, plus généralement, le lien entre les troubles de la parole et les fonctions cognitives, chez des patients atteints d'aphasie.

Sur le plan cérébral, nous pourrions évaluer la réorganisation des réseaux du langage et de la parole induite par la rééducation, lors de la réalisation des tâches de langage. De plus, nous pourrions évaluer les modifications en termes de connectivités fonctionnelle et structurelle chez les patients, après la rééducation. La présence de données dans un groupe de participants sains nous permettra d'identifier les réseaux cérébraux impliqués dans la réalisation des tâches de langage et plus largement la connectivité fonctionnelle et structurelle des réseaux cérébraux. Ceci fournira un point de comparaison pour les patients et permettra d'enrichir la littérature dans le domaine du vieillissement. Comme mentionné précédemment, nous supposons que l'utilisation du logiciel *Ultraspeech-player* permettra de construire des objectifs phonologiques plus complets, ce qui devrait se traduire au niveau cérébral par un recrutement supplémentaire des réseaux impliqués dans la planification et la programmation motrices (*i.e.*, le GFI, l'insula, le cortex prémoteur ventral

gauche, l'AMS et M1) et le *monitoring* des erreurs (*i.e.*, le LPI associé à la comparaison avec la prédiction sensorielle) (voir Grandchamp et al., 2019 ; Løevenbruck, 2019). Nous supposons, plus largement, que cette rééducation renforcée permettra une réactivation des régions impliquées dans l'interaction sensorimotrice associée à la production de parole (cf. Hickok, 2012a). De même, la rééducation permettra un renforcement de la connectivité fonctionnelle entre ces régions (*e.g.*, renforcement de la connectivité entre les régions antérieures et postérieures nécessaire au mécanisme de copie d'efférence; Grandchamp et al., 2019 ; Johnson, Yourganov, et al., 2022). Enfin, nous supposons qu'une modification de la connectivité structurelle au sein de certains faisceaux de substance blanche impliqués dans le langage et la parole sera induite par la rééducation, associée à la récupération (*e.g.*, la normalisation de la fraction d'anisotropie ou l'augmentation du volume du faisceau arqué; Schlaug, Marchina, & Norton, 2009 ; van Hees et al., 2014). En résumé, on s'attend à retrouver un renforcement spécifiquement au niveau de certains réseaux associés à la rééducation renforcée et un renforcement plus important en comparaison à la rééducation classique.

2 Étude préliminaire

Le projet SEMO décrit dans la section précédente permet donc d'évaluer de façon multimodale l'efficacité de la rééducation renforcée, en comparaison à la rééducation simple, à l'échelle d'un groupe. Notons que les expérimentations ont été pratiquées dans le respect de la réglementation des droits des personnes (RGPD, Règlement général sur la protection des données) et sur la base du volontariat. Les participants (témoins et patients) ont fourni un consentement écrit de participation à l'étude, approuvée par un comité d'éthique (CPP [ID-RCB] : 2020-A00720-39).

Comme nous l'avons mentionné précédemment, cette étude a débuté récemment et nous présentons ici des résultats préliminaires avec les données obtenues pour un patient et un groupe de participants sains. Notons que ce groupe de participants sains est encore incomplet. De plus, en raison des contraintes liées à la pandémie de Covid-19, nous avons dû adapter le protocole SEMO. En effet, nous avons réduit le contenu des évaluations du patient réalisées à T1, T2 et T3, afin que chacune d'elles puissent être réalisées sur une seule journée. Plus particulièrement, nous avons diminué le contenu des évaluations langagières et neuropsychologiques, en raison

des contraintes de temps et de la fatigue du patient⁹. Par ailleurs, la rééducation était réalisée en autonomie, au domicile du patient.

2.1 Méthode

2.1.1 Participants

Patient P4 Les données sociodémographiques et cliniques du patient P4 sont présentées dans le Tableau 5.1. Le patient est un homme de 56 ans qui a subi un AVC ischémique gauche suite à une thrombose de l'artère carotide interne gauche. Il présente une lésion large avec une atteinte des régions fronto-temporo-pariétales à gauche (voir Figure 5.2). Suite à cet AVC, il présentait une aphasie non fluente. Au moment de l'étude, cette aphasie était en phase chronique (> 2 ans post-AVC).

Tableau 5.1 – Données sociodémographiques et cliniques du patient P4.

Patient	P4
Sexe, âge	Homme, 56 ans
Préférence manuelle	Droitier
Niveau d'éducation	CAP
Âge de survenue de l'AVC	53 ans
Cause et localisation de la lésion	AVC ischémique au niveau de l'artère carotide interne gauche
Type d'aphasie	Aphasie non fluente
Autres déficits associés	Hémiplégie droite
Rééducation orthophonique classique	2 séances/semaine

Un bilan des compétences de langage a été réalisé initialement par les orthophonistes du CHU Grenoble Alpes, à l'aide d'une batterie de tests élaborée par ces orthophonistes¹⁰. Selon ce bilan, le patient présentait des troubles sur le plan expressif avec des persévérations et de nombreuses stéréotypies. La compréhension du langage était meilleure que le versant expressif, mais il présentait des difficultés sur le plan sémantique. Le langage oral n'était pas aidé par la lecture et la répétition orale était impossible. Au moment de l'étude, la lecture et l'écriture restaient laborieuses, la compréhension orale était correcte sauf pour les structures syntaxiques plus

9. Le protocole SEMO, tel qu'il est conçu, prévoit la réalisation d'un bilan orthophonique (1 à 2 h), d'un bilan neuropsychologique (1 à 2 h), d'une évaluation de la parole intérieure et de la parole à voix haute (45 min) et de la neuroimagerie (1 h 30). Ceci n'était évidemment pas réalisable en une seule journée, ce qui justifie la diminution du contenu des évaluations.

10. Ce bilan permettait d'évaluer notamment l'expression orale (parole automatique, dénomination) et écrite (écriture spontanée ou copie de mots), la compréhension orale (désignation d'objets, d'images et par l'usage, exécution d'ordres) et écrite (correspondance mots écrits/images, morphosyntaxes), les praxies bucco-faciales et la répétition.

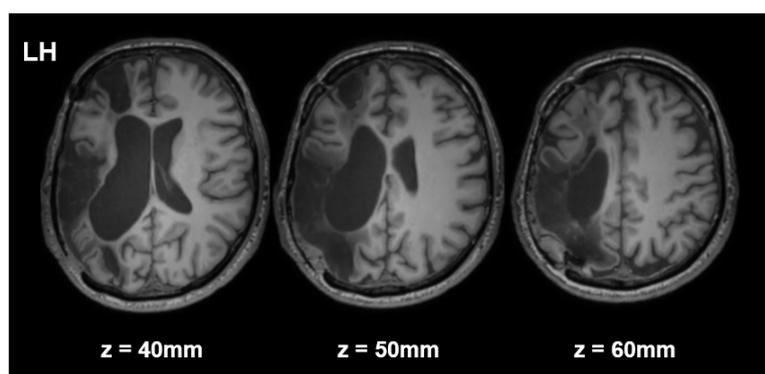


FIGURE 5.2 – Trois coupes axiales issues de l’IRM (T1) du patient P4 permettant de visualiser la lésion post-AVC. La lésion est localisée dans les régions fronto-temporo-pariétales à gauche (LH, *Left Hemisphere*). Les coordonnées z, dans l’espace MNI, sont mentionnées sous chaque coupe.

complexes, la répétition était possible et réalisée correctement pour certains sons. Ces dernières informations ont été obtenues suite à un échange avec les orthophonistes qui suivaient le patient.

Ainsi, nous avons mentionné plus haut le rôle des régions postérieures (temporo-pariétales) dans l’intégration multisensorielle (entre les modalités auditive, visuelle et somesthésique) sur laquelle est fondée la rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player*. Bien que l’intégrité de ces régions soit préférable, les critères d’inclusion spécifient également l’importance du tableau clinique et notamment des troubles de types expressifs. C’est donc sur le tableau clinique que nous nous sommes basés afin de valider l’inclusion de ce patient. En effet, d’après, le bilan du langage réalisé par les orthophonistes, le patient P4 présente une aphasie non fluente avec une prédominance des troubles sur le versant expressif.

Nous avons également vérifié que le patient ne présentait pas de troubles de la compréhension, d’apraxie des membres supérieurs (au moins un membre sans apraxie) ou de négligence spatiale unilatérale (voir Annexe D, Section 2). Nous nous sommes également assurés de la familiarité du patient avec les outils numériques. Le patient a indiqué utiliser souvent les outils numériques (plusieurs fois par jour) et plus spécifiquement par le biais des réseaux sociaux et des applications, notamment sur tablette (voir Annexe D, Tableau D.2).

Participants sains Un groupe contrôle de participants sains a également été inclus, constitué de 11 participants sains (5 hommes et 6 femmes), en majorité droitiers (10 droitiers) et ayant une moyenne d’âge de 66,7 ans (voir Tableau 5.2). Dans le cadre des analyses détaillées ci-après, nous considérerons le groupe de participants sains dans sa totalité pour les analyses de neuroimagerie.

Cependant, en raison des différences acoustiques existant entre hommes et femmes (Meynadier, 2013 ; Pépiot, 2016a, 2016b ; Simpson, 2009), nous considérerons uniquement les données obtenues chez les hommes pour les analyses acoustiques.

Tableau 5.2 – Données sociodémographiques des participants sains. Les données sont présentées pour chaque participant.

Participants	Âge	Sexe	Préférence manuelle	Niveau d'éducation
1	60	F	D	BAC
2	68	F	D	BAC
3	69	F	D	BAC+4
4	73	H	D	BAC+5
5	75	H	D	BAC+2
6	73	F	D	BAC
7	63	H	D	CAP/BEP
8	67	H	G	BAC+5
9	74	H	D	BAC+5
10	56	F	D	CAP/BEP
11	66	F	D	BAC+3

F, femme; H, homme; D, droitier; G, gaucher; BAC, baccalauréat, CAP, certificat d'aptitude professionnelle; BEP, brevet d'études professionnelles.

2.1.2 Rééducation

La rééducation renforcée se basait sur l'utilisation du logiciel *Ultraspeech-player* en complément de la rééducation orthophonique classique. Le patient a réalisé 3 séances par semaine pendant 4 semaines (30 minutes/séance), soit un total de 12 séances. Durant les séances, il était assis devant l'écran d'ordinateur sur lequel il pouvait visualiser les mouvements linguaux et/ou labiaux associés à des sons pré-enregistrés chez un locuteur de référence. Durant la première évaluation (T1), le logiciel a été présenté au patient. Ensuite, le patient a suivi les 4 semaines de rééducation augmentée (avec le logiciel) en autonomie, à son domicile. Lors de ces séances de rééducation, il devait réaliser plusieurs exercices permettant de travailler de nouveaux phonèmes ou des phonèmes travaillés lors de la séance précédente (pour le détail des séances, voir Annexe D, Section 3). Ainsi, le patient devait répéter plusieurs fois un phonème cible avant de passer au suivant. Le patient était autonome avec le logiciel, c'est-à-dire qu'il sélectionnait; les exercices à réaliser en fonction de la séance en cours, le son à répéter et le type de visualisation (langue ou lèvres). Notons que la première et la dernière semaine de rééducation, nous avons été en contact avec le patient (en visio-conférence) afin de vérifier le bon déroulement des séances.

Durant la rééducation simple, le patient suivait sa rééducation orthophonique dite « classique » à un rythme de 2 séances/semaine, avec deux orthophonistes différentes. Une orthophoniste intervenait à domicile et l'autre à son cabinet. Dans la vie quotidienne, le patient avait tendance à utiliser la communication non verbale (gestes, expressions faciales, etc.). Ainsi, durant la rééducation, les orthophonistes avaient pour but d'améliorer la production orale, en favorisant la production de mots et de phrases pour la communication (entraînement avec des descriptions d'images, fins de phrases, évocations, etc.). L'orthophoniste qui intervenait à domicile aidait à développer un outil basé sur la « communication alternative et augmentée » sur tablette avec des situations de la vie quotidienne¹¹. L'orthophoniste qui voyait le patient à son cabinet, quant à elle, axait sa rééducation sur l'articulation des sons et la communication dans son ensemble.

Le patient a suivi la rééducation renforcée pendant 4 semaines suivie de la rééducation simple pendant 4 autres semaines. Avant et après chaque cycle de rééducation, le patient a eu une évaluation multimodale (neuropsychologique, langagière et cérébrale) : (i) l'évaluation T1, avant de commencer la rééducation renforcée; (ii) l'évaluation T2, après 4 semaines de rééducation renforcée; (iii) l'évaluation T3, après 8 semaines de rééducation (renforcée et simple).

2.1.3 Évaluation neuropsychologique

Les performances cognitives globales du patient ont été évaluées, à T1, T2 et T3, à l'aide de la MOCA-B (*Montreal Cognitive Assessment-Basic*; Julayanont et al., 2015). Ce test permet d'évaluer très globalement la mémoire à court terme, les capacités visuo-spatiales, les fonctions exécutives, le langage et l'orientation dans le temps et l'espace.

2.1.4 Évaluation du langage et de la parole

L'évaluation du langage et de la parole a été réalisée à T1, T2 et T3 chez le patient. Nous avons évalué : les praxies bucco-linguo-faciales (Nespoulous et al., 1992); la répétition de mots (BECD; Auzou & Rolland-Monnoury, 2006) et de phonèmes; la discrimination phonémique (BALE; Jacquier-Roux et al., 2010); et la dénomination d'images (DO80; Deloche & Hannequin, 1997). Les épreuves

11. Le patient dispose d'un outil sur tablette basé sur la communication alternative et augmentée qui lui permet de communiquer en utilisant des pictogrammes (images ou photos) qui sont classés par catégories. Une fois sélectionnées, les images ou photos sont copiées dans une ligne de lecture située en haut de l'écran et un bouton de lecture permet de lire le mot ou la phrase associé(e) à l'image. Cet outil peut être enrichi avec des images personnalisées et le mot ou la phrase associé(e).

de répétition de syllabes, de mots et la discrimination phonémique sont similaires à celles réalisées lors de l'étude de cas du patient P3 (voir Tableau C.5, Annexe C).

Précisons que, lors de la répétition de syllabes, le patient devait répéter : des voyelles isolées (/a, œ, ø, e, ε, o, ɔ, y, u, i, ê, ã, õ/), des semi-consonnes en position initiale accompagnées des voyelles /a/ ou /i/ (/ja, wa, qi/) et des consonnes (/p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, l, ɲ, ʁ/) en position initiale ou médiane accompagnées de /a/. Dans cette thèse, nous noterons « [CV] » pour la répétition des consonnes et des semi-consonnes en position initiale et « [VCV] » pour la répétition des consonnes en position médiane. Les réponses produites, lors de la répétition de syllabes et de mots, ont été enregistrées à l'aide d'un microphone (enregistreur ZOOM H4nPro).

Lors de l'évaluation à T1, le patient a réalisé une seule répétition de syllabes¹² ; tandis que lors des évaluations à T2 et T3, il a réalisé deux répétitions de syllabes. Cette tâche de répétition de syllabes a également été réalisée par le groupe de participants sains à T1 et T2. Pour ces participants, la tâche a été répétée 3 fois et les productions des participants étaient enregistrées à l'aide du même microphone que pour le patient (enregistreur ZOOM H4nPro).

Une évaluation de la parole intérieure a également été réalisée pour les participants sains à T1 et T2 (évaluation objective et subjective) et pour le patient à T2 (évaluation subjective uniquement). Cependant, nous ne présenterons pas ces données dans la thèse.

2.1.5 IRM fonctionnelle

Lors des deux premières évaluations, le patient et les participants sains ont réalisé un examen IRM incluant une IRMf de tâche et de repos et un examen anatomique (DTI, *Diffusion Tensor Imaging*¹³), d'une durée totale de 60 minutes. Dans cette thèse, nous présenterons uniquement les données issues de l'IRMf de tâche¹⁴. Lors de l'IRMf de tâche, les participants ont réalisé

12. Lors de cette tâche, à l'issue de la première répétition, le patient semblait fatigué et il présentait des difficultés importantes. Pour cette raison, nous n'avons fait qu'une seule répétition.

13. L'imagerie par tenseur de diffusion (*Diffusion Tensor Imaging*, DTI) permet d'étudier la structure de la substance blanche cérébrale en se basant sur les propriétés de diffusion des molécules d'eau (Beaulieu, 2002 ; Glasser & Rilling, 2008). Plus spécifiquement, dans la substance blanche, l'orientation parallèle des fibres restreint le mouvement des molécules d'eau à une seule direction préférentielle qui est celle des axones (Beaulieu, 2002). Il sera ensuite possible de représenter la trajectoire des axones par cette mesure de diffusion des molécules d'eau par le biais de la tractographie.

14. Les analyses des données de l'IRMf de repos et de l'IRM de diffusion sont en cours ou à venir. Elles ne seront donc pas intégrées dans ce travail de thèse.

trois tâches : la dénomination, la détection de rimes et la répétition de syllabes. La présentation des stimuli lors des trois tâches a été effectuée à l'aide du logiciel E-Prime 2.0 (Psychology Software Tools, Pittsburgh, PA).

Dénomination Lors de la dénomination orale, les participants devaient dénommer des images, sans production à voix haute. Quatre-vingts images en couleur étaient présentées. Les mots correspondant à ces images étaient issus en partie de la tâche de dénomination d'images de [Deloche et Hannequin \(1997\)](#) (DO80).

La tâche de dénomination était présentée selon un paradigme en bloc avec une alternance de 20 périodes de tâche et de repos. Durant la période de repos, les participants devaient seulement regarder une croix de fixation. Chaque bloc durait 10 secondes et 4 stimuli étaient présentés par bloc. La durée totale de cette tâche était d'environ 7 minutes. Le déroulement de cette tâche est présenté dans la Figure D.2 (Annexe D).

Détection de rimes en modalité visuelle Lors de la détection de rimes (DR), les participants visualisaient deux images, l'une à côté de l'autre, et ils devaient juger si les mots associés à ces images rimaient ou non. Quarante paires d'images étaient présentées, dont 20 paires qui rimaient et 20 paires qui ne rimaient pas. Les participants répondaient à l'aide d'une clé de réponse, avec un bouton associé à la réponse « riment » et un autre pour la réponse « ne riment pas ». Les réponses ont été enregistrées à l'aide du logiciel E-Prime (Psychology Software Tools, Pittsburgh, PA).

Cette tâche de DR était présentée selon un paradigme en bloc avec une alternance de 20 périodes de tâche et de repos. Chaque bloc durait 10 secondes et 2 stimuli étaient présentés par bloc. La durée totale de cette tâche était d'environ 7 minutes. Le déroulement de cette tâche est présenté dans la Figure D.2 (Annexe D).

Répétition de syllabes Lors de la répétition de syllabes (RS), les participants devaient répéter à voix haute 62 syllabes présentées en modalité auditive. Les réponses étaient enregistrées à l'aide d'un microphone compatible IRM (FOMRI™ III). Les syllabes étaient de quatre types : syllabes ouvertes (CV) ou fermées (VC) et groupes consonantiques ouverts (CCV) ou fermés (VCC). Les syllabes et groupes consonantiques étaient composés des consonnes (C) /p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ,

v, z, ʒ, m, n, ɲ, l, ʁ/ et de la voyelle (V) /a/. Les items utilisés dans cette tâche sont issus de la batterie EULALIES (pour plus de détails, voir Meloni, 2022).

La tâche de RS était présentée selon un paradigme en bloc avec une alternance de 15 périodes de tâche et de repos. Chaque bloc de tâche durait 26 secondes et comportait 4 items, sauf le dernier bloc qui durait 39 secondes et comportait 7 items. Chaque bloc de repos durait 19,5 secondes. La durée totale de cette tâche était d'environ 12 minutes. Le déroulement de cette tâche est présenté dans la Figure D.3 (Annexe D). On note que cette tâche de RS était acquise en *sparse-sampling*¹⁵.

Paramètres d'acquisition Les acquisitions IRMf ont été réalisées avec l'imageur 3T corps entier (Philips Achieva, TX) de la plateforme IRMaGe du CHU Grenoble Alpes. Une séquence d'acquisition FE-EPI pondérée en T2* a été utilisée. Pour les tâches de DR et dénomination, 42 coupes adjacentes, parallèles au plan bicommissural et d'une épaisseur de 3 mm chacune, ont été acquises en mode séquentiel. La taille des voxels était de 3 × 3 × 3 mm avec un champ de vue de 239,9 × 239,9 × 126 mm et encodés par une matrice d'acquisition de 80 × 78. Le TR était de 2,5 s, le TE de 30 ms et l'angle de bascule de 82°. Pour la tâche de RS, les paramètres étaient identiques excepté pour le TR qui était de 6,5 s. Une image anatomique pondérée en T1 avec une haute résolution spatiale (1 × 1 × 1 mm) a également été acquise.

2.1.6 Analyse des données de langage et de parole

L'évaluation du langage et la parole nous a permis de déterminer un score de performances (pourcentage de phonèmes corrects ou score à la tâche) et un indice d'évolution pour les 5 tâches (répétition de syllabes et de mots, discrimination phonémique, dénomination d'images et praxies bucco-linguo-faciales). Nous avons également réalisé une évaluation des erreurs et une évaluation acoustique pour la tâche de répétition de syllabes. L'évaluation des performances et l'analyse des erreurs ont été réalisées uniquement pour le patient, tandis que l'évaluation acoustique a été réalisée pour le patient et pour les participants sains. Les différentes représentations graphiques issues de ces analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel R (RStudio Team, 2020).

15. Lors d'une acquisition en *sparse-sampling* un délai est ajouté après chaque volume d'acquisition, durant lequel les gradients sont « désactivés » et donc ne génèrent aucun bruit. Ainsi, ce délai silencieux entre chaque acquisition permet : (i) la présentation des stimuli auditifs sans contamination liée au bruit de la machine et (ii) l'enregistrement des réponses orales sans artefacts liés aux mouvements (Perrachione & Ghosh, 2013).

Performances Les tâches de répétition de syllabes et de mots ont été analysées avec le logiciel *Phon* (Hedlund & Rose, 2018 ; Rose & MacWhinney, 2014 ; Rose et al., 2006), afin d'extraire un pourcentage de phonèmes corrects (PPC). Le PPC est calculé comme le rapport entre le nombre de phonèmes corrects et la somme des productions correctes et incorrectes¹⁶. Pour les autres tâches, nous avons déterminé le score de réussite à la tâche. Notons que, pour la dénomination, nous avons attribué un score de 1 lorsque l'image était dénommée sans aide, 0,5 lorsque l'on donnait un indice (*i.e.*, le premier phonème du mot) et 0 lorsque l'indice représentait plus de la moitié du mot ou que le mot était donné en entier et que le patient le répétait. L'ensemble de ces scores ou mesures de performances sont calculés à T1, T2 et T3.

Pour les différentes tâches, nous avons calculé un indice d'évolution afin de traduire les améliorations du patient entre les différentes évaluations. Ainsi, nous avons trois indices d'évolution (IE) : entre T1 et T2 (IE_{T2-T1}), entre T2 et T3 (IE_{T3-T2}), et entre T1 et T3 (IE_{T3-T1}). L'IE est calculé à partir d'un score obtenu pour chaque item de chaque tâche. Ce score par item est calculé différemment en fonction des tâches (pour le détail des calculs, voir Annexe D, Section 5). Si l'on prend l'exemple des évaluations T1 et T2, pour chaque item de chaque tâche, nous calculons un score qui sera de +1 lors d'une amélioration entre T1 et T2, -1 lors d'une détérioration entre T1 et T2 et 0 en cas d'absence de changement entre T1 et T2. En faisant la somme de ces scores pour chaque item, nous obtenons un IE entre les évaluations T1 et T2 (IE_{T2-T1}) pour chaque tâche. Le calcul est similaire entre les évaluations T2 et T3 et entre T1 et T3. Ainsi, nous obtenons une évolution en lien avec la rééducation renforcée (IE_{T2-T1}), la rééducation simple (IE_{T3-T2}) et une évolution globale (IE_{T3-T1}).

Analyse des erreurs Afin de mieux décrire les erreurs du patient, nous avons identifié, durant la tâche de répétition de syllabes, les processus phonologiques mis en jeu dans ces erreurs. En effet, à l'aide du logiciel *Phon*, nous avons comparé les phonèmes cibles et les phonèmes produits et nous avons identifié les erreurs pour les consonnes en condition [CV] et [VCV] séparément, lors des évaluations T1, T2 et T3. Ainsi, parmi les erreurs, nous avons déterminé les pourcentages de :

16. La formule permettant de calculer ce PPC s'écrit ainsi :

$$PPC = \frac{N_{correct}}{N_{correct} + N_{incorrect}} \times 100 = \frac{N_{correct}}{N_{correct} + N_{déletion} + N_{épenthèse} + N_{substitution}} \times 100.$$

dévoisement (*i.e.*, une consonne non voisée au lieu d'une voisée, *e.g.*, /t/ au lieu de /d/); **voisement** (*i.e.*, une consonne voisée au lieu d'une non voisée, *e.g.*, /b/ au lieu de /p/); **postériorisation des coronales** (*i.e.*, une consonne postérieure au lieu d'une coronale, *e.g.*, /k/ au lieu de /t/); **antériorisation des vélares** (*i.e.*, une consonne alvéolaire au lieu d'une vélaire, *i.e.*, /t, d/ au lieu de /k, g/); **postériorisation des alvéolaires** (*i.e.*, une consonne postérieure au lieu d'une alvéolaire, *e.g.*, /ʃ/ au lieu de /s/); **occlusion des fricatives** (*i.e.*, une occlusive au lieu d'une fricative, *e.g.*, /p/ au lieu de /f/); **friction des occlusives** (*i.e.*, une fricative au lieu d'une occlusive, *e.g.*, /f/ au lieu de /p/); **délétion** (*i.e.*, suppression d'une consonne ou voyelle en position initiale, médiane ou finale); **épenthèse** (*i.e.*, ajout d'une consonne ou voyelle en position initiale, médiane ou finale).

Nous avons également réalisé des matrices de confusion¹⁷. Ces matrices nous permettent de représenter les phonèmes cibles en fonction des phonèmes produits (pour une explication détaillée des matrices de confusion, voir Section 2.2.2 du Chapitre 4). Nous avons représenté ces matrices obtenues à T1, T2 et T3 et pour les trois conditions (voyelles isolées, consonnes et semi-consonnes en condition [CV] et consonnes en condition [VCV]). Nous avons ainsi 9 matrices de confusion.

Évaluation acoustique L'évaluation acoustique a été effectuée sur les productions issues de la tâche de répétition de syllabes réalisée à T1, T2 et T3 pour le patient et à T1 et T2 pour les participants sains. Nous avons extrait les paramètres acoustiques à l'aide du logiciel *Praat* (Boersma & Weenink, 2010), pour les voyelles orales, les consonnes occlusives et les consonnes fricatives non voisées jugées comme correctes ou émergentes (*i.e.*, lorsque le participant produit un phonème avant de produire le phonème cible). En vue de la comparaison des paramètres acoustiques entre le patient et les participants sains, nous avons conservé uniquement les données des participants sains de sexe masculin ($N = 5$). La méthode permettant l'étiquetage des données et l'extraction des paramètres acoustiques est similaire à celle utilisée dans le Chapitre 4 (voir Sections 1.1.5 et 2.1.5). Notons que, par rapport aux études précédentes, nous avons choisi d'afficher 7 formants dans *Praat* (compris entre 0 et 5000 Hz), afin de faciliter la détection et l'extraction des formants pour

17. Notons que ces matrices nous permettent de fournir une information sur la « justesse » pour chaque phonème ainsi qu'une vue globale du type de confusion produite par le patient (*i.e.*, substitution ou délétion d'un phonème). Contrairement au PPC ou à l'étude des processus phonologiques dans les erreurs, ces matrices ne fournissent pas d'information concernant les épenthèses. Ainsi, l'analyse conjointe du PPC, des erreurs et des matrices de confusion permet une meilleure évaluation des performances du patient avec une évaluation de ses capacités de productions correctes au niveau d'une syllabe donnée (PPC), une mesure sur le phonème cible (matrices de confusion), et un détail du type d'erreur (processus phonologiques).

les voyelles du patient. Rappelons que, pour le patient, lors de l'évaluation à T1, nous avons une seule répétition de syllabes, tandis que lors des évaluations à T2 et T3, nous avons deux répétitions. Enfin, pour les données acoustiques mesurées chez les participants sains, nous avons montré qu'il n'existait pas de différence significative entre T1 et T2 ce qui nous a permis de regrouper les données acoustiques des deux sessions pour les différents paramètres mesurés (voir Section 6, Annexe D).

Pour les voyelles orales (/a, œ, ø, e, ε, o, ɔ, y, u, i/), nous avons extrait les valeurs des formants F1 et F2. Nous avons ensuite réalisé une normalisation, à l'aide de la méthode de [Watt et Fabricius \(2002\)](#)¹⁸, pour les données du patient et des participants sains. Ceci nous a permis de comparer et de représenter sur un même graphique les triangles vocaliques avec les productions des participants sains et la ou les production(s) du patient. Pour les participants sains, nous avons représenté chaque production de coordonnées (F2, F1) de chaque participant et une ellipse représentant la distribution pour chaque voyelle. Notons que, pour les participants sains, l'absence de différence statistique entre T1 et T2 pour les formants F1 et F2, nous a permis de regrouper les données des deux sessions. Pour le patient, nous avons indiqué un seul point de coordonnées (F2, F1), qui correspond soit à l'unique production, soit au barycentre des deux productions réalisées¹⁹. Ainsi, nous avons représenté ces triangles vocaliques à T1, T2 et T3. À partir de l'observation de ces triangles vocaliques, nous pourrions évaluer qualitativement la distance inter-voyelles, c'est-à-dire la distance entre les différentes voyelles. Cette distance devrait être grande, suggérant une meilleure distinction entre les voyelles.

Nous pourrions également calculer, à partir des valeurs de formants normalisées : (i) la distance intra-voyelle pour les participants sains et (ii) la distance intra-voyelle inter-sujets entre le patient et les participants sains (voir illustration dans la Figure 5.3).

La **distance intra-voyelle** est la distance, pour chaque voyelle, entre son point de coordonnées (F2, F1) et le barycentre correspondant. Cette distance est calculée pour les participants sains uniquement. La **distance intra-voyelle inter-sujets** est la distance entre la production du patient (ou le barycentre de ses productions, s'il y en plusieurs pour une même voyelle) et le barycentre

18. La normalisation de [Watt et Fabricius](#), à l'aide du logiciel *R* ([RStudio Team, 2020](#)), donne les valeurs de formants normalisées, séparément pour F1 et F2. Ces valeurs sont calculées comme le rapport entre les formants observés et le centroïde estimé. L'estimation du centroïde du système vocalique est calculée sur la base des valeurs des extrémités du triangle, notamment /i/ (voyelle la plus antérieure) et /u/ (voyelle la plus postérieure).

19. Pour rappel, à T1, il n'y a qu'une seule répétition, c'est-à-dire un unique point de coordonnées (F2, F1). Cependant, à T2 et T3, en cas de production correcte, il y a deux répétitions, ce qui permet de calculer le barycentre. Ce barycentre est calculé pour chaque voyelle comme la moyenne arithmétique des coordonnées (F2, F1).

5. Un nouveau protocole expérimental pour la rééducation de la parole

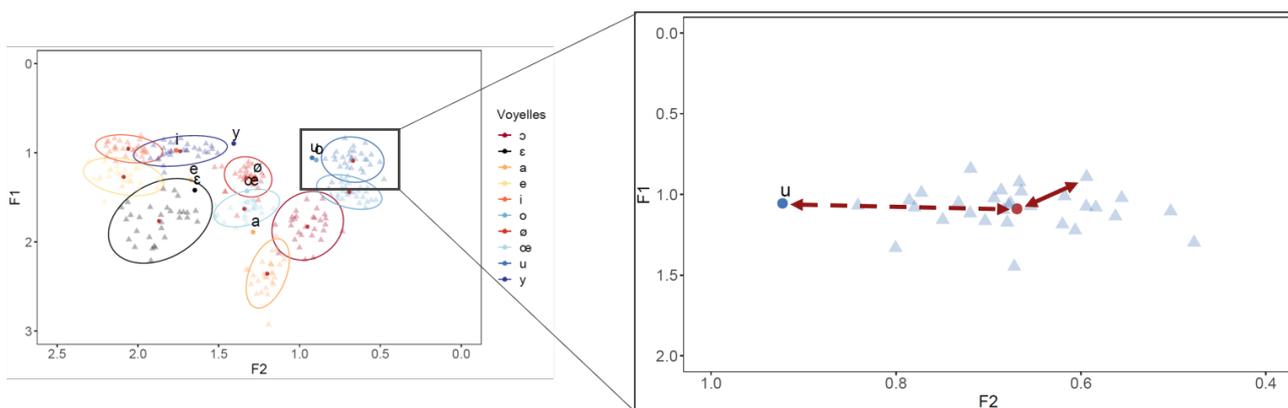


FIGURE 5.3 – Illustration de la distance intra-voyelle et de la distance intra-voyelle inter-sujets. Les triangles représentent les productions des participants sains, le point rouge le barycentre de ces productions et le point bleu la production du patient. La distance intra-voyelle (flèche en trait plein) est la distance, pour chaque voyelle, entre son point de coordonnées (F2, F1) et le barycentre correspondant. Elle est calculée pour chaque production des participants sains. La distance intra-voyelle inter-sujets (flèche en pointillé) est la distance entre la production du patient (ou le barycentre de ses productions) et le barycentre des productions des participants sains.

des productions des participants sains. La distance intra-voyelle inter-sujets devrait diminuer si le patient se rapproche des productions des participants sains. Dans le cas d'une production « parfaite », cette distance serait égale à 0, c'est-à-dire lorsque la production du patient possède les mêmes coordonnées (F2, F1) que le barycentre des productions des participants sains. Dans un cas « moins parfait », nous devrions observer une distance qui se rapproche de la moyenne des distances intra-voyelle des participants sains, après la rééducation.

Pour les consonnes occlusives voisées /b, d, g/ et non voisées /p, t, k/ en condition [CV], nous avons extrait le délai d'établissement du voisement (VOT, *Voice Onset Time*). Ces valeurs ont été mesurées pour les productions des participants sains et du patient. Pour les participants sains, l'absence de différence statistique pour le VOT entre T1 et T2 nous a permis de regrouper les valeurs des deux sessions. Nous avons ainsi déterminé une valeur moyenne de VOT pour les occlusives voisées et non voisées, séparément. Nous pourrions comparer les valeurs obtenues pour les participants sains et le patient.

Enfin, pour les consonnes fricatives non voisées /f, s, ʃ/ en condition [CV], nous avons extrait les moments spectraux et plus spécifiquement les deux premiers moments : centre de gravité (CG) et écart type (ET). Les consonnes fricatives non voisées sont séparées en trois catégories : alvéolaire /s/, post-alvéolaire /ʃ/ et labiodentale /f/. Pour les participants sains, l'absence de différence significative, entre T1 et T2, pour les valeurs de CG et d'ET nous a permis de regrouper

graphiquement les données des deux sessions. Nous avons représenté graphiquement les valeurs de CG et d'ET en séparant selon les trois catégories (alvéolaire, labiodentale et post-alvéolaire) pour les participants sains. Nous avons également déterminé les valeurs moyennes de CG et d'ET pour les trois catégories de consonnes produites à T1, T2 et T3 par le patient. Enfin, nous avons déterminé les différences entre les valeurs de CG (Δ_{CG}) ou d'ET (Δ_{ET}) obtenues pour les différents types de consonnes. Cette différence sera exprimée en valeur absolue.

2.1.7 Analyse des données d'IRMf de tâche

L'analyse des données d'IRMf a été effectuée en utilisant le logiciel SPM12 (*Wellcome Department of Imaging Neuroscience*, London, UK, www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm) sous MATLAB (Mathworks, Natick, MA, Etats-Unis). Les images ont été pré-traitées temporellement et spatialement, puis une analyse statistique a été réalisée. Ces traitements ont été effectués séparément pour chacune des tâches. Nous détaillons ci-dessous les différentes étapes de ces analyses.

Pré-traitements Pour les participants sains, ce pré-traitement comprend plusieurs étapes : (i) le réaligement afin de corriger les mouvements de tête; (ii) le *slice timing* afin de corriger les *artefacts* causés par le délai d'acquisition entre les coupes; (iii) la « coregistration » afin de réaligner le volume anatomique avec les images moyennes créées par la procédure de réaligement; (iv) la segmentation du volume anatomique en six tissus différents (matière blanche, matière grise, liquide céphalo-rachidien, os, tissus mous et extérieurs à la tête) à l'aide des cartes de probabilités d'appartenance aux tissus (*Tissue Probability Map*, TPM); (v) la normalisation dans l'espace MNI du volume anatomique et des volumes fonctionnels, à partir du champ de déformation obtenu à l'issue de la segmentation de l'image anatomique; et (vi) le lissage spatial (*smoothing*) à l'aide d'un filtre Gaussien (8 mm FWHM), afin de limiter les biais liés à la corrélation spatiale entre les voxels.

Pour le patient, nous avons réalisé un masque de la lésion à l'aide de la *toolbox lesion-GNB* (Griffis, Allendorfer, & Szaflarski, 2016) incluse dans le logiciel SPM12. Ce masque a ensuite été binarisé à l'aide d'*ImCalc* sous SPM12 (avec un seuil de 0,5)²⁰. Les pré-traitements ont ensuite été réalisés en deux temps. Premièrement, nous avons fait : une coregistration afin de réaligner le masque sur les cartes de probabilités; une segmentation du volume anatomique en ajoutant

20. Nous avons choisi un seuil à 0,5 après une étude du masque de la lésion. Une intensité supérieure à ce seuil indique que le voxel se situe dans la lésion (1) et une intensité inférieure signifie que le voxel est hors de la lésion (0).

une septième carte de probabilités correspondant à l'image issue de la coregistration; et une normalisation du masque de la lésion et du volume anatomique. Deuxièmement, nous avons réalisé les étapes de réalignement, de *slice timing*, de normalisation des volumes fonctionnels (en prenant en compte le champ de déformation issu de la segmentation faite dans la première partie des pré-traitements) et de lissage spatial.

Notons que, pour la tâche de répétition de syllabes, étant donné que celle-ci est réalisée en *sparse-sampling*, nous n'avons pas effectué d'étape de *slice timing* lors des pré-traitements.

Analyses statistiques des données Les analyses statistiques ont ensuite été réalisées pour les tâches de DR, RS et dénomination, séparément. Pour chaque tâche, un régresseur d'intérêt (tâche) a été déclaré et convolué avec la réponse hémodynamique canonique et avec les dérivés spatiales et temporelles associées. Les paramètres de mouvements ont été modélisés comme des régresseurs de non-intérêt, ce qui a permis de les prendre en compte dans le signal BOLD (sans tester directement leur effet). Ceci permet également d'avoir une meilleure estimation du signal et de l'erreur résiduelle. Le modèle linéaire généralisé a été utilisé pour générer des paramètres d'activation estimés pour chaque voxel, chaque condition et chaque participant. Nous avons ensuite déterminé pour chaque tâche : (i) les contrastes principaux (tâche à T1 et à T2, séparément) pour identifier les réseaux cérébraux impliqués dans les tâches lors de chaque session et (ii) les contrastes tâche-T1 *vs.* tâche-T2 pour identifier l'effet de la rééducation sur ces réseaux cérébraux, pour le patient, et la variabilité entre les sessions, pour les participants sains. Notons que, pour les participants sains, nous avons effectué ces contrastes au niveau individuel puis à l'échelle du groupe. Ainsi, nous commenterons principalement les résultats des activations à T1 et le contraste T2-T1 pour chaque tâche, pour le patient et pour le groupe de participants sains.

2.2 Résultats

2.2.1 Évaluation neuropsychologique

Le bilan neuropsychologique, réalisé lors des trois évaluations, met en évidence une atteinte légère des performances cognitives (voir Tableau 5.3). Plus spécifiquement, le fonctionnement exécutif, l'orientation (dans le temps et l'espace), les capacités attentionnelles et le calcul sont normaux lors des trois évaluations, tandis que la fluence verbale est fortement atteinte. Le patient

présente aussi des difficultés en mémoire à court terme et en dénomination à T1, mais nous constatons une augmentation du nombre de mots rappelés ou d'images dénommées entre T1 et T2. Enfin, les compétences visuo-perceptives s'améliorent entre T1 et T2 avec des performances normales lors des évaluations T2 et T3.

Tableau 5.3 – Résultats de l'évaluation des compétences cognitives. Les scores aux différentes tâches de la MOCA-B (*Montreal Cognitive Assessment-Basic*; Julayanont et al., 2015) sont présentés.

	T1	T2	T3
Fonctions exécutives (/1)	1	1	1
Fluence verbale (/2)	0	0	0
Orientation (/6)	6	6	6
Calcul (/3)	3	3	3
Abstraction (/3)	2	1	2
Rappel différé (/5)	1	3	2
Visuo-perception (/3)	1	3	3
Dénomination (/4)	2	4	3
Attention (partie 1, /1)	1	0	1
Attention (partie 2, /2)	2	2	2
Total (/30)	19	23	23

2.2.2 Évaluation du langage et de la parole

Performances Les performances de l'évaluation du langage et de la parole du patient, réalisée à T1, T2 et T3, sont présentées dans le Tableau 5.4. L'indice d'évolution (IE), entre les différentes évaluations, est également présenté pour chaque tâche.

Lors de la répétition de syllabes, le patient semble s'améliorer légèrement pour les voyelles isolées entre T1 et T2 (de 50,00% à 55,32%) mais les performances diminuent entre T2 et T3 (52,73%). En revanche, on observe une amélioration plus importante pour les consonnes en condition [CV] et [VCV], avec une augmentation du PPC entre T1 et T3 en condition [CV] (de 51,85% à 63,64%) et en condition [VCV] (de 52,94% à 70,82%). Dans les deux cas, on observe une amélioration plus importante du PPC entre T1 et T2 (augmentation d'environ 16% pour [VCV] et 8% pour [CV]) qu'entre T2 et T3 (environ 1,6% pour [VCV] et 3% pour [CV]), ce qui est associé à un IE plus élevé entre T1 et T2 (+5) qu'entre T2 et T3 (+2). Ces résultats sont en faveur d'une amélioration plus importante pour les consonnes que pour les voyelles, avec une amélioration plus importante entre T1 et T2.

5. Un nouveau protocole expérimental pour la rééducation de la parole

Tableau 5.4 – Performances du patient P4 lors de évaluations langagières réalisées à T1, T2 et T3. Le score ou le PPC est présenté pour les différentes tâches et l'indice d'évolution (IE) entre les différentes évaluations est également présenté dans le tableau.

		T1	T2	T3	IE_{T2-T1}	IE_{T3-T2}	IE_{T3-T1}
Répétition de syllabes	Voyelles isolées	50,00%	55,32%	52,73%	+1	0	0
	Condition [CV]	51,85%	60,56%	63,64%	+5	+2	+7
	Condition [VCV]	52,94%	69,20%	70,82%	+5	+2	+7
Répétition de mots		70,25%	72,87%	68,23%	+4	-5	-2
Discrimination de phonèmes	Score (/14)	13	12	11	-1	-1	-2
	Dénomination	Score (/80)	40	45,5	50	+5	+8
Praxies BLF (total /15)	Sur ordre	6	7	9	+1	+2	+3
	Sur imitation	7	6	4	-1	-2	-3

La répétition de syllabes comprend les voyelles isolées (/a, œ, ø, e, ε, o, ɔ, y, u, i, ē, ā, 5/), les semi-consonnes (/j, w, ɥ/) et consonnes (/p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, l, ɲ, ʁ/) en position initiale [CV] et les consonnes en position médiane [VCV].

BECD, Batterie d'Évaluation Clinique de la Dysarthrie; PPC, pourcentage de phonèmes corrects; BLF, bucco-linguo-faciales.

Lors de la répétition de mots, nous observons une légère augmentation du PPC entre T1 et T2 (de 70,25% à 72,87%), avec un IE de +4. Par ailleurs, le PPC diminue entre T2 et T3 (de 72,87% à 68,23%), avec un IE de -5. Enfin, de façon globale, entre T1 et T3 on observe une diminution du PPC avec un IE négatif (-2). Ces résultats suggèrent une légère amélioration entre T1 et T2, qui n'est pas maintenue à T3.

Les performances lors de la discrimination de phonèmes sont préservées, avec un score de 13 à T1 (score /14). Néanmoins, on observe une légère diminution avec un score à 12 à T2 et 11 à T3.

Lors de la dénomination, nous observons une amélioration du score entre T1 et T3 (de 40 à 50). Cette amélioration est associée à un IE positif entre T1 et T3 (+18), avec un IE de +5 entre T1 et T2 et de +8 entre T2 et T3, ce qui suggère une amélioration des performances en dénomination tout au long du protocole.

Enfin, nous remarquons une augmentation du score de réalisation des praxies sur ordre de 6 à 9 entre T1 et T3, ce qui suggère une légère amélioration des praxies bucco-linguo-faciales sur ordre.

Analyse des erreurs Afin d'analyser les productions du patient, nous avons effectué une analyse des processus phonologiques identifiés dans les erreurs lors de la répétition de syllabes, pour les consonnes en condition [CV] et [VCV]. Parmi les processus identifiés pour les consonnes en condition [CV] (voir Tableau 5.5), nous observons une diminution du pourcentage de délétions de

T1 à T3 (de 8,33% à 0,00%), avec une diminution du pourcentage de délétions de la consonne initiale et de la voyelle finale. Une diminution globale des épenthèses de T1 à T3 (de 12,00% à 6,29%) est également à noter. Plus spécifiquement, les épenthèses médianes de T1 à T3 diminuent de 4,00% à 0,70%, tandis que les épenthèses finales diminuent de 5,33% à 0,70%. Le pourcentage d'épenthèses initiales, quant à lui, augmente entre T1 et T3 (de 2,67% à 4,90%). Ces résultats suggèrent une amélioration de la capacité du patient à produire la séquence de type [CV] à T2.

Par ailleurs, nous observons une diminution du pourcentage de dévoisement entre T1 et T2 (de 54,55% à 45,65%), de même pour l'antériorisation des consonnes vélares (de 66,67% à 55,56%) et l'occlusion des fricatives (de 36,36% à 0,00%), suggérant une amélioration du contrôle du larynx et du mode et du lieu d'articulation entre les deux premières évaluations. Cependant, ces mêmes pourcentages augmentent à T3 (52,08%, 100,00% et 20,83%, respectivement), ce qui suggère que l'amélioration n'est pas maintenue à T3. Enfin, nous constatons que le pourcentage de friction des occlusives augmente entre T1 et T2 (de 0,00% à 16,13%), mais diminue entre T2 et T3 (6,25%), ce qui est en faveur d'un meilleur contrôle du mode d'articulation pour les occlusives à T3.

Tableau 5.5 – Processus phonologiques identifiés parmi les erreurs lors de la répétition de consonnes en condition [CV]. Le pourcentage des différents types d'erreurs est calculé lors des trois évaluations (T1, T2 et T3).

Processus phonologiques	T1	T2	T3	
Postériorisation des coronales	0,00%	0,00%	0,00%	
Délétions	totales	8,33%	3,97%	0,00%
	consonne initiale	5,56%	3,97%	0,00%
	voyelle finale	2,78%	0,00%	0,00%
Épenthèses	totales	12,00%	11,68%	6,29%
	initiales	2,67%	2,92%	4,90%
	médianes	4,00%	2,92%	0,70%
	finales	5,33%	5,84%	0,70%
Dévoisement	54,55%	45,65%	52,08%	
Voisement	0,00%	0,00%	0,00%	
Antériorisation des vélares	66,67%	55,56%	100,00%	
Postériorisation des alvéolaires	0,00%	0,00%	0,00%	
Occlusion des fricatives	36,36%	0,00%	20,83%	
Friction des occlusives	0,00%	16,13%	6,25%	

Pour les consonnes en condition [VCV] (voir Tableau 5.6), nous n'observons aucune erreur de postériorisation des coronales, de postériorisation des alvéolaires, ou d'occlusion des fricatives à T1 et T2. Cependant, le pourcentage de ces erreurs augmente à T3 (2,50%, 3,23% et 25,00%,

5. Un nouveau protocole expérimental pour la rééducation de la parole

respectivement). On observe une augmentation des erreurs de dévoisement entre T1 et T2 (de 30,77% à 38,71%) puis une diminution à T3 (20,00%). Les erreurs de voisement, quant à elles, augmentent légèrement à T3 (3,70%), alors qu'aucune erreur n'était faite à T1 et T2. Nous remarquons également une augmentation de l'antériorisation des consonnes vélares et de la friction des occlusives entre T1 et T3 (de 66,67% à 75,00% et de 16,67% à 18,18%, respectivement). Ces différents résultats suggèrent un défaut de contrôle du mode et du lieu d'articulation, principalement à T3, avec un contrôle imparfait du voisement.

Tableau 5.6 – Processus phonologiques identifiés parmi les erreurs lors de la répétition de consonnes en condition [VCV]. Le pourcentage des différents types d'erreurs est calculé lors des trois évaluations (T1, T2 et T3).

Processus phonologiques	T1	T2	T3	
Postériorisation des coronales	0,00%	0,00%	2,50%	
Délétions	totales	30,16%	7,66%	6,10%
	voyelle initiale	12,70%	7,28%	6,10%
	consonne médiane	9,52%	0,00%	0,00%
	voyelle finale	7,94%	0,38%	0,00%
Épenthèses	totales	10,20%	5,86%	4,62%
	initiales	10,20%	4,69%	3,36%
	médianes	0,00%	0,39%	0,42%
	finales	0,00%	0,78%	0,84%
Dévoisement	30,77%	38,71%	20,00%	
Voisement	0,00%	0,00%	3,70%	
Antériorisation des vélares	66,67%	75,00%	75,00%	
Postériorisation des alvéolaires	0,00%	0,00%	3,23%	
Occlusion des fricatives	0,00%	0,00%	25,00%	
Friction des occlusives	16,67%	16,00%	18,18%	

Enfin, on observe une diminution du pourcentage de délétions de T1 à T2 (de 30,16% à 7,66%) avec une diminution des délétions sur la voyelle initiale ou sur la consonne médiane. Ces résultats suggèrent que le patient parvient à produire la séquence [VCV] attendue, alors qu'elle n'était pas produite à T1 ou qu'elle était substituée par [CV] ou [V]. Cette diminution des erreurs se poursuit à T3, mais de façon moins importante (6,10% pour les délétions totales). La diminution du pourcentage de délétions est associée à une diminution du pourcentage d'épenthèses entre T1 et T2 (de 10,20% à 5,86%) avec une diminution notamment des épenthèses en position initiale. Ces résultats suggèrent que le patient parvient à produire la séquence [VCV], alors qu'elle n'était pas

produite à T1 ou qu'elle était substituée par [CVCV]. Cette diminution des épenthèses se poursuit à T3, mais de façon moins importante (4,62% pour les épenthèses totales).

Afin d'étudier les productions du patient à T1, T2 et T3, nous avons représenté les matrices de confusion pour les voyelles isolées, les consonnes et semi-consonnes en condition [CV] et les consonnes en condition [VCV]. Nous commençons par une description des matrices de confusion pour les voyelles (Figure 5.4).

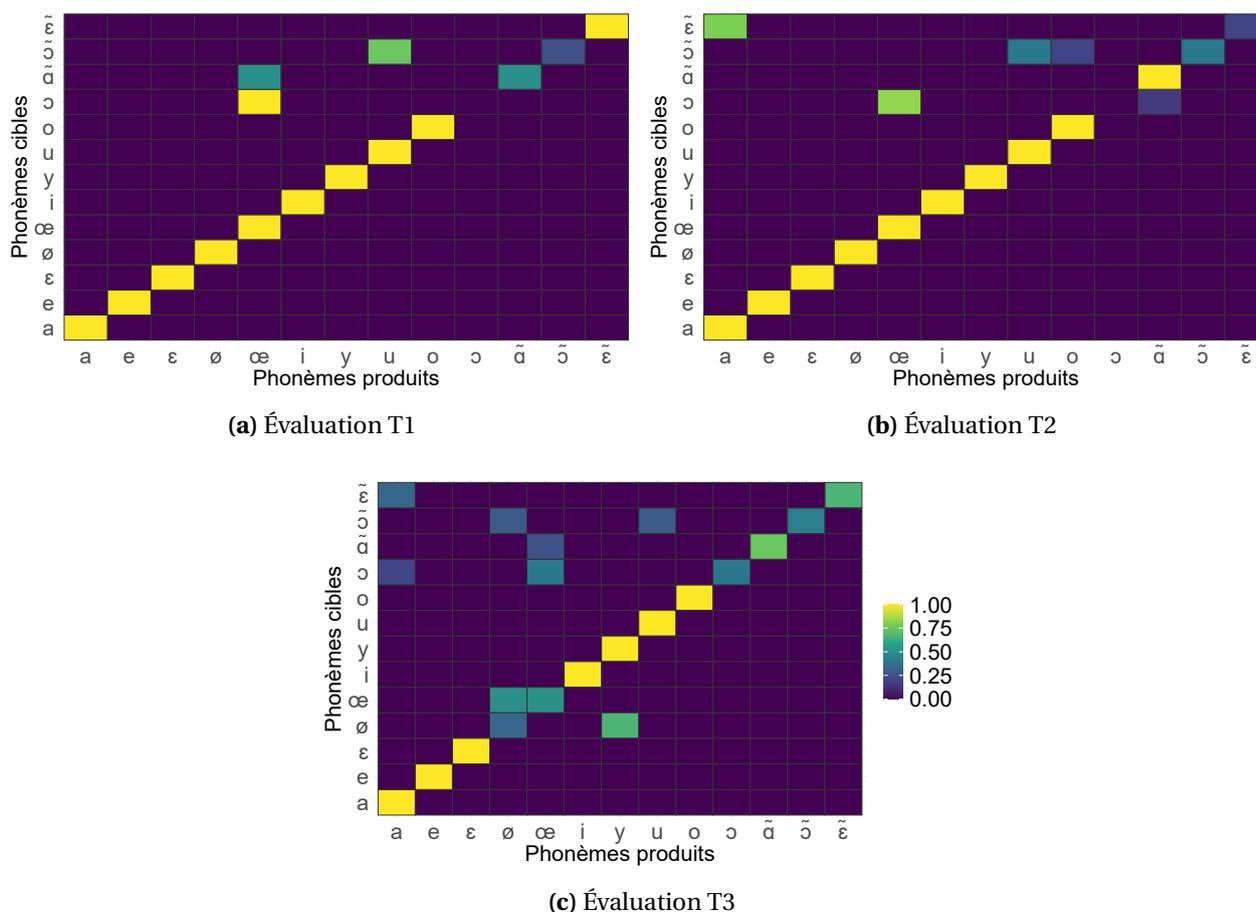


FIGURE 5.4 – Matrices de confusion pour la répétition de voyelles isolées. Ces matrices représentent les phonèmes cibles en fonction des phonèmes produits lors des évaluations T1, T2 et T3. L'échelle de couleur indique la valeur du rapport entre le nombre de fois qu'un phonème est produit sachant le nombre de fois qu'un phonème cible est présenté. Les valeurs plus élevées tendent vers le jaune.

D'après les matrices de confusion pour les voyelles isolées, le patient P4 maîtrise parfaitement les voyelles /a, e, ε, ø, œ, i, y, u, o/ à T1 et à T2. En revanche, les productions de /ø/ et /œ/ semblent se détériorer à T3 avec une substitution par [y] et [ø]. Nous observons aussi une incapacité du patient à produire /ɔ/ à T1 et T2 (substitution par [œ] à T1 et par [œ, ā] à T2). Toutefois, il parvient à produire la voyelle /ɔ/ à T3, même si celle-ci n'est que partiellement maîtrisée (substitution par

5. Un nouveau protocole expérimental pour la rééducation de la parole

[a, œ]). Enfin, les voyelles nasales ne sont pas parfaitement maîtrisées. En effet, nous observons une amélioration pour /ã, õ/, mais une augmentation de la confusion pour /ẽ/ à T2. Tandis qu'à T3, nous remarquons une amélioration pour /ẽ/, mais une augmentation de la confusion pour /ã/.

Pour les consonnes en condition [CV] (Figure 5.5), nous observons de nombreuses persévérations à T1, avec la production de [pa]. De plus, le patient ne parvient pas à produire correctement les consonnes /k, b, d, g, v, z, ʒ/. Les consonnes /z, n, ɲ, ʁ/ ne sont pas produites à T1 (*i.e.*, aucune répétition ou substitution n'est réalisée).

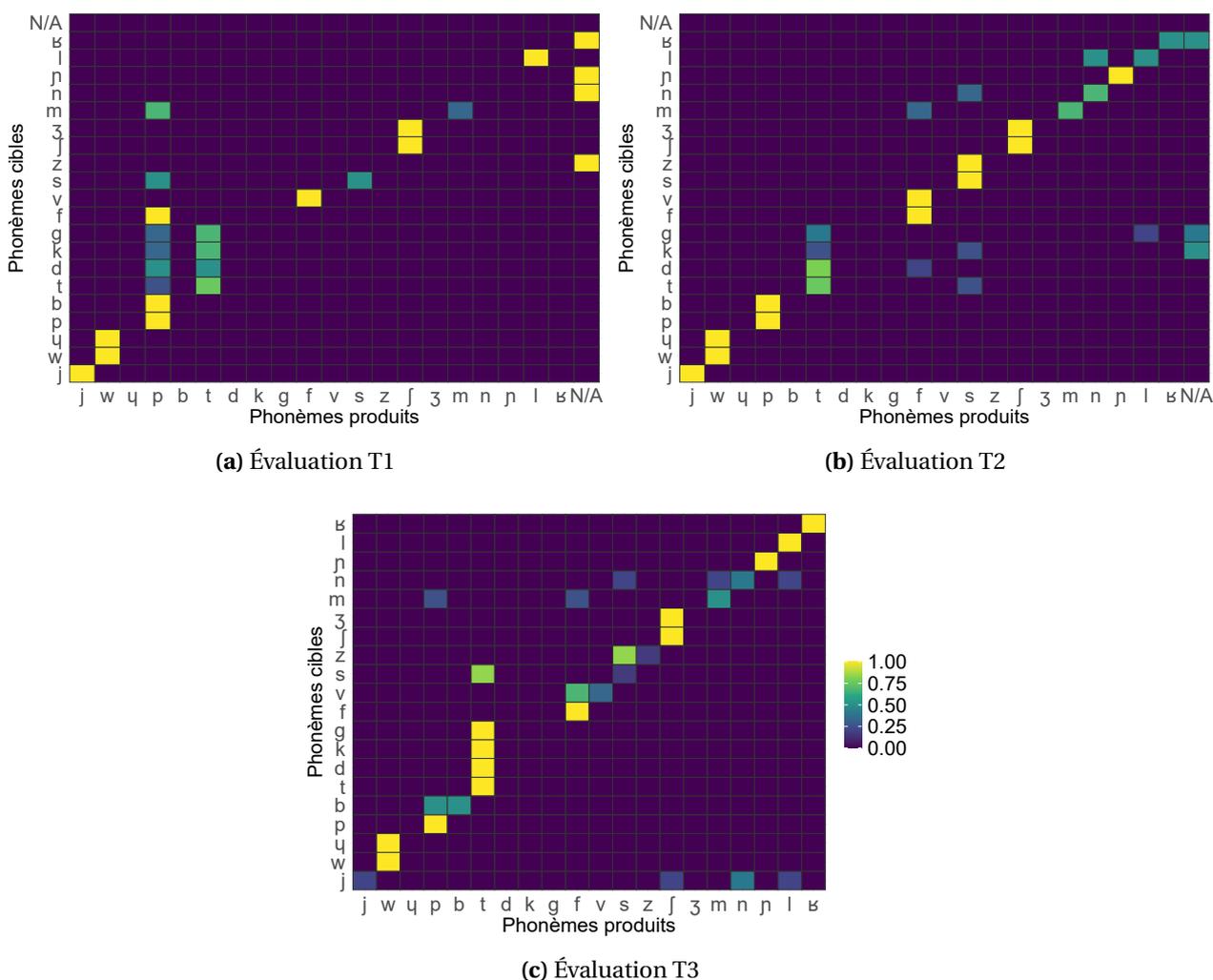


FIGURE 5.5 – Matrices de confusion pour la répétition de consonnes et semi-consonnes en condition [CV]. Ces matrices représentent les phonèmes cibles en fonction des phonèmes produits lors des évaluations T1, T2 et T3. N/A indique qu'aucune production n'est réalisée (*i.e.*, le patient ne parvient pas à répéter). L'échelle de couleur indique la valeur du rapport entre le nombre de fois qu'un phonème est produit sachant le nombre de fois qu'un phonème cible est présenté. Les valeurs plus élevées tendent vers le jaune.

À T2, nous notons de nombreuses améliorations avec une diminution des persévérations, les

consonnes occlusives ou fricatives voisées sont substituées par les consonnes non voisées ayant le même mode et lieu d'articulation (e.g., /b/ est substituée par [p]), ce qui suggère un meilleur contrôle du mode et du lieu d'articulation, mais un défaut dans le contrôle du voisement. À T2, le patient parvient à produire /n, ɲ, β/ mais /n, β/ ne sont pas parfaitement maîtrisées. Enfin, à T3, le patient parvient à produire certaines consonnes voisées, notamment /b, v, z/. Cependant, ces consonnes ne sont pas parfaitement maîtrisées, elles sont substituées par une consonne partageant le même lieu et mode d'articulation : /b/ est substituée par [p], /v/ par [f] et /z/ par [s]. Ceci suggère un meilleur contrôle du mode et lieu d'articulation avec une amélioration du contrôle du voisement, même si celui-ci est encore imparfait. Enfin, l'amélioration se poursuit pour /l, β/. À T2 et T3, le patient ne parvient toujours pas à produire /k, g/, qu'il substitue par [t] le plus souvent, ce qui suggère une maîtrise du mode d'articulation, mais un mauvais positionnement de la langue.

Pour la condition [VCV] (Figure 5.6), les consonnes /f, s, m, ɲ, β/ n'étaient pas produites à T1 (i.e., aucune production ou substitution). Seules les consonnes /p, v, z, ʃ, l/ étaient maîtrisées. À T2, on observe une amélioration par rapport à T1, avec une maîtrise parfaite des consonnes /t, f, s, ɲ/. Ceci reflète la capacité du patient à produire les séquences de type [VCV]. Par ailleurs, nous observons à T2 une amélioration pour les consonnes /ʒ, m, n, β/ mais une augmentation des substitutions pour /v/ (substituée par [f]) et /z/ (substituée par [s, v]). Ces substitutions apparaissant à T2 révèlent un bon contrôle du mode d'articulation et une amélioration du voisement, même si celui-ci est encore imparfait. Enfin, lors de l'évaluation T3, nous constatons une augmentation des persévérations avec les phonèmes /p, t, v/ venant « parasiter » les productions du patient. Néanmoins, le patient parvient à produire les phonèmes /b, d/, même si la maîtrise n'est pas parfaite, ce qui suggère une amélioration du contrôle du voisement.

Analyses acoustiques Les analyses acoustiques ont été réalisées sur la tâche de répétition de syllabes pour le patient ainsi que les participants sains (uniquement les hommes). Les analyses statistiques n'ayant montré aucune différence entre les deux sessions, pour les paramètres acoustiques mesurés chez les participants sains, nous avons regroupé les deux sessions (voir Annexe D, Section 6).

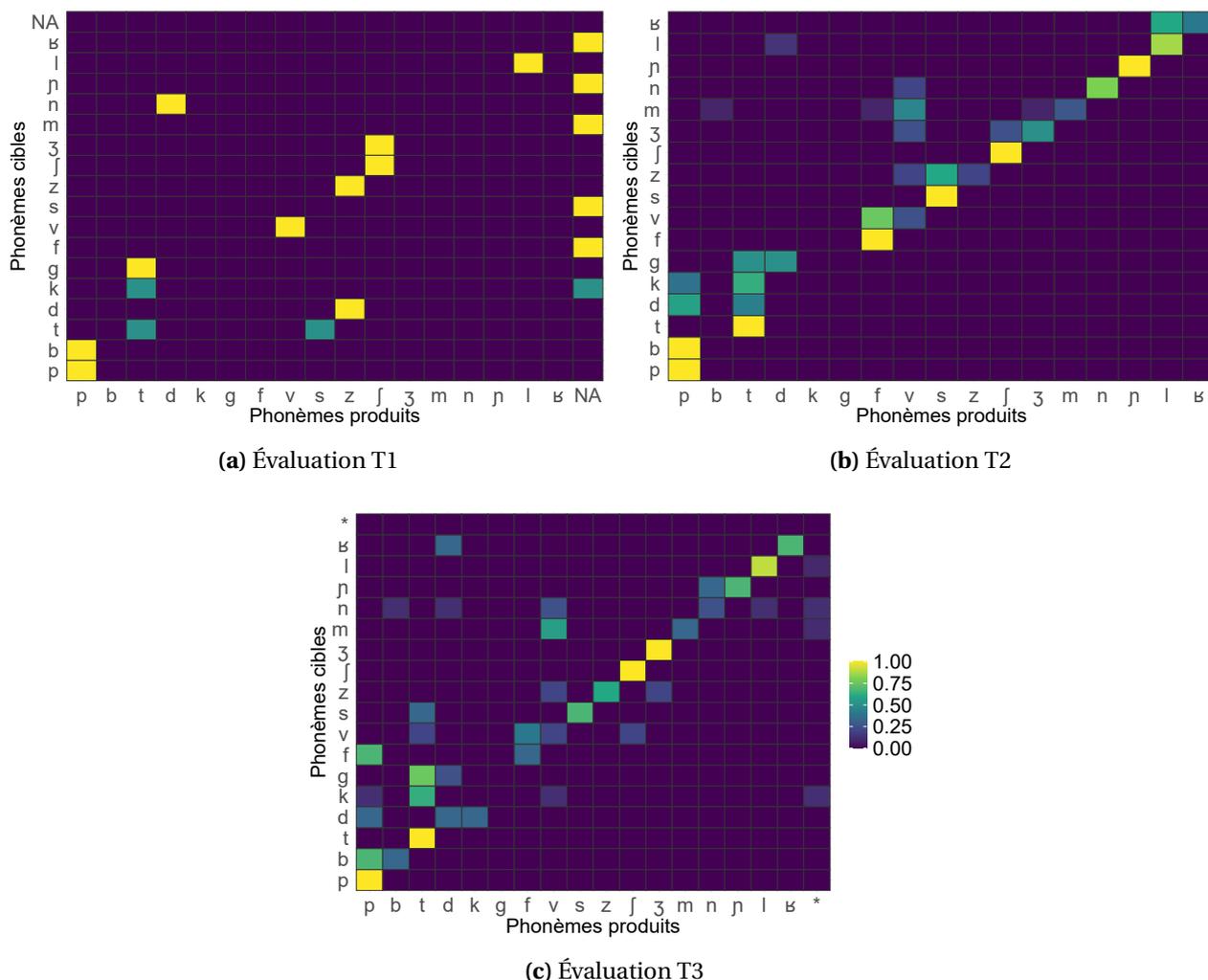


FIGURE 5.6 – Matrices de confusion pour la répétition des consonnes en condition [VCV]. Ces matrices représentent les phonèmes cibles en fonction des phonèmes produits lors des évaluations T1, T2 et T3. N/A indique qu’aucune production n’est réalisée (*i.e.*, le patient ne parvient pas à répéter) et "*" indique qu’une production non identifiable est réalisée. L’échelle de couleur indique la valeur du rapport entre le nombre de fois qu’un phonème est produit sachant le nombre de fois qu’un phonème cible est présenté. Les valeurs plus élevées tendent vers le jaune.

Pour les voyelles orales, les triangles vocaliques, représentant les productions des participants sains et du patient, sont présentés dans la Figure 5.7. De plus, les distances intra-voyelle et les distances intra-voyelle inter-sujets sont présentées dans la Figure 5.8.

En observant les triangles vocaliques, les résultats suggèrent une meilleure distinction entre /e/ et /ɛ/, entre /o/ et /u/ et entre /ø/ et /œ/ avec une augmentation de la distance inter-voyelles entre T1 et T2/T3 (Figure 5.7). À T1, il semble également que la langue soit placée plus en arrière (valeur de F2 plus faible) pour les voyelles antérieures /i, e, ɛ/ et plus haute (valeur de F1 plus

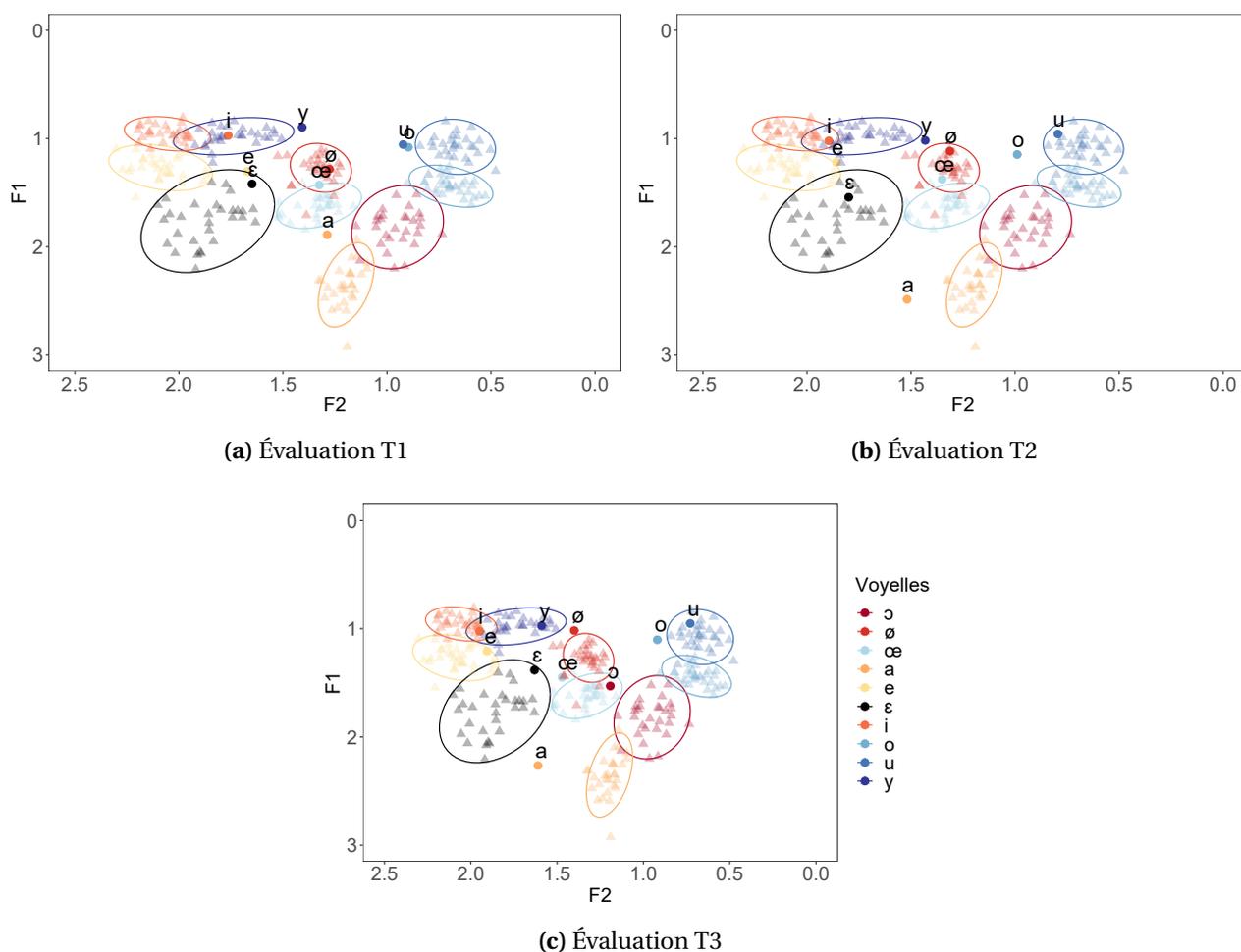


FIGURE 5.7 – Triangles vocaliques représentant F1 en fonction de F2 pour les voyelles orales /i, e, ε, y, œ, ø, u, o, ɔ, a/. Les valeurs de formants sont normalisées. Sur les trois graphiques, les ellipses et les points triangulaires représentent la distribution des voyelles produites pas les participants sains dans l'espace F1-F2. Tandis que, les points ronds représentent la production ou le barycentre des productions du patient pour les différentes voyelles, lors des évaluations T1, T2 et T3.

faible) pour /a/, par rapport aux participants sains. Cependant, le triangle « s'élargit » à T2 avec un positionnement de la langue plus antérieur pour les voyelles /i, e, ε/ (augmentation de F2) et plus bas pour /a/ (augmentation de F1). Cet élargissement est globalement maintenu à T3.

Les distances intra-voyelle inter-sujets ont tendance à diminuer pour les voyelles /a, e, ε, i, y, o/ entre T1 et T2 (voir Figure 5.8), suggérant une production plus proche des participants sains et donc un meilleur positionnement des articulateurs (position de la langue et forme des lèvres). Cette distance diminue légèrement entre T2 et T3 pour /e, i, o/ et de façon plus importante pour /y, u/, mais elle augmente pour /ε/, suggérant un meilleur positionnement des articulateurs (positionnement antérieur de la langue et arrondissement des lèvres) seulement pour certaines voyelles. Cependant,

pour /ø/, la distance intra-voyelle inter-sujets augmente de T1 à T3 et elle augmente également de T2 à T3 pour /œ/, suggérant une maîtrise encore imparfaite de l'arrondissement des lèvres.

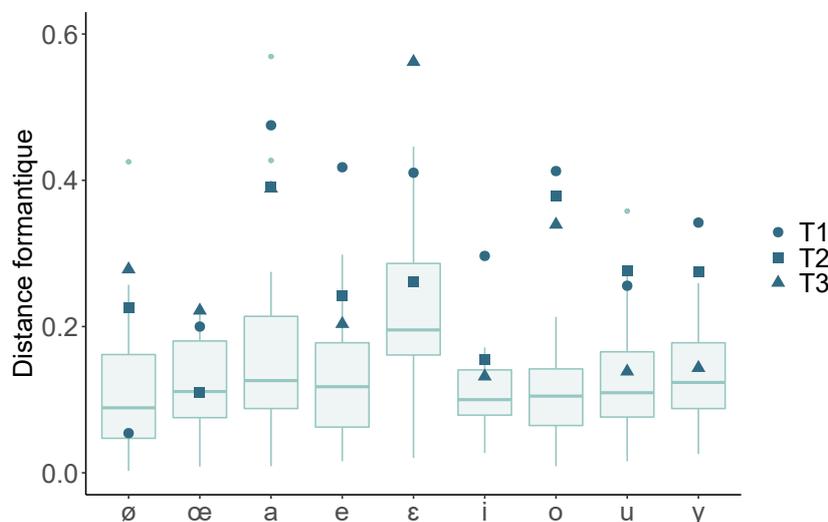


FIGURE 5.8 – Distance intra-voyelle pour les participants sains et intra-voyelle inter-sujets entre les productions des participants sains et du patient. Les *boxplots* représentent la distance intra-voyelle entre les productions des participants sains et le barycentre, pour chaque voyelle. La distance intra-voyelle inter-sujets entre la production ou le barycentre des productions du patient et le barycentre des productions des participants sains, pour chaque voyelle, est représentée à T1 (rond), à T2 (carré) et à T3 (triangle).

Les consonnes occlusives sont caractérisées par le VOT (voir Tableau 5.7). Plus spécifiquement, le VOT est positif (0,024 s) pour les occlusives non voisées et négatif (−0,089 s) pour les voisées. Pour le patient, nous observons une diminution de la valeur de VOT pour les occlusives non voisées de T1 à T3 (de 0,041 s à 0,023 s) avec un VOT qui se rapproche de la valeur moyenne observée chez les participants sains (voir Tableau 5.7).

Concernant les occlusives voisées, le patient est incapable de les produire à T1 et T2 et il produit une seule occlusive voisée à T3 (la consonne bilabiale /b/). Ce VOT est plus long chez

Tableau 5.7 – Valeurs de VOT obtenues pour les consonnes occlusives produites par le patient et les participants sains. Les valeurs sont déterminées à T1, T2 et T3 pour le patient. On distingue les occlusives voisées /b, d, g/ et non voisées /p, t, k/.

	Patient P4			Participants sains
	T1	T2	T3	
Non voisées	0,041 (0,012)	0,033 (0,012)	0,023 (0,010)	0,024 (0,011)
Voisées	N/A	N/A	−0,15	−0,089 (0,045)

Les données sont présentées sous forme de moyenne, avec l'écart type associé, lorsqu'il est possible de le calculer (*i.e.*, lorsqu'il y a plus d'une valeur). On note N/A lorsque les consonnes ne sont pas produites par le patient.

le patient ($-0,15$ s) par rapport à la valeur moyenne observée chez les participants sains. Ces résultats suggèrent une amélioration du contrôle de la dynamique des articulateurs lors de la production des occlusives non voisées.

Enfin, pour les consonnes fricatives, les valeurs des moments spectraux (CG et ET) pour les participants sains et le patient sont représentées dans la Figure 5.9. Pour le CG, on retrouve l'ordre alvéolaire \approx labiodentale $>$ post-alvéolaire, ce qui met en évidence la distinction faite entre l'alvéolaire /s/ et la post-alvéolaire /ʃ/. Pour l'ET on retrouve l'ordre labiodentale $>$ alvéolaire $>$ post-alvéolaire, ce qui met en évidence la distinction faite entre la labiodentale /f/ et l'alvéolaire /s/.

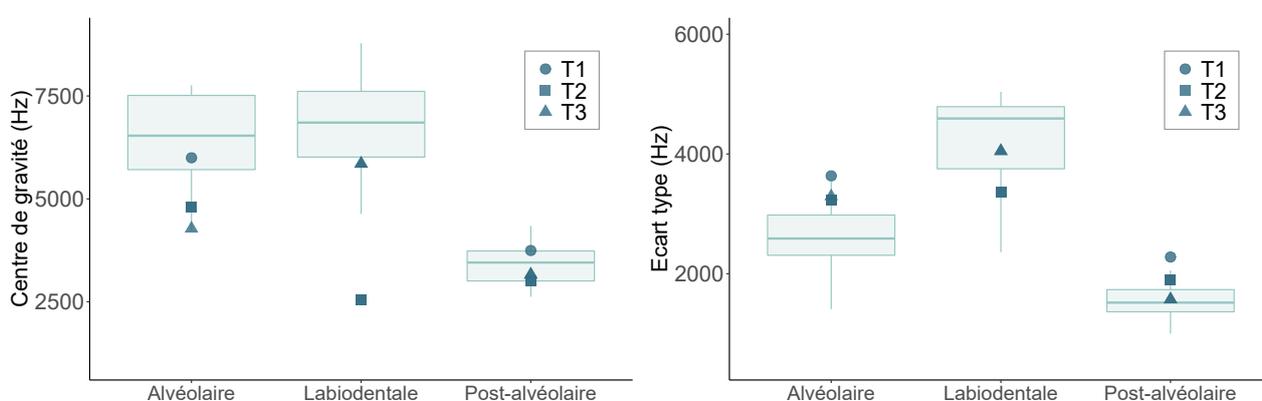


FIGURE 5.9 – Moments spectraux obtenus lors de la répétition des consonnes fricatives non voisées, pour les participants sains et le patient. Le CG est représenté en haut et l'ET en bas. Les consonnes sont séparées selon le lieu d'articulation : alvéolaire /s/, labiodentale /f/ et post-alvéolaire /ʃ/. Les *boxplots* représentent les valeurs de CG et ET pour les participants sains et les valeurs moyennes pour le patient sont représentées à T1 (rond), T2 (carré) et T3 (triangle).

Pour le patient et les participants sains, les valeurs des moments spectraux (CG et ET) ainsi que les écarts (ΔCG et ΔET) entre les CG ou les ET des consonnes fricatives alvéolaire, labiodentale et post-alvéolaire sont présentés dans le Tableau 5.8. La moyenne des CG et ET du patient à T1, T2 et T3 est également représentée dans la Figure 5.9. Les valeurs du CG sont dans l'ordre attendu avec un CG de l'alvéolaire /s/ supérieur à celui de la post-alvéolaire /ʃ/, à T1, T2 et T3, ce qui suggère une distinction entre /s/ et /ʃ/. Cependant, l'écart entre ces deux valeurs (mesuré par $\Delta CG_{\text{alvéolaire-post-alvéolaire}}$) diminue de T1 à T3 (de 2252,82 Hz à 1118,31 Hz). Concernant l'ET, l'écart entre les consonnes alvéolaire et labiodentale est faible ($\Delta ET_{\text{alvéolaire-labiodentale}} = 135,86$ Hz) bien que l'ET de la labiodentale /f/ soit légèrement supérieur à celui de l'alvéolaire /s/ à T2. À T3, la valeur de $\Delta ET_{\text{alvéolaire-labiodentale}}$ augmente (755,77 Hz), ce qui signifie que le patient distingue mieux /f/ et /s/. On note que le patient ne parvient pas à produire la consonne labiodentale /f/ à T1

Tableau 5.8 – Valeurs moyennes des centre de gravité (CG) et écart type (ET) spectraux du patient et des participants sains, obtenues lors de la répétition des consonnes fricatives non voisées. Les consonnes sont séparées selon le lieu d’articulation : alvéolaire /s/, labiodentale /f/ et post-alvéolaire /ʃ/. Les valeurs sont présentées à T1, T2 et T3 pour le patient. Les écarts (Δ) entre les CG et entre les ET des différentes consonnes sont également présentées, en valeur absolue, pour le patient et les sujet sains.

		Patient P4			Participants sains
		T1	T2	T3	
CG (en Hz)	Alvéolaire	5 998,35	4 793,20 (1 237,49)	4 278,23	6 434,30 (1 094,25)
	Post-alvéolaire	3 745,53	3 013,18 (35,28)	3 159,92 (271,57)	3 422,89 (501,08)
	Labiodentale	N/A	2 560,27 (1 791,22)	5 853,45 (615,81)	6 654,25 (1 206,74)
	$\Delta CG_{\text{alvéolaire} - \text{post-alvéolaire}}$	2 252,82	1 780,02	1 118,31	3 011,41
	$\Delta CG_{\text{alvéolaire} - \text{labiodentale}}$	N/A	2 232,93	1 575,22	216,30
	$\Delta CG_{\text{labiodentale} - \text{post-alvéolaire}}$	N/A	452,91	2 693,52	3 227,71
ET (en Hz)	Alvéolaire	3 634,41	3 231,79 (47,96)	3 292,93	2 624,41 (597,00)
	Post-alvéolaire	2 279,21	1 890,32 (53,71)	1 572,07 (53,34)	1 543,99 (241,83)
	Labiodentale	N/A	3 367,65 (1 279,82)	4 048,70 (196,24)	4 221,94 (729,84)
	$\Delta ET_{\text{alvéolaire} - \text{post-alvéolaire}}$	1 355,19	1 341,48	1 720,86	1 080,41
	$\Delta ET_{\text{alvéolaire} - \text{labiodentale}}$	N/A	135,86	755,77	1 600,85
	$\Delta ET_{\text{labiodentale} - \text{post-alvéolaire}}$	N/A	1 477,34	2 476,63	2 681,27

La valeur moyenne des moments spectraux est présentée avec, entre parenthèses, l’écart type (au sens statistique) associé, lorsqu’il est possible de le calculer (*i.e.*, lorsqu’il y a plus d’une valeur). N/A représente l’absence de données, *i.e.*, lorsque le patient n’est pas capable de produire les consonnes.

2.2.3 IRMf de tâche

Participants sains La Figure 5.10 présente les activations pour les participants sains lors des trois tâches à T1 (pour le détail des activations à T1 et à T2, voir Tableau D.4, Annexe D) et le Tableau 5.9 présente les contrastes T1 *vs.* T2 pour les trois tâches chez les participants sains.

La tâche de dénomination réalisée à T1 par les participants sains implique un réseau fronto-temporo-parietal gauche, avec le recrutement du GFI, de l’AMS, du LPI, du thalamus (noyau geniculé latéral). Cette tâche implique également l’hippocampe, le GSM, l’insula et le lobule X du cervelet à droite. Lors de la DR, les participants sains recrutent des régions bilatéralement. À droite, cette tâche implique l’insula, le précuneus, le GSM, les gyri précentral et postcentral, l’AMS et le lobule IX du cervelet. Tandis qu’à gauche, elle implique l’AMS, le gyrus précentral, le GFI-tri et le thalamus (pulvinar médial). Enfin, lors de la RS, on observe des activations au niveau du GFI-op et du pallidum bilatéralement, ainsi que de l’AMS à gauche et du GTS à droite. Notons que, pour les trois tâches, il y a des activations au niveau occipital, en lien avec la stimulation visuelle²¹.

21. Lors de la dénomination et de la DR, les stimuli sont présentés en modalité visuelle, il s’agit d’images. Lors de la RS, un pictogramme est présent, indiquant que le participant doit répéter, ensuite une croix rouge apparaît lui demandant d’arrêter de répéter, juste avant que l’acquisition ne démarre. Nous rappelons que la tâche de RS est effectuée en *sparse sampling*, c’est-à-dire que l’acquisition ne démarre qu’après la production à voix haute. La croix rouge indique donc au participant qu’il ne doit plus répéter, afin de limiter les mouvements lors de l’acquisition.

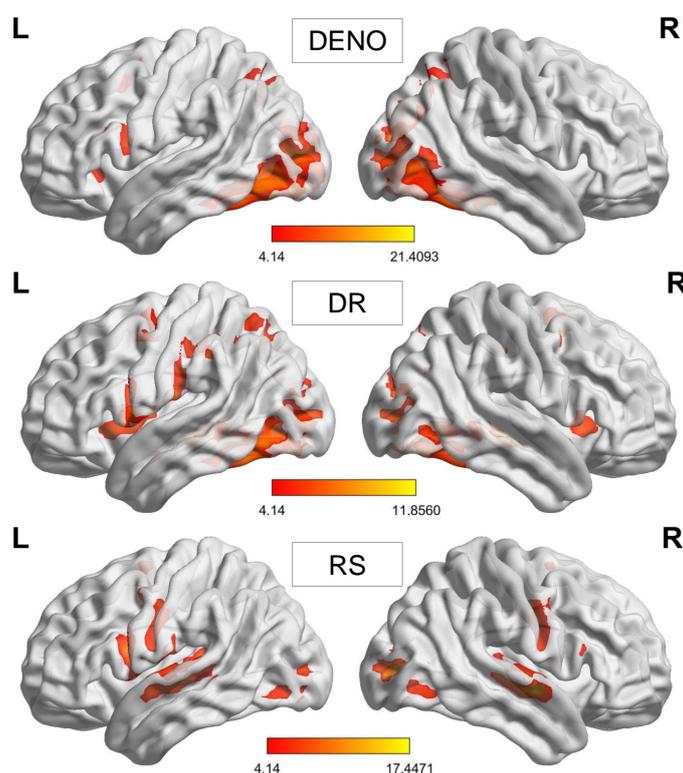


FIGURE 5.10 – Activations cérébrales obtenues pour les participants sains lors des tâches de dénomination (DENO), de détection de rimes (DR) et de répétition de syllabes (RS) réalisées à T1. L'hémisphère gauche est représenté à gauche (L, *left*) et l'hémisphère droit à droite (R, *right*).

Tableau 5.9 – Contrastes entre T1 et T2 pour les activations cérébrales obtenues lors des tâches de dénomination (DENO), détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), pour les participants sains. Nous présentons les résultats des contrastes T1 *vs.* T2, c'est à dire T1-T2 et T2-T1.

		T1-T2					T2-T1					
Régions (AAL)		k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t	Régions (AAL)	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t
DENO	Pas de <i>cluster</i> supérieur au seuil						Pas de <i>cluster</i> supérieur au seuil					
DR	Paracentral Lobule L	10	-12	-34	68	6.79						
	Frontal Sup 2 R	18	21	5	62	5.45						
RS	Pas de <i>cluster</i> supérieur au seuil						Temporal Mid R	86	57	-31	-4	7.41
							Temporal Sup L	50	-39	-25	2	6.38
							Temporal Mid L	19	-60	-40	2	5.97
							Rolandic Oper L	10	-36	-37	17	5.65
							Parietal Inf L	25	-54	-49	35	5.43
							Calcarine L	11	-27	-61	8	4.88
							SupraMarginal R	17	63	-37	32	4.75
						Insula R	11	45	-10	-1	4.70	

Seuls les pics d'activation les plus significatifs au niveau de chaque groupe de voxels activés (k voxels) sont mentionnés.

Le nom des régions (issues de l'atlas AAL; Tzourio-Mazoyer et al., 2002), les coordonnées MNI (x, y, z) et les valeurs de t (pour $p < 0,001$ non corrigé, $k \geq 10$) sont fournis.

Lorsque l'on compare les deux sessions (T1 et T2) pour les participants sains, on constate qu'il n'y a pas de différence entre T1 et T2 lors de la dénomination (voir Tableau 5.9). Lors de

la DR, il semble qu'il y ait une activation plus importante à T1 au niveau du GFS droit et du lobule paracentral gauche. Enfin, lors de la RS, on observe une activation plus importante à T2 au niveau du GTM, du GSM et de l'insula à droite et du GTS, du GTM, du LPI, de l'opercule rolandique et de la fissure calcarine à gauche.

Patient P4 Concernant le patient, la Figure 5.11 présente les activations observées lors des trois tâches à T1. Le détail de ces activations à T1 ainsi qu'à T2 est présenté dans le Tableau D.5 (Annexe D).

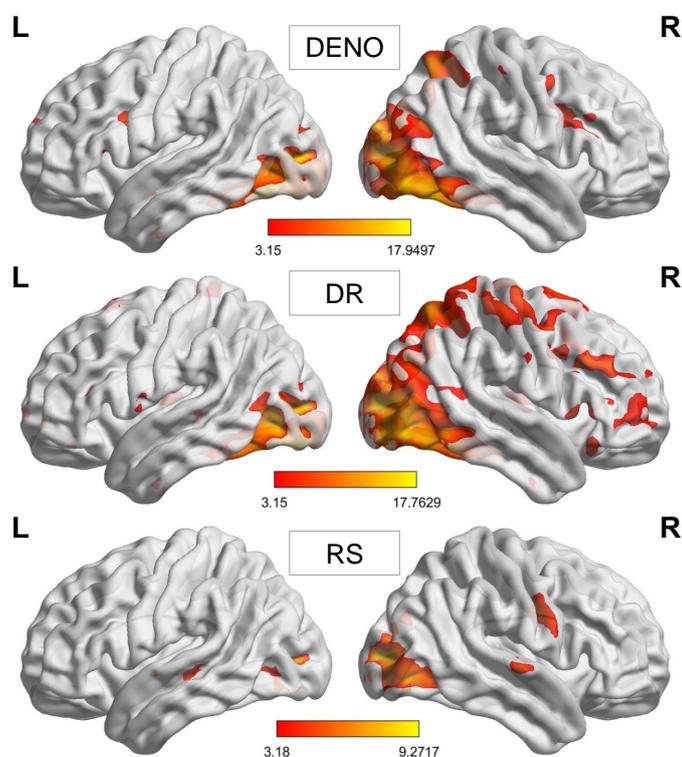


FIGURE 5.11 – Activations cérébrales obtenues pour le patient P4 lors des tâches de dénomination (DENO), de détection de rimes (DR) et de répétition de syllabes (RS) réalisées à T1. L'hémisphère gauche est représenté à gauche (L, left) et l'hémisphère droit à droite (R, right).

À T1, lors de la dénomination, nous observons une implication du GFI, de l'AMS, du gyrus postcentral, du thalamus (noyau géniculé latéral), de l'hippocampe et du GTS à droite et du GFI, du GFS, du GFM et de l'amygdale à gauche. Le lobule VII-b du cervelet est également impliqué dans cette tâche bilatéralement. Lors de la DR, nous avons mis en évidence une implication du GFS médian, du GFI, du GFM, de l'opercule rolandique, du gyrus précentral, du gyrus orbitaire médial

et du pôle temporal supérieur à gauche. À droite, cette tâche de DR implique le gyrus postcentral, le GTS, le GFS médian et le cortex cingulaire antérieur. Enfin, la tâche de RS, implique le gyrus postcentral et le GTS à droite et le GTM, le GTI et le GTS à gauche. Notons que, ces trois tâches impliquent des régions au niveau occipital, en lien avec la présentation visuelle des stimuli (dans le cas de la dénomination et la DR) ou de la stimulation visuelle (dans le cas de la RS).

Lors de la dénomination, à T2, on observe un recrutement supplémentaire du gyrus postcentral, du GTM, du GFS médian et de l'AMS à droite et du LPS et du gyrus précentral à gauche (voir Tableau 5.10). Lors de la DR, à T2, on observe un recrutement supplémentaire du GFM à gauche. Lors des tâches de DR et dénomination, on observe également quelques activations supplémentaires au niveau occipital en lien avec le stimulus visuel. Enfin, lors de la RS, on n'observe aucun *cluster* activé de façon supplémentaire à T2, par rapport à T1.

Tableau 5.10 – Contrastes entre T1 et T2 pour les activations cérébrales obtenues lors des tâches de dénomination (DENO), détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), pour le patient P4. Nous présentons les résultats des contrastes T1 *vs.* T2, c'est à dire T1–T2 et T2–T1.

	T1–T2					T2–T1						
	Régions (AAL)	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t	Régions (AAL)	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t
DENO	Occipital Mid L	33	-27	-91	2	6,88	Occipital Mid L	72	-27	-76	8	5,86
	Cerebellum 6 R	101	39	-64	-22	5,79	Fusiform R	37	27	-76	-1	5,59
	Occipital Mid R	19	33	-91	8	5,25	Postcentral R	43	30	-46	62	5,25
	Calcarine R	15	15	-97	-4	4,51	Temporal Mid R	33	45	-43	-7	4,88
	Cerebellum 6 L	51	-9	-76	-13	4,27	Occipital Sup R	29	36	-76	44	4,88
	Lingual R	20	12	-73	10	4,21	Occipital Sup R	16	24	-82	32	4,44
	Hippocampus R	11	36	-10	-19	4,06	Frontal Sup Medial R	28	9	59	29	4,21
	Hippocampus L	19	-33	-10	-19	3,94	Supp Motor Area R	38	12	20	65	4,21
	Frontal Inf Oper R	12	46	5	26	3,86	Calcarine L	13	-9	-70	5	4,17
							Parietal Sup L	21	-18	-70	44	4,09
DR							Parietal Sup L	19	-21	-46	62	4,01
							Fusiform L	25	-33	-25	-25	3,76
							Precentral L	25	-36	-31	62	3,69
	Occipital Sup R	37	21	-94	23	7,51	Cuneus R	25	18	-91	11	6,34
	Occipital Mid L	41	-27	-85	-1	6,35	Occipital Mid L	30	-36	-79	5	5,26
	Frontal Sup 2 R	50	15	-1	77	5,84	Fusiform R	38	27	-76	-1	4,57
	Cerebellum 6 L	143	-27	-67	-19	4,69	Frontal Mid 2 L	17	-36	50	17	4,00
	Parietal Sup R	51	21	-49	77	4,6						
	Parietal Sup R	19	24	-70	59	4,59						
	Occipital Mid R	11	33	-82	35	4,58						
Occipital Mid R	11	45	-82	5	4,57							
Lingual L	17	-9	-91	-13	4,55							
Postcentral L	13	-15	-34	71	3,69							
Parietal Sup R	12	18	-82	47	3,66							
Precuneus L	10	0	-76	44	3,49							
RS	Temporal Mid L	65	-45	-22	-10	3,96	Pas de <i>cluster</i> supérieur au seuil					
	Occipital Mid R	12	30	-82	35	3,92						

Seuls les pics d'activation les plus significatifs au niveau de chaque groupe de voxels activés (k voxels) sont mentionnés.

Le nom des régions (issues de l'atlas AAL; Tzourio-Mazoyer et al., 2002), les coordonnées MNI (x, y, z) et les valeurs de t (pour $p < 0,001$ non corrigé, $k \geq 10$) sont fournis.

2.3 Discussion

Dans cette étude préliminaire, nous avons évalué l'effet de la rééducation renforcée, par rapport à la rééducation orthophonique classique seule, à l'aide du protocole SEMO, chez un patient présentant une aphasie non fluente en phase chronique. Dans le cadre de ce protocole, le patient a suivi un programme de rééducation renforcée (*i.e.*, le logiciel *Ultraspeech player* en complément de la rééducation orthophonique classique) puis une rééducation simple (*i.e.*, la rééducation orthophonique classique seule). Afin d'évaluer l'effet de ces deux programmes et de les comparer, le patient a eu plusieurs évaluations multimodales (T1, T2 et T3). Nous avons également récolté des données pour un groupe de participants sains. Notons qu'il s'agit ici de résultats préliminaires que nous discuterons de façon qualitative ou descriptive. Toutefois, ces résultats sont encourageants et mettent en avant : (i) l'effet bénéfique de la rééducation augmentée (le logiciel *Ultraspeech player*); (ii) l'intérêt d'une évaluation multimodale; et (iii) la quantité importante de données qu'il est possible d'extraire de ces évaluations.

Le patient P4 présentait une lésion fronto-temporo-pariétale (voir Figure 5.2) associée à une aphasie non fluente caractérisée principalement par des troubles de production de la parole. Ce patient présentait une atteinte cognitive légère avec des troubles légers en mémorisation et en dénomination et des troubles sévères de la fluence verbale (voir Tableau 5.3). Notons que, le rappel est fortement entravé par les capacités réduites de production orale. Le fonctionnement exécutif, l'orientation, le calcul et l'attention, quant à eux, sont normaux. Lors de l'évaluation du langage (voir Tableau 5.4), les capacités de discrimination phonémique sont globalement maintenues, on observe une légère amélioration pour les praxies bucco-linguo-faciales de T1 à T3 et les résultats sont plus mitigés pour la répétition de mots avec une faible augmentation, de T1 à T2, puis une diminution de T2 à T3. Cependant, les performances du patient s'améliorent lors de la répétition de syllabes et la dénomination d'images. Plus spécifiquement, lors de la dénomination, on observe une amélioration progressive de T1 à T3, tandis que pour la répétition de syllabes, l'amélioration semble plus importante entre T1 et T2, suggérant un effet bénéfique de la rééducation renforcée.

L'évaluation conjointe des performances, des erreurs et des matrices de confusion semble montrer une amélioration plus importante lors de la répétition des consonnes en condition [CV] et [VCV], entre T1 et T2. Ceci est mis en évidence par une amélioration des performances plus

importante (Tableau 5.4), une diminution des erreurs (Tableaux 5.5 et 5.6) et une diminution des substitutions ou des délétions (Figures 5.6 et 5.5).

Plus spécifiquement, en condition [VCV], les consonnes ne sont pas produites, pour la plupart, à T1 et on remarque une augmentation des productions à T2 avec une diminution importante des délétions et des épenthèses. Ceci suggère que le patient parvient à produire des séquences de type [VCV], au lieu de [CV] ou [VC] (*i.e.*, cas des délétions) ou [CVCV] (*i.e.*, cas des épenthèses) qui étaient produites à T1. Cette amélioration est plus importante entre T1 et T2, suggérant un effet supérieur de la rééducation renforcée. Cette difficulté lors de la production des séquences comportant plusieurs phonèmes est associée à la difficulté d'initiation et aux troubles de coarticulation dans l'aphasie (Katz, 1990 ; Trost & Canter, 1974). De plus, à T2, on remarque une meilleure maîtrise du mode d'articulation (degré de constriction), avec peu de confusion entre les occlusives et les fricatives. De même, le lieu d'articulation (position de la langue) pour les consonnes fricatives semble mieux maîtrisé. Ceci peut être expliqué au travers des erreurs de voisement. En effet, lorsque le patient dévoise les consonnes, le lieu ainsi que le mode d'articulation sont corrects (*e.g.*, production de [f] au lieu de /v/).

Par ailleurs, pour les consonnes en condition [CV], on remarque un meilleur contrôle du mode et du lieu d'articulation entre T1 et T2, avec une diminution de l'occlusion des fricatives et un meilleur positionnement de la langue, notamment lors des erreurs de voisement. De même que précédemment, lors de ces erreurs, le mode et le lieu d'articulation sont corrects, mais le voisement est incorrect (*e.g.*, production de [t] au lieu de /d/ ou [s] au lieu de /z/). On note que le patient présente un défaut dans le contrôle du voisement à T1 et T2, ce qui est retrouvé dans la littérature (Kurowski et al., 2007, 2003 ; Nespoulous et al., 2013 ; Valdois & Nespoulous, 1994). Nous retrouvons également une plus forte prévalence des erreurs de dévoisement, par rapport aux erreurs de voisement (Nespoulous et al., 2013). Cependant, le patient s'améliore pour certaines consonnes à T3, en condition [CV] et [VCV], avec une diminution des erreurs de dévoisement. Cette amélioration suggère une amélioration de la coordination entre les articulateurs laryngés et supra-laryngés.

Enfin, acoustiquement, on constate une amélioration de la dynamique et de la coordination des articulateurs pour les occlusives non voisées, avec un VOT qui se rapproche des participants sains (Figure 5.7 et Tableau 5.7). Les fricatives /s/ et /ʃ/, d'une part, et /f/ et /s/, d'autre part,

semblent bien être distinctes acoustiquement (valeurs de CG et ET distinctes; Figure 5.9 et Tableau 5.8). Cependant, l'amélioration de cette distinction est visible uniquement pour /f/ et /s/ à T3 (augmentation de $\Delta ET_{\text{alvéolaire-labiodentale}}$).

Pour les voyelles, les matrices de confusion mettent en évidence de bonnes performances, à T1, excepté pour les voyelles /ɔ, ã, õ/ (Figure 5.4). Cependant, le PPC pour les voyelles se situe autour de 50% lors des trois évaluations, avec une augmentation entre T1 et T2 et une légère diminution de T2 à T3 (Tableau 5.4). Ces deux mesures n'évaluent pas de la même façon la « justesse » des productions. En effet, le PPC et les matrices de confusion permettent de rendre compte, tous les deux, des erreurs de substitutions et délétions. Cependant, seul le PPC peut refléter les erreurs de type épenthèses. Notons que, dans le cas des voyelles, le pourcentage d'épenthèses augmente de T1 à T3 (avec 16,67% à T1, 17,02% à T2 et 25,45% à T3), ce qui induit une faible valeur de PPC par rapport aux productions correctes visibles dans les matrices de confusion. L'analyse conjointe du PPC et des matrices de confusion permet donc une meilleure évaluation des performances du patient avec une évaluation de ses capacités de production correctes au niveau d'une syllabe donnée (avec le PPC) et une mesure sur le phonème cible (avec les matrices de confusion).

L'analyse acoustique réalisée, pour les voyelles, nous montre que le patient se rapproche acoustiquement des productions des participants sains (Figure 5.8). De plus, le positionnement de sa langue pour les voyelles antérieures /i, e, ε/ et pour /a/ (extrémité basse du triangle) s'améliore, avec un « élargissement » du triangle (augmentation de F2 pour /a/ et de F1 pour /i, e, ε/; Figure 5.7). Ainsi, ces résultats suggèrent un meilleur positionnement de la langue, ainsi qu'un meilleur contrôle de l'arrondissement des lèvres entre T1 et T2. Notons toutefois que ce contrôle est encore imparfait, notamment pour /ø/ et /œ/. Cette amélioration du contrôle des articulateurs est maintenue à T3.

Ces différents résultats suggèrent une amélioration au niveau des consonnes, notamment les occlusives et les fricatives, avec un meilleur positionnement de la langue (lieu d'articulation), un meilleur contrôle du mode d'articulation (degré de constriction), une amélioration de la coarticulation permettant la production des séquences [VCV] qui n'étaient pas ou peu produites à T1 et une amélioration de la coordination et de la dynamique des articulateurs qui se traduit acoustiquement pour les occlusives non voisées (mesure du VOT) et pour les fricatives non voisées (mesure des moments spectraux). Ces différentes améliorations font suite à la rééducation renforcée, c'est-à-dire avec un entraînement à l'aide du logiciel *Ultraspeech-player* qui permet de visualiser

les articulateurs de la parole tels que la langue (habituellement non visible) ou les lèvres. Précisons que, les séquences de type [VCV] sont principalement entraînées à l'aide du logiciel. Ainsi, selon nos hypothèses, il semblerait que la visualisation des mouvements articulatoires cibles permette au patient de corriger ses propres mouvements lors de la production des syllabes.

Ces différentes modifications au niveau langagier peuvent être mises en lien avec les mécanismes de plasticité induite par la rééducation. Notons toutefois que ce patient est en phase chronique, en particulier à plus de 2,5 ans post-AVC, ce qui suggère que des mécanismes de plasticité ont déjà été mis en place. En effet, en phase chronique, les mécanismes de perturbation et de résolution sont terminés (*i.e.*, la reperfusion des tissus hypoperfusés et la résolution du *diaschisis*, induisant une réactivation ou une hyper-activation des régions épargnées bilatéralement et une modulation de la connectivité fonctionnelle) (voir Aghaz et al., 2018 ; Hartwigsen & Saur, 2019 ; Kiran & Thompson, 2019 ; Saur et al., 2006 ; Stefaniak et al., 2020 ; Vochin et al., 2022). C'est principalement la réorganisation des réseaux, permettant aux réseaux épargnés de prendre en charge les fonctions des régions lésées, qui domine cette phase (Hartwigsen & Saur, 2019). Selon les études, différents mécanismes peuvent survenir en phase chronique, sur la base de trois hypothèses : l'hypothèse péri-lésionnelle qui suggère que la récupération est associée à une reconstitution du système langagier domaine-spécifique impliquant les tissus autour de la lésion ; l'hypothèse du transfert de latéralité (« *laterality-shift* ») qui suggère que la récupération est associée au transfert des fonctions vers les régions homotopiques dans l'hémisphère controlatéral ; l'hypothèse de la désinhibition qui suggère que la levée de l'inhibition transcallosale induit le recrutement de régions au niveau de l'hémisphère droit (HD), qui contribuent peu à la récupération et peuvent induire une inhibition des tissus non lésés à gauche (voir Geranmayeh et al., 2014 ; Hamilton et al., 2011 ; Kiran & Thompson, 2019). Par ailleurs, ces mécanismes de réorganisation, avec le recrutement des régions à gauche ou à droite, dépendent de facteurs tels que la taille et la localisation de la lésion, les processus langagiers étudiés, le type de thérapie ou encore le type de troubles (Hamilton et al., 2011 ; Hartwigsen & Saur, 2019). Notons que dans cette discussion, étant donné la faible taille de notre groupe de participants sains, nous ne réaliserons pas de description détaillée des réseaux du langage chez les participants sains âgés, mais nous comparerons qualitativement²² les régions recrutées durant les tâches en IRMf, chez le patient et chez les participants sains. Par ailleurs, nous commenterons principalement les

22. Nous parlons de comparaison « qualitative » dans le sens où nous n'avons pas fait de comparaison statistique ou de contraste patient *vs.* participants sains.

régions impliquées dans les processus langagiers et pas ou peu les aires visuelles qui sont présentes, en lien avec la stimulation visuelle dans les tâches (*i.e.*, présence d'un stimulus visuel). Dans cette discussion des résultats, nous gardons à l'esprit qu'il s'agit de résultats préliminaires.

De plus, en comparant les régions recrutées lors des deux sessions (T1 et T2) chez le patient (Tableau 5.10), il est possible de mettre en évidence les mécanismes de plasticité induite par la rééducation. En effet, la récupération est un processus long, qui peut prendre jusqu'à plusieurs années, et il est donc possible d'induire une amélioration du langage suite à la rééducation, même en phase chronique (*e.g.*, voir Breitenstein et al., 2017 ; Meinzer et al., 2008 ; Mohr, 2017).

Lors de la **dénomination**, les résultats suggèrent que le patient recrute des régions bilatéralement afin de réaliser la tâche de dénomination. Par rapport aux participants sains, on observe un recrutement supplémentaire du GFS et du GFM à gauche et d'un large réseau fronto-temporo-pariétal à droite. En effet, le patient recrute le GFI-tri (ce *cluster* s'étend au GFI-op et au gyrus précentral), le gyrus postcentral et le GTS à droite. On observe également des activations supplémentaires au niveau de l'amygdale à gauche, du thalamus (noyau géniculé latéral) à droite et du lobule VII-b du cervelet bilatéralement. Ces résultats suggèrent une réorganisation du langage durant les premières années suite à l'AVC, avec un recrutement des régions homologues du langage à droite et des régions impliquées dans le système domaine-général. Selon certaines études, le système domaine-spécifique associé au langage interagit avec le système domaine-général qui est impliqué dans le contrôle cognitif et l'attention afin d'optimiser les performances des patients (Brownsett et al., 2014 ; S. W. Davis & Cabeza, 2015 ; Fedorenko & Thompson-Schill, 2014). Dans le cas de l'aphasie, la récupération des capacités langagières sera donc associée à une réorganisation au niveau des régions associées au système domaine-spécifique (réseau bilatéral préexistant), avec le support du cortex préfrontal dorso-latéral qui est impliqué dans le système domaine-général (Brownsett et al., 2014 ; Hartwigsen & Saur, 2019 ; Turkeltaub, Messing, Norise, & Hamilton, 2011). Par ailleurs, le cortex rostral préfrontal, qui comprend une partie du GFM et du GFS, et le cortex orbitofrontal sont impliqués dans l'initiation de la production de la parole (à voix haute) ou l'inhibition de la sortie motrice lors de la production de la parole intérieure (Løevenbruck, 2019). Ainsi, le patient recrute davantage les régions impliquées dans le contrôle exécutif afin de réaliser la tâche de dénomination.

Par ailleurs, chez ce patient, on observe un recrutement des régions homologues du réseau langagier à droite. Selon les études, le rôle de l'HD dans la récupération est débattu. En effet,

certaines suggèrent un effet bénéfique du recrutement de l'HD dans la récupération (Hamilton et al., 2010 ; Hartwigsen et al., 2013 ; Kiran et al., 2015 ; Martin et al., 2009 ; Turkeltaub et al., 2011 ; van Hees et al., 2014), tandis que d'autres suggèrent un rôle plus délétère (Hamilton et al., 2010 ; Heiss & Thiel, 2006 ; Naeser et al., 2011 ; Saur et al., 2006 ; Tsai et al., 2014). Cependant, il existe un lien entre la taille/localisation de la lésion et l'engagement de l'HD (Saur et al., 2006 ; Sebastian & Kiran, 2011 ; Skipper-Kallal, Lacey, Xing, & Turkeltaub, 2017). Ainsi, une lésion large touchant des régions clés du langage au niveau de l'hémisphère gauche laissera peu de régions disponibles pour la réorganisation, ce qui implique le recrutement de l'HD (Anglade, Thiel, & Ansaldo, 2014 ; Kiran & Thompson, 2019 ; Skipper-Kallal et al., 2017). Ce recrutement des régions à droite semble spécifique à certaines tâches (*e.g.*, pour la tâche de dénomination mais pas pour le jugement sémantique ; Sebastian & Kiran, 2011 ; Skipper-Kallal et al., 2017). Selon Skipper-Kallal et al. (2017), l'augmentation de l'activation au niveau de l'HD peut refléter l'effort plus important fourni par le patient pour la réalisation de la tâche, en accord avec le recrutement plus important de l'HD, chez les participants sains, lorsque la difficulté de la tâche augmente (*e.g.*, voir Adank, 2012 ; Raboyeau et al., 2008). Ainsi, la lésion large observée chez le patient P4 peut expliquer ce changement de latéralisation (*i.e.*, transfert vers la droite ou bilatéralisation des activations), lors de la réalisation de la tâche de dénomination. Ce changement de latéralisation peut survenir pour les régions frontales, mais également pour les régions temporo-pariétales (voir Breier, Maher, Schmadeke, Hasan, & Papanicolaou, 2007 ; Crinion & Price, 2005 ; Geranmayeh et al., 2014 ; Leff et al., 2002 ; Musso et al., 1999 ; Thompson, den Ouden, Bonakdarpour, Garibaldi, & Parrish, 2010). Enfin, le patient recrute également le lobule VII-b du cervelet bilatéralement, ainsi que le thalamus à droite et l'amygdale à gauche. Le lobule VII-b du cervelet est impliqué dans les fonctions exécutives, notamment la mémoire de travail et l'attention, mais également dans la production du langage (voir Brissenden, Tobyne, Halko, & Somers, 2021 ; Stoodley & Schmahmann, 2009, 2018). Le recrutement de l'amygdale peut être mis en lien avec l'anxiété ressentie par le patient avant la réalisation de l'examen IRM (la dénomination étant la première tâche réalisée) (pour des revues, voir Calhoon & Tye, 2015 ; Tovote, Fadok, & Lüthi, 2015). Le noyau géniculé latéral du thalamus, quant à lui, est impliqué dans le traitement visuel (voir Felleman, 2001).

En comparant les deux sessions (T1 et T2), nous avons mis en évidence une activation supplémentaire au niveau du gyrus postcentral, du GTM, du GFS médian, de l'AMS à droite et du LPS et du

gyrus précentral à gauche. Le gyrus précentral gauche (plus spécifiquement l'AB4 correspondant au cortex moteur primaire) est impliqué dans l'élaboration des programmes moteurs (Grandchamp et al., 2019 ; Hickok, 2012a), tandis que le LPS est impliqué dans l'attention (rôle dans le réseau d'attention dorsal; Corbetta, Patel, & Shulman, 2008 ; Corbetta & Shulman, 2002) et le traitement linguistique visuo-spatial (e.g., dans le cas du langage signé; Banaszekiewicz et al., 2021). Notons que le lobe pariétal supérieur est également impliqué dans l'intégration sensorimotrice (en maintenant la représentation interne de son propre corps; Wolpert, Goodbody, & Husain, 1998). Le GFS médian est impliqué dans un réseau fronto-pariétal qui est associé au contrôle exécutif, tandis que le LPS bilatéralement et le cortex temporal postérieur droit (incluant le GTM postérieur) sont impliqués dans des réseaux d'attention (dorsal et ventral) (Geranmayeh et al., 2014 ; Seeley et al., 2007). Le réseau d'attention dorsal est plutôt associé aux processus *top-down* d'attention et le réseau ventral est associé aux processus *bottom-up* (voir Corbetta & Shulman, 2002 ; Geranmayeh et al., 2014). Ces deux réseaux d'attention peuvent être recrutés lors de tâche nécessitant une attention soutenue (Langner & Eickhoff, 2013). Ainsi, on propose que le patient recrute davantage de processus attentionnels pour réaliser cette tâche, après la rééducation.

De plus, cette tâche de dénomination en parole intérieure permet d'évaluer l'accès lexical, impliquant l'accès aux connaissances conceptuelles et aux représentations phonologiques associées, stockées en mémoire de travail (Hickok & Poeppel, 2007 ; Skipper-Kallal et al., 2017). Le rôle du GTM dans cette tâche peut être associé à la récupération du lemme (Løevenbruck, 2019). Par ailleurs, le GTM (bilatéralement) est également impliqué dans l'interface lexicale (*i.e.*, liant les informations phonologiques et sémantiques) et dans les réseaux combinatoires (*i.e.*, qui réalisent les opérations syntaxiques et les combinaisons sémantiques) (Hickok & Poeppel, 2007). Le gyrus postcentral, plus spécifiquement S1, est impliqué dans l'élaboration de la représentation somatosensorielle du lexème (Hickok, 2012a). L'implication du gyrus postcentral à droite peut être le reflet de la compensation par l'HD, lors de la réalisation de la tâche. Enfin, l'AMS est impliquée dans le contrôle moteur de la parole, avec un rôle dans l'initiation et la synchronisation, mais également dans la mémoire de travail verbale et la prédiction lors de la perception de la parole. Notons que l'AMS comprend des représentations de la parole articulée intérieure ou silencieuse (pour une revue, voir Hertrich, Dietrich, & Ackermann, 2016). L'implication de l'AMS lors de la production de la parole

est bilatérale, ce qui explique la réorganisation avec la compensation par l'AMS de l'hémisphère non dominant (Alario, Chainay, Lehericy, & Cohen, 2006 ; Krainik et al., 2004).

Lors de la **détection de rimes** (DR), on observe des activations supplémentaires du GFS médian bilatéralement; du GFM, de l'opercule rolandique, du pôle temporal supérieur et du gyrus orbital médian à gauche; et du GTS, du cortex cingulaire antérieur (sub-génual) et Crus I du cervelet à droite. Le cortex cingulaire antérieur et le GFS médian adjacent, avec l'insula antérieure et le GFI adjacent, font partie d'un réseau cingulo-operculaire (Geranmayeh et al., 2014 ; Power & Petersen, 2013). Ce réseau comprend le réseau de saillance (Ji et al., 2019) et est impliqué dans le contrôle attentionnel, plus spécifiquement pour les comportements orientés vers un but avec le maintien de l'attention ou la détection d'événements saillants (Geranmayeh et al., 2014). Comme nous l'avons mentionné précédemment, le réseau du langage (domaine-spécifique) interagit avec les réseaux bilatéraux impliqués dans le contrôle cognitif et l'attention afin d'optimiser les performances de langage (Brownsett et al., 2014 ; Fedorenko & Thompson-Schill, 2014 ; Hartwigsen & Saur, 2019 ; Turkeltaub et al., 2011). Plus spécifiquement, Brownsett et al. (2014) ont montré que l'activation du cortex frontal supérieur, impliqué dans le système domaine-général, est corrélée aux performances résiduelles de langage en phase chronique.

De plus, une tâche de DR cible les capacités d'encodage phonologique, c'est-à-dire la transformation de la forme lexicale en plans articulatoires. Cet encodage phonologique implique la sélection, le séquençage, la syllabification et des opérations phonologiques et morpho-phonémiques (Levelt, 1989, 2001). Ainsi, afin de déterminer si deux mots riment ou non, le patient doit notamment assembler les phonèmes en une séquence, puis réaliser la syllabification et déterminer les schémas d'accentuation en appliquant les règles phonologiques (Wilson, Eriksson, Yen, et al., 2019). Parmi les régions recrutées lors de la DR, l'opercule rolandique à gauche joue un rôle dans le traitement phonologique, la planification et l'exécution articulatoires (Nakamichi et al., 2018) et il est impliqué plus spécifiquement dans l'articulation des mouvements linguaux (S. Brown et al., 2009). Le pôle temporal, au niveau du GTS, est impliqué dans un réseau associé au traitement du langage, un réseau en lien avec les fonctions d'intégration visuo-spatiale et audio-visuelle, ainsi que dans la mémorisation ou le traitement socio-émotionnel (pour des revues, voir Ardila, Bernal, & Rosselli, 2014 ; Herlin, Navarro, & Dupont, 2021). L'implication du gyrus orbital médian à gauche s'étend au GFI et au pôle temporal, dont nous avons évoqué le rôle précédemment. Le cervelet est impliqué

dans la phonation et l'articulation avec un rôle dans le contrôle de l'exécution motrice et dans la transformation entre les représentations sensorielles et motrices en générant un modèle interne inverse qui transforme les objectifs phonétiques en une spécification motrice (Correia, Caballero-Gaudes, Guediche, & Carreiras, 2020 ; Grandchamp et al., 2019 ; Hickok, 2012b). Plus spécifiquement, Crus I du cervelet est impliqué dans les tâches de langage, la mémoire de travail verbale, le traitement émotionnel et les fonctions exécutives (Stoodley & Schmahmann, 2009 ; Stoodley et al., 2012). Enfin, le GTS bilatéralement est associé au traitement des stimuli auditifs (Hickok & Poeppel, 2007) et selon Hickok (2012a), le GTS code la représentation auditive de la syllabe. Notons que, pour cette tâche, le *cluster* de 12 556 voxels ayant un pic au niveau du gyrus occipital inférieur s'étend aux niveaux pariétal (LPI, LPS, gyrus postcentral) et frontal (gyrus précentral et GFI). Ceci est lié notamment au recrutement du réseau fronto-temporo-pariétal associé au langage bilatéralement (*i.e.*, les régions à gauche et les régions homologues à droite), mais également aux activations motrices en lien avec la réponse manuelle lors de cette tâche. Ces résultats suggèrent donc que plusieurs mécanismes de réorganisation sont mis en place par le patient. En effet, on observe un recrutement du réseau domaine-spécifique associé au langage situé au niveau de l'hémisphère gauche (en lien avec les modèles de Grandchamp et al., 2019 ; Hickok, 2012a) et du réseau domaine-général associé au contrôle exécutif et à l'attention. De plus, les régions au niveau de l'HD sont également impliquées, permettant de compenser les régions non disponibles à gauche.

La comparaison des deux sessions a permis de mettre en évidence une activation supplémentaire au niveau du GFM à gauche (postérieur à l'activation observée lors de la tâche de DR à T1), suggérant une implication de régions extérieures au réseau langagier lors de la réalisation de la tâche. Notamment, des réseaux associés au contrôle exécutif. Par ailleurs, le GFM pourrait être impliqué dans l'inhibition de la sortie motrice dans cette tâche (Løevenbruck, 2019 ; Turkeltaub et al., 2011). Ceci suggère une implication plus importante du système de contrôle exécutif lors de la réalisation de la tâche, après la rééducation.

Enfin, lors de la **répétition de syllabes** (RS), chez le patient, on ne retrouve pas d'activation au niveau du GFI et de l'AMS, contrairement aux participants sains. Cependant, de façon similaire aux participants sains, on retrouve l'activation au niveau temporal, notamment le GTS à droite et à gauche, associée au traitement des stimuli auditifs (Hickok & Poeppel, 2007). Le patient active de façon supplémentaire, par rapport aux participants sains, le gyrus postcentral droit et le GFM

à gauche. De façon similaire aux deux autres tâches, l'implication du GFM à gauche pourrait être associée au recrutement du système domaine-général (contrôle exécutif) (Turkeltaub et al., 2011). D'autres études ont montré une implication du GFM gauche dans la mémoire de travail (Barbey, Koenigs, & Grafman, 2013) ou encore dans le stockage des informations perceptives (en accord avec le modèle hiérarchique proposé par Hickok, 2012a), afin de permettre la vérification ou la correction lors de la production de parole (Wen et al., 2017). Le gyrus postcentral, quant à lui, joue un rôle dans la représentation des informations proprioceptives et tactiles des articulateurs (Guenther & Hickok, 2015). Ces résultats suggèrent un maintien des capacités de traitement des stimuli auditifs et une implication plus importante des régions impliquées dans la représentation proprioceptive des articulateurs et dans la correction des erreurs, par rapport aux participants sains.

Dans ce chapitre, nous avons basé nos résultats sur l'évaluation du langage et de la parole et sur l'IRMf d'activation. Cependant, nous savons que le langage est organisé en réseau avec des interactions entre des régions distantes aux niveaux frontal, temporal et pariétal (*e.g.*, voir Dick et al., 2014 ; Friederici & Gierhan, 2013 ; Grandchamp et al., 2019 ; Hickok, 2012a ; Hickok & Poeppel, 2007), ce qui permet une compensation de façon dynamique après une lésion focale telle que l'AVC (Hartwigsen & Saur, 2019). Ainsi, sur la base de cette vision du fonctionnement en réseau et de la notion de dégénérescence des réseaux cérébraux (Price & Friston, 2002 ; Stefaniak et al., 2020), l'aphasie peut être considérée comme une pathologie des réseaux (Hartwigsen & Saur, 2019). Ceci souligne donc l'importance, dans le cadre du protocole SEMO, d'évaluer les modifications fonctionnelles et structurelles survenant après l'aphasie post-AVC.

Bien que cette étude soit une étude préliminaire, nous considérons que les résultats sont en faveur d'un effet supérieur de la rééducation renforcée, par rapport à la rééducation simple, et donc d'un effet bénéfique de la rééducation augmentée visuellement. En effet, la rééducation augmentée a permis d'améliorer le contrôle, le positionnement et la coordination des articulateurs. Cependant, le patient a réalisé la rééducation renforcée puis simple, ce qui ajoute l'effet d'ordre comme facteur confondant dans l'interprétation des résultats. Il s'agit d'une limite que nous pourrions corriger lors de l'intégration d'un groupe de patients et d'un groupe plus important de participants sains, dans le cadre du protocole SEMO. Notons cependant que les résultats de cette étude préliminaire permettent d'illustrer le type et la quantité de données que nous pouvons extraire à partir des évaluations langagière et cérébrale (en IRMf d'activation). De plus, nous

montrons ici que la présence d'un groupe contrôle permet d'apporter des données standard qui peuvent être comparées aux données du patient. Nous donnons également des pistes sur la façon de distinguer les améliorations relevant de la rééducation renforcée, de celles relevant de la rééducation simple. Les analyses effectuées dans cette étude pourront être améliorées et complexifiées lors de l'évaluation à l'échelle du groupe.

Résumé 5.1 : Étude préliminaire - SEMO

- Résultats préliminaires : cette étude doit être poursuivie en intégrant un groupe de patients et un groupe plus important de participants sains.
- Résultats en faveur d'un effet plus important du programme de rééducation renforcée, par rapport à la rééducation orthophonique classique seule.
- Amélioration des performances en répétition de syllabes suite à la rééducation renforcée et en dénomination d'images après la rééducation renforcée et après la rééducation simple.
- Amélioration du contrôle de la dynamique, du mode et lieu d'articulation pour les consonnes et amélioration du positionnement de la langue en avant pour les voyelles à l'issue de la rééducation renforcée.
- Amélioration du voisement et de la distinction entre les fricatives alvéolaire et labio-dentale après la rééducation simple.
- Réorganisation post-AVC : bilatéralisation des activations avec un recrutement des régions homologues du langage à droite, recrutement du réseau domaine-général impliqué dans le contrôle exécutif et des réseaux attentionnels. Recrutement supplémentaire des régions impliquées dans la représentation proprioceptive des articulateurs et dans la correction des erreurs lors de la production de parole, par rapport aux participants sains.
- Après la rééducation : recrutement supplémentaire des processus attentionnels et du contrôle exécutif, recrutement des régions impliquées dans le contrôle moteur de la parole, la représentation de la parole articulée et l'interaction somato-sensorimotrice.

CHAPITRE 6

Discussion générale

Table des Matières

1	Synthèse des principaux résultats	210
1.1	La variabilité associée à l'aphasie et sa récupération	212
1.2	Une méthode de rééducation de la parole augmentée : le logiciel <i>Ultraspeech-player</i>	213
2	Discussion générale	216
2.1	Vers une rééducation intensive et adaptée	217
2.1.1	Les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie	218
2.1.2	Les déterminants de la récupération langagière	221
2.1.3	Implications thérapeutiques : recommandations pour la rééducation orthophonique	223
2.2	Vers une rééducation augmentée, fondée sur l'intégration sensorimotrice	224
3	Limites	228
4	Perspectives	229
5	Conclusion générale	235

1 Synthèse des principaux résultats

Chaque année en France, environ 40 000 personnes sont victimes d'un AVC conduisant à une aphasie. L'aphasie non fluente est caractérisée par une production de parole hésitante et laborieuse, réduite parfois à des mots isolés ou des groupes de mots, avec une prosodie inadaptée et des agrammatismes. Ces troubles langagiers impactent considérablement la communication avec autrui, avec un impact significatif dans la vie quotidienne et des difficultés psychologiques et sociales. La prise en charge des troubles, afin de permettre la récupération des capacités de communication, représente donc un enjeu majeur pour la clinique. Si la prise en charge orthophonique favorise la récupération des fonctions langagières, son efficacité diminue après quelques mois. De plus, en phase chronique, l'accès aux soins est souvent rendu plus difficile, pour des raisons de santé, géographiques ou financières. Il est donc crucial de développer de nouvelles méthodes de rééducation adaptées au profil clinique et social de chaque patient et tenant compte des données de la recherche sur les facteurs favorisant la récupération des fonctions langagières post-AVC, pour mieux guider les bilans cliniques et les stratégies thérapeutiques. Par ailleurs, une meilleure description des mécanismes cérébraux sous-tendant la récupération des fonctions langagières après un AVC présente également un intérêt pour la recherche fondamentale et est susceptible d'enrichir les modèles théoriques neurolinguistiques.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de ces questions cliniques et théoriques et porte sur les processus cognitifs et les mécanismes cérébraux associés à la récupération de la parole dans l'aphasie post-AVC. Pour cela, nous avons utilisé une approche multimodale (langagière, cognitive et cérébrale) permettant d'évaluer : (i) les facteurs de variabilité de la sévérité initiale de l'aphasie et du degré de récupération du langage et de la parole chez des patients présentant une aphasie post-AVC et (ii) l'effet sur la récupération de la parole, d'un programme de rééducation renforcée – s'appuyant sur une technologie offrant une illustration visuelle réaliste de la dynamique articulatoire linguale et labiale (*Ultraspeech-player*) en complément de la rééducation orthophonique classique – appliqué à des patients présentant une aphasie non fluente post-AVC.

Il existe une grande variabilité en termes de sévérité des troubles associés à l'aphasie ainsi qu'en termes de degré de récupération langagière ultérieure (cf. Chapitre 1, Section 5.2). Les déterminants de la récupération du langage dans l'aphasie post-AVC ont été examinés en détail

dans de nombreuses études, présentées dans les Chapitres 1 et 3, étant donné l'intérêt pour la clinique (proposition de rééducations personnalisées, présentation des perspectives de rétablissement) et pour la recherche (comprendre les mécanismes sous-tendant la récupération des fonctions langagières et déterminer le type de rééducation le plus adapté ou l'intensité de rééducation optimale) (Kristinsson et al., 2022). Cependant, en raison des divergences de résultats et de l'impossibilité de généraliser à tous les patients, il n'existe actuellement pas de réponse claire, dans la littérature, quant aux facteurs les plus déterminants. Ainsi, de nouvelles recherches sont nécessaires afin de fournir aux cliniciens les facteurs susceptibles d'influencer la récupération, leur permettant ainsi de choisir la méthode de rééducation la plus adaptée (*i.e.*, garantissant une récupération positive et la meilleure possible).

Par ailleurs, étant donné la diminution d'efficacité des méthodes de rééducation et les difficultés d'accès à la prise en charge en phase chronique, de nouvelles méthodes de rééducation orthophonique ont été proposées récemment (**cf.** Chapitre 1, Section 4). Elles s'appuient sur des données de recherche, dans des cadres théoriques plus ou moins explicites.

L'originalité de cette thèse a été de se placer d'emblée dans un cadre théorique précis et consensuel, décrivant les mécanismes neurocognitifs sous-tendant le contrôle de la production de la parole. Dans ce cadre théorique, il est proposé que le contrôle de la production de la parole met en jeu des processus perceptifs et que la planification et la programmation motrices reposent sur des représentations multisensorielles, auditives, somatosensorielles et visuelles, ainsi que des connaissances articulatoires (**cf.** Chapitre 1, Section 2.1).

Ainsi, notre hypothèse théorique est que ces représentations multisensorielles pourraient contribuer à la réorganisation des réseaux langagiers et à la compensation des déficits de planification et de programmation motrices qui peuvent être observés dans l'aphasie suite à un AVC. Le corollaire clinique de cette hypothèse est que les méthodes de rééducation de la production de la parole fondées sur la visualisation des articulateurs de la parole, en complément d'autres informations sensorielles (auditives, somesthésiques), pourraient permettre de compléter et d'enrichir la représentation des articulateurs de la parole et de mieux spécifier les objectifs phonologiques. Lors de la répétition de sons de parole, les représentations phonologiques visuellement étayées pourraient donc améliorer la planification et la programmation motrices et restaurer un contrôle moteur

de la parole fluide chez les patients présentant des troubles de la parole. Pour examiner cette hypothèse, nous nous sommes demandés :

1. Quels sont les déterminants sociaux, comportementaux et cérébraux de la sévérité initiale de l'aphasie et de la récupération du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC?
2. Quel est l'effet sur les plans langagier, cognitif et cérébral d'une nouvelle méthode de rééducation de la production de parole, fondée sur des représentations phonologiques multisensorielles augmentées, dans le cadre de l'aphasie non fluente post-AVC?

Afin de répondre à ces deux questions de recherche, nous avons suivi une double démarche, avec : (i) une partie observationnelle examinant les facteurs associés à la sévérité initiale de l'aphasie et à la récupération du langage et de la parole et (ii) une partie interventionnelle afin de proposer et d'évaluer un programme de rééducation de la parole renforcée. Nous avons ainsi utilisé le logiciel *Ultraspeech-player*, en complément de la rééducation orthophonique classique. Ce logiciel permet la visualisation des mouvements des lèvres et de la langue, en complément du son (phonèmes et syllabes), pré-enregistrés chez un locuteur de référence (Hueber, 2013).

1.1 La variabilité associée à l'aphasie et sa récupération

Dans les Chapitres 2 et 3, nous nous sommes penchés sur les facteurs (sociodémographiques, cliniques, associés à la lésion ou à la rééducation) qui influencent : (i) la sévérité initiale de l'aphasie et (ii) la récupération du langage et de la parole.

Premièrement, comme nous le présentons dans le Chapitre 2, nous avons identifié qu'un dysfonctionnement exécutif sévère, une lésion de taille importante et un AVC sévère sont associés à une aphasie plus sévère initialement. D'un point de vue neuroanatomique, nous avons également mis en évidence un lien entre la localisation de la lésion ou la déconnexion des faisceaux de substance blanche et la sévérité initiale de l'aphasie. Plus spécifiquement, une lésion localisée au niveau de l'insula, du GFI-op, GFI-tri et de l'opercule rolandique à gauche ainsi qu'une déconnexion au niveau de l'IFOF, du FA, du FAT, des RTS à gauche et du corps calleux sont associées à une aphasie plus sévère initialement.

Deuxièmement, comme décrit dans le Chapitre 3, nous avons montré qu'une rééducation plus intensive et une lésion au niveau du GFI-op sont associées à une récupération plus importante.

Notons que nous avons évalué le gain relatif¹ entre l'évaluation initiale (comprise entre 0 et 60 jours post-AVC) et l'évaluation finale (réalisée avant 6 mois post-AVC), à partir duquel nous avons constitué deux groupes : récupération élevée ($gain \geq 0,5$) et récupération faible ($gain < 0,5$). Le groupe avec une récupération élevée est principalement constitué de patients ayant une aphasie sévère initialement (96,8% des patients du groupe). Nos résultats peuvent donc s'expliquer par une marge d'amélioration possible plus importante chez les patients avec une aphasie sévère initialement, tandis que ceux avec une aphasie modérée ou légère ont une marge d'amélioration potentielle moindre (J. B. Lee et al., 2009 ; Osa García et al., 2020). Par conséquent, ces résultats suggèrent une récupération plus importante suite à une rééducation intensive, en particulier pour les patients présentant une aphasie sévère initialement avec une lésion du GFI-op à gauche.

1.2 Une méthode de rééducation de la parole augmentée : le logiciel *Ultraspeech-player*

La deuxième partie de la thèse a permis de démontrer l'efficacité d'un programme de rééducation de la parole renforcée, fondé sur la répétition de sons de parole présentés sous une forme « augmentée visuellement » (*i.e.*, basée sur l'intégration sensorimotrice avec des représentations multisensorielles), en complément de la rééducation classique. Nous avons d'abord mené des études de cas, puis nous avons construit un protocole expérimental permettant une évaluation multimodale (langagière, cognitive et cérébrale) de cette méthode, sur une cohorte étendue. L'objectif de ce protocole est de distinguer ce qui relève simplement d'une prise en charge renforcée, de ce qui relève spécifiquement de l'amélioration des objectifs phonologiques par l'ajout de représentations visuelles habituellement non disponibles (*i.e.*, les mouvements linguaux sagittaux).

Nos études de cas (**cf.** Chapitre 4) ont montré un effet bénéfique de la rééducation renforcée pour deux patients sur trois (P1 et P3), et des résultats plus mitigés dans un cas (P2). En effet, les résultats suggèrent un impact bénéfique de la rééducation pour les items entraînés (répétition de syllabes) mais également une généralisation aux tâches non entraînées spécifiquement durant la rééducation. Les améliorations mesurées sur les plans phonétique et acoustique, lors de la répétition de syllabes, suggèrent que la rééducation permet une amélioration de la coordination et de la dynamique des articulateurs (langue, lèvres et larynx), avec un meilleur contrôle laryngé

1. Le gain relatif est calculé à partir des scores de sévérité (ASRS) mesurés lors des évaluations initiale (EI) et finale (EF) : $\frac{ASRS_{EF} - ASRS_{EI}}{ASRS_{EI}}$.

ainsi que du lieu et du mode d'articulation. Nous expliquons les résultats mitigés de la patiente P2 par la localisation de sa lésion, étendue aux régions temporo-pariétales. En effet, ces régions sont fortement impliquées dans l'intégration des informations multisensorielles (Culham et al., 2006 ; Ishida et al., 2010). La rééducation augmentée s'appuyant justement sur l'intégration d'informations auditives, visuelles, somesthésiques/proprioceptives fournies par le logiciel, une diminution de son efficacité est attendue en cas de lésion étendue à ces régions.

Ainsi, à l'issue de ces études de cas, nous avons montré que : (i) la préservation des régions temporo-pariétales semble importante pour tirer un bénéfice de la rééducation augmentée avec le logiciel *Ultraspeech-player*; (ii) l'évaluation multimodale (langagière, cognitive, cérébrale) fournit une analyse fine et détaillée de la production de parole (performances, nombre et type d'erreurs, corrélats acoustiques, corrélats cérébraux), ce qui permet de mieux décrire les stratégies phonatoires et articulatoires de chaque patient et leur évolution pendant la rééducation; et (iii) la comparaison des productions intra-locuteurs est essentielle pour identifier les déficits ainsi que les stratégies palliatives mises en place par les patients (Nespoulous et al., 2013).

Bien que ces études de cas nous éclairent sur l'efficacité de la rééducation renforcée et la possibilité de son application chez les patients atteints d'aphasie non fluente post-AVC en phase chronique, il existe certaines limites. Premièrement, dans ces études de cas, nous avons évalué uniquement l'efficacité du programme de rééducation renforcée, fondé sur l'utilisation de la rééducation augmentée en complément de la rééducation orthophonique classique. Notons que cette rééducation renforcée peut être considérée comme une rééducation intensive. Bien qu'un entraînement intensif puisse induire des changements dans les premiers jours ou les premières semaines (Berthier & Pulvermüller, 2011) et que sur une courte période (< 4 semaines) les modifications cérébrales puissent être interprétées comme étant liées à la rééducation (Mohr, 2017), une comparaison de la rééducation renforcée et de la rééducation orthophonique classique seule est nécessaire. Cette comparaison nous permettrait d'affirmer plus positivement l'efficacité de la rééducation visuellement augmentée par rapport à celle d'un autre type de rééducation. Deuxièmement, nous avons effectué uniquement des études de cas. Une étude sur une large cohorte permettrait d'évaluer la généralisation de l'efficacité du programme à des patients d'âges et de profils cognitifs et sociaux variés. Enfin, troisièmement, nous avons évalué les caractéristiques acoustiques et cérébrales de la production de parole uniquement chez les patients, sans comparaison à celles de participants sains

appariés. Sachant que les paramètres acoustiques varient avec l'âge (D'Alessandro & Fougeron, 2018 ; Hermes et al., 2018 ; Torre & Barlow, 2009 ; Verhaegen, Delvaux, Fagniard, et al., 2020) et qu'il existe une réorganisation cérébrale liée à l'âge (Baciu et al., 2021 ; J. W. Brown & Jaffe, 1975 ; Cabeza, 2002 ; C. Davis et al., 2008 ; Hoyau et al., 2017), une évaluation des mesures acoustiques, de l'activité cérébrale lors de tâches de langage et de la connectivité fonctionnelle et structurelle chez des participants sains âgés permettrait de comparer les résultats à des normes plus appropriées.

Ainsi, afin de répondre à ces différentes limites, nous avons proposé un nouveau protocole expérimental intitulé SEMO (pour intégration SEnsiMOtrice). Dans ce protocole, nous proposons un plan croisé (ou *cross-over*) comprenant idéalement 36 patients atteints d'aphasie non fluente et 36 participants sains appariés. Deux types de rééducation sont prévus pour les patients, d'une durée de quatre semaines chacune : une rééducation renforcée (rééducation augmentée avec le logiciel *Ultraspeech-player* en complément de la rééducation orthophonique classique) et une rééducation simple (rééducation orthophonique classique uniquement). Les patients seront répartis en deux groupes : un groupe qui suivra la rééducation simple puis la rééducation renforcée et un groupe qui suivra la rééducation renforcée puis la rééducation simple. Afin de mesurer l'effet de la rééducation, nous proposons une évaluation multimodale, avant et après chaque cycle de rééducation (renforcée ou simple), comprenant : une évaluation langagière avec une évaluation des compétences de langage (bilan orthophonique), des compétences phonétiques (score de parole et mesures acoustiques) et des représentations phonologiques (parole intérieure) ; une évaluation des compétences cognitives (bilan neuropsychologique) ; et une évaluation cérébrale (IRMf d'activation, connectivités fonctionnelle et structurelle). Ainsi, il y aura une évaluation T1 initialement, une évaluation T2 après le premier programme/méthode de rééducation et une évaluation T3 après le second programme/méthode. L'inclusion des participants sains, appariés avec les patients (en nombre, âge, sexe et préférence manuelle), nous permet d'obtenir des valeurs standard pour les paramètres acoustiques, les performances de parole intérieure et pour la neuroimagerie. Ces participants sains sont évalués deux fois (T1 et T2) à quatre semaines d'intervalle.

Ce protocole permettra donc : (i) la comparaison entre la rééducation simple et renforcée ; (ii) une généralisation à une plus grande échelle de l'efficacité de la rééducation augmentée visuellement ; et (iii) la comparaison des données de chaque patient avec des valeurs normées

ou des valeurs standard obtenues chez des participants sains. Les différences entre les études de cas et le nouveau protocole sont présentées dans le Tableau 6.1.

Tableau 6.1 – Différences entre les études de cas et le protocole SEMO.

Mesures	Études de cas P1 & P2	Étude de cas P3	Protocole SEMO
Évaluation du langage (performances)	✓	✓	✓
Évaluation phonétique (scores de parole et mesures acoustiques)	✓	✓	✓
Évaluation des représentations phonologiques (parole intérieure)	✗	✗	✓
Évaluation des corrélats cérébraux	✓	✗	✓
Évaluation des performances cognitives	✗	✓	✓
Présence de valeurs standard (phonétique, parole intérieure et neuroimagerie) *	✗	✗	✓
Efficacité de la rééducation renforcée	✓	✓	✓
Comparaison avec la rééducation orthophonique classique seule	✗	✗	✓
Généralisation à l'échelle d'un groupe de patients	✗	✗	✓

* Pour les études de cas des patientes P1 et P2, des données chez des participants sains contrôle ont été acquises une seule fois et uniquement en IRMf de tâche. Une comparaison uniquement entre la patiente P1 et les participants sains avait été réalisée. Ainsi, nous considérons que ces données en IRMf ne suffisent pas à fournir des données comparatives.

Des résultats préliminaires (**cf.** Chapitre 5) obtenus dans cette thèse suggèrent un effet plus important de la rééducation renforcée par rapport à la rééducation classique. Les résultats suggèrent que la visualisation des articulateurs de la parole permet une amélioration du contrôle de la dynamique des articulateurs, du lieu et du mode d'articulation lors de la production de la parole. Au niveau cérébral, lors de tâches de langage, on observe un recrutement supplémentaire des processus attentionnels et du contrôle exécutif et un recrutement des régions impliquées dans le contrôle moteur de la parole et la représentation de la parole articulée et l'interaction somato-sensorimotrice, après la rééducation.

2 Discussion générale

Dans cette section, nous discutons les résultats obtenus à la lumière du cadre théorique dans lequel nous nous inscrivons (**cf.** Chapitre 1). Nous commencerons par nos résultats sur les facteurs

associés à la sévérité de l'aphasie et sa récupération. Puis, nous nous focaliserons sur l'intérêt d'une rééducation augmentée visuellement et fondée sur l'interaction sensorimotrice pour la récupération de la parole dans l'aphasie et nous discuterons des premiers résultats montrant l'efficacité de cette méthode.

2.1 Vers une rééducation intensive et adaptée

L'évaluation des facteurs à l'origine de la variabilité en termes de sévérité initiale des troubles et de degré de récupération langagière, nous a permis de mettre en évidence que les patients avec un dysfonctionnement exécutif sévère, un AVC sévère et une lésion de taille importante, localisée au niveau de l'insula, du GFI (GFI-op, GFI-tri) et de l'opercule rolandique à gauche, avec une déconnexion de l'IFOF, du FA, du FAT, des RTS gauche et du corps calleux, présentent une aphasie plus sévère initialement. Pour les patients présentant une aphasie sévère, avec une atteinte au niveau du GFI-op à gauche, il semble qu'une rééducation intensive permette une récupération plus importante. Dans ce contexte, nous synthétisons à présent les facteurs associés à la sévérité initiale de l'aphasie et ceux associés à la récupération afin de donner un exemple de rééducation optimale qui pourrait être mise en place.

Connaitre les facteurs associés à la sévérité de l'aphasie et à sa récupération présente un intérêt au niveau clinique, en permettant aux cliniciens de déterminer le « degré d'amélioration » attendu après la rééducation, ce qui peut permettre : d'optimiser la rééducation en fonction des besoins spécifiques de chaque patient, d'augmenter l'efficacité de cette rééducation, et de présenter des perspectives de rétablissement plus précises au patient et à son entourage (Kristinsson et al., 2022 ; Simic et al., 2019). L'augmentation de l'efficacité de la rééducation se fait par le biais de l'augmentation de la durée, la personnalisation² (en prenant en compte la sévérité de l'aphasie et les troubles de la parole et du langage associés) et la favorisation de l'accès à la rééducation (Fridriksson & Hillis, 2021). La connaissance de ces facteurs présente également un intérêt pour la recherche, en permettant de déterminer quel type de thérapie sera adapté à quel type de patient, quelle intensité sera la plus adaptée ou encore quel devrait être l'objectif de la rééducation pour les patients ne répondant pas à l'orthophonie classique (Kristinsson et al., 2022). Par ailleurs, une

2. Nous parlons de rééducation personnalisée dans le cas d'une rééducation adaptée. Il s'agit de proposer au patient des exercices adaptés en fonction de ses troubles (*i.e.*, ni trop facile, ni trop difficile) et de prendre en compte ses objectifs (*i.e.*, les compétences qu'il souhaite retrouver), afin de proposer une rééducation qui permettra au patient de progresser, en favorisant la neuroplasticité (Haldin et al., 2022 ; Kleim & Jones, 2008).

meilleure description des mécanismes cérébraux sous-tendant la récupération constitue également un enjeu pour les modèles théoriques en neurolinguistique.

Nos travaux indiquent qu'une rééducation intensive et adaptée permettrait d'optimiser la rééducation, notamment chez les patients présentant une aphasie sévère initialement. L'adaptation ou la personnalisation de la rééducation passe par la prise en compte de la sévérité initiale de l'aphasie et de la localisation de la lésion, ainsi que des objectifs et des besoins du patient et de son entourage (Chomel-Guillaume et al., 2010 ; Fridriksson & Hillis, 2021 ; Haldin et al., 2022 ; Kristinsson et al., 2022 ; Simic et al., 2019). Dans la discussion qui suit, nous distinguons les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie, présentés dans une première partie, et les déterminants de la récupération du langage, présentés ensuite.

2.1.1 Les déterminants de la sévérité initiale de l'aphasie

Premièrement, nous avons montré dans le Chapitre 2 qu'un AVC sévère, avec une lésion large localisée dans des régions impliquées dans le langage et les processus domaines-généraux, est associé à une aphasie plus sévère initialement, avec un dysfonctionnement exécutif plus important (Inatomi et al., 2008 ; Kiran & Thompson, 2019 ; Lahiri, Dubey, Ardila, & Ray, 2021). Plus spécifiquement, nous avons montré un lien entre la localisation de la lésion ou la déconnexion des faisceaux de substance blanche et la sévérité initiale de l'aphasie. Rappelons que le score permettant d'évaluer la sévérité de l'aphasie (*i.e.*, ASRS) est fortement lié aux capacités de fluence verbale, avec un score plus faible (aphasie sévère) pour les patients avec une fluence verbale fortement réduite et un score plus élevé (aphasie modérée/légère) pour les patients présentant pas ou peu de troubles de la fluence verbale (Mazaux & Orgogozo, 1981). Les différentes régions (insula, GFI et opercule rolandique à gauche) et les réseaux (FA, IFOF, FAT, RTS à gauche et corps calleux) que nous avons identifiés comme associés à une aphasie plus sévère font partie des structures essentielles au langage et à la production de la parole (Ardila et al., 2016a ; Dick et al., 2014 ; Duffau et al., 2014 ; Friederici & Gierhan, 2013 ; Hickok, 2012a).

En effet, il a été proposé que le GFI (GFI-op et GFI-tri) joue un rôle dans l'élaboration des représentations motrices associées à la syllabe et, avec l'insula, ils sont impliqués dans la planification de l'articulation (Dronkers, 1996 ; Dronkers et al., 2007 ; Hickok, 2012a). L'insula joue également un rôle dans le contrôle et la coordination, à plusieurs niveaux de la production du langage, notamment

en connectant les systèmes lexico-sémantique et grammatical (Ardila et al., 2016a). L'opercule rolandique est également impliqué dans l'articulation, notamment les mouvements linguaux (S. Brown et al., 2009) et, avec d'autres régions (gyri précentral et postcentral, GFI-op, GTS et LPI), il est impliqué dans le traitement phonologique, la planification et l'exécution articulaires (Nakamichi et al., 2018). Ainsi, il a été montré qu'une lésion au niveau de ces régions entraîne une diminution de la fluence verbale (e.g., voir Borovsky et al., 2007 ; Park et al., 2021 ; Triarhou, 2021 ; Yourganov et al., 2015). Par ailleurs, des auteurs ont montré un lien entre l'atteinte de ces régions et la sévérité initiale de l'aphasie (Døli et al., 2021 ; Zavanone et al., 2018).

Parmi les faisceaux identifiés comme étant déconnectés, le FA joue un rôle dans la voie dorsale (Dick et al., 2014 ; Hickok & Poeppel, 2007) et il est impliqué dans le traitement des informations phonologiques et syntaxiques complexes durant la production et la compréhension du langage ainsi que dans la transformation acoustico-articulatoire (Dick et al., 2014 ; Friederici & Gierhan, 2013). Il est également impliqué dans la boucle de rétroaction auditive permettant l'intégration des informations sensorimotrices pour le contrôle en temps réel de la production de parole complexe (Basilakos et al., 2014). L'IFOF est impliqué dans la voie ventrale directe (Duffau et al., 2014) et joue un rôle dans le traitement sémantique et l'intégration sensorimotrice multimodale (Friederici & Gierhan, 2013 ; Zhang et al., 2021). Le FAT joue un rôle dans l'initiation de la parole et la fluence (Catani et al., 2013) et potentiellement dans la sélection et récupération au niveau lexical (Dick et al., 2019). Les RTS, sont associés à certaines fonctions langagières (production et compréhension) et à certaines fonctions exécutives (Younes et al., 2019). Enfin, le corps calleux joue un rôle dans la production du langage et le traitement sémantique (Civier et al., 2015 ; Fang et al., 2015). Des études ont mis en évidence qu'une atteinte de ces faisceaux de substance blanche est associée à une diminution de la fluence verbale (e.g., voir Basilakos et al., 2014 ; Civier et al., 2015 ; Cristofori et al., 2015 ; Fridriksson et al., 2013 ; Geller et al., 2019 ; Hope et al., 2016). De plus, il existe une association entre une atteinte au niveau du FA (Forkel & Catani, 2018 ; Kim et al., 2021), du FAT (Forkel & Catani, 2018), du FLS, du corps calleux, de la *corona radiata* au niveau des lobes frontal et temporal (Kim et al., 2021), du FU et de l'IFOF (Zavanone et al., 2018) et la sévérité initiale de l'aphasie.

Ainsi, une atteinte de ces différentes régions et de ces différents réseaux impliqués dans l'articulation et la planification motrices de la parole, mais également dans d'autres fonctions

associées (traitement sémantique ou syntaxique) est associée à une augmentation de la sévérité initiale de l'aphasie avec une diminution de la fluence verbale, selon le score de sévérité (ASRS).

De plus, nos résultats mettent en avant le lien existant entre les fonctions exécutives et le langage. En effet, les fonctions exécutives font partie des compétences cognitives affectées chez les patients présentant une aphasie (Bonini & Radanovic, 2015 ; Fonseca et al., 2019), en lien avec la localisation de la lésion (Barbey et al., 2012 ; Olsson et al., 2019). Ceci s'explique par l'aspect intégratif du langage, mêlant des opérations linguistiques et extra-linguistiques (Roger, Rodrigues De Almeida, et al., 2022). Ainsi, de bonnes capacités linguistiques impliquent des fonctions cognitives telles que la mémoire de travail, les fonctions exécutives ou l'attention (Herbet & Duffau, 2020). Les fonctions exécutives et les capacités linguistiques semblent donc étroitement liées et, plus généralement, le fonctionnement exécutif peut être considéré comme un indicateur approprié des capacités de communication (Gonçalves et al., 2018 ; Olsson et al., 2019). Une évaluation des fonctions exécutives semble donc nécessaire et importante à prendre en compte dans la mise en place d'une rééducation personnalisée (voir Gilmore et al., 2019 ; Olsson et al., 2019 ; Simic et al., 2020, 2019). Selon certaines études, l'intégrité du système de contrôle exécutif, notamment la flexibilité, permet le maintien des capacités de transfert des mécanismes compensatoires acquis durant la rééducation vers les activités de la vie quotidienne (e.g., les capacités de communication) (Simic et al., 2020, 2019). Cependant, dans ce travail, l'évaluation des fonctions exécutives s'appuie sur un score global unique³, proposé par les neuropsychologues, et regroupant différentes compétences exécutives (i.e., flexibilité, contrôle attentionnel, inhibition, mémoire de travail, planification). Ainsi, nous proposons qu'une évaluation des compétences exécutives, avec un score plus détaillé, donnerait une indication plus précise du fonctionnement exécutif des patients et fournirait un bilan clinique initial plus informatif.

3. Dans ce travail, les patients ont été classés selon leur dysfonctionnement exécutif : aucun ou léger (0) et modéré ou sévère (1). Ce classement se base sur un score proposé par les neuropsychologues issu de plusieurs tests évaluant les processus exécutifs : le *Trail Making Test*, le test de Stroop, le *Wisconsin Card Sorting Test*, la fluence verbale, l'empan de chiffre et le test de Code, la tour de Hanoï ou de Londres, et/ou la figure complexe de Rey. Le score était de : 0 pour « aucun trouble », 1 pour « troubles exécutifs légers », 2 pour « troubles exécutifs modérés », et 3 pour « troubles exécutifs sévères ». Les patients ont ensuite été classés en deux groupes, selon leur dysfonctionnement exécutif : aucun/léger et modéré/sévère.

2.1.2 Les déterminants de la récupération langagière

En ce qui concerne les déterminants de la récupération langagière, nous avons montré dans le Chapitre 3 d'une part, que la rééducation intensive permettait une récupération plus importante, et d'autre part que cette récupération était majorée chez les patients présentant une aphasie sévère avec une lésion du GFI-op. Nous détaillons ci-dessous ces deux observations.

En premier lieu, nos résultats sur l'intensité de la rééducation sont en accord avec d'autres études qui ont montré que la rééducation intensive semblait permettre une meilleure récupération par rapport à une rééducation peu intensive (Brady et al., 2022b, 2016 ; Breitenstein et al., 2017 ; Dignam et al., 2016 ; Mohr, 2017) et ceci est lié au phénomène de neuroplasticité⁴. Cette neuroplasticité survient au niveau péri-lésionnel ou à distance de la lésion (dans l'hémisphère ipsilésionnel ou les régions homotopiques controlatérales), en phase aiguë ou chronique (Cramer & Riley, 2008 ; Herbet & Duffau, 2020). Les profils de neuroplasticité diffèrent selon le délai post-AVC, l'expérience, l'apprentissage et l'entraînement (Gerstenecker & Lazar, 2019 ; Kiran & Thompson, 2019). Le rôle de la plasticité synaptique⁵, qui est un processus neurologique associé à la neuroplasticité, est crucial lors de la récupération en lien avec la rééducation (Berthier & Pulvermüller, 2011 ; Cramer & Riley, 2008 ; Kiran & Thompson, 2019). Ainsi, une rééducation intensive, dans les stades précoces ou en phase chronique, sera associée à une meilleure récupération, en lien avec le renforcement des contacts synaptiques entre les neurones et le rétablissement de l'activité neuronale, par rapport à une rééducation peu intensive (*e.g.*, voir Bakheit et al., 2007 ; Basso, 2005 ; Berthier & Pulvermüller, 2011 ; Brady et al., 2016 ; Godecke et al., 2013 ; Stahl et al., 2016). Parmi les principes permettant de promouvoir la neuroplasticité⁶, Kiran et Thompson (2019) proposent que la répétition et l'intensité

4. La neuroplasticité peut survenir spontanément ou suite à la rééducation. En effet, en complément de la réduction de l'œdème et de la reperfusion des tissus au niveau péri-lésionnel, la neuroplasticité spontanée (*i.e.*, le déroulement naturel des restaurations neurophysiologiques et de la réorganisation corticale des fonctions du langage) peut survenir dans les phases précoces (principalement les trois premiers mois) et entraîner une restauration spontanée (Berthier & Pulvermüller, 2011 ; Robertson & Fitzpatrick, 2008). Précisons que, la récupération spontanée atteint un plateau et l'ajout de la rééducation, par exemple, permet d'augmenter la récupération, surtout en phase chronique (Berthier, 2005 ; Shah et al., 2013). Dans cette thèse, nous parlons principalement de la neuroplasticité induite par la rééducation.

5. Cette plasticité synaptique repose sur la règle de Hebb qui postule que l'activation synchrone d'un groupe de neurones et l'activation répétée de leur cible neuronale postsynaptique entraînent un renforcement synaptique, tandis que les neurones qui s'activent indépendamment des autres neurones avec lesquels ils sont connectés présentent un « affaiblissement » synaptique (Berthier & Pulvermüller, 2011 ; Hebb, 1949).

6. Les dix principes, proposés par Kleim et Jones (2008), ont été regroupés en six principes par Kiran et Thompson (2019) : (1) utiliser, améliorer ou perdre ; (2) la spécificité reconstruit les réseaux ciblés ; (3) la saillance est essentielle ; (4) la répétition et l'intensité favorisent l'apprentissage et la consolidation ; (5) favoriser la généralisation et éviter les interférences ; (6) la complexité favorise l'apprentissage et la généralisation.

favorisent l'apprentissage (ou le réapprentissage) et la consolidation (voir aussi Kleim & Jones, 2008). Toutefois, les études ne semblent pas s'accorder sur une intensité optimale (Dignam et al., 2016). Par ailleurs, la « rééducation intensive » n'est pas définie de la même façon selon les études (*i.e.*, nombre d'heures par séance, durée de la thérapie ou nombre d'heures total; voir Kiran & Thompson, 2019). Dans le cadre de cette thèse, nous associons le terme « rééducation intensive » à une intensité de 5 séances/semaine, puisqu'il s'agit de la médiane observée dans le groupe ayant une récupération élevée.

Deuxièmement, nous avons montré que la récupération était plus importante pour les patients présentant une lésion du GFI-op. Ce résultat, en accord avec les données issues des travaux de Fridriksson et ses collaborateurs (Bonilha et al., 2019 ; Fridriksson, Basilakos, et al., 2015 ; Fridriksson, Fillmore, Guo, & Rorden, 2015 ; Fridriksson et al., 2012 ; Johnson, Yourganov, et al., 2022 ; Venezia et al., 2016), peut être mis en lien avec les phénomènes de plasticité et de réorganisation cérébrales qui seront mis en place lors de la rééducation. En effet, Fridriksson et al. (2012) ont montré un effet bénéfique d'une tâche d'imitation de parole synchronisée avec une vidéo labiale (nommée *speech entrainment*, ce qui peut se traduire par « imitation de parole synchronisée » ou « production de parole assistée par vidéo »), par rapport à une tâche de production de parole spontanée. En effet, après un entraînement de 6 semaines avec ces exercices d'imitation assistée, une amélioration de la fluence verbale semble être observée chez les patients présentant une aphasie non fluente. Plus spécifiquement, il semble que ce soit les patients présentant une lésion au niveau des GFI-op et GFI-tri qui tirent le plus de bénéfices des informations visuelles lors d'une tâche d'imitation assistée par rapport à une tâche de parole spontanée (Fridriksson, Basilakos, et al., 2015). Dans une autre étude, ces auteurs ajoutent que l'atteinte de la voie dorsale, accompagnée d'une préservation des régions associées à la voie ventrale (*i.e.*, le GTM postérieur) et des faisceaux de substance blanche associés (*i.e.*, le FU et l'IFOF) est associée à une amélioration de la fluence verbale lors d'une tâche d'imitation de parole assistée par rapport à une tâche de production spontanée (Bonilha et al., 2019).

Ces résultats peuvent s'interpréter dans le cadre de modèles théoriques sur l'importance de la coordination entre les régions temporales postérieures (GTM et GTS postérieurs) et les régions frontales antérieures (GFI-op) (Grandchamp et al., 2019 ; Guenther & Vladusich, 2012 ; Hickok, 2012a). En effet, les modèles proposés par Hickok (2012a), Guenther et Vladusich (2012) et Grandchamp et al. (2019) suggèrent que la connectivité entre les régions antérieures et postérieures est

nécessaire au mécanisme de copie d'efférence qui sous-tend le contrôle efficient de la production de parole. Une atteinte au niveau des régions antérieures ou postérieures ou de la connexion entre les deux pourrait entraîner des troubles de la programmation motrice avec une diminution de la fluence, dus aux difficultés lors de la génération et de l'utilisation de la copie d'efférence (Feenaughty et al., 2017). Selon Johnson, Yourganov, et al. (2022), la tâche d'imitation de parole assistée, qui guide la production par la présentation de stimuli audiovisuels, permettrait de restaurer le mécanisme de copie d'efférence qui serait défaillant dans l'aphasie non fluente, en recrutant les régions postérieures résiduelles (*i.e.*, le GTM postérieur qui est impliqué dans l'intégration audio-visuelle; Venezia et al., 2016), ce qui permettrait de produire une parole plus fluente. Par ailleurs, Johnson, Yourganov, et al. (2022) ont mis en évidence un renforcement de la connectivité fonctionnelle entre les régions antérieures et postérieures (normalisation de la connectivité), au niveau de l'hémisphère gauche ainsi que des régions homologues à droite, associé à l'amélioration de la fluence verbale, lors de l'imitation assistée.

2.1.3 Implications thérapeutiques : recommandations pour la rééducation orthophonique

Ainsi, nous fondant sur ces travaux, nous proposons que les méthodes qui s'appuient sur une illustration visuelle, telle que l'imitation de son assistée visuellement (Fridriksson et al., 2012) ou encore la rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player*, sont particulièrement adaptées à la rééducation orthophonique des patients présentant une aphasie sévère avec une diminution de la fluence verbale. L'illustration visuelle fournie pourrait en effet compléter les représentations auditives et somatosensorielles et permettre de construire des objectifs phonologiques plus complets, qui permettraient une amélioration des étapes de planification et programmation motrices et un *monitoring* interne plus robuste lors de la production de parole. En outre, il apparaît que le logiciel *Ultraspeech-player* – qui présente l'avantage de fournir, en plus des informations labiales, des informations visuelles sur des articulations habituellement non visibles (mouvements linguaux sagittaux) – semble être particulièrement indiqué pour compléter et renforcer les objectifs phonologiques. Ainsi, en complément du modèle proposé par Grandchamp et al. (2019) (**cf.** Figure 1.3, dans le Chapitre 1), nous proposons que l'apport de représentations visuelles permettrait d'augmenter les objectifs phonologiques multisensoriels, permettant un plan moteur

plus complet et rendant plus robuste la comparaison avec la prédiction multisensorielle générée par le mécanisme de copie d'efférence.

Par ailleurs, en s'appuyant sur le lien entre les fonctions exécutives (ou cognitives non linguistiques) et le langage, [Herbet et Duffau \(2020\)](#) ont proposé qu'une rééducation multimodale, ciblant les processus langagiers atteints ainsi que les fonctions associées au langage (*i.e.*, mémoire de travail, fonctions exécutives, attention), permettrait une reconfiguration des réseaux fonctionnels conduisant à un nouvel état d'« équilibre fonctionnel » capable de compenser les troubles du langage. Récemment, une étude a proposé une nouvelle méthode de rééducation intégrant la flexibilité cognitive (*Cognitive Flexibility in Aphasia Therapy*; voir [Spitzer, Binkofski, Willmes, & Bruehl, 2021](#)). Cette méthode permet une rééducation à la fois des troubles langagiers et des troubles exécutifs tels que la flexibilité. Des études ont également proposé de cibler les compétences cognitives non linguistiques pour améliorer les compétences linguistiques (*e.g.*, voir [Amaddii, Centorrino, Cambi, & Passali, 2014](#) ; [Coelho, 2005](#) ; [Helm-Estabrooks, 2011](#) ; [Mayer, Mitchinson, & Murray, 2017](#) ; [Ramsberger, 2005](#)).

En résumé, nos travaux offrent des perspectives encourageantes pour les patients présentant une aphasie sévère initialement. En effet, certaines thérapies intensives ne sont généralement pas proposées aux patients présentant une aphasie sévère initialement (comme mentionné par [Glize et al., 2017](#)). Cependant, dans cette thèse, nous mettons en évidence une meilleure récupération lors de la rééducation intensive chez ces patients, et nous proposons qu'en ciblant le renforcement des objectifs phonologiques, par un entraînement audio-visuel de la parole (*i.e.*, méthode s'appuyant sur l'illustration visuelle), la réorganisation cérébrale pourrait être optimale.

2.2 Vers une rééducation augmentée, fondée sur l'intégration sensorimotrice

Dans le Chapitre 4, nous avons montré un effet bénéfique de la rééducation renforcée, fondée sur l'intégration sensorimotrice avec le logiciel *Ultraspeech-player* en complément de la rééducation orthophonique classique. Nos résultats semblent indiquer qu'un entraînement s'appuyant sur la présentation des informations visuelles articulatoires (mouvements des lèvres et mouvements internes de la langue), en complément d'informations auditives (provenant du logiciel et issues du retour auditif sur les productions des patients eux-mêmes) et somesthésiques (ressenti des mouvements articulatoires), permet d'améliorer les productions orales des patients. Cette amélioration

est observée sur un plan linguistique, avec de meilleures performances lexicales et phonétiques (diminution des erreurs, des confusions, augmentation des productions correctes) et confirmée quantitativement sur le plan acoustique (caractéristiques spectrales et temporelles se rapprochant de la norme), suggérant que la visualisation des articulateurs d'un locuteur standard permet une amélioration du placement des articulateurs du patient. Nous observons également que cette amélioration est associée à une plasticité cérébrale induite par la rééducation, avec un recrutement supplémentaire des régions impliquées dans les interactions somato-sensorimotrices (AMS et cortex somesthésique primaire, gyrus précentral à gauche et Crus I à droite) et auditivo-motrices (GFI-orb et insula à gauche). Ces interactions jouent un rôle dans l'intégration des informations multisensorielles associées à la production de parole (représentations auditives, visuelles et somesthésiques du son et des articulateurs de la parole; [Grandchamp et al., 2019](#) ; [Hickok, 2012a](#)).

En nous appuyant sur ces résultats, nous avons proposé dans le Chapitre 5 une rééducation renforcée qui peut s'apparenter à une rééducation intensive en phase chronique, avec un rythme de 5 séances/semaines. En effet, dans les premiers mois suivant l'AVC, la fréquence optimale des séances est quasi-quotidienne, avec 5 séances/semaine (environ 45 minutes/séance)⁷, tandis qu'elle diminue après trois mois ([Koenig-Bruhin et al., 2013](#) ; [Viader et al., 2010](#)). En phase chronique, généralement, le nombre de séances de rééducation orthophonique par semaine est de 2, auquel nous proposons d'ajouter trois séances de rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player*. D'après certains auteurs, une rééducation intensive pourrait être définie par une fréquence de 1 à 2 heures/jour pendant 2 à 4 semaines ([Bhagal, Teasell, & Speechley, 2003](#)) et une fréquence est considérée comme intensive au-delà de 5 heures/semaine ([Breitenstein et al., 2017](#)). Toutefois, quelques études ne semblent pas montrer une efficacité supérieure de la rééducation intensive en phase chronique (*e.g.*, voir [Raymer, Kohen, & Saffell, 2006](#) ; [Sage, Snell, & Lambon Ralph, 2011](#) ; [Stahl et al., 2018](#)). La littérature ne définit pas clairement le terme de « rééducation intensive » (elle est définie par le nombre d'heures/séance ou la durée de la thérapie ou le nombre d'heures total; [Kiran & Thompson, 2019](#)) et il n'existe actuellement pas d'intensité optimale définie ([Dignam et al., 2016](#) ; [Doogan et al., 2018](#)).

7. Précisons que, lors de l'hospitalisation en unité neurovasculaire, la rééducation est quotidienne, voire biquotidienne. Après la sortie des patients, la fréquence restera quotidienne en institution, mais elle diminue généralement dans le cas des prises en charge en libéral ([Chomel-Guillaume et al., 2010](#)).

Dans le contexte actuel, la pratique clinique est limitée en termes de ressources humaines et financières et les patients se heurtent à des limites, telles que : la couverture d'assurance limitée, le manque de moyens de transport, l'éloignement géographique, les contraintes horaires, la fatigue ou les restrictions sanitaires suite à la pandémie de Covid-19 (Braley et al., 2021 ; Harnish et al., 2014 ; Kong, 2021). Ainsi, il est impossible de maintenir une rééducation intensive à un rythme soutenu de 5 séances/semaine avec l'orthophoniste pour tous les patients, y compris les patients en phase chronique (Braley et al., 2021). Dans ce cadre, la rééducation en autonomie, à domicile, présente plusieurs intérêts. Par exemple, l'augmentation de l'intensité (associée à la réduction des déplacements et des coûts; Godlove et al., 2019 ; Meltzer et al., 2018), ou encore le choix de l'horaire (en lien avec d'autres contraintes personnelles, e.g., la possibilité de décaler en cas de fatigue importante qui entraînerait une séance non productive; Braley et al., 2021).

La rééducation en autonomie est un point en faveur de l'intensité et les interactions sociales avec l'entourage jouent également un rôle bénéfique dans le processus de récupération (van de Sandt-Koenderman, 2011). Ainsi, dans le cadre de la rééducation, l'implication de l'entourage (*i.e.*, principalement la famille) sera à encourager. Pour cela, il est possible d'enseigner à l'entourage des techniques permettant de favoriser la communication avec le patient et de l'impliquer dans la rééducation en lui proposant de s'assurer que le patient suit le protocole de rééducation correctement, ce qui permettra de favoriser l'interaction et l'engagement social (Haldin et al., 2022 ; Meltzer et al., 2018 ; Simmons-Mackie et al., 2016). De plus, la rééducation intensive, lorsqu'elle est adaptée au patient, peut être bénéfique et entraîner une augmentation de la motivation, de l'engagement et de la « compliance » du patient (*e.g.*, le cas de la TCI; Mohr, 2017 ; Stahl et al., 2016). En effet, la motivation joue un rôle important lors de la rééducation du langage et de la parole dans l'aphasie. Cependant, la façon de l'évaluer ne fait pas consensus et des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer le rôle de la motivation dans la récupération (Biel, Enclade, Richardson, Guerrero, & Patterson, 2022 ; Kirmess & Maher, 2010 ; Weatherill, Tibus, & Rodriguez, 2022).

Rappelons que, la récupération de l'aphasie est un processus complexe, qui implique des changements cérébraux qui facilitent ou interfèrent avec la récupération (Aghaz et al., 2018 ; Crosson et al., 2019). Ainsi, la thérapie devrait se concentrer sur les processus de restauration ou de réorganisation qui entraînent des changements cérébraux bénéfiques (Crosson et al., 2019). Nos travaux, ainsi que d'autres études antérieures (**cf.** Mohr, 2017), indiquent que la répétition de

stimuli durant un entraînement et l'imitation de sons de parole assistée visuellement favorisent l'apprentissage et la restructuration des réseaux langagiers résiduels. Les changements survenant au niveau cérébral sont le support du réapprentissage des séquences de parole et de la reconfiguration des processus langagiers (Crosson et al., 2019 ; Kiran & Thompson, 2019). Une forte intensité de la rééducation, ainsi que la répétition, permettent de promouvoir la neuroplasticité, favorisant ainsi le réapprentissage et la récupération des capacités linguistiques (Kiran & Thompson, 2019 ; Kleim & Jones, 2008). Ceci passe par le recrutement des régions péri-lésionnelles ou des régions à distance, notamment celles impliquées dans l'intégration multisensorielle (GTS et GTM postérieurs, GFI, jonction temporo-pariétale, aires motrices et pré-motrices, LPI, cervelet) associée à la production de la parole, mais également par un renforcement de la connectivité entre ces régions (Grandchamp et al., 2019 ; Hartwigsen & Saur, 2019 ; Herbet & Duffau, 2020 ; Hickok, 2012a). Dans les données présentées dans les Chapitres 4 et 5, nous observons effectivement un recrutement des régions impliquées dans les interactions somato-sensorimotrices (AMS et cortex somesthésique primaire à gauche ou à droite, gyrus précentral à gauche et Crus I à droite) et auditivo-motrices (GFI-orb et insula à gauche) suite à la rééducation avec le logiciel *Ultraspeech-player*.

De plus, lors de la mise en place d'une rééducation, l'objectif sera le transfert du gain obtenu pour une tâche donnée à une autre tâche non entraînée, avec comme visée ultime l'amélioration de la communication dans la vie quotidienne (Crosson et al., 2019 ; Kleim & Jones, 2008). Selon Kleim et Jones (2008), le transfert désigne « la capacité de la plasticité au sein d'un ensemble de circuits neuronaux à promouvoir une plasticité simultanée ou ultérieure ». Ce qui signifie que la plasticité, en réponse à un entraînement, pourra induire une amélioration sur des tâches, items ou comportements non entraînés : il s'agit de la généralisation (voir aussi Kiran & Thompson, 2019). Il est possible d'observer une généralisation lorsque des tâches partagent des mécanismes psycholinguistiques (Crosson et al., 2019). Par exemple, l'entraînement à la production de nouvelles séquences de phonèmes, afin de renforcer le système phonologique, peut permettre une généralisation à d'autres processus comme la récupération de mots ou la lecture (Brookshire, Conway, Pompon, Oelke, & Kendall, 2014 ; Kendall, Oelke, Brookshire, & Nadeau, 2015).

En résumé, nous avons proposé un nouveau programme de rééducation du langage et de la parole pour les patients présentant une aphasie non fluente chronique suite à un AVC. Ce nouveau

programme s'appuie sur l'utilisation du logiciel *Ultraspeech-player*, en complément de la rééducation orthophonique classique. Cette rééducation avec illustration visuelle, dite « augmentée », peut être réalisée en autonomie, éventuellement à domicile, ce qui est en faveur de l'augmentation de l'intensité sans surcharger les professionnels de santé (Braley et al., 2021). Toutefois, nous soulignons l'importance de la motivation (Biel et al., 2022 ; Kirmess & Maher, 2010 ; Weatherill et al., 2022) et de la présence de l'entourage (Meltzer et al., 2018 ; Simmons-Mackie et al., 2016 ; van de Sandt-Koenderman, 2011) dans la rééducation et dans le processus de récupération.

Cette rééducation est proposée aux patients avec une aphasie non fluente présentant une lésion des régions cérébrales antérieures, mais avec une préservation des régions péri-lésionnelles ou à distance, impliquées dans l'intégration sensorimotrice et/ou l'exécution motrice. L'intégrité de ces régions, en particulier les régions postérieures (GTS et GTM postérieurs, LPI, jonction temporo-pariétale) et motrices (voir les modèles de Grandchamp et al., 2019 ; Guenther & Vladusich, 2012 ; Hickok, 2012a), devrait permettre aux patients de tirer un bénéfice de la rééducation fondée sur l'interaction sensorimotrice (*i.e.*, fondée sur la transformation d'un signal multisensoriel augmenté en un plan moteur plus stable). Par ailleurs, sur la base des principes de répétition/intensité et de transfert/généralisation proposés par Kleim et Jones (2008), cette rééducation pourrait favoriser les mécanismes de neuroplasticité induite (voir aussi Kiran & Thompson, 2019), ce qui permettrait une amélioration plus générale des capacités de production de parole.

Nous avons proposé, dans le Chapitre 5, un nouveau protocole expérimental permettant de réaliser une évaluation multimodale (langagière, cognitive, cérébrale) de la récupération en lien avec la rééducation renforcée. Des détails concernant ce nouveau protocole seront présentés en tant que perspectives de ce travail.

3 Limites

Certaines limites relatives aux études présentées dans cette thèse peuvent être soulevées. Nous avons présenté, dans la Section 1.2, les limites relatives aux études de cas. Ici, nous présenterons donc les limites associées aux études réalisées dans les Chapitres 2 et 3.

Premièrement, l'évaluation des fonctions exécutives que nous avons mise en place ne fournit pas une évaluation détaillée des différentes fonctions, il s'agit d'un score global. Une mesure

plus détaillée permettrait de comparer nos résultats avec la littérature (*e.g.*, voir [Olsson et al., 2019](#) ; [Simic et al., 2020, 2019](#)).

Deuxièmement, nous n'avons pas pris en compte de covariables (*e.g.*, âge, taille de la lésion, etc.; voir suggestions de [Rajashekar et al., 2020](#)) dans les analyses VLSM et VDSM. Nous avons considéré que la taille de notre échantillon et de nos groupes ne nous permettait pas d'ajouter de covariables (comme suggéré par [Shahid et al., 2017](#)). Une analyse statistique, combinant la proportion de lésion au niveau de certaines régions clés (voir [Benghanem et al., 2019](#) ; [Johnson, Nemati, et al., 2022](#)) et les facteurs sociodémographiques, cliniques, associés à la lésion ou la rééducation, permettrait de déterminer le rôle de ces facteurs, conjointement, sur la sévérité initiale de l'aphasie et sur la récupération ultérieure.

Troisièmement, le calcul de gain que nous avons proposé permet de rendre compte du potentiel de récupération des patients, ce qui implique un gain plus élevé pour les patients sévères par rapport aux patients présentant une aphasie légère ou modérée. Une nouvelle façon de déterminer la récupération pourrait être envisagée, par exemple prendre en compte uniquement les patients sévères initialement ($ASRS_{EI} \leq 2$) et déterminer s'ils restent dans le groupe « aphasie sévère » lors de l'évaluation finale ($ASRS_{EF} \leq 2$), suggérant une mauvaise récupération, ou s'ils passent dans le groupe « aphasie modérée/légère » ($ASRS_{EF} \geq 3$), suggérant une bonne récupération. Une telle façon de procéder nécessite un plus grand nombre de patients.

4 Perspectives

Les perspectives que nous proposons dans la suite de ce travail reposent sur la mise en place du protocole SEMO. Dans le Chapitre 5, nous avons présenté ce nouveau protocole, ainsi que des résultats préliminaires. Cependant, la mise en place de ce protocole à l'échelle d'un groupe reste à effectuer. L'objectif global de ce nouveau protocole de recherche est d'évaluer l'effet sur les plans langagier, cognitif et cérébral de la rééducation renforcée, en comparaison à la rééducation orthophonique classique seule, chez des patients présentant une aphasie non fluente, avec l'apport de données linguistiques et cérébrales normatives chez des participants sains âgés.

La mise en place d'une étude de groupe permettra une généralisation de l'efficacité du logiciel sur un groupe de patients. Par ailleurs, cette étude sera réalisée en *cross-over*, ce qui permet de proposer à un patient donné les deux programmes de rééducation et de contrebalancer leur ordre.

Il existe une importante variabilité entre les patients, notamment en termes de troubles et de taille et localisation de lésion. Ainsi, le fait de proposer la rééducation renforcée et la rééducation simple à un même patient nous permet de les comparer, en limitant la variabilité qui serait générée en comparant deux groupes suivants chacun un des programmes de rééducation. De plus, l'observation de deux groupes de patients, proposée dans ce *cross-over*, permet de prendre en compte l'effet d'ordre dû à l'utilisation de deux programmes de rééducation. Ainsi, contrairement aux études de cas présentées dans cette thèse, ce protocole permettra à terme d'identifier l'effet spécifique de la rééducation augmentée visuellement (*i.e.*, fondée sur le logiciel *Ultraspeech-player*).

La présence d'un groupe contrôle, apparié en âge, sexe et préférence manuelle, apporte des informations supplémentaires (*i.e.*, les normes) sur les plans langagier (acoustique et parole intérieure) et cérébral (IRMf de tâche, de repos et DTI).

Sur la base des mesures de neuroimagerie, nous pourrions mettre en évidence les mécanismes de plasticité mis en place avant l'application du protocole et après la rééducation (renforcée ou simple), en comparant les patients et les participants sains⁸. Plus largement, ce protocole, nous permettra de proposer des profils de réorganisation du langage dans le cadre de la rééducation visuellement augmentée, fondée sur l'interaction sensorimotrice. Suite à un AVC, la réorganisation des structures associées au langage peut survenir, spontanément ou suite à la rééducation, avec un recrutement des régions péri-lésionnelles ou à distance de la lésion (dans l'hémisphère ipsilésionnel ou dans les régions homotopiques de l'hémisphère controlatéral) (Herbet & Duffau, 2020). Les évaluations en neuroimagerie (IRMf de tâche, de repos et DTI), proposées dans le cadre du protocole SEMO, représentent un atout important pour mieux comprendre les mécanismes qui sous-tendent la récupération du langage en lien avec la rééducation. En effet, dans les stades précoces, des déconnexions fonctionnelles et structurelles surviennent, entraînant une hypoactivation des régions du langage épargnées ou une hypoconnectivité des réseaux de repos, en lien avec les performances de langage (Hartwigsen & Saur, 2019 ; Sandberg, 2017). Une normalisation des mesures d'intégration et ségrégation et plus généralement de la connectivité fonctionnelle est corrélée à la récupération du langage, en lien avec la rééducation (*e.g.*, voir Duncan & Small, 2016 ; Johnson, Yourganov, et al., 2022 ; Kiran et al., 2015 ; Marcotte, Perlberg, Marrelec, Benali, & Ansaldo, 2013 ; Sandberg, Bohland, & Kiran, 2015 ; van Hees et al., 2014).

8. Pour rappel, les participants sains seront évalués lors de deux sessions à 4 semaines d'intervalle. Cependant, pendant ces quatre semaines, ils ne suivront aucune rééducation.

Par ailleurs, un AVC peut entraîner une lésion au niveau d'un faisceau de substance blanche et une déconnexion ou une atteinte de ce faisceau est associée à une diminution des performances de langage (Forkel & Catani, 2018). Notamment, une lésion au niveau du FA, du FAT et/ou du FU est associée à une diminution de la fluence verbale (Basilakos et al., 2014 ; Fridriksson et al., 2013). Il existe également un lien entre l'atteinte du FA (Forkel & Catani, 2018 ; Kim et al., 2021), du FAT (Forkel & Catani, 2018), du FLS, du corps calleux, de la *corona radiata* (Kim et al., 2021), du FU, de l'IFOF (Zavanone et al., 2018) et la sévérité de l'aphasie. Des études ont également montré que l'intégrité micro-structurale (évaluée par la fraction d'anisotropie) des FA, IFOF, FLS et FLI est associée à la sévérité de l'aphasie et aux performances dans différents domaines linguistiques (compréhension, lecture, dénomination, répétition, parole spontanée) (Braun et al., 2022 ; J.-K. Lee et al., 2021 ; Zhang et al., 2021). La rééducation peut donc induire des modifications structurelles (e.g., Schlaug et al., 2009 ; van Hees et al., 2014 ; Wan et al., 2014). Ainsi, van Hees et al. (2014) ont montré une normalisation de la valeur de la fraction d'anisotropie au niveau du FA gauche après la rééducation. Wan et al. (2014), quant à eux, ont montré une diminution de la valeur de la fraction d'anisotropie au niveau des faisceaux de substance blanche sous-jacents au GFI, au GTS postérieur et au *cingulum* postérieur à droite. Toutefois, des études supplémentaires sont nécessaires afin de clarifier le rôle des régions au niveau des hémisphères gauche et droit et d'examiner les modifications de connectivité anatomique et fonctionnelle survenant suite à la rééducation. Ainsi, une évaluation de la connectivité fonctionnelle et structurelle et des activations lors de tâches de langage permettra de présenter les profils de réorganisation associés à la récupération du langage et de la parole suite à la rééducation renforcée ou simple.

Lors de l'évaluation acoustique, les données permettront d'obtenir les valeurs des paramètres acoustiques chez les participants sains âgés. En effet, le vieillissement entraîne des modifications de la vitesse articulaire, une altération de la coordination et des modifications des capacités d'anticipation, impactant les paramètres acoustiques (D'Alessandro & Fougeron, 2018 ; Hermes et al., 2018). Ainsi, la présence de ce groupe contrôle fournira des valeurs standard à comparer à celles des patients. Ces paramètres acoustiques mesurés permettront de rendre compte de la position et de la dynamique des articulateurs de la parole lors de la production de consonnes

et voyelles. Par ailleurs, la mesure de ces paramètres acoustiques comblera le manque de données concernant les caractéristiques acoustiques durant le vieillissement, notamment pour les consonnes fricatives du français.

Un volet qui n'est pas traité en détail dans cette thèse s'intéresse à la parole intérieure. En effet, le protocole SEMO comprend une évaluation des capacités de parole intérieure chez les participants sains et chez les patients. Rappelons que la parole intérieure peut être définie sur la base de l'expérience subjective⁹, comme la capacité de générer du langage silencieusement dans sa propre tête ou de développer une image auditivo-articulatoire de la parole, sans émettre de son (*i.e.*, sans sortie motrice effective). Elle peut également être définie sur la base de l'expérience objective¹⁰, comme la capacité objectivement mesurable d'évaluer la structure auditivo-articulatoire de la parole, sans tenir compte du sens (voir Fama & Turkeltaub, 2020). Malgré les troubles de la parole à voix haute présents chez les patients atteints d'aphasie, la parole intérieure reste parfois préservée (*e.g.*, voir Fama, Hayward, Snider, Friedman, & Turkeltaub, 2017 ; Geva, Bennett, Warburton, & Patterson, 2011 ; Stark et al., 2017). Plus spécifiquement, il semblerait qu'elle soit davantage préservée pour les patients présentant une capacité de récupération des mots intacte et des difficultés principalement au niveau du traitement de la sortie vocale (pour une revue, voir Fama & Turkeltaub, 2020). Les études soulignent la nécessité de mieux comprendre le fonctionnement et les corrélats neuroanatomiques de la parole intérieure chez les patients présentant une aphasie non fluente (Buffo, 2021 ; Fama & Turkeltaub, 2020 ; Geva et al., 2011). Notons qu'une étude est en cours, en collaboration avec un collectif de chercheurs et de praticiens hospitaliers basés en Roumanie, dans le but de déterminer le décours temporel des activations associées à la production de parole intérieure chez des patients épileptiques implantés en utilisant l'électroencéphalographie intracrânienne. Cette étude devrait permettre de mieux comprendre le déroulement temporel des activations de certaines régions cérébrales cruciales dans la production de la parole. Dans le cadre du protocole SEMO, l'évaluation de la parole intérieure, avec des mesures objectives et subjectives, permettra de mieux comprendre le fonctionnement et de mieux identifier les corrélats neuronaux de la parole intérieure, tant chez des patients atteints d'aphasie que chez des participants sains âgés.

9. L'évaluation subjective de la parole intérieure se base sur les réponses des personnes lorsqu'on les interroge sur l'intégrité de leur parole intérieure (*e.g.*, des questionnaires).

10. L'évaluation objective de la parole intérieure se base sur l'utilisation de tâches de langage afin de mesurer indirectement les capacités de parole intérieure (*e.g.*, les tâches de détection de rimes ou détection d'homophones).

Ce protocole comprend également un bilan neuropsychologique des patients avec une évaluation des performances cognitives, du fonctionnement exécutif, de la mémoire, des capacités de rotation mentale et de l'anxiété et de la dépression. Par le biais de l'étude d'un modèle pathologique (les patients présentant une aphasie), nous pourrions étudier l'interaction qui existe entre le langage et d'autres fonctions cognitives. Par exemple, sur la base des interactions entre le langage et la mémoire, une étude récente a proposé un modèle neurocognitif du langage et de la mémoire en interaction (Roger, Banjac, et al., 2022). Ces notions d'interaction entre le langage et la mémoire ont été plus largement étudiées dans le cas de patients présentant une épilepsie temporale pharmaco-résistante (voir Banjac, 2021 ; Banjac et al., 2020 ; Roger, 2020). De même, il existe une interaction entre le langage et les fonctions exécutives, ce qui a été montré notamment dans l'étude de patients présentant une aphasie suite à un AVC (Gilmore et al., 2019 ; Gonçalves et al., 2018 ; Herbet & Duffau, 2020 ; Olsson et al., 2019 ; Simic et al., 2019). Les résultats de cette thèse vont dans ce sens, avec une association entre le dysfonctionnement exécutif et la sévérité de l'aphasie. Ceci est donc en accord avec un modèle récent suggérant l'existence d'un réseau inflexible du langage (Net 1) et de trois réseaux supplémentaires, activés différemment selon la tâche de langage, qui sont associés au contrôle exécutif (Net 2), à la connaissance (Net 3) et aux aspects sensorimoteurs de la production de parole (Net 4) (Roger, Rodrigues De Almeida, et al., 2022). Ainsi, des travaux supplémentaires pourront être menés, dans le cadre du protocole SEMO, afin de mettre en évidence la relation entre les fonctions du langage (évaluées lors du bilan orthophonique) et les fonctions cognitives (évaluées lors du bilan neuropsychologique). Une intégration des informations langagières et cognitives pourra être proposée afin d'expliquer les profils de réorganisation anatomo-fonctionnelle dans une perspective multimodale.

De façon plus concrète, nous avons présenté les résultats attendus suite à la mise en place du protocole SEMO (cf. Chapitre 5, Section 1.3). Ainsi, nous supposons que, dans le cas d'une efficacité supérieure de la rééducation renforcée, la comparaison entre les évaluations réalisées avant et après chaque programme de rééducation, mettra en évidence : (i) une augmentation des productions correctes, une diminution des erreurs et un rapprochement des paramètres acoustiques vers les valeurs normales obtenues chez les participants sains, spécifiquement pour les phonèmes ciblés par le logiciel (*i.e.*, les phonèmes pour lesquelles les articulateurs sont visibles sans ambiguïté) et les conditions entraînées durant la rééducation augmentée, notamment la condition [VCV] ; (ii)

une efficacité de la rééducation en cas de maintien des fonctions cognitives (aussi observée dans le cas de la rééducation simple) ; et (iii) un recrutement supplémentaire des réseaux impliqués dans l'intégration multisensorielle (Grandchamp et al., 2019) et plus spécifiquement dans la programmation et la planification motrices (*i.e.*, le GFI, l'insula, le cortex prémoteur ventral gauche, l'AMS et M1) et dans le monitoring des erreurs (*i.e.*, le LPI), avec un renforcement de la connectivité fonctionnelle entre ces régions (*e.g.*, renforcement de la connectivité entre les régions antérieures et postérieures nécessaire au mécanisme de copie d'efférence ; Grandchamp et al., 2019 ; Johnson, Yourganov, et al., 2022) et une modification de la connectivité structurale au sein de certains faisceaux de substance blanche impliqués dans le langage (*e.g.*, la normalisation de la fraction d'anisotropie ou l'augmentation du volume du FA ; Schlaug et al., 2009 ; van Hees et al., 2014).

Comme noté plus haut, dans la pratique clinique, la proposition de nouvelles méthodes de rééducation, en complément de la rééducation orthophonique classique, présente plusieurs intérêts : l'augmentation de la récupération et l'augmentation de l'intensité. Par ailleurs, le maintien d'une rééducation intensive pour les patients en phase chronique se heurte à des limites liées à la pratique clinique (*e.g.*, ressources humaines et financières) et aux patients eux-mêmes (*e.g.*, couverture d'assurance limitée, manque de moyens de transport, fatigue, etc.). Ainsi, de nouvelles méthodes ont été proposées permettant une rééducation intensive, même en phase chronique (*e.g.*, utilisation d'applications à domicile ; pour une revue, voir Haldin et al., 2022). C'est le cas notamment de la méthode que nous proposons. Bien que, des recherches supplémentaires soient nécessaires pour tirer des conclusions définitives sur l'efficacité de ces nouvelles méthodes, nos premiers résultats, ainsi que ceux d'autres équipes évaluant des méthodes similaires, sont prometteurs (Vochin et al., 2022). Cependant, ces nouvelles méthodes sont peu utilisées dans la pratique clinique courante, au-delà du cadre de la recherche expérimentale. Une des raisons qui pourraient expliquer cela, est la nécessité de les normer, de former des orthophonistes pour les utiliser, avec une bonne compréhension des principes théoriques qui les sous-tendent et/ou une maîtrise adéquate du matériel à utiliser. Par ailleurs, un plus grand effort doit être fait par les chercheurs qui développent ces nouvelles approches, pour faire connaître, diffuser et expliquer les principes de ces différentes méthodes (Haldin et al., 2022).

Ces nouvelles méthodes sont proposées en vue de compléter la rééducation orthophonique classique, et non de la remplacer. De plus, le logiciel *Ultraspeech-player*, que nous proposons

dans le cadre de la rééducation, peut être utilisé par les patients en autonomie, à leur domicile. Ainsi, à plus long terme, cette méthode pourrait être proposée en complément, pour que les patients réalisent des exercices à domicile. Notons que, des améliorations du logiciel peuvent être envisagées. En effet, plusieurs éléments pourraient être améliorés : (i) le mouvement du contour du conduit vocal ou *a minima* l'ouverture ou fermeture des lèvres lorsque le patient visualise les mouvements de la langue; (ii) l'ajout de mots, voire de phrases pour l'entraînement; (iii) un indicateur de voisement et de la nasalisation (*e.g.*, présence d'une flèche indiquant la présence du voisement ou de la nasalisation pour les consonnes).

5 Conclusion générale

Dans cette thèse, pour faire face au nombre limité de données concernant les facteurs associés à la sévérité initiale de l'aphasie et au manque de données fiables concernant les facteurs à prendre en compte lors de la mise en place de la rééducation, nous avons proposé deux études évaluant les facteurs associés à la sévérité et la récupération dans l'aphasie post-AVC. Nos résultats offrent une perspective encourageante pour les patients présentant une aphasie sévère initialement, associée à une lésion large avec un AVC sévère et un dysfonctionnement exécutif, car la rééducation intensive semble leur être bénéfique. De plus, l'atteinte des régions cérébrales antérieures (insula, GFI-op, GFI-tri et opercule rolandique) et une déconnexion de l'IFOE, du FA, du FAT, des RTS à gauche et du corps calleux sont associées à une aphasie plus sévère initialement. Toutefois, la récupération est plus importante suite à une rééducation intensive, en particulier pour les patients présentant une aphasie sévère initialement avec une lésion du GFI-op à gauche.

Par ailleurs, la diminution d'efficacité des méthodes orthophoniques classiques et les différentes limites empêchant le maintien de la rééducation intensive en phase chronique (*e.g.*, ressources humaines et financières, couverture d'assurance limitée, manque de moyens de transport, fatigue, etc.), rendent nécessaire le développement de nouvelles méthodes de rééducation. Dans cette thèse, nous avons proposé une méthode visuellement augmentée, fondée sur l'interaction sensorimotrice (*via* le logiciel *Ultraspeech-player*). Cette méthode permet une amélioration de la coordination des mouvements articulatoires ainsi que du placement des articulateurs, en lien avec le recrutement des régions cérébrales impliquées dans l'interaction auditivo-motrice et somato-sensorimotrice.

Ainsi, ces différents résultats, conduisent à la proposition d'un nouveau protocole de recherche permettant d'évaluer l'efficacité sur les plans langagier, cognitif et cérébral de la rééducation renforcée (rééducation augmentée en complément de la rééducation orthophonique classique), en comparaison à la rééducation orthophonique classique seule, chez des patients présentant une aphasie non fluente, avec l'apport de données linguistiques et cérébrales chez des participants sains âgés.

La principale perspective de cette thèse repose donc sur la mise en place de ce nouveau protocole de recherche à une plus grande échelle et, à plus long terme, la proposition d'intégrer le logiciel *Ultraspeech-player* dans la prise en charge, en complément de la rééducation orthophonique classique. En effet, l'illustration visuelle fournie par le logiciel pourrait compléter les représentations auditives et somatosensorielles et permettre de construire des objectifs phonologiques plus complets, qui permettraient une amélioration des étapes de planification et programmation motrices et un *monitoring* interne plus robuste lors de la production de parole.

Bibliographie

Abramson, A. S., & Whalen, D. H. (2017). Voice onset time (VOT) at 50 : Theoretical and practical issues in measuring voicing distinctions. *Journal of Phonetics*, 63, 75–86. doi: [10.1016/j.wocn.2017.05.002](https://doi.org/10.1016/j.wocn.2017.05.002)

cité page 14

Acher, A., Fabre, D., Hueber, T., Badin, P., Detante, O., Cousin, E., ... Baciú, M. (2016). Retour visuel en aphasiologie : résultats comportementaux, acoustiques et en neuroimagerie. In N. Joyeux & S. Topouzkhaniyan (Eds.), *XVIèmes rencontres internationales d'orthophonie. orthophonie et technologies innovantes* (pp. 227–260). Paris, France : Ortho Edition.

cité page 133

Adank, P. (2012). The neural bases of difficult speech comprehension and speech production : Two activation likelihood estimation (ALE) meta-analyses. *Brain and Language*, 122(1), 42–54. doi: [10.1016/j.bandl.2012.04.014](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2012.04.014)

cité page 202

Agence nationale d'accréditation et d'évaluation en santé. (2002). Prise en charge initiale des patients adultes atteints d'accident vasculaire cérébral. aspects paramédicaux. *Recommandations pour la pratique clinique*.

cité page 31

Aghaz, A., Hemmati, E., & Ghasisin, L. (2018). Types of neuroplasticity and factors affecting language recovery in patients with aphasia : A systematic review. *Archives of Neuroscience*, 5(3), e62265. doi: [10.5812/ans.62265](https://doi.org/10.5812/ans.62265)

6 citations, pages 45, 46, 47, 48, 200 & 226

Alario, F.-X., Chainay, H., Lehericy, S., & Cohen, L. (2006). The role of the supplementary motor area (SMA) in word production. *Brain Research*, 1076(1), 129–143. doi: [10.1016/j.brainres.2005.11.104](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.11.104)

cité page 204

Albaret, J.-M., & Aubert, E. (1996). Test de rotation mentale de Vandenberg : étalonnage 15-19 ans. *Évolutions Psychomotrices*, 8(34), 169–178.

2 citations, pages 139, 166

Ali, M., Vandenberg, K., Williams, L. J., Williams, L. R., Abo, M., Becker, F., ... Brady, M. C. (2021). Predictors of Poststroke Aphasia Recovery : A Systematic Review-Informed Individual Participant Data Meta-Analysis. *Stroke*, 52(5), 1778–1787. doi: [10.1161/STROKEAHA.120.031162](https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.120.031162)

cité page 2

Allain, S., Naouri, D., & de Peretti, C. (2022). En France, les AVC sont plus fréquents, plus graves et moins souvent pris en charge en unité spécialisée pour les personnes les plus modestes.

DREES, *Études et Résultats*(1219), 1–7.

cité page 86

Allen, L., Mehta, S., Andrew McClure, J., & Teasell, R. (2012). Therapeutic interventions for aphasia initiated more than six months post stroke : A review of the evidence. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 19(6), 523–535. doi: [10.1310/tsr1906-523](https://doi.org/10.1310/tsr1906-523)

cité page 37

Amaddii, L., Centorrino, S., Cambi, J., & Passali, D. (2014). Communication skills and thalamic lesion : Strategies of rehabilitation. *Otolaryngologia Polska*, 68(4), 174–179. doi: [10.1016/j.otpol.2014.04.002](https://doi.org/10.1016/j.otpol.2014.04.002)

cité page 224

American Psychological Association. (2022a). *American psychological association dictionary of psychology*. Consulté le 2022-12-05, sur <https://dictionary.apa.org/>

cité page 8

American Psychological Association. (2022b). Crossover design. In *American psychological association dictionary of psychology*. Consulté le 2022-12-21, sur <https://dictionary.apa.org/crossover-design>

cité page 161

Andrews-Hanna, J. R., Smallwood, J., & Spreng, R. N. (2014). The default network and self-generated thought : component processes, dynamic control, and clinical relevance : The brain's default network. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1316(1), 29–52. doi: [10.1111/nyas.12360](https://doi.org/10.1111/nyas.12360)

cité page 27

Anglade, C., Thiel, A., & Ansaldi, A. I. (2014). The complementary role of the cerebral hemispheres in recovery from aphasia after stroke : A critical review of literature. *Brain Injury*, 28(2), 138–145. doi: [10.3109/02699052.2013.859734](https://doi.org/10.3109/02699052.2013.859734)

cité page 202

Ardila, A., Bernal, B., & Rosselli, M. (2014). The elusive role of the left temporal pole (BA38) in language : A preliminary meta-analytic connectivity study. *International Journal of Brain Science*, 2014, 1–7. doi: [10.1155/2014/946039](https://doi.org/10.1155/2014/946039)

cité page 204

Ardila, A., Bernal, B., & Rosselli, M. (2016a). How localized are language brain areas? A review of brodmann areas involvement in oral language. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 31(1), 112–122. doi: [10.1093/arclin/acv081](https://doi.org/10.1093/arclin/acv081)

3 citations, pages 81, 218 & 219

Ardila, A., Bernal, B., & Rosselli, M. (2016b). Why Broca's area damage does not result in classical Broca's aphasia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 249. doi: [10.3389/fnhum.2016.00249](https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00249)

cité page 81

Ardila, A., & Rubio-Bruno, S. (2018). Aphasia from the inside : The cognitive world of the aphasic patient. *Applied Neuropsychology Adult*, 25(5), 434–440. doi: [10.1080/23279095.2017.1323753](https://doi.org/10.1080/23279095.2017.1323753)

cité page 152

Austin, P. C., & Tu, J. V. (2004). Bootstrap methods for developing predictive models. *The American Statistician*, 58(2), 131–137. doi: [10.1198/0003130043277](https://doi.org/10.1198/0003130043277)

2 citations, pages 74, 102

Auzou, P., & Rolland-Monnoury, V. (2006). *BECD : Batterie d'Évaluation Clinique de la Dysarthrie*. Ortho édition.

2 citations, pages 139, 172

Azhar, A., Maqbool, S., Butt, G. A., Iftikhar, S., & Iftikhar, G. (2017). Frequency of aphasia and its symptoms in stroke patients. *Journal of Speech Pathology & Therapy*, 2(1), 121. doi: 10.4172/2472-5005.1000121

cité page 163

Azouvi, P., Bartolomeo, P., Beis, J.-M., Pérennou, D., Pradat-Diehl, P., & Rousseaux, M. (2006). A battery of tests for the quantitative assessment of unilateral neglect. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 24(4-6), 273–285.

cité page 65

Babbitt, E. M., & Cherney, L. R. (2010). Communication confidence in persons with aphasia. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 17(3), 214–223. doi: 10.1310/tsr1703-214

cité page 43

Baciu, M., Banjac, S., Roger, E., Haldin, C., Perrone-Bertolotti, M., Lœvenbruck, H., & Démonet, J.-F. (2021). Strategies and cognitive reserve to preserve lexical production in aging. *GeroScience*, 43(4), 1725–1765. doi: 10.1007/s11357-021-00367-5

cité page 215

Baciu, M., & Perrone-Bertolotti, M. (2015). What do patients with epilepsy tell us about language dynamics? A review of fMRI studies. *Reviews in the Neurosciences*, 26(3), 323–341. doi: 10.1515/revneuro-2014-0074

cité page 46

Bakheit, A., Shaw, S., Barrett, L., Wood, J., Carrington, S., Griffiths, S., ... Koutsi, F. (2007). A prospective, randomized, parallel group, controlled study of the effect of intensity of speech and language therapy on early recovery from poststroke aphasia. *Clinical Rehabilitation*, 21(10), 885–894. doi: 10.1177/0269215507078486

cité page 221

Baldo, J. V., Wilkins, D. P., Ogar, J., Willock, S., & Dronkers, N. F. (2011). Role of the precentral gyrus of the insula in complex articulation. *Cortex*, 47(7), 800–807. doi: 10.1016/j.cortex.2010.07.001

cité page 133

Banaszkiewicz, A., Bola, Ł., Matuszewski, J., Szczepanik, M., Kossowski, B., Mostowski, P., ... Marchewka, A. (2021). The role of the superior parietal lobule in lexical processing of sign language: Insights from fMRI and TMS. *Cortex*, 135, 240–254. doi: 10.1016/j.cortex.2020.10.025

cité page 203

Banjac, S. (2021). *Interactive cartography of language and memory in patients with focal and pharmaco-resistant epilepsy. multimodal assessment*. (Thèse de doctorat). Université Grenoble Alpes, Grenoble, France.

2 citations, pages 26, 233

Banjac, S., Roger, E., Cousin, E., Perrone-Bertolotti, M., Haldin, C., Pichat, C., ... Baciu, M. (2020). Interactive mapping of language and memory with the GE2REC protocol. *Brain Imaging and Behavior*, 15(3), 1562–1579. doi: 10.1007/s11682-020-00355-x

cité page 233

Barbey, A. K., Colom, R., Solomon, J., Krueger, F., Forbes, C., & Grafman, J. (2012). An integrative architecture for general intelligence and executive function revealed by lesion mapping. *Brain*, 135(4), 1154–1164. doi: 10.1093/brain/aws021

3 citations, pages 80, 84 & 220

- Barbey, A. K., Koenigs, M., & Grafman, J. (2013). Dorsolateral prefrontal contributions to human working memory. *Cortex*, 49(5), 1195–1205. doi: [10.1016/j.cortex.2012.05.022](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.05.022)
cité page 206
- Barnay, J.-L., Gregoire, W., Marc, R., Huei-Yune, B., Dischler, F., De Boissezon, X., ... Bénaim, C. (2012). Presentation of the cognitive assessment scale for stroke patient (CASP). *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 55(1), e188. doi: [10.1016/j.rehab.2012.07.481](https://doi.org/10.1016/j.rehab.2012.07.481)
3 citations, pages 139, 152 & 165
- Basilakos, A., Fillmore, P. T., Rorden, C., Guo, D., Bonilha, L., & Fridriksson, J. (2014). Regional white matter damage predicts speech fluency in chronic post-stroke aphasia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 845. doi: [10.3389/fnhum.2014.00845](https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00845)
6 citations, pages 59, 82, 83, 91, 219 & 231
- Basso, A. (2005). How intensive/prolonged should an intensive/prolonged treatment be? *Aphasiology*, 19(10-11), 975–984. doi: [10.1080/02687030544000182](https://doi.org/10.1080/02687030544000182)
cité page 221
- Bates, E., Wilson, S. M., Saygin, A. P., Dick, F., Sereno, M. I., Knight, R. T., & Dronkers, N. F. (2003). Voxel-based lesion-symptom mapping. *Nature Neuroscience*, 6(5), 448–450. doi: [10.1038/nn1050](https://doi.org/10.1038/nn1050)
4 citations, pages 59, 80, 81 & 82
- Baudo, K., & Vernisse, A.-L. (2001). *Influence de la mémoire de travail sur l'ordre de réussite aux épreuves métaphonologiques* (Mémoire pour l'obtention du Certificat de capacité d'orthophonie). Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, France.
2 citations, pages 119, 164
- Beaulieu, C. (2002). The basis of anisotropic water diffusion in the nervous system – a technical review. *NMR in Biomedicine*, 15(7-8), 435–455. doi: [10.1002/nbm.782](https://doi.org/10.1002/nbm.782)
2 citations, pages 25, 173
- Beis, J.-M., Keller, C., Morin, N., Bartolomeo, P., Bernati, T., Chokron, S., ... for the French Collaborative Study Group on Assessment of Unilateral Neglect (2004). Right spatial neglect after left hemisphere stroke : Qualitative and quantitative study. *Neurology*, 63(9), 1600–1605. doi: [10.1212/01.WNL.0000142967.60579.32](https://doi.org/10.1212/01.WNL.0000142967.60579.32)
cité page 65
- Bénaim, C., Cailly, B., Pérennou, D., & Pelissier, J. (2004). Validation of the aphasic depression rating scale. *Stroke*, 35(7), 1692–1696. doi: [10.1161/01.STR.0000130591.95710.20](https://doi.org/10.1161/01.STR.0000130591.95710.20)
cité page 64
- Bénaim, C., Pérennou, D. A., Villy, J., Rousseaux, M., & Pelissier, J. Y. (1999). Validation of a Standardized Assessment of Postural Control in Stroke Patients : The Postural Assessment Scale for Stroke Patients (PASS). *Stroke*, 30(9), 1862–1868. doi: [10.1161/01.STR.30.9.1862](https://doi.org/10.1161/01.STR.30.9.1862)
cité page 64
- Benghanem, S., Rosso, C., Arbizu, C., Moulton, E., Dormont, D., Leger, A., ... Samson, Y. (2019). Aphasia outcome : the interactions between initial severity, lesion size and location. *Journal of Neurology*, 266(6), 1303–1309. doi: [10.1007/s00415-019-09259-3](https://doi.org/10.1007/s00415-019-09259-3)
6 citations, pages 49, 79, 91, 105, 106 & 229
- Berg, K., Isaksen, J., Wallace, S. J., Cruice, M., Simmons-Mackie, N., & Worrall, L. (2022). Establishing consensus on a definition of aphasia : an e-delphi study of international aphasia researchers. *Aphasiology*, 36(4), 385-400. doi: [10.1080/02687038.2020.1852003](https://doi.org/10.1080/02687038.2020.1852003)

2 citations, pages 30, 35

Bernhardt, J., Hayward, K. S., Kwakkel, G., Ward, N. S., Wolf, S. L., Borschmann, K., ... Cramer, S. C. (2017). Agreed definitions and a shared vision for new standards in stroke recovery research : The Stroke Recovery and Rehabilitation Roundtable taskforce. *International Journal of Stroke*, 12(5), 444–450. doi: [10.1177/1747493017711816](https://doi.org/10.1177/1747493017711816)

cité page 44

Berthier, M. L. (2005). Poststroke aphasia : Epidemiology, Pathophysiology and Treatment. *Drugs & Aging*, 22(2), 163–182. doi: [10.2165/00002512-200522020-00006](https://doi.org/10.2165/00002512-200522020-00006)

cité page 221

Berthier, M. L. (2021). Ten key reasons for continuing research on pharmacotherapy for post-stroke aphasia. *Aphasiology*, 35(6), 824–858. doi: [10.1080/02687038.2020.1769987](https://doi.org/10.1080/02687038.2020.1769987)

2 citations, pages 37, 112

Berthier, M. L., & Pulvermüller, F. (2011). Neuroscience insights improve neurorehabilitation of poststroke aphasia. *Nature Reviews Neurology*, 7(2), 86–97. doi: [10.1038/nrneurol.2010.201](https://doi.org/10.1038/nrneurol.2010.201)

3 citations, pages 45, 214 & 221

Bhagal, S. K., Teasell, R., & Speechley, M. (2003). Intensity of aphasia therapy, impact on recovery. *Stroke*, 34(4), 987–993. doi: [10.1161/01.STR.0000062343.64383.D0](https://doi.org/10.1161/01.STR.0000062343.64383.D0)

cité page 225

Biel, M., Enclade, H., Richardson, A., Guerrero, A., & Patterson, J. (2022). Motivation theory and practice in aphasia rehabilitation : A scoping review. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 31(5S), 2421–2443. doi: [10.1044/2022_ajslp-22-00064](https://doi.org/10.1044/2022_ajslp-22-00064)

2 citations, pages 226, 228

Billot, A., Thiebaut de Schotten, M., Parrish, T. B., Thompson, C. K., Rapp, B., Caplan, D., & Kiran, S. (2022). Structural disconnections associated with language impairments in chronic post-stroke aphasia using disconnectome maps. *Cortex*, 155, 90–106. doi: [10.1016/j.cortex.2022.06.016](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.06.016)

5 citations, pages 32, 59, 60, 67 & 84

Biou, E., Cassoudeulle, H., Cogné, M., Sibon, I., De Gabory, I., Dehail, P., ... Glize, B. (2019). Transcranial direct current stimulation in post-stroke aphasia rehabilitation : A systematic review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 62(2), 104–121. doi: [10.1016/j.rehab.2019.01.003](https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.01.003)

2 citations, pages 37, 112

Blumstein, S. E. (2016). Psycholinguistic approaches to the study of syndromes and symptoms of aphasia. In G. Hickok & S. L. Small (Eds.), *Neurobiology of language* (pp. 923–933). Academic Press. doi: [10.1016/B978-0-12-407794-2.00074-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407794-2.00074-2)

2 citations, pages 32, 154

Bock, K. (1987). Exploring levels of processing in sentence production. In G. Kempen (Ed.), *Natural Language Generation* (Vol. 135, pp. 351–363). Springer Netherlands. doi: [10.1007/978-94-009-3645-4_22](https://doi.org/10.1007/978-94-009-3645-4_22)

cité page 18

Boden-Albala, B., Litwak, E., Elkind, M. S. V., Rundek, T., & Sacco, R. L. (2005). Social isolation and outcomes post stroke. *Neurology*, 64(11), 1888–1892. doi: [10.1212/01.WNL.0000163510.79351.AF](https://doi.org/10.1212/01.WNL.0000163510.79351.AF)

4 citations, pages 50, 51, 90 & 155

Boersma, P., & Weenink, D. (2010). *Praat : doing phonetics by computer*. Consulté sur <https://>

www.fon.hum.uva.nl/praat/

3 citations, pages 121, 142 & 177

Bonilha, L., Hillis, A. E., Wilmskoetter, J., Hickok, G., Basilakos, A., Munsell, B., ... Fridriksson, J. (2019). Neural structures supporting spontaneous and assisted (entrained) speech fluency. *Brain*, 142(12), 3951–3962. doi: [10.1093/brain/awz309](https://doi.org/10.1093/brain/awz309)

2 citations, pages 107, 222

Bonini, M. V., & Radanovic, M. (2015). Cognitive deficits in post-stroke aphasia. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, 73(10), 840–847. doi: [10.1590/0004-282X20150133](https://doi.org/10.1590/0004-282X20150133)

5 citations, pages 34, 51, 79, 152 & 220

Borovsky, A., Saygin, A. P., Bates, E., & Dronkers, N. (2007). Lesion correlates of conversational speech production deficits. *Neuropsychologia*, 45(11), 2525–2533. doi: [10.1016/j.neuropsychologia.2007.03.023](https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.03.023)

2 citations, pages 81, 219

Bradshaw, A. R., Thompson, P. A., Wilson, A. C., Bishop, D. V., & Woodhead, Z. V. (2017). Measuring language lateralisation with different language tasks : a systematic review. *PeerJ*, 5, e3929. doi: [10.7717/peerj.3929](https://doi.org/10.7717/peerj.3929)

cité page 24

Brady, M. C., Ali, M., VandenBerg, K., Williams, L. J., Williams, L. R., Abo, M., ... Wright, H. H. (2022a). Complex speech-language therapy interventions for stroke-related aphasia : the RELEASE study incorporating a systematic review and individual participant data network meta-analysis. *Health and Social Care Delivery Research*, 10(28), 1–272. doi: [10.3310/rtlh7522](https://doi.org/10.3310/rtlh7522)

cité page 2

Brady, M. C., Ali, M., VandenBerg, K., Williams, L. J., Williams, L. R., Abo, M., ... Wright, H. H. (2022b). Dosage, Intensity, and Frequency of Language Therapy for Aphasia : A Systematic Review–Based, Individual Participant Data Network Meta-Analysis. *Stroke*, 53(3), 956–967. doi: [10.1161/STROKEAHA.121.035216](https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.121.035216)

9 citations, pages 2, 52, 54, 85, 91, 106, 108, 112 & 221

Brady, M. C., Kelly, H., Godwin, J., Enderby, P., & Campbell, P. (2016). Speech and language therapy for aphasia following stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2016(6). doi: [10.1002/14651858.CD000425.pub4](https://doi.org/10.1002/14651858.CD000425.pub4)

9 citations, pages 2, 35, 43, 51, 54, 91, 105, 106 & 221

Braley, M., Pierce, J. S., Saxena, S., De Oliveira, E., Taraboanta, L., Anantha, V., ... Kiran, S. (2021). A virtual, randomized, control trial of a digital therapeutic for speech, language, and cognitive intervention in post-stroke persons with aphasia. *Frontiers in Neurology*, 12, 626780. doi: [10.3389/fneur.2021.626780](https://doi.org/10.3389/fneur.2021.626780)

5 citations, pages 3, 42, 43, 226 & 228

Braun, E. J., Billot, A., Meier, E. L., Pan, Y., Parrish, T. B., Kurani, A. S., & Kiran, S. (2022). White matter microstructural integrity pre- and post-treatment in individuals with chronic post-stroke aphasia. *Brain and Language*, 232, 105163. doi: [10.1016/j.bandl.2022.105163](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2022.105163)

2 citations, pages 82, 231

Breier, J. I., Maher, L. M., Schmadeke, S., Hasan, K. M., & Papanicolaou, A. C. (2007). Changes in language-specific brain activation after therapy for aphasia using magnetoencephalography : A case study. *Neurocase*, 13(3), 169–177. doi: [10.1080/13554790701448200](https://doi.org/10.1080/13554790701448200)

cité page 202

- Breitenstein, C., Grewe, T., Flöel, A., Ziegler, W., Springer, L., Martus, P., ... Bamborschke, S. (2017). Intensive speech and language therapy in patients with chronic aphasia after stroke : a randomised, open-label, blinded-endpoint, controlled trial in a health-care setting. *The Lancet*, 389(10078), 1528–1538. doi: [10.1016/S0140-6736\(17\)30067-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30067-3)
4 citations, pages 105, 201, 221 & 225
- Brissenden, J. A., Tobyne, S. M., Halko, M. A., & Somers, D. C. (2021). Stimulus-specific visual working memory representations in human cerebellar lobule VIIb/VIIIa. *The Journal of Neuroscience*, 41(5), 1033–1045. doi: [10.1523/jneurosci.1253-20.2020](https://doi.org/10.1523/jneurosci.1253-20.2020)
cité page 202
- Broca, P. (1861a). Nouvelle observation d'aphémie produite par une lésion de la moitié postérieure des deuxième et troisième circonvolutions frontales. *Bulletin et Mémoires de la Société Anatomique de Paris*, 6, 398–407.
cité page 28
- Broca, P. (1861b). Perte de la parole, ramollissement chronique et destruction partielle du lobe antérieur gauche du cerveau. *Bulletin de la Société Anthropologique*, 2, 235–238.
2 citations, pages 17, 29
- Broca, P. (1861c). Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d'une observation d'aphémie (perte de la parole). *Bulletin et Mémoires de la Société Anatomique de Paris*, 6, 330–357.
2 citations, pages 28, 29
- Brookshire, C. E., Conway, T., Pompon, R. H., Oelke, M., & Kendall, D. L. (2014). Effects of Intensive Phonomotor Treatment on Reading in Eight Individuals With Aphasia and Phonological Alexia. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 23(2), S300-S311. doi: [10.1044/2014_AJSLP-13-0083](https://doi.org/10.1044/2014_AJSLP-13-0083)
cité page 227
- Brott, T., Adams, H. P., Olinger, C. P., Marler, J. R., Barsan, W. G., Biller, J., ... Hertzberg, V. (1989). Measurements of acute cerebral infarction : a clinical examination scale. *Stroke*, 20(7), 864–870. doi: [10.1161/01.STR.20.7.864](https://doi.org/10.1161/01.STR.20.7.864)
2 citations, pages 65, 96
- Brown, J. W., & Jaffe, J. (1975). Hypothesis on cerebral dominance. *Neuropsychologia*, 13(1), 107–110. doi: [10.1016/0028-3932\(75\)90054-8](https://doi.org/10.1016/0028-3932(75)90054-8)
2 citations, pages 24, 215
- Brown, S., Laird, A. R., Pfordresher, P. Q., Thelen, S. M., Turkeltaub, P., & Liotti, M. (2009). The somatotopy of speech : Phonation and articulation in the human motor cortex. *Brain and Cognition*, 70(1), 31–41. doi: [10.1016/j.bandc.2008.12.006](https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.12.006)
3 citations, pages 82, 204 & 219
- Brownsett, S. L., Warren, J. E., Geranmayeh, F., Woodhead, Z., Leech, R., & Wise, R. J. S. (2014). Cognitive control and its impact on recovery from aphasic stroke. *Brain*, 137(1), 242–254. doi: [10.1093/brain/awt289](https://doi.org/10.1093/brain/awt289)
4 citations, pages 47, 132, 201 & 204
- Brust, J. C., Shafer, S. Q., Richter, R. W., & Bruun, B. (1976). Aphasia in acute stroke. *Stroke*, 7(2), 167–174. doi: [10.1161/01.str.7.2.167](https://doi.org/10.1161/01.str.7.2.167)
2 citations, pages 1, 31
- Buckner, R. L., Andrews-Hanna, J. R., & Schacter, D. L. (2008). The brain's default network : Anatomy,

function, and relevance to disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124(1), 1–38. doi: [10.1196/annals.1440.011](https://doi.org/10.1196/annals.1440.011)

cité page 27

Buffo, M. (2021). *Liens entre accès au lexique, langage intérieur et imagerie visuelle chez les personnes aphasiques en phase chronique post-AVC : étude préliminaire* (Mémoire présenté pour l'obtention du certificat de capacité d'orthophoniste). Université de Montpellier, Département Universitaire d'Orthophonie, Montpellier, France.

cité page 232

Bullier, B., Cassouduelle, H., Villain, M., Cogné, M., Mollo, C., De Gabory, I., ... Glize, B. (2020). New factors that affect quality of life in patients with aphasia. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 63(1), 33–37. doi: [10.1016/j.rehab.2019.06.015](https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.06.015)

cité page 51

Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults : the HAROLD model. *Psychology and Aging*, 17(1), 85–100. doi: [10.1037//0882-7974.17.1.85](https://doi.org/10.1037//0882-7974.17.1.85)

3 citations, pages 24, 47 & 215

Calhoun, G. G., & Tye, K. M. (2015). Resolving the neural circuits of anxiety. *Nature Neuroscience*, 18(10), 1394–1404. doi: [10.1038/nn.4101](https://doi.org/10.1038/nn.4101)

cité page 202

Cappa, S. (2008). Spontaneous recovery of aphasia. In B. Stemmer & H. A. Whitaker (Eds.), *Handbook of the neuroscience of language* (pp. 389–395). Elsevier. doi: [10.1016/B978-008045352-1.00038-0](https://doi.org/10.1016/B978-008045352-1.00038-0)

2 citations, pages 45, 51

Cardebat, D., Doyon, B., Puel, M., Goulet, P., & Joanette, Y. (1990). Évocation lexicale formelle et sémantique chez des sujets normaux. Performances et dynamiques de production en fonction du sexe, de l'âge et du niveau d'étude. *Acta neurologica belgica*, 90(4), 207–217.

2 citations, pages 119, 164

Carrera, E., & Tononi, G. (2014). Diaschisis : past, present, future. *Brain*, 137(9), 2408–2422. doi: [10.1093/brain/awu101](https://doi.org/10.1093/brain/awu101)

cité page 44

Catani, M., Dell'Acqua, F., Vergani, F., Malik, F., Hodge, H., Roy, P., ... Thiebaut de Schotten, M. (2012). Short frontal lobe connections of the human brain. *Cortex*, 48(2), 273–291. doi: [10.1016/j.cortex.2011.12.001](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.12.001)

cité page 83

Catani, M., & ffytche, D. H. (2005). The rises and falls of disconnection syndromes. *Brain*, 128(10), 2224–2239. doi: [10.1093/brain/awh622](https://doi.org/10.1093/brain/awh622)

cité page 18

Catani, M., Mesulam, M. M., Jakobsen, E., Malik, F., Martersteck, A., Wieneke, C., ... Rogalski, E. (2013). A novel frontal pathway underlies verbal fluency in primary progressive aphasia. *Brain*, 136(8), 2619–2628. doi: [10.1093/brain/awt163](https://doi.org/10.1093/brain/awt163)

2 citations, pages 83, 219

Catani, M., & Thiebaut de Schotten, M. (2012). *Atlas of Human Brain Connections*. Oxford University Press. doi: [10.1093/med/9780199541164.001.0001](https://doi.org/10.1093/med/9780199541164.001.0001)

2 citations, pages 25, 83

Chapey, R., Duchan, J. F., Elman, R. J., Garcia, L. J., Kagan, A., Lyon, J. G., & Simmons Mackie, N.

(2000). Life participation approach to aphasia : a statement of values for the future. *The ASHA Leader*, 5(3), 4–6. doi: [10.1044/leader.FTR.05032000.4](https://doi.org/10.1044/leader.FTR.05032000.4)

cité page 51

Chomel-Guillaume, S., Leloup, G., & Bernard, I. (2010). Conceptions contemporaines de la rééducation des aphasies. In I. Riva & C. François-Guinaud (Eds.), *Les aphasies : évaluation et rééducation* (1^{re} éd., pp. 185–223). Elsevier Masson.

5 citations, pages 36, 44, 85, 218 & 225

Chomel-Guillaume, S., Leloup, G., & Bernard, I. (2021). *Les aphasies : évaluation et rééducation* (2^e éd.; I. Riva & C. François-Guinaud, Eds.). Elsevier Masson.

3 citations, pages 1, 2 & 36

Cichon, N., Wlodarczyk, L., Saluk-Bijak, J., Bijak, M., Redlicka, J., Gorniak, L., & Miller, E. (2021). Novel advances to post-stroke aphasia pharmacology and rehabilitation. *Journal of Clinical Medicine*, 10(17), 3778. doi: [10.3390/jcm10173778](https://doi.org/10.3390/jcm10173778)

4 citations, pages 37, 40, 41 & 43

Civier, O., Kronfeld-Duenias, V., Amir, O., Ezrati-Vinacour, R., & Ben-Shachar, M. (2015). Reduced fractional anisotropy in the anterior corpus callosum is associated with reduced speech fluency in persistent developmental stuttering. *Brain and Language*, 143, 20–31. doi: [10.1016/j.bandl.2015.01.012](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2015.01.012)

2 citations, pages 83, 219

Clough, S., & Gordon, J. K. (2020). Fluent or nonfluent? Part A. Underlying contributors to categorical classifications of fluency in aphasia. *Aphasiology*, 34(5), 515–539. doi: [10.1080/02687038.2020.1727709](https://doi.org/10.1080/02687038.2020.1727709)

2 citations, pages 32, 33

Coelho, C. (2005). Direct attention training as a treatment for reading impairment in mild aphasia. *Aphasiology*, 19(3-5), 275–283. doi: [10.1080/02687030444000741](https://doi.org/10.1080/02687030444000741)

cité page 224

Corbetta, M., Patel, G., & Shulman, G. L. (2008). The reorienting system of the human brain : From environment to theory of mind. *Neuron*, 58(3), 306–324. doi: [10.1016/j.neuron.2008.04.017](https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.04.017)

cité page 203

Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(3), 201–215. doi: [10.1038/nrn755](https://doi.org/10.1038/nrn755)

cité page 203

Correia, J. M., Caballero-Gaudes, C., Guediche, S., & Carreiras, M. (2020). Phonatory and articulatory representations of speech production in cortical and subcortical fMRI responses. *Scientific Reports*, 10(1), 4529. doi: [10.1038/s41598-020-61435-y](https://doi.org/10.1038/s41598-020-61435-y)

cité page 205

Cortese, M. D., Riganello, F., Arcuri, F., Pignataro, L. M., & Buglione, I. (2015). Rehabilitation of aphasia : application of melodic-rhythmic therapy to italian language. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 520. doi: [10.3389/fnhum.2015.00520](https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00520)

cité page 40

Coslett, H. B. (2016). Noninvasive Brain Stimulation in Aphasia Therapy : Lessons from TMS and tDCS. In G. Hickok & S. L. Small (Eds.), *Neurobiology of Language* (pp. 1035–1054). Academic Press. doi: [10.1016/B978-0-12-407794-2.00083-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407794-2.00083-3)

2 citations, pages 37, 112

- Cramer, S. C., & Riley, J. D. (2008). Neuroplasticity and brain repair after stroke. *Current Opinion in Neurology*, 21(1), 76–82. doi: [10.1097/wco.0b013e3282f36cb6](https://doi.org/10.1097/wco.0b013e3282f36cb6)
cité page 221
- Crinion, J., & Price, C. J. (2005). Right anterior superior temporal activation predicts auditory sentence comprehension following aphasic stroke. *Brain*, 128(12), 2858–2871. doi: [10.1093/brain/awh659](https://doi.org/10.1093/brain/awh659)
cité page 202
- Cristofori, I., Zhong, W., Chau, A., Solomon, J., Krueger, F., & Grafman, J. (2015). White and gray matter contributions to executive function recovery after traumatic brain injury. *Neurology*, 84(14), 1394–1401. doi: [10.1212/WNL.0000000000001446](https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000001446)
2 citations, pages 84, 219
- Crosson, B., Rodriguez, A. D., Copland, D., Fridriksson, J., Krishnamurthy, L. C., Meinzer, M., ... Leff, A. P. (2019). Neuroplasticity and aphasia treatments : new approaches for an old problem. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 90(10), 1147–1155. doi: [10.1136/jnnp-2018-319649](https://doi.org/10.1136/jnnp-2018-319649)
2 citations, pages 226, 227
- Culham, J. C., Cavina-Pratesi, C., & Singhal, A. (2006). The role of parietal cortex in visuomotor control : What have we learned from neuroimaging? *Neuropsychologia*, 44(13), 2668–2684. doi: [10.1016/j.neuropsychologia.2005.11.003](https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.11.003)
3 citations, pages 135, 157 & 214
- Curtis, S., Nicholas, M. L., Pittmann, R., & Zipse, L. (2020). Tap your hand if you feel the beat : differential effects of tapping in melodic intonation therapy. *Aphasiology*, 34(5), 580–602. doi: [10.1080/02687038.2019.1621983](https://doi.org/10.1080/02687038.2019.1621983)
cité page 41
- D'Alessandro, D., & Fougeron, C. (2018). Réduction de la coarticulation et vieillissement. In *XXXIle Journées d'Études sur la Parole (JEP)* (pp. 410–418). Aix-en-Provence, France. doi: [10.21437/JEP.2018-47](https://doi.org/10.21437/JEP.2018-47)
3 citations, pages 16, 215 & 231
- Damasio, A. R. (1998). Signs of aphasia. In M. T. Sarno (Ed.), *Acquired aphasia* (pp. 25–41). Elsevier.
4 citations, pages 29, 30, 32 & 33
- Darrigrand, B., Dutheil, S., Michelet, V., Rereau, S., Rousseaux, M., & mazaux, J.-M. (2011). Communication impairment and activity limitation in stroke patients with severe aphasia. *Disability and Rehabilitation*, 33(13-14), 1169–1178. doi: [10.3109/09638288.2010.524271](https://doi.org/10.3109/09638288.2010.524271)
cité page 85
- Davis, C., Kleinman, J. T., Newhart, M., Gingis, L., Pawlak, M., & Hillis, A. E. (2008). Speech and language functions that require a functioning Broca's area. *Brain and Language*, 105(1), 50–58. doi: [10.1016/j.bandl.2008.01.012](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2008.01.012)
2 citations, pages 24, 215
- Davis, S. W., & Cabeza, R. (2015). Cross-hemispheric collaboration and segregation associated with task difficulty as revealed by structural and functional connectivity. *Journal of Neuroscience*, 35(21), 8191–8200. doi: [10.1523/jneurosci.0464-15.2015](https://doi.org/10.1523/jneurosci.0464-15.2015)
cité page 201
- Dehqan, A., Scherer, R. C., Dashti, G., Ansari-Moghaddam, A., & Fanaie, S. (2012). The effects of aging on acoustic parameters of voice. *Folia phoniatrica et logopaedica*, 64(6), 265–270. doi:

10.1159/000343998

cité page 16

Dell, G. S. (1986). A spreading-activation theory of retrieval in sentence production. *Psychological Review*, 93(3), 283–321. doi: 10.1037/0033-295X.93.3.283

cité page 18

Dell, G. S. (2013). Cascading and feedback in interactive models of production : A reflection of forward modeling? *Behavioral and Brain Sciences*, 36(4), 351–352. doi: 10.1017/S0140525X12002531

cité page 18

Deloche, G., & Hannequin, D. (1997). *DO 80 : Test de dénomination orale d'images*. Editions du Centre de Psychologie Appliquée.

5 citations, pages 64, 95, 119, 172 & 174

Dick, A. S., Bernal, B., & Tremblay, P. (2014). The language connectome : new pathways, new concepts. *The Neuroscientist*, 20(5), 453–467. doi: 10.1177/1073858413513502

10 citations, pages 18, 25, 26, 27, 28, 82, 83, 206, 218 & 219

Dick, A. S., Garic, D., Graziano, P., & Tremblay, P. (2019). The frontal aslant tract (FAT) and its role in speech, language and executive function. *Cortex*, 111, 148–163. doi: 10.1016/j.cortex.2018.10.015

2 citations, pages 83, 219

Dignam, J. K., Copland, D., O'Brien, K., Burfein, P., Khan, A., & Rodriguez, A. D. (2017). Influence of cognitive ability on therapy outcomes for anomia in adults with chronic poststroke aphasia. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 60(2), 406–421. doi: 10.1044/2016_JSLHR-L-15-0384

4 citations, pages 34, 51, 90 & 153

Dignam, J. K., Rodriguez, A. D., & Copland, D. A. (2016). Evidence for Intensive Aphasia Therapy : Consideration of Theories From Neuroscience and Cognitive Psychology. *PM & R*, 8(3), 254–267. doi: 10.1016/j.pmrj.2015.06.010

6 citations, pages 52, 105, 106, 221, 222 & 225

Døli, H., Andersen Helland, W., Helland, T., Næss, H., Hofstad, H., & Specht, K. (2023). Associations between stroke severity, aphasia severity, lesion location, and lesion size in acute stroke, and aphasia severity one year post stroke. *Aphasiology*, 37(2), 307–329. doi: 10.1080/02687038.2021.2013430

2 citations, pages 59, 79

Døli, H., Andersen Helland, W., Helland, T., & Specht, K. (2021). Associations between lesion size, lesion location and aphasia in acute stroke. *Aphasiology*, 35(6), 745–763. doi: 10.1080/02687038.2020.1727838

6 citations, pages 58, 59, 79, 80, 81 & 219

Domanski, C. W. (2013). Mysterious "Monsieur Leborgne" : The mystery of the famous patient in the history of neuropsychology is explained. *Journal of the History of the Neurosciences*, 22(1), 47–52. doi: 10.1080/0964704X.2012.667528

cité page 29

Doogan, C., Dignam, J. K., Copland, D., & Leff, A. (2018). Aphasia Recovery : When, How and Who to Treat? *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 18(12), 90. doi: 10.1007/s11910-018-0891-x

4 citations, pages 54, 85, 107 & 225

Dronkers, N. F. (1996). A new brain region for coordinating speech articulation. *Nature*, 384(6605), 159–161. doi: [10.1038/384159a0](https://doi.org/10.1038/384159a0)

3 citations, pages 81, 133 & 218

Dronkers, N. F., Plaisant, O., Iba-Zizen, M. T., & Cabanis, E. A. (2007). Paul broca's historic cases : high resolution MR imaging of the brains of leborgne and lelong. *Brain*, 130, 1432–1441. doi: [10.1093/brain/awm042](https://doi.org/10.1093/brain/awm042)

3 citations, pages 29, 81 & 218

Dronkers, N. F., Wilkins, D. P., Van Valin, R. D., Redfern, B. B., & Jaeger, J. J. (2004). Lesion analysis of the brain areas involved in language comprehension. *Cognition*, 92(1-2), 145–177. doi: [10.1016/j.cognition.2003.11.002](https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.11.002)

2 citations, pages 58, 80

Duffau, H. (2008). The anatomo-functional connectivity of language revisited. *Neuropsychologia*, 46(4), 927–934. doi: [10.1016/j.neuropsychologia.2007.10.025](https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.10.025)

2 citations, pages 18, 24

Duffau, H. (2018). The error of Broca : From the traditional localizationist concept to a connectomal anatomy of human brain. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 89, 73–81. doi: [10.1016/j.jchemneu.2017.04.003](https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2017.04.003)

cité page 18

Duffau, H., Moritz-Gasser, S., & Mandonnet, E. (2014). A re-examination of neural basis of language processing : Proposal of a dynamic hodotopical model from data provided by brain stimulation mapping during picture naming. *Brain and Language*, 131, 1–10. doi: [10.1016/j.bandl.2013.05.011](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.05.011)

8 citations, pages 18, 24, 25, 27, 28, 83, 218 & 219

Duncan, E. S., & Small, S. L. (2016). Increased modularity of resting state networks supports improved narrative production in aphasia recovery. *Brain Connectivity*, 6(7), 524–529. doi: [10.1089/brain.2016.0437](https://doi.org/10.1089/brain.2016.0437)

cité page 230

Durand, J., Laks, B., & Lyche, C. (2014). French phonology from a corpus perspective : the PFC program. In D. Jacques, G. Ulrike, & K. Gjert (Eds.), *The Oxford Handbook of Corpus Phonology* (pp. 486–497). Oxford University Press.

cité page 141

El Hachoui, H., Lingsma, H. F., Sandt-Koenderman, M. E., Dippel, D. W. J., Koudstaal, P. J., & Visch-Brink, E. G. (2013). Recovery of aphasia after stroke : a 1-year follow-up study. *Journal of Neurology*, 260(1), 166–171. doi: [10.1007/s00415-012-6607-2](https://doi.org/10.1007/s00415-012-6607-2)

5 citations, pages 2, 35, 48, 54 & 112

Ellis, C., & Urban, S. (2016). Age and aphasia : a review of presence, type, recovery and clinical outcomes. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 23(6), 430–439. doi: [10.1080/10749357.2016.1150412](https://doi.org/10.1080/10749357.2016.1150412)

5 citations, pages 51, 90, 105, 155 & 163

Engelter, S. T., Gostynski, M., Papa, S., Frei, M., Born, C., Ajdacic-Gross, V., ... Lyrer, P. A. (2006). Epidemiology of aphasia attributable to first ischemic stroke. *Stroke*, 37(6), 1379–1384. doi: [10.1161/01.STR.0000221815.64093.8c](https://doi.org/10.1161/01.STR.0000221815.64093.8c)

2 citations, pages 1, 31

Fama, M. E., Hayward, W., Snider, S. F., Friedman, R. B., & Turkeltaub, P. E. (2017). Subjective

experience of inner speech in aphasia : Preliminary behavioral relationships and neural correlates. *Brain and Language*, 164, 32–42. doi: 10.1016/j.bandl.2016.09.009

cité page 232

Fama, M. E., & Turkeltaub, P. E. (2020). Inner Speech in Aphasia : Current Evidence, Clinical Implications, and Future Directions. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 29(1S), 560–573. doi: 10.1044/2019_AJSLP-CAC48-18-0212

2 citations, pages 33, 232

Fang, Y., Han, Z., Zhong, S., Gong, G., Song, L., Liu, F., ... Bi, Y. (2015). The semantic anatomical network : Evidence from healthy and brain-damaged patient populations. *Human Brain Mapping*, 36(9), 3499–3515. doi: 10.1002/hbm.22858

2 citations, pages 83, 219

Fazekas, F., Chawluk, J., Alavi, A., Hurtig, H., & Zimmerman, R. (1987). MR signal abnormalities at 1.5 T in Alzheimer's dementia and normal aging. *American Journal of Roentgenology*, 149(2), 351–356. doi: 10.2214/ajr.149.2.351

cité page 66

Fédération Nationale des Aphasiques de France. (2022). *L'APHASIE... c'est « qui », c'est « quoi »?* Consulté le 2023-01-03, sur <https://aphasie.fr/wp-content/uploads/2022/09/DP-FNAF-Agence-CelebrityCo-sans-couleur.pdf>

cité page 1

Fedorenko, E. (2014). The role of domain-general cognitive control in language comprehension. *Frontiers in Psychology*, 5, 335. doi: 10.3389/fpsyg.2014.00335

cité page 47

Fedorenko, E., & Thompson-Schill, S. L. (2014). Reworking the language network. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(3), 120–126. doi: 10.1016/j.tics.2013.12.006

2 citations, pages 201, 204

Feenaughty, L., Basilakos, A., Bonilha, L., den Ouden, D.-B., Rorden, C., Stark, B., & Fridriksson, J. (2017). Non-fluent speech following stroke is caused by impaired efference copy. *Cognitive Neuropsychology*, 34(6), 333–346. doi: 10.1080/02643294.2017.1394834

2 citations, pages 114, 223

Felleman, D. (2001). Visual system in the brain. In *International encyclopedia of the social & behavioral sciences* (pp. 16278–16285). Elsevier. doi: 10.1016/b0-08-043076-7/03473-2

cité page 202

Ferro, J. M., & Crespo, M. (1988). Young adult stroke : neuropsychological dysfunction and recovery. *Stroke*, 19(8), 982–986. doi: 10.1161/01.str.19.8.982

cité page 155

Fillingham, J. K., Sage, K., & Lambon Ralph, M. A. (2006). The treatment of anomia using errorless learning. *Neuropsychological Rehabilitation*, 16(2), 129–154. doi: 10.1080/09602010443000254

cité page 90

Finger, S. (2009). The birth of localization theory. In M. J. Aminoff, F. Boller, & D. F. Swaab (Eds.), *History of neurology* (Vol. 95, pp. 117–128). Elsevier. doi: 10.1016/s0072-9752(08)02110-6

cité page 17

Fonseca, J., Ferreira, J. J., & Pavão, M. I. (2017). Cognitive performance in aphasia due to stroke : a systematic review. *International Journal on Disability and Human Development*, 16(2), 127–139. doi: 10.1515/ijdh-2016-0011

- 3 citations, pages 34, 152 & 153
- Fonseca, J., Raposo, A., & Martins, I. P. (2019). Cognitive functioning in chronic post-stroke aphasia. *Applied Neuropsychology Adult*, 26(4), 355–364. doi: [10.1080/23279095.2018.1429442](https://doi.org/10.1080/23279095.2018.1429442)
- 3 citations, pages 34, 79 & 220
- Forkel, S. J., & Catani, M. (2018). Lesion mapping in acute stroke aphasia and its implications for recovery. *Neuropsychologia*, 115, 88–100. doi: [10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.036](https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.036)
- 5 citations, pages 58, 59, 82, 219 & 231
- Forrest, K., Weismer, G., Milenkovic, P., & Dougall, R. N. (1988). Statistical analysis of word-initial voiceless obstruents : Preliminary data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(1), 115–123. doi: [10.1121/1.396977](https://doi.org/10.1121/1.396977)
- 2 citations, pages 13, 14
- Foulon, C., Cerliani, L., Kinkingnéhun, S., Levy, R., Rosso, C., Urbanski, M., ... Thiebaut de Schotten, M. (2018). Advanced lesion symptom mapping analyses and implementation as BCBtoolkit. *GigaScience*, 7(3). doi: [10.1093/gigascience/giy004](https://doi.org/10.1093/gigascience/giy004)
- cité page 67
- Fridriksson, J., Basilakos, A., Hickok, G., Bonilha, L., & Rorden, C. (2015). Speech entrainment compensates for Broca's area damage. *Cortex*, 69, 68–75. doi: [10.1016/j.cortex.2015.04.013](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.04.013)
- 5 citations, pages 91, 106, 107, 108 & 222
- Fridriksson, J., den Ouden, D.-B., Hillis, A. E., Hickok, G., Rorden, C., Basilakos, A., ... Bonilha, L. (2018). Anatomy of aphasia revisited. *Brain*, 141(3), 848–862. doi: [10.1093/brain/awx363](https://doi.org/10.1093/brain/awx363)
- 2 citations, pages 31, 32
- Fridriksson, J., Fillmore, P., Guo, D., & Rorden, C. (2015). Chronic broca's aphasia is caused by damage to broca's and wernicke's areas. *Cerebral Cortex*, 25(12), 4689–4696. doi: [10.1093/cercor/bhu152](https://doi.org/10.1093/cercor/bhu152)
- cité page 222
- Fridriksson, J., Guo, D., Fillmore, P., Holland, A., & Rorden, C. (2013). Damage to the anterior arcuate fasciculus predicts non-fluent speech production in aphasia. *Brain*, 136(11), 3451–3460. doi: [10.1093/brain/awt267](https://doi.org/10.1093/brain/awt267)
- 8 citations, pages 58, 59, 80, 81, 82, 91, 219 & 231
- Fridriksson, J., & Hillis, A. E. (2021). Current Approaches to the Treatment of Post-Stroke Aphasia. *Journal of Stroke*, 23(2), 183–201. doi: [10.5853/jos.2020.05015](https://doi.org/10.5853/jos.2020.05015)
- 7 citations, pages 60, 85, 91, 105, 108, 217 & 218
- Fridriksson, J., Hubbard, H. I., Hudspeth, S. G., Holland, A. L., Bonilha, L., Fromm, D., & Rorden, C. (2012). Speech entrainment enables patients with broca's aphasia to produce fluent speech. *Brain*, 135(12), 3815–3829. doi: [10.1093/brain/aws301](https://doi.org/10.1093/brain/aws301)
- 2 citations, pages 222, 223
- Fridriksson, J., Nettles, C., Davis, M., Morrow, L., & Montgomery, A. (2006). Functional communication and executive function in aphasia. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 20(6), 401–410. doi: [10.1080/02699200500075781](https://doi.org/10.1080/02699200500075781)
- cité page 84
- Friederici, A. D., & Gierhan, S. M. (2013). The language network. *Current Opinion in Neurobiology*, 23(2), 250–254. doi: [10.1016/j.conb.2012.10.002](https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.10.002)
- 7 citations, pages 18, 25, 26, 83, 206, 218 & 219
- Friederici, A. D., von Cramon, D. Y., & Kotz, S. A. (2007). Role of the corpus callosum in

speech comprehension : Interfacing syntax and prosody. *Neuron*, 53(1), 135–145. doi: 10.1016/j.neuron.2006.11.020

cité page 83

Fromkin, V. A. (1980). *Errors in linguistic performance : Slips of the tongue, ear, pen, and hand* (Academic Press éd.).

cité page 19

Geller, J., Thyé, M., & Mirman, D. (2019). Estimating effects of graded white matter damage and binary tract disconnection on post-stroke language impairment. *NeuroImage*, 189, 248–257. doi: 10.1016/j.neuroimage.2019.01.020

4 citations, pages 32, 59, 82 & 219

George, K., & Das, J. M. (2022). Neuroanatomy, thalamocortical radiations. In *Statpearls [internet]*. StatPearls Publishing.

cité page 84

Geranmayeh, F., Brownsett, S. L. E., & Wise, R. J. S. (2014). Task-induced brain activity in aphasic stroke patients : what is driving recovery? *Brain*, 137(10), 2632–2648. doi: 10.1093/brain/awu163

5 citations, pages 47, 200, 202, 203 & 204

GEREN. (2002). *Batterie d'évaluation de la négligence unilatérale : BEN*. Ortho Edition.

2 citations, pages 138, 164

Gerstenecker, A., & Lazar, R. M. (2019). Language recovery following stroke. *The Clinical Neuropsychologist*, 33(5), 928–947. doi: 10.1080/13854046.2018.1562093

16 citations, pages 2, 29, 30, 31, 32, 33, 45, 49, 50, 51, 58, 60, 90, 91, 105 & 221

Geschwind, N. (1970). The organization of language and the brain. *Science*, 170(3961), 940–944. doi: 10.1126/science.170.3961.940

cité page 18

Geva, S., Bennett, S., Warburton, E. A., & Patterson, K. (2011). Discrepancy between inner and overt speech : Implications for post-stroke aphasia and normal language processing. *Aphasiology*, 25(3), 323–343. doi: 10.1080/02687038.2010.511236

cité page 232

Gilmore, N., Meier, E. L., Johnson, J. P., & Kiran, S. (2019). Nonlinguistic cognitive factors predict treatment-induced recovery in chronic poststroke aphasia. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 100(7), 1251–1258. doi: 10.1016/j.apmr.2018.12.024

5 citations, pages 85, 90, 167, 220 & 233

Glasser, M. F., & Rilling, J. K. (2008). DTI tractography of the human brain's language pathways. *Cerebral Cortex*, 18(11), 2471–2482. doi: 10.1093/cercor/bhn011

2 citations, pages 25, 173

Glize, B., Villain, M., Richert, L., Vellay, M., de Gabory, I., Mazaux, J.-M., . . . Joseph, P.-A. (2017). Language features in the acute phase of poststroke severe aphasia could predict the outcome. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 53(2), 249–255. doi: 10.23736/S1973-9087.16.04255-6

3 citations, pages 51, 106 & 224

Godecke, E., Rai, T., Ciccone, N., Armstrong, E., Granger, A., & Hankey, G. (2013). Amount of therapy matters in very early aphasia rehabilitation after stroke : A clinical prognostic model. *Seminars in Speech and Language*, 34(3), 129–141. doi: 10.1055/s-0033-1358369

- 2 citations, pages 90, 221
- Godefroy, O., & GREFEX. (2008). *Fonctions exécutives et pathologies neurologiques et psychiatriques : Évaluation en pratique clinique*. De Boeck Supérieur.
- 3 citations, pages 139, 152 & 166
- Godlove, J., Anantha, V., Advani, M., Des Roches, C., & Kiran, S. (2019). Comparison of therapy practice at home and in the clinic : a retrospective analysis of the constant therapy platform data set. *Frontiers in Neurology*, 10. doi: 10.3389/fneur.2019.00140
- 6 citations, pages 37, 41, 42, 43, 112 & 226
- Gonçalves, A. P. B., Mello, C., Pereira, A. H., Ferré, P., Fonseca, R. P., & Joannette, Y. (2018). Executive functions assessment in patients with language impairment. A systematic review. *Dementia & Neuropsychologia*, 12(3), 272–283. doi: 10.1590/1980-57642018dn12-030008
- 4 citations, pages 80, 84, 220 & 233
- Goodglass, H., & Kaplan, E. (1983). *The assessment of aphasia and related disorders*. Lea & Febiger.
- 7 citations, pages 60, 62, 93, 95, 138, 164 & 165
- Grandchamp, R., Rapin, L., Perrone-Bertolotti, M., Pichat, C., Haldin, C., Cousin, E., ... Løevenbruck, H. (2019). The ConDialInt model : Condensation, dialogality, and intentionality dimensions of inner speech within a hierarchical predictive control framework. *Frontiers in Psychology*, 10, 2019. doi: 10.3389/fpsyg.2019.02019
- 16 citations, pages xiii, 1, 21, 23, 28, 112, 168, 203, 205, 206, 222, 223, 225, 227, 228 & 234
- Grant, D. A., & Berg, E. (1948). A behavioral analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem. *Journal of Experimental Psychology*, 38(4), 404–411. doi: 10.1037/h0059831
- cité page 64
- Greicius, M. D., & Menon, V. (2004). Default-mode activity during a passive sensory task : uncoupled from deactivation but impacting activation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(9), 1484–1492. doi: 10.1162/0898929042568532
- cité page 27
- Griffis, J. C., Allendorfer, J. B., & Szaflarski, J. P. (2016). Voxel-based gaussian naïve bayes classification of ischemic stroke lesions in individual t1-weighted mri scans. *Journal of Neuroscience Methods*, 257, 97-108. doi: 10.1016/j.jneumeth.2015.09.019
- cité page 180
- Grysiewicz, R. A., Thomas, K., & Pandey, D. K. (2008). Epidemiology of ischemic and hemorrhagic stroke : incidence, prevalence, mortality, and risk factors. *Neurologic Clinics*, 26(4), 871–895. doi: 10.1016/j.ncl.2008.07.003
- cité page 31
- Guenther, F. H., & Hickok, G. (2015). Role of the auditory system in speech production. In M. J. Aminoff, F. Boller, & D. F. Swaab (Eds.), *The human auditory system* (Vol. 129, pp. 161–175). Elsevier. doi: 10.1016/b978-0-444-62630-1.00009-3
- cité page 206
- Guenther, F. H., & Vladusich, T. (2012). A neural theory of speech acquisition and production. *Journal of Neurolinguistics*, 25(5), 408–422. doi: 10.1016/j.jneuroling.2009.08.006
- 4 citations, pages 83, 133, 222 & 228
- Hagoort, P. (2016). MUC (Memory, Unification, Control) : A model on the neurobiology of language

beyond single word processing. In G. Hickok & S. L. Small (Eds.), *Neurobiology of language* (p. 339-347). Academic Press. doi: [10.1016/B978-0-12-407794-2.00028-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407794-2.00028-6)

cité page 18

Haldin, C., Acher, A., Kauffmann, L., Hueber, T., Cousin, E., Badin, P., ... Baciú, M. (2018). Speech recovery and language plasticity can be facilitated by sensori-motor fusion training in chronic non-fluent aphasia. A case report study. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 32(7), 595–621. doi: [10.1080/02699206.2017.1402090](https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090)

5 citations, pages 114, 115, 149, 150 & 301

Haldin, C., Acher, A., Kauffmann, L., Hueber, T., Cousin, E., Badin, P., ... Baciú, M. (2019). Effet de la rééducation perceptivomotrice sur la récupération de la parole chez deux patientes avec aphasie non fluente chronique post-AVC. *Revue de neuropsychologie*, 11(1), 44–59. doi: [10.3917/rne.111.0044](https://doi.org/10.3917/rne.111.0044)

3 citations, pages 114, 115 & 301

Haldin, C., Dai, S., Piscicelli, C., Marcon, V., Løevenbruck, H., Pérennou, D., & Baciú, M. (in prep). *Multifactorial interplay on language recovery after left-hemispheric stroke. A retrospective study.*

3 citations, pages 61, 93 & 301

Haldin, C., Løevenbruck, H., & Baciú, M. (2022). Complémenter la méthode orthophonique avec des nouvelles approches de rééducation du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC. *Revue de neuropsychologie*, 14(1), 43-58.

11 citations, pages 35, 37, 43, 106, 112, 114, 217, 218, 226, 234 & 301

Haldin, C., Løevenbruck, H., Hueber, T., Marcon, V., Piscicelli, C., Perrier, P., ... Baciú, M. (2021). Speech rehabilitation in post-stroke aphasia using visual illustration of speech articulators : A case report study. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 35(3), 253–276. doi: [10.1080/02699206.2020.1780473](https://doi.org/10.1080/02699206.2020.1780473)

3 citations, pages 115, 136 & 301

Hamilton, R. H., Chrysikou, E. G., & Coslett, B. (2011). Mechanisms of aphasia recovery after stroke and the role of noninvasive brain stimulation. *Brain and language*, 118(1-2), 40–50. doi: [10.1016/j.bandl.2011.02.005](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.02.005)

4 citations, pages 46, 47, 48 & 200

Hamilton, R. H., Sanders, L., Benson, J., Faseyitan, O., Norise, C., Naeser, M., ... Coslett, H. B. (2010). Stimulating conversation : Enhancement of elicited propositional speech in a patient with chronic non-fluent aphasia following transcranial magnetic stimulation. *Brain and Language*, 113(1), 45–50. doi: [10.1016/j.bandl.2010.01.001](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2010.01.001)

cité page 202

Hardcastle, W. J., & Marchal, A. (1990). *Speech production and speech modelling* (Vol. 55). Springer Science & Business Media.

cité page 9

Harnish, S. M., Morgan, J., Lundine, J. P., Bauer, A., Singletary, F., Benjamin, M. L., ... Crosson, B. (2014). Dosing of a cued picture-naming treatment for anomia. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 23(2), S285-S299. doi: [10.1044/2014_ajslp-13-0081](https://doi.org/10.1044/2014_ajslp-13-0081)

cité page 226

Haro-Martínez, A. M., Lubrini, G., Madero-Jarabo, R., Díez-Tejedor, E., & Fuentes, B. (2019). Melodic intonation therapy in post-stroke nonfluent aphasia : a randomized pilot trial. *Clinical*

Rehabilitation, 33(1), 44–53. doi: [10.1177/0269215518791004](https://doi.org/10.1177/0269215518791004)

cité page 40

Hartwigsen, G., Price, C. J., Baumgaertner, A., Geiss, G., Koehnke, M., Ulmer, S., & Siebner, H. R. (2010). The right posterior inferior frontal gyrus contributes to phonological word decisions in the healthy brain : Evidence from dual-site TMS. *Neuropsychologia*, 48(10), 3155–3163. doi: [10.1016/j.neuropsychologia.2010.06.032](https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.06.032)

cité page 134

Hartwigsen, G., & Saur, D. (2019). Neuroimaging of stroke recovery from aphasia – insights into plasticity of the human language network. *NeuroImage*, 190, 14–31. doi: [10.1016/j.neuroimage.2017.11.056](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.11.056)

7 citations, pages 48, 200, 201, 204, 206, 227 & 230

Hartwigsen, G., Saur, D., Price, C. J., Ulmer, S., Baumgaertner, A., & Siebner, H. R. (2013). Perturbation of the left inferior frontal gyrus triggers adaptive plasticity in the right homologous area during speech production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(41), 16402–16407. doi: [10.1073/pnas.1310190110](https://doi.org/10.1073/pnas.1310190110)

cité page 202

Harvey, D. Y., Parchure, S., & Hamilton, R. H. (2022). Factors predicting long-term recovery from post-stroke aphasia. *Aphasiology*, 36(11), 1351–1372. doi: [10.1080/02687038.2021.1966374](https://doi.org/10.1080/02687038.2021.1966374)

6 citations, pages 49, 60, 90, 91, 105 & 106

Hauwelle, A., Sibon, I., Hatier, M., Laganaro, M., Dehail, P., Villain, M., ... Glize, B. (2018). Lesion locations associated with outcomes for post-stroke aphasia. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 61, e47. doi: [10.1016/j.rehab.2018.05.103](https://doi.org/10.1016/j.rehab.2018.05.103)

2 citations, pages 91, 106

Hebb, D. (1949). *The organization of behavior : a neuropsychological theory*. Wiley.

cité page 221

Hedlund, G., & Rose, Y. (2018). *Phon 3.4.2 [logiciel informatique]*. Consulté sur <https://www.phon.ca>

4 citations, pages 140, 141, 142 & 176

Heiss, W.-D., & Thiel, A. (2006). A proposed regional hierarchy in recovery of post-stroke aphasia. *Brain and Language*, 98(1), 118–123. doi: [10.1016/j.bandl.2006.02.002](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2006.02.002)

2 citations, pages 47, 202

Helm-Estabrooks, N. (2011). Treating attention to improve auditory comprehension deficits associated with aphasia. *Perspectives on Neurophysiology and Neurogenic Speech and Language Disorders*, 21(2), 64–71. doi: [10.1044/nnsld21.2.64](https://doi.org/10.1044/nnsld21.2.64)

cité page 224

Helm-Estabrooks, N., & Albert, M. (2004). *Manual of Aphasia and Aphasia Therapy*. Pro-Ed.

cité page 40

Herbet, G., & Duffau, H. (2020). Revisiting the functional anatomy of the human brain : Toward a meta-networking theory of cerebral functions. *Physiological Reviews*, 100(3), 1181–1228. doi: [10.1152/physrev.00033.2019](https://doi.org/10.1152/physrev.00033.2019)

9 citations, pages 80, 84, 167, 220, 221, 224, 227, 230 & 233

Herlin, B., Navarro, V., & Dupont, S. (2021). The temporal pole : From anatomy to function – A literature appraisal. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 113, 101925. doi: [10.1016/j.jchemneu.2021.101925](https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2021.101925)

cité page 204

Hermes, A., Mertens, J., & Mücke, D. (2018). Age-related effects on sensorimotor control of speech production. In *Proceedings of Interspeech* (pp. 1526–1530). Hyderabad, India. doi: [10.21437/Interspeech.2018-1233](https://doi.org/10.21437/Interspeech.2018-1233)

3 citations, pages 16, 215 & 231

Hertrich, I., Dietrich, S., & Ackermann, H. (2016). The role of the supplementary motor area for speech and language processing. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *68*, 602–610. doi: [10.1016/j.neubiorev.2016.06.030](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.06.030)

cité page 203

Hickok, G. (2012a). Computational neuroanatomy of speech production. *Nature Reviews Neuroscience*, *13*(2), 135–145. doi: [10.1038/nrn3158](https://doi.org/10.1038/nrn3158)

21 citations, pages xiii, 19, 20, 21, 23, 25, 28, 81, 112, 132, 133, 134, 168, 203, 205, 206, 218, 222, 225, 227 & 228

Hickok, G. (2012b). The cortical organization of speech processing : Feedback control and predictive coding the context of a dual-stream model. *Journal of Communication Disorders*, *45*(6), 393–402. doi: [10.1016/j.jcomdis.2012.06.004](https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2012.06.004)

cité page 205

Hickok, G., Houde, J., & Rong, F. (2011). Sensorimotor integration in speech processing : Computational basis and neural organization. *Neuron*, *69*(3), 407–422. doi: [10.1016/j.neuron.2011.01.019](https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.01.019)

2 citations, pages 19, 23

Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, *8*(5), 393–402. doi: [10.1038/nrn2113](https://doi.org/10.1038/nrn2113)

10 citations, pages 25, 26, 31, 49, 82, 83, 203, 205, 206 & 219

Hillis, A. E., Beh, Y. Y., Sebastian, R., Breining, B., Tippett, D. C., Wright, A., ... Fridriksson, J. (2018). Predicting recovery in acute poststroke aphasia. *Annals of Neurology*, *83*(3), 612–622. doi: [10.1002/ana.25184](https://doi.org/10.1002/ana.25184)

2 citations, pages 106, 107

Hillis, A. E., & Tippett, D. C. (2014). Stroke recovery : Surprising influences and residual consequences. *Advances in Medicine*, *2014*, 378263. doi: [10.1155/2014/378263](https://doi.org/10.1155/2014/378263)

2 citations, pages 51, 90

Hinkley, L. B. N., Marco, E. J., Brown, E. G., Bukshpun, P., Gold, J., Hill, S., ... Nagarajan, S. S. (2016). The contribution of the corpus callosum to language lateralization. *Journal of Neuroscience*, *36*(16), 4522–4533. doi: [10.1523/JNEUROSCI.3850-14.2016](https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3850-14.2016)

cité page 83

Holland, A. L., Greenhouse, J., Fromm, D., & Swindell, C. (1989). Predictors of language restitution following stroke : a multivariate analysis. *Journal of speech and hearing research*, *32*(2), 232–238. doi: [10.1044/jshr.3202.232](https://doi.org/10.1044/jshr.3202.232)

cité page 155

Hope, T. M., Seghier, M. L., Prejawa, S., Leff, A. P., & Price, C. J. (2016). Distinguishing the effect of lesion load from tract disconnection in the arcuate and uncinate fasciculi. *NeuroImage*, *125*, 1169–1173. doi: [10.1016/j.neuroimage.2015.09.025](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.09.025)

4 citations, pages 59, 82, 91 & 219

Hoyau, E., Boudiaf, N., Cousin, E., Pichat, C., Fournet, N., Krainik, A., ... Baciú, M. (2017). Aging modulates the hemispheric specialization during word production. *Frontiers in Aging*

Neuroscience, 9, 125. doi: [10.3389/fnagi.2017.00125](https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00125)

cité page 215

Hueber, T. (2013). Ultraspeech-player : Intuitive visualization of ultrasound articulatory data for speech therapy and pronunciation training. In *Proceedings of interspeech (show&tell)* (pp. 752–753). Lyon, France.

9 citations, pages xiii, xiv, 54, 113, 116, 118, 138, 212 & 287

Hurkmans, J., de Bruijn, M., Boonstra, A. M., Jonkers, R., Bastiaanse, R., Arendzen, H., & Reinders-Messelink, H. A. (2012). Music in the treatment of neurological language and speech disorders : A systematic review. *Aphasiology*, 26(1), 1–19. doi: [10.1080/02687038.2011.602514](https://doi.org/10.1080/02687038.2011.602514)

cité page 39

Inatomi, Y., Yonehara, T., Omiya, S., Hashimoto, Y., Hirano, T., & Uchino, M. (2008). Aphasia during the acute phase in ischemic stroke. *Cerebrovascular Diseases*, 25(4), 316–323. doi: [10.1159/000118376](https://doi.org/10.1159/000118376)

4 citations, pages 50, 79, 80 & 218

Indefrey, P. (2011). The spatial and temporal signatures of word production components : a critical update. *Frontiers in Psychology*, 2, 255. doi: [10.3389/fpsyg.2011.00255](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00255)

cité page 133

Inserm. (2019). *Accident vasculaire cérébral (AVC)*. Consulté le 2019-5-13, sur <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/accident-vasculaire-cerebral-avc>

2 citations, pages 31, 163

International Phonetic Association. (2015). *The Full International Phonetic Alphabet Chart*. Consulté le 2022-11-11, sur <https://www.internationalphoneticassociation.org/content/full-ipa-chart>

2 citations, pages 11, 12

Ishida, H., Nakajima, K., Inase, M., & Murata, A. (2010). Shared mapping of own and others' bodies in visuotactile bimodal area of monkey parietal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(1), 83–96. doi: [10.1162/jocn.2009.21185](https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21185)

3 citations, pages 135, 157 & 214

Jacquier-Roux, M., Lequette, C., Pouget, G., Valdois, S., & Zorman, M. (2010). *BALE : Batterie Analytique du Langage Écrit*. Groupe Cogni-Sciences, Laboratoire de Psychologie et Neuro-Cognition.

3 citations, pages 139, 164 & 172

Japee, S., Holiday, K., Satyshur, M. D., Mukai, I., & Ungerleider, L. G. (2015). A role of right middle frontal gyrus in reorienting of attention : a case study. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9, 23. doi: [10.3389/fnsys.2015.00023](https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00023)

cité page 133

Ji, J. L., Spronk, M., Kulkarni, K., Repovš, G., Anticevic, A., & Cole, M. W. (2019). Mapping the human brain's cortical-subcortical functional network organization. *NeuroImage*, 185, 35–57. doi: [10.1016/j.neuroimage.2018.10.006](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.10.006)

cité page 204

Johnson, L., Nemati, S., Bonilha, L., Rorden, C., Busby, N., Basilakos, A., ... Fridriksson, J. (2022). Predictors beyond the lesion : Health and demographic factors associated with aphasia severity. *Cortex*, 154, 375–389. doi: [10.1016/j.cortex.2022.06.013](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.06.013)

cité page 229

Johnson, L., Yourganov, G., Basilakos, A., Newman-Norlund, R. D., Thors, H., Keator, L., ... Fridriksson, J. (2022). Functional connectivity and speech entrainment speech entrainment improves connectivity between anterior and posterior cortical speech areas in non-fluent aphasia. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 36(2), 164–174. doi: [10.1177/15459683211064264](https://doi.org/10.1177/15459683211064264)

6 citations, pages 107, 168, 222, 223, 230 & 234

Jones, B., & Kenward, M. G. (1989). *Design and analysis of cross-over trials*. Chapman and Hall/CRC. doi: [10.4324/9780203009277](https://doi.org/10.4324/9780203009277)

cité page 163

Jongman, A., Wayland, R., & Wong, S. (2000). Acoustic characteristics of English fricatives. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(3), 1252–1263. doi: [10.1121/1.1288413](https://doi.org/10.1121/1.1288413)

2 citations, pages 13, 14

Julayanont, P., Tangwongchai, S., Hemrungronj, S., Tunvirachaisakul, C., Phanthumchinda, K., Hongswat, J., ... Nasreddine, Z. S. (2015). The Montreal Cognitive Assessment-Basic : A Screening Tool for Mild Cognitive Impairment in Illiterate and Low-Educated Elderly Adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, 63(12), 2550–2554. doi: [10.1111/jgs.13820](https://doi.org/10.1111/jgs.13820)

2 citations, pages 172, 182

Jung, I.-Y., Lim, J. Y., Kang, E. K., Sohn, H. M., & Paik, N.-J. (2011). The factors associated with good responses to speech therapy combined with transcranial direct current stimulation in post-stroke aphasic patients. *Annals of Rehabilitation Medicine*, 35(4), 460–469. doi: [10.5535/arm.2011.35.4.460](https://doi.org/10.5535/arm.2011.35.4.460)

2 citations, pages 50, 91

Katz, W. (1990). A kinematic analysis of anticipatory coarticulation in the speech of anterior aphasic subjects using electromagnetic articulography. *Brain and Language*, 38(4), 555–575. doi: [10.1016/0093-934x\(90\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0093-934x(90)90137-6)

cité page 198

Kempen, G., & Hoenkamp, E. (1987). An incremental procedural grammar for sentence formulation. *Cognitive Science*, 11(2), 201–258. doi: [10.1207/s15516709cog1102_5](https://doi.org/10.1207/s15516709cog1102_5)

cité page 18

Kendall, D. L., Oelke, M., Brookshire, C. E., & Nadeau, S. E. (2015). The influence of phonomotor treatment on word retrieval abilities in 26 individuals with chronic aphasia : An open trial. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 58(3), 798–812. doi: [10.1044/2015_JSLHR-L-14-0131](https://doi.org/10.1044/2015_JSLHR-L-14-0131)

cité page 227

Kent, R. (1997). *The speech sciences*. Singular Publishing Group.

cité page 9

Kim, G., Jeong, B., Choi, M., Kim, W.-S., Han, C. E., & Paik, N.-J. (2021). Neural substrates of subcortical aphasia in subacute stroke : Voxel-based lesion symptom mapping study. *Journal of the Neurological Sciences*, 420, 117266. doi: [10.1016/j.jns.2020.117266](https://doi.org/10.1016/j.jns.2020.117266)

6 citations, pages 32, 58, 59, 82, 219 & 231

Kiran, S. (2012). What is the nature of poststroke language recovery and reorganization? *International Scholarly Research Network Neurology*, 2012, 1–13. doi: [10.5402/2012/786872](https://doi.org/10.5402/2012/786872)

cité page 45

Kiran, S., Meier, E. L., Kapse, K. J., & Glynn, P. A. (2015). Changes in task-based effective connectivity

in language networks following rehabilitation in post-stroke patients with aphasia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 316. doi: [10.3389/fnhum.2015.00316](https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00316)

3 citations, pages 47, 202 & 230

Kiran, S., & Thompson, C. K. (2019). Neuroplasticity of language networks in aphasia : Advances, updates, and future challenges. *Frontiers in Neurology*, 10, 295. doi: [10.3389/fneur.2019.00295](https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00295)

20 citations, pages 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 58, 80, 90, 155, 200, 202, 218, 221, 222, 225, 227 & 228

Kirmess, M., & Maher, L. M. (2010). Constraint induced language therapy in early aphasia rehabilitation. *Aphasiology*, 24(6-8), 725–736. doi: [10.1080/02687030903437682](https://doi.org/10.1080/02687030903437682)

3 citations, pages 155, 226 & 228

Kleim, J. A., & Jones, T. A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity : Implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 51(1). doi: [10.1044/1092-4388\(2008/018\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/018))

5 citations, pages 217, 221, 222, 227 & 228

Koenig-Bruhin, M., Kolonko, B., At, A., Annoni, J.-M., & Hunziker, E. (2013). Aphasia following a stroke : recovery and recommendations for rehabilitation. *Swiss Archives of Neurology and Psychiatry*, 164(8), 292–298. doi: [10.4414/sanp.2013.00209](https://doi.org/10.4414/sanp.2013.00209)

2 citations, pages 51, 225

Koleck, M., Gana, K., Lucot, C., Darrigrand, B., Mazaux, J.-M., & Glize, B. (2017). Quality of life in aphasic patients 1 year after a first stroke. *Quality of Life Research*, 26(1), 45–54. doi: [10.1007/s11136-016-1361-z](https://doi.org/10.1007/s11136-016-1361-z)

2 citations, pages 35, 85

Kong, A. P.-H. (2021). The impact of COVID-19 on speakers with aphasia : What is currently known and missing? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 64(1), 176–180. doi: [10.1044/2020_JSLHR-20-00371](https://doi.org/10.1044/2020_JSLHR-20-00371)

2 citations, pages 41, 226

Krainik, A., Duffau, H., Capelle, L., Cornu, P., Boch, A.-L., Mangin, J.-F., ... Lehericy, S. (2004). Role of the healthy hemisphere in recovery after resection of the supplementary motor area. *Neurology*, 62(8), 1323–1332. doi: [10.1212/01.wnl.0000120547.83482.b1](https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000120547.83482.b1)

cité page 204

Kristinsson, S., Basilakos, A., Elm, J., Spell, L. A., Bonilha, L., Rorden, C., ... Fridriksson, J. (2021). Individualized response to semantic versus phonological aphasia therapies in stroke. *Brain Communications*, 3(3). doi: [10.1093/braincomms/fcab174](https://doi.org/10.1093/braincomms/fcab174)

2 citations, pages 91, 92

Kristinsson, S., den Ouden, D. B., Rorden, C., Newman-Norlund, R., Neils-Strunjas, J., & Fridriksson, J. (2022). Predictors of therapy response in chronic aphasia : Building a foundation for personalized aphasia therapy. *Journal of Stroke*, 24(2), 189–206. doi: [10.5853/jos.2022.01102](https://doi.org/10.5853/jos.2022.01102)

14 citations, pages 48, 50, 51, 53, 58, 90, 91, 92, 105, 106, 107, 211, 217 & 218

Kuriakose, D., & Xiao, Z. (2020). Pathophysiology and treatment of stroke : Present status and future perspectives. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(20), 7609. doi: [10.3390/ijms21207609](https://doi.org/10.3390/ijms21207609)

cité page 31

Kuriki, S., Takeuchi, F., & Hirata, Y. (1998). Neural processing of words in the human extrastriate visual cortex. *Cognitive Brain Research*, 6(3), 193–203. doi: [10.1016/S0926-6410\(97\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(97)00030-X)

cité page 134

Kurland, J., Stanek, E. J., Stokes, P., Li, M., & Andrianopoulos, M. (2016). Intensive Language Action Therapy in Chronic Aphasia : A Randomized Clinical Trial Examining Guidance by Constraint. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 25(4S), S798–S812. doi: [10.1044/2016_AJSLP-15-0135](https://doi.org/10.1044/2016_AJSLP-15-0135)

cité page 38

Kurowski, K., Blumstein, S. E., Palumbo, C. L., Waldstein, R., & Burton, M. W. (2007). Nasal Consonant Production in Broca's and Wernicke's Aphasics : Speech Deficits and Neuroanatomical Correlates. *Brain and Language*, 100(3), 262–275. doi: [10.1016/j.bandl.2006.10.002](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2006.10.002)

2 citations, pages 154, 198

Kurowski, K., Hazen, E., & Blumstein, S. E. (2003). The nature of speech production impairments in anterior aphasics : An acoustic analysis of voicing in fricative consonants. *Brain and Language*, 84(3), 353–371. doi: [10.1016/S0093-934X\(02\)00555-2](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(02)00555-2)

3 citations, pages 114, 154 & 198

Labache, L., Mazoyer, B., Joliot, M., Crivello, F., Hesling, I., & Tzourio-Mazoyer, N. (2020). Typical and atypical language brain organization based on intrinsic connectivity and multitask functional asymmetries. *eLife*, 9, e58722. doi: [10.7554/eLife.58722](https://doi.org/10.7554/eLife.58722)

3 citations, pages 24, 50 & 90

Lahiri, D., Dubey, S., Ardila, A., & Ray, B. K. (2021). Factors affecting vascular aphasia severity. *Aphasiology*, 35(5), 633–641. doi: [10.1080/02687038.2020.1712587](https://doi.org/10.1080/02687038.2020.1712587)

5 citations, pages 58, 60, 79, 80 & 218

Lahiri, D., Dubey, S., Ardila, A., Sanyal, D., & Ray, B. K. (2021). Determinants of aphasia recovery : exploratory decision tree analysis. *Language, Cognition and Neuroscience*, 36(1), 25–32. doi: [10.1080/23273798.2020.1777314](https://doi.org/10.1080/23273798.2020.1777314)

6 citations, pages 2, 49, 58, 60, 90 & 105

Lai, S., Billot, A., Varkanitsa, M., Braun, E., Rapp, B., Parrish, T., ... Ishwar, P. (2021). An exploration of machine learning methods for predicting post-stroke aphasia recovery. In *The 14th Pervasive technologies related to assistive environments conference (PETRA)* (pp. 556–564). Corfu, Greece. doi: [10.1145/3453892.3461319](https://doi.org/10.1145/3453892.3461319)

cité page 60

Landrigan, J.-F., Zhang, F., & Mirman, D. (2021). A data-driven approach to post-stroke aphasia classification and lesion-based prediction. *Brain*, 144(5), 1372–1383. doi: [10.1093/brain/awab010](https://doi.org/10.1093/brain/awab010)

cité page 33

Lang, E. W., Tomé, A. M., Keck, I. R., Górriz-Sáez, J. M., & Puntinet, C. G. (2012). Brain Connectivity Analysis : A Short Survey. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2012, 412512. doi: [10.1155/2012/412512](https://doi.org/10.1155/2012/412512)

2 citations, pages 24, 27

Langner, R., & Eickhoff, S. B. (2013). Sustaining attention to simple tasks : A meta-analytic review of the neural mechanisms of vigilant attention. *Psychological Bulletin*, 139(4), 870–900. doi: [10.1037/a0030694](https://doi.org/10.1037/a0030694)

cité page 203

Laska, A. C., Hellblom, A., Murray, V., Kahan, T., & Von Arbin, M. (2001). Aphasia in acute stroke and relation to outcome. *Journal of Internal Medicine*, 249(5), 413–422. doi: [10.1046/j.1365-2796.2001.00812.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2796.2001.00812.x)

cité page 48

Lazar, R. M., & Antonello, D. (2008). Variability in recovery from aphasia. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 8(6), 497–502. doi: [10.1007/s11910-008-0079-x](https://doi.org/10.1007/s11910-008-0079-x)

cité page 32

Lazar, R. M., Minzer, B., Antonello, D., Festa, J. R., Krakauer, J. W., & Marshall, R. S. (2010). Improvement in aphasia scores after stroke is well predicted by initial severity. *Stroke*, 41(7), 1485–1488. doi: [10.1161/STROKEAHA.109.577338](https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.109.577338)

3 citations, pages 49, 58 & 105

Le Bihan, D., Mangin, J.-F., Poupon, C., Clark, C. A., Pappata, S., Molko, N., & Chabriat, H. (2001). Diffusion tensor imaging : concepts and applications. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 13(4), 534–546. doi: [10.1002/jmri.1076](https://doi.org/10.1002/jmri.1076)

cité page 40

Lee, B., & Pyun, S.-B. (2014). Characteristics of Cognitive Impairment in Patients With Post-stroke Aphasia. *Annals of Rehabilitation Medicine*, 38(6), 759–765. doi: [10.5535/arm.2014.38.6.759](https://doi.org/10.5535/arm.2014.38.6.759)

cité page 152

Lee, J. B., Kaye, R. C., & Cherney, L. R. (2009). Conversational script performance in adults with non-fluent aphasia : Treatment intensity and aphasia severity. *Aphasiology*, 23(7-8), 885–897. doi: [10.1080/02687030802669534](https://doi.org/10.1080/02687030802669534)

5 citations, pages 49, 58, 105, 106 & 213

Lee, J.-K., Ko, M.-H., Park, S.-H., & Kim, G.-W. (2021). Prediction of aphasia severity in patients with stroke using diffusion tensor imaging. *Brain Sciences*, 11(3), 304. doi: [10.3390/brainsci11030304](https://doi.org/10.3390/brainsci11030304)

3 citations, pages 58, 82 & 231

Leff, A., Crinion, J., Scott, S., Turkheimer, F., Howard, D., & Wise, R. (2002). A physiological change in the homotopic cortex following left posterior temporal lobe infarction. *Annals of Neurology*, 51(5), 553–558. doi: [10.1002/ana.10181](https://doi.org/10.1002/ana.10181)

cité page 202

Leonardi, S., Cacciola, A., De Luca, R., Aragona, B., Andronaco, V., Milardi, D., . . . Calabrò, R. S. (2018). The role of music therapy in rehabilitation : improving aphasia and beyond. *International Journal of Neuroscience*, 128(1), 90–99. doi: [10.1080/00207454.2017.1353981](https://doi.org/10.1080/00207454.2017.1353981)

2 citations, pages 39, 40

Levelt, W. J. M. (1989). *Speaking : from intention to articulation*. MIT press.

2 citations, pages 18, 204

Levelt, W. J. M. (2001). Spoken word production : A theory of lexical access. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(23), 13464–13471. doi: [10.1073/pnas.231459498](https://doi.org/10.1073/pnas.231459498)

cité page 204

Levelt, W. J. M., Roelofs, A., & Meyer, A. S. (1999). A theory of lexical access in speech production. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(1), 1-38. doi: [10.1017/s0140525x99001776](https://doi.org/10.1017/s0140525x99001776)

2 citations, pages 18, 19

Li, F., Edwards, J., & Beckman, M. E. (2009). Contrast and covert contrast : The phonetic development of voiceless sibilant fricatives in English and Japanese toddlers. *Journal of Phonetics*, 37(1), 111–124. doi: [10.1016/j.wocn.2008.10.001](https://doi.org/10.1016/j.wocn.2008.10.001)

3 citations, pages 14, 122 & 155

Lichtheim, L. (1885). On Aphasia. *Brain*, 7(4), 433–484. doi: [10.1093/brain/7.4.433](https://doi.org/10.1093/brain/7.4.433)

cité page 18

LimeSurvey GmbH. (2012). Limesurvey : An open source survey tool [Manuel de logiciel]. Hamburg, Germany. Consulté sur <http://www.limesurvey.org>

cité page 165

Lisker, L., & Abramson, A. S. (1964). A cross-language study of voicing in initial stops : Acoustical measurements. *WORD*, 20(3), 384–422. doi: 10.1080/00437956.1964.11659830

2 citations, pages 13, 122

Lœvenbruck, H. (2019). *Loquor, ergo communico-cogito-sum* (Habilitation à diriger des recherches). Université Grenoble Alpes, Grenoble, France.

10 citations, pages 19, 21, 22, 23, 28, 112, 168, 201, 203 & 205

Lœvenbruck, H., Grandchamp, R., Rapin, L., Nalborczyk, L., Dohen, M., Perrier, P., ... Perrone-Bertolotti, M. (2018). A cognitive neuroscience view of inner language : to predict and to hear, see, feel. In P. Langland-Hassan & A. Vicente (Eds.), *Inner speech : New voices* (pp. 131–167). Oxford University Press.

3 citations, pages 21, 28 & 134

Maas, M. B., Lev, M. H., Ay, H., Singhal, A. B., Greer, D. M., Smith, W. S., ... Furie, K. L. (2012). The prognosis for aphasia in stroke. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 21(5), 350–357. doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2010.09.009

2 citations, pages 90, 105

Marchal, A. (2011). *Précis de physiologie de la production de la parole*. SOLAL.

cité page 9

Marchina, S., Zhu, L. L., Norton, A., Zipse, L., Wan, C. Y., & Schlaug, G. (2011). Impairment of speech production predicted by lesion load of the left arcuate fasciculus. *Stroke*, 42(8), 2251–2256. doi: 10.1161/STROKEAHA.110.606103

2 citations, pages 59, 82

Marcotte, K., Perlberg, V., Marrelec, G., Benali, H., & Ansaldo, A. I. (2013). Default-mode network functional connectivity in aphasia : Therapy-induced neuroplasticity. *Brain and Language*, 124(1), 45–55. doi: 10.1016/j.bandl.2012.11.004

cité page 230

Margulies, D. S., Ghosh, S. S., Goulas, A., Falkiewicz, M., Huntenburg, J. M., Langs, G., ... Smallwood, J. (2016). Situating the default-mode network along a principal gradient of macroscale cortical organization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(44), 12574–12579. doi: 10.1073/pnas.1608282113

cité page 25

Mariën, P., Ackermann, H., Adamaszek, M., Barwood, C. H. S., Beaton, A., Desmond, J., ... Ziegler, W. (2014). Consensus paper : Language and the cerebellum : an ongoing enigma. *The Cerebellum*, 13(3), 386–410. doi: 10.1007/s12311-013-0540-5

cité page 132

Martin, P. I., Naeser, M. A., Ho, M., Treglia, E., Kaplan, E., Baker, E. H., & Pascual-Leone, A. (2009). Research with transcranial magnetic stimulation in the treatment of aphasia. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 9(6), 451–458. doi: 10.1007/s11910-009-0067-9

cité page 202

Mayer, J. F., Mitchinson, S. I., & Murray, L. L. (2017). Addressing concomitant executive dysfunction and aphasia : previous approaches and the new brain budget protocol. *Aphasiology*, 31(7),

837–860. doi: [10.1080/02687038.2016.1249333](https://doi.org/10.1080/02687038.2016.1249333)

cité page 224

Mazaux, J.-M., & Orgogozo, J.-M. (1981). *Echelle d'évaluation de l'aphasie adaptée du Boston Diagnostic Aphasia examination* (Editeurs du Centre de Psychologie Appliquée, Ed.). Editions scientifiques et psychotechniques.

7 citations, pages 60, 62, 64, 81, 94, 95 & 218

Mazoyer, B., Zago, L., Jobard, G., Crivello, F., Joliot, M., Perchey, G., ... Tzourio-Mazoyer, N. (2014). Gaussian mixture modeling of hemispheric lateralization for language in a large sample of healthy individuals balanced for handedness. *PLoS ONE*, 9(6), e101165. doi: [10.1371/journal.pone.0101165](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101165)

cité page 24

Meinzer, M., Flaisch, T., Breitenstein, C., Wienbruch, C., Elbert, T., & Rockstroh, B. (2008). Functional re-recruitment of dysfunctional brain areas predicts language recovery in chronic aphasia. *NeuroImage*, 39(4), 2038–2046. doi: [10.1016/j.neuroimage.2007.10.008](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.10.008)

cité page 201

Meloni, G. (2022). *Évaluation des troubles du développement des sons de parole dans le cadre d'un modèle psycholinguistique chez l'enfant francophone* (Thèse de doctorat). Université de Montréal et Université Grenoble Alpes, Grenoble, France.

2 citations, pages 19, 175

Meltzer, J. A., Baird, A. J., Steele, R. D., & Harvey, S. J. (2018). Computer-based treatment of poststroke language disorders : a non-inferiority study of telerehabilitation compared to in-person service delivery. *Aphasiology*, 32(3), 290–311. doi: [10.1080/02687038.2017.1355440](https://doi.org/10.1080/02687038.2017.1355440)

6 citations, pages 41, 42, 43, 44, 226 & 228

Menke, R., Meinzer, M., Kugel, H., Deppe, M., Baumgärtner, A., Schiffbauer, H., ... Breitenstein, C. (2009). Imaging short- and long-term training success in chronic aphasia. *BMC Neuroscience*, 10(1). doi: [10.1186/1471-2202-10-118](https://doi.org/10.1186/1471-2202-10-118)

cité page 47

Merrett, D. L., Peretz, I., & Wilson, S. J. (2014). Neurobiological, cognitive, and emotional mechanisms in melodic intonation therapy. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 401. doi: [10.3389/fnhum.2014.00401](https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00401)

2 citations, pages 40, 41

Meunier, C. (2007). Phonétique acoustique. In P. Auzou (Ed.), *Les dysarthries* (pp. 164–173). De Boeck Solal.

8 citations, pages 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 & 16

Mevel, K., Grassiot, B., Chételat, G., Defer, G., Desgranges, B., & Eustache, F. (2010). The default mode network : Cognitive role and pathological disturbances. *Revue Neurologique*, 166(11), 859–872. doi: [10.1016/j.neurol.2010.01.008](https://doi.org/10.1016/j.neurol.2010.01.008)

cité page 27

Meynadier, Y. (2013). Éléments de phonétique acoustique. In N. Nguyen & M. Adda-Decker (Eds.), *Méthodes et outils pour l'analyse phonétique des grands corpus oraux* (pp. 25–83). Hermès.

6 citations, pages 11, 13, 14, 15, 16 & 171

Meynert, T. (1885). *Psychiatry : a clinical treatise on diseases of the fore-brain based upon a study of its structure, functions, and nutrition*. (G.P. Putnam's Sons éd. ; B. Sachs, Trad.).

cité page 25

- Middlebrooks, E. H., Yagmurlu, K., Szaflarski, J. P., Rahman, M., & Bozkurt, B. (2016). A contemporary framework of language processing in the human brain in the context of preoperative and intraoperative language mapping. *Neuroradiology*, *59*(1), 69–87. doi: [10.1007/s00234-016-1772-0](https://doi.org/10.1007/s00234-016-1772-0)
cité page 17
- Mirman, D., Chen, Q., Zhang, Y., Wang, Z., Faseyitan, O. K., Coslett, H. B., & Schwartz, M. F. (2015). Neural organization of spoken language revealed by lesion–symptom mapping. *Nature Communications*, *6*, 6762. doi: [10.1038/ncomms7762](https://doi.org/10.1038/ncomms7762)
2 citations, pages 58, 80
- Mohr, B. (2017). Neuroplasticity and functional recovery after intensive language therapy in chronic post stroke aphasia : Which factors are relevant? *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*, 332. doi: [10.3389/fnhum.2017.00332](https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00332)
6 citations, pages 44, 46, 201, 214, 221 & 226
- Monroy-Sosa, A., Chakravarthi, S. S., Cortes-Contreras, A. P., Hernandez-Varela, M., Andres-Arrieta, V., Epping, A., & Rovin, R. A. (2021). The Evolution of Cerebral Language Localization : Historical Analysis and Current Trends. *World Neurosurgery*, *145*, 89–97. doi: [10.1016/j.wneu.2020.09.028](https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.09.028)
5 citations, pages 17, 18, 25, 26 & 28
- Moore, M. J., & Demeyere, N. (2022). Lesion symptom mapping of domain-specific cognitive impairments using routine imaging in stroke. *Neuropsychologia*, *167*, 108159. doi: [10.1016/j.neuropsychologia.2022.108159](https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2022.108159)
cité page 84
- Moulin-Frier, C., Diard, J., Schwartz, J.-L., & Bessière, P. (2015). COSMO (“Communicating about Objects using Sensory–Motor Operations”) : A Bayesian modeling framework for studying speech communication and the emergence of phonological systems. *Journal of Phonetics*, *53*, 5–41. doi: [10.1016/j.wocn.2015.06.001](https://doi.org/10.1016/j.wocn.2015.06.001)
cité page 19
- Murray, L. (2012). Attention and other cognitive deficits in aphasia : presence and relation to language and communication measures. *American Journal of Speech-Language Pathology*, *21*(2), S51–64. doi: [10.1044/1058-0360\(2012/11-0067\)](https://doi.org/10.1044/1058-0360(2012/11-0067))
cité page 34
- Murray, L., & Coppens, P. (2017). Formal and informal assessment of aphasia. In I. Papathanasiou & P. Coppens (Eds.), *Aphasia and Related Neurogenic Communication Disorders* (2^e éd., pp. 81–108). Jones & Bartlett Learning.
cité page 152
- Musso, M., Weiller, C., Kiebel, S., Müller, S. P., Bülau, P., & Rijntjes, M. (1999). Training-induced brain plasticity in aphasia. *Brain*, *122*(9), 1781–1790. doi: [10.1093/brain/122.9.1781](https://doi.org/10.1093/brain/122.9.1781)
cité page 202
- Na, Y., Jung, J., Tench, C. R., Auer, D. P., & Pyun, S.-B. (2022). Language systems from lesion-symptom mapping in aphasia : A meta-analysis of voxel-based lesion mapping studies. *NeuroImage : Clinical*, *35*, 103038. doi: [10.1016/j.nicl.2022.103038](https://doi.org/10.1016/j.nicl.2022.103038)
2 citations, pages 49, 50
- Naeser, M. A., Martin, P. I., Theoret, H., Kobayashi, M., Fregni, F., Nicholas, M., ... Pascual-Leone, A. (2011). TMS suppression of right pars triangularis, but not pars opercularis, improves naming

in aphasia. *Brain and language*, 119(3), 206–213. doi: [10.1016/j.bandl.2011.07.005](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.07.005)

cité page 202

Nakamichi, N., Takamoto, K., Nishimaru, H., Fujiwara, K., Takamura, Y., Matsumoto, J., ... Nishijo, H. (2018). Cerebral hemodynamics in speech-related cortical areas : Articulation learning involves the inferior frontal gyrus, ventral sensory-motor cortex, and parietal-temporal sylvian area. *Frontiers in Neurology*, 9, 939. doi: [10.3389/fneur.2018.00939](https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00939)

3 citations, pages 82, 204 & 219

Nenert, R., Allendorfer, J. B., Martin, A. M., Banks, C., Vannest, J., Holland, S. K., & Szaflarski, J. P. (2017). Age-related language lateralization assessed by fMRI : The effects of sex and handedness. *Brain Research*, 1674, 20–35. doi: [10.1016/j.brainres.2017.08.021](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2017.08.021)

2 citations, pages 24, 38

Nespoulous, J.-L., Baqué, L., Rosas, A., Marczyk, A., & Estrada, M. (2013). Aphasia, phonological and phonetic voicing within the consonantal system : preservation of phonological oppositions and compensatory strategies. *Language Sciences*, 39, 117–125. doi: [10.1016/j.langsci.2013.02.015](https://doi.org/10.1016/j.langsci.2013.02.015)

7 citations, pages 114, 154, 155, 158, 160, 198 & 214

Nespoulous, J.-L., Lecours, A. R., Lafond, D., Lemay, M. A., Puel, M., Joannette, Y., ... Rascol, A. (1992). *Protocole Montréal-Toulouse d'examen linguistique de l'aphasie, MT 86, Module standard initial : M1b*. Ortho Editions.

5 citations, pages 119, 120, 138, 164 & 172

Nissen, S. L., & Fox, R. A. (2005). Acoustic and spectral characteristics of young children's fricative productions : A developmental perspective. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(4), 2570–2578. doi: [10.1121/1.2010407](https://doi.org/10.1121/1.2010407)

3 citations, pages 14, 122 & 155

Ogrezeanu, V., Voinescu, I., Mihăilescu, L., & Jipescu, I. (1994). "Spontaneous" recovery in aphasics after single ischaemic stroke. *Romanian Journal of Neurology and Psychiatry*, 32(2), 77–90.

cité page 155

Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness : the edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. doi: [10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)

2 citations, pages 63, 95

Olsson, C., Arvidsson, P., & Blom Johansson, M. (2019). Relations between executive function, language, and functional communication in severe aphasia. *Aphasiology*, 33(7), 821–845. doi: [10.1080/02687038.2019.1602813](https://doi.org/10.1080/02687038.2019.1602813)

8 citations, pages 79, 84, 85, 108, 167, 220, 229 & 233

Osa García, A., Brambati, S. M., Brisebois, A., Désilets-Barnabé, M., Houzé, B., Bedetti, C., ... Marcotte, K. (2020). Predicting early post-stroke aphasia outcome from initial aphasia severity. *Frontiers in Neurology*, 11. doi: [10.3389/fneur.2020.00120](https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00120)

5 citations, pages 49, 58, 90, 105 & 213

Park, E. J., Kim, Y. W., Nam, H. S., Choi, H. S., & Kim, D. Y. (2021). Neural substrates of aphasia in acute left hemispheric stroke using voxel-based lesion-symptom brain mapping. *Brain & Neurorehabilitation*, 14(2), e14. doi: [10.12786/bn.2021.14.e14](https://doi.org/10.12786/bn.2021.14.e14)

5 citations, pages 58, 80, 81, 91 & 219

Parkinson, B. R., Raymer, A., Chang, Y.-L., FitzGerald, D. B., & Crosson, B. (2009). Lesion characteristics related to treatment improvement in object and action naming for patients

- with chronic aphasia. *Brain and Language*, 110(2), 61–70. doi: [10.1016/j.bandl.2009.05.005](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2009.05.005)
cité page 107
- Patri, J.-F., Perrier, P., Schwartz, J.-L., & Diard, J. (2018). What drives the perceptual change resulting from speech motor adaptation? Evaluation of hypotheses in a Bayesian modeling framework. *PLoS Computational Biology*, 14(1), e1005942. doi: [10.1371/journal.pcbi.1005942](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005942)
cité page 19
- Pedersen, P. M., Stig Jørgensen, H., Nakayama, H., Raaschou, H. O., & Olsen, T. S. (1995). Aphasia in acute stroke : Incidence, determinants, and recovery. *Annals of Neurology*, 38(4), 659–666. doi: [10.1002/ana.410380416](https://doi.org/10.1002/ana.410380416)
2 citations, pages 1, 31
- Pedersen, P. M., Vinter, K., & Olsen, T. S. (2004). Aphasia after stroke : Type, severity and prognosis. *Cerebrovascular Diseases*, 17(1), 35–43. doi: [10.1159/000073896](https://doi.org/10.1159/000073896)
4 citations, pages 49, 50, 79 & 91
- Pépiot, E. (2015). Voice, speech and gender : Male-female acoustic differences and cross-language variation in English and French speakers. *Corela*(HS-16). doi: [10.4000/corela.3783](https://doi.org/10.4000/corela.3783)
cité page 16
- Pépiot, E. (2016a). Female and male speech : a study of vowel formants and consonant noise in Parisian French and American English speakers. *Paisii Hilendarski University of Plovdiv, Bulgaria – Research Papers*, 53(1), 610–621.
2 citations, pages 16, 171
- Pépiot, E. (2016b). Voix de femmes, voix d’hommes : une étude du voice onset time, de la répartition consonnes/voyelles et du débit de parole chez des locuteurs francophones et anglophones américains. In *Acte de la conférence conjointe Journées d’Études sur la Parole (JEP), Traitement Automatique des Langues Naturelles (TALN), Rencontre des Étudiants Chercheurs en Informatique pour le Traitement Automatique des Langues (RÉCITAL)* (pp. 759–767). Paris, France.
2 citations, pages 16, 171
- Pérennou, D., Amblard, B., Leblond, C., & Pélissier, J. (1998). Biased postural vertical in humans with hemispheric cerebral lesions. *Neuroscience Letters*, 252(2), 75–78. doi: [10.1016/S0304-3940\(98\)00501-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(98)00501-1)
cité page 64
- Perrachione, T. K., & Ghosh, S. S. (2013). Optimized design and analysis of sparse-sampling fMRI experiments. *Frontiers in Neuroscience*, 7, 55. doi: [10.3389/fnins.2013.00055](https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00055)
cité page 175
- Perrier, P., & Schwartz, J.-L. (2016). De la bouche à l’oreille : éléments d’anatomie et de physiologie fonctionnelles des systèmes auditif et articulatoire. In S. Pinto & M. Sato (Eds.), *Traité de neurolinguistique. Du cerveau au langage* (pp. 13–30). De Boeck Supérieur.
2 citations, pages 9, 118
- Perrone-Bertolotti, M., Tzourio-Mazoyer, N., Hoyau, E., Mazoyer, B., & Baciú, M. (2016). La-téralisation hémisphérique du langage : résultats des études comportementales et de la neuroimagerie. In S. Pinto & M. Sato (Eds.), *Traité de neurolinguistique. du cerveau au langage* (pp. 147–167). De Boeck.
cité page 24
- Pickering, M. J., & Garrod, S. (2013). An integrated theory of language production and comprehen-

- sion. *Behavioral and Brain Sciences*, 36(4), 329–347. doi: [10.1017/S0140525X12001495](https://doi.org/10.1017/S0140525X12001495)
cité page 19
- Pickering, M. J., & Garrod, S. (2021). *Understanding Dialogue : Language Use and Social Interaction*. Cambridge University Press. doi: [10.1017/9781108610728](https://doi.org/10.1017/9781108610728)
cité page 19
- Plowman, E., Hentz, B., & Ellis, C. (2012). Post-stroke aphasia prognosis : a review of patient-related and stroke-related factors. *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 18(3), 689–694. doi: [10.1111/j.1365-2753.2011.01650.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2753.2011.01650.x)
3 citations, pages 49, 60 & 79
- Popescu, T., Stahl, B., Wiernik, B. M., Haiduk, F., Zemanek, M., Helm, H., ... Fitch, W. T. (2022). Melodic Intonation Therapy for aphasia : A multi-level meta-analysis of randomised controlled trials and individual participant data. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1516(1), 76–84. doi: [10.1111/nyas.14848](https://doi.org/10.1111/nyas.14848)
3 citations, pages 37, 40 & 112
- Postma, A. (2000). Detection of errors during speech production : a review of speech monitoring models. *Cognition*, 77(2), 97–132. doi: [10.1016/S0010-0277\(00\)00090-1](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(00)00090-1)
cité page 19
- Power, J. D., & Petersen, S. E. (2013). Control-related systems in the human brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 23(2), 223–228. doi: [10.1016/j.conb.2012.12.009](https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.12.009)
cité page 204
- Price, C. J. (2012). A review and synthesis of the first 20years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *NeuroImage*, 62(2), 816–847. doi: [10.1016/j.neuroimage.2012.04.062](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.04.062)
cité page 23
- Price, C. J., & Friston, K. J. (2002). Degeneracy and cognitive anatomy. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(10), 416–421. doi: [10.1016/s1364-6613\(02\)01976-9](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(02)01976-9)
cité page 206
- Prince, T. (2017). Architectures des troubles phonético-phonologiques dans l'aphasie du français : des segments aux syllabes. *Revue de neuropsychologie*, 9(2), 81–98. doi: [10.1684/nrp.2017.0420](https://doi.org/10.1684/nrp.2017.0420)
cité page 32
- Pulvermüller, F., Neininger, B., Elbert, T., Mohr, B., Rockstroh, B., Koebbel, P., & Taub, E. (2001). Constraint-induced therapy of chronic aphasia after stroke. *Stroke*, 32(7), 1621–1626. doi: [10.1161/01.STR.32.7.1621](https://doi.org/10.1161/01.STR.32.7.1621)
2 citations, pages 37, 38
- Pustina, D., Coslett, H. B., Ungar, L., Faseyitan, O. K., Medaglia, J. D., Avants, B., & Schwartz, M. F. (2017). Enhanced estimations of post-stroke aphasia severity using stacked multimodal predictions. *Human Brain Mapping*, 38(11), 5603–5615. doi: [10.1002/hbm.23752](https://doi.org/10.1002/hbm.23752)
cité page 60
- Raboyeau, G., De Boissezon, X., Marie, N., Balduyck, S., Puel, M., Bezy, C., ... Cardebat, D. (2008). Right hemisphere activation in recovery from aphasia : Lesion effect or function recruitment? *Neurology*, 70(4), 290–298. doi: [10.1212/01.wnl.0000287115.85956.87](https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000287115.85956.87)
cité page 202
- Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(2),

676–682. doi: [10.1073/pnas.98.2.676](https://doi.org/10.1073/pnas.98.2.676)

cité page 27

Rajashekar, D., Wilms, M., Hecker, K. G., Hill, M. D., Dukelow, S., Fiehler, J., & Forkert, N. D. (2020). The impact of covariates in voxel-wise lesion-symptom mapping. *Frontiers in Neurology*, *11*, 854. doi: [10.3389/fneur.2020.00854](https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00854)

2 citations, pages 86, 229

Ramsberger, G. (2005). Achieving conversational success in aphasia by focusing on non-linguistic cognitive skills : A potentially promising new approach. *Aphasiology*, *19*(10-11), 1066–1073. doi: [10.1080/02687030544000254](https://doi.org/10.1080/02687030544000254)

cité page 224

Ramsey, L. E., Siegel, J. S., Lang, C. E., Strube, M., Shulman, G. L., & Corbetta, M. (2017). Behavioural clusters and predictors of performance during recovery from stroke. *Nature Human Behaviour*, *1*, 0038. doi: [10.1038/s41562-016-0038](https://doi.org/10.1038/s41562-016-0038)

3 citations, pages 49, 58 & 105

Raymer, A. M., Kohen, F. P., & Saffell, D. (2006). Computerised training for impairments of word comprehension and retrieval in aphasia. *Aphasiology*, *20*(2-4), 257–268. doi: [10.1080/02687030500473312](https://doi.org/10.1080/02687030500473312)

cité page 225

Reitan, R. M., & Wolfson, D. (1985). *The Halstead-Reitan neuropsychological test battery : theory and clinical interpretation*. Neuropsychological Press.

cité page 64

Rey, A., & Osterrieth, P. A. (1993). Translations of excerpts from Andre Rey's Psychological examination of traumatic encephalopathy and P. A. Osterrieth's The complex figure copy test". *Clinical Neuropsychologist*, *7*(1), 4–21.

cité page 64

Robertson, I. H., & Fitzpatrick, S. M. (2008). The future of cognitive neurorehabilitation. In D. T. Stuss, G. Winocur, & I. H. Robertson (Eds.), *Cognitive neurorehabilitation* (pp. 565–574). Cambridge University Press.

cité page 221

Robey, R. R. (1998). A meta-analysis of clinical outcomes in the treatment of aphasia. *Journal of speech, language, and hearing research*, *41*(1), 172–187. doi: [10.1044/jslhr.4101.172](https://doi.org/10.1044/jslhr.4101.172)

3 citations, pages 49, 58 & 90

Rode, G., Pagliari, C., Huchon, L., Rossetti, Y., & Pisella, L. (2017). Semiology of neglect : An update. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, *60*(3), 177–185. doi: [10.1016/j.rehab.2016.03.003](https://doi.org/10.1016/j.rehab.2016.03.003)

cité page 65

Roger, E. (2020). *Réorganisations neurocognitives du langage et de la mémoire dans l'épilepsie temporale pharmaco-résistante : une approche multimodale basée sur la connectivité* (Thèse de doctorat). Université Grenoble Alpes, Grenoble, France.

2 citations, pages 25, 233

Roger, E., Banjac, S., Thiebaut de Schotten, M., & Baciú, M. (2022). Missing links : The functional unification of language and memory (LUM). *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *133*, 104489. doi: [10.1016/j.neubiorev.2021.12.012](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.12.012)

2 citations, pages 9, 233

- Roger, E., Rodrigues De Almeida, L., Løevenbruck, H., Perrone-Bertolotti, M., Cousin, E., Schwartz, J.-L., ... Baciú, M. (2022). Unraveling the functional attributes of the language connectome : crucial subnetworks, flexibility and variability. *NeuroImage*, 263, 119672. doi: 10.1016/j.neuroimage.2022.119672
7 citations, pages 9, 28, 80, 84, 167, 220 & 233
- Rorden, C. (2019). *MRICron*. Consulté le 2022-11-14, sur <https://www.nitrc.org/projects/mricron>
cité page 66
- Rorden, C. (2022). *MRICroGL*. Consulté le 2022-11-14, sur <https://www.nitrc.org/projects/microgl>
4 citations, pages 67, 69, 96 & 98
- Rose, Y., & MacWhinney, B. (2014). The PhonBank Project : Data and Software-Assisted Methods for the Study of Phonology and Phonological Development. In J. Durand, U. Gut, & G. Kristoffersen (Eds.), *The Oxford Handbook of Corpus Phonology* (pp. 308–401). Oxford University Press. doi: 10.1093/oxfordhb/9780199571932.013.023
4 citations, pages 140, 141, 142 & 176
- Rose, Y., MacWhinney, B., Byrne, R., Hedlund, G., Maddocks, K., O'Brien, P., & Wareham, T. (2006). Introducing Phon : A Software Solution for the Study of Phonological Acquisition. In D. Bamman, T. Magnitskaia, & C. Zaller (Eds.), *Proceedings of the 30th Annual Boston University Conference on Language Development* (pp. 489–500). Somerville, MA : Cascadilla Press.
4 citations, pages 140, 141, 142 & 176
- RStudio Team. (2020). Rstudio : Integrated development environment for r [Manuel de logiciel]. Boston, MA. Consulté sur <http://www.rstudio.com/>
9 citations, pages 68, 97, 121, 141, 142, 143, 175, 178 & 297
- Ruff, R. M., Light, R. H., & Evans, R. W. (1987). The ruff figural fluency test : A normative study with adults. *Developmental Neuropsychology*, 3(1), 37–51. doi: 10.1080/87565648709540362
3 citations, pages 139, 152 & 166
- Ryalls, J., Provost, H., & Arsenault, N. (1995). Voice Onset Time production in French-speaking aphasics. *Journal of Communication Disorders*, 28(3), 205–215. doi: 10.1016/0021-9924(94)00009-0
cité page 155
- Sage, K., Snell, C., & Lambon Ralph, M. A. (2011). How intensive does anomia therapy for people with aphasia need to be? *Neuropsychological Rehabilitation*, 21(1), 26–41. doi: 10.1080/09602011.2010.528966
cité page 225
- Sandberg, C. W. (2017). Hypoconnectivity of resting-state networks in persons with aphasia compared with healthy age-matched adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 91. doi: 10.3389/fnhum.2017.00091
cité page 230
- Sandberg, C. W., Bohland, J. W., & Kiran, S. (2015). Changes in functional connectivity related to direct training and generalization effects of a word finding treatment in chronic aphasia. *Brain and Language*, 150, 103–116. doi: 10.1016/j.bandl.2015.09.002
cité page 230
- Sato, M. (2020). The neurobiology of sex differences during language processing in healthy

adults : A systematic review and a meta-analysis. *Neuropsychologia*, 140, 107404. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2020.107404

cité page 24

Saur, D., Lange, R., Baumgaertner, A., Schraknepper, V., Willmes, K., Rijntjes, M., & Weiller, C. (2006). Dynamics of language reorganization after stroke. *Brain*, 129(6), 1371–1384. doi: 10.1093/brain/awl090

5 citations, pages 45, 46, 47, 200 & 202

Schlaug, G., Marchina, S., & Norton, A. (2009). Evidence for plasticity in white-matter tracts of patients with chronic broca's aphasia undergoing intense intonation-based speech therapy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169(1), 385–394. doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.04587.x

3 citations, pages 168, 231 & 234

Schwartz, M. E, Faseyitan, O., Kim, J., & Coslett, H. B. (2012). The dorsal stream contribution to phonological retrieval in object naming. *Brain*, 135(12), 3799–3814. doi: 10.1093/brain/aws300

2 citations, pages 58, 80

Sebastian, R., & Kiran, S. (2011). Task-modulated neural activation patterns in chronic stroke patients with aphasia. *Aphasiology*, 25(8), 927–951. doi: 10.1080/02687038.2011.557436

cité page 202

Seeley, W. W., Menon, V., Schatzberg, A. F., Keller, J., Glover, G. H., Kenna, H., ... Greicius, M. D. (2007). Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *Journal of Neuroscience*, 27(9), 2349–2356. doi: 10.1523/jneurosci.5587-06.2007

cité page 203

Seniów, J., Litwin, M., & Leśniak, M. (2009). The relationship between non-linguistic cognitive deficits and language recovery in patients with aphasia. *Journal of the Neurological Sciences*, 283(1), 91–94. doi: 10.1016/j.jns.2009.02.315

3 citations, pages 34, 90 & 153

Shah, P. P., Szaflarski, J. P., Allendorfer, J., & Hamilton, R. H. (2013). Induction of neuroplasticity and recovery in post-stroke aphasia by non-invasive brain stimulation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 888. doi: 10.3389/fnhum.2013.00888

2 citations, pages 47, 221

Shahid, H., Sebastian, R., Schnur, T. T., Hanayik, T., Wright, A., Tippett, D. C., ... Hillis, A. E. (2017). Important considerations in lesion-symptom mapping : Illustrations from studies of word comprehension. *Human Brain Mapping*, 38(6), 2990–3000. doi: 10.1002/hbm.23567

2 citations, pages 86, 229

Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Serie B, Biological Sciences*, 298(1089), 199–209. doi: 10.1098/rstb.1982.0082

cité page 64

Sickert, A., Anders, L.-C., Munte, T. F., & Sailer, M. (2014). Constraint-induced aphasia therapy following sub-acute stroke : a single-blind, randomised clinical trial of a modified therapy schedule. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 85(1), 51–55. doi: 10.1136/jnnp-2012-304297

cité page 37

Signoret, J.-L. (1991). *Batterie d'Efficiency Mnésique, BEM 144*. Elsevier.

2 citations, pages 139, 166

- Simic, T., Bitan, T., Turner, G., Chambers, C., Goldberg, D., Leonard, C., & Rochon, E. (2020). The role of executive control in post-stroke aphasia treatment. *Neuropsychological Rehabilitation*, 30(10), 1853–1892. doi: [10.1080/09602011.2019.1611607](https://doi.org/10.1080/09602011.2019.1611607)
5 citations, pages 85, 90, 167, 220 & 229
- Simic, T., Rochon, E., Greco, E., & Martino, R. (2019). Baseline executive control ability and its relationship to language therapy improvements in post-stroke aphasia : a systematic review. *Neuropsychological Rehabilitation*, 29(3), 395–439. doi: [10.1080/09602011.2017.1307768](https://doi.org/10.1080/09602011.2017.1307768)
6 citations, pages 85, 217, 218, 220, 229 & 233
- Simmons-Mackie, N., Raymer, A., & Cherney, L. R. (2016). Communication partner training in aphasia : An updated systematic review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 97(12), 2202–2221.e8. doi: [10.1016/j.apmr.2016.03.023](https://doi.org/10.1016/j.apmr.2016.03.023)
3 citations, pages 44, 226 & 228
- Simon, H. A. (1975). The functional equivalence of problem solving skills. *Cognitive Psychology*, 7(2), 268–288. doi: [10.1016/0010-0285\(75\)90012-2](https://doi.org/10.1016/0010-0285(75)90012-2)
cité page 64
- Simpson, A. P. (2009). Phonetic differences between male and female speech. *Language and Linguistics Compass*, 3(2), 621–640. doi: [10.1111/j.1749-818X.2009.00125.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-818X.2009.00125.x)
2 citations, pages 16, 171
- Skipper-Kallal, L. M., Lacey, E. H., Xing, S., & Turkeltaub, P. E. (2017). Right hemisphere remapping of naming functions depends on lesion size and location in poststroke aphasia. *Neural Plasticity*, 2017, 8740353. doi: [10.1155/2017/8740353](https://doi.org/10.1155/2017/8740353)
2 citations, pages 202, 203
- Small, S. L., & Llano, D. A. (2009). Biological approaches to aphasia treatment. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 9(6), 443–450. doi: [10.1007/s11910-009-0066-x](https://doi.org/10.1007/s11910-009-0066-x)
2 citations, pages 37, 112
- Smallwood, J., Bernhardt, B. C., Leech, R., Bzdok, D., Jefferies, E., & Margulies, D. S. (2021). The default mode network in cognition : a topographical perspective. *Nature Reviews Neuroscience*, 22(8), 503–513. doi: [10.1038/s41583-021-00474-4](https://doi.org/10.1038/s41583-021-00474-4)
cité page 27
- Sommer, I. E., Aleman, A., Somers, M., Boks, M. P., & Kahn, R. S. (2008). Sex differences in handedness, asymmetry of the planum temporale and functional language lateralization. *Brain Research*, 1206, 76–88. doi: [10.1016/j.brainres.2008.01.003](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.01.003)
cité page 24
- Sparks, R., Helm, N., & Albert, M. (1974). Aphasia rehabilitation resulting from melodic intonation therapy. *Cortex*, 10(4), 303–316. doi: [10.1016/s0010-9452\(74\)80024-9](https://doi.org/10.1016/s0010-9452(74)80024-9)
cité page 40
- Spitzer, L., Binkofski, F., Willmes, K., & Bruehl, S. (2021). The novel cognitive flexibility in aphasia therapy (CFAT) : A combined treatment of aphasia and executive functions to improve communicative success. *International Journal of Speech-Language Pathology*, 23(2), 168–179. doi: [10.1080/17549507.2020.1757152](https://doi.org/10.1080/17549507.2020.1757152)
cité page 224
- Sporns, O., Tononi, G., & Kötter, R. (2005). The Human Connectome : A Structural Description of the Human Brain. *PLoS Computational Biology*, 1(4), e42. doi: [10.1371/journal.pcbi.0010042](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.0010042)
cité page 25

- Springer, L. (2008). Therapeutic approaches in aphasia rehabilitation. In B. Stemmer & H. A. Whitaker (Eds.), *Handbook of the neuroscience of language* (pp. 397–406). Elsevier.
2 citations, pages 35, 36
- Stahl, B., Mohr, B., Büscher, V., Dreyer, F. R., Lucchese, G., & Pulvermüller, F. (2018). Efficacy of intensive aphasia therapy in patients with chronic stroke : a randomised controlled trial. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 89(6), 586–592. doi: [10.1136/jnnp-2017-315962](https://doi.org/10.1136/jnnp-2017-315962)
cité page 225
- Stahl, B., Mohr, B., Dreyer, F. R., Lucchese, G., & Pulvermüller, F. (2016). Using language for social interaction : Communication mechanisms promote recovery from chronic non-fluent aphasia. *Cortex*, 85, 90–99. doi: [10.1016/j.cortex.2016.09.021](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.09.021)
3 citations, pages 38, 221 & 226
- Stark, B. C., Geva, S., & Warburton, E. A. (2017). Inner speech's relationship with overt speech in poststroke aphasia. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 60(9), 2406–2415. doi: [10.1044/2017_jslhr-s-16-0270](https://doi.org/10.1044/2017_jslhr-s-16-0270)
2 citations, pages 42, 232
- Stark, B. C., & Warburton, E. A. (2018). Improved language in chronic aphasia after self-delivered iPad speech therapy. *Neuropsychological Rehabilitation*, 28(5), 818–831. doi: [10.1080/09602011.2016.1146150](https://doi.org/10.1080/09602011.2016.1146150)
3 citations, pages 3, 42 & 43
- Stefaniak, J. D., Halai, A. D., & Lambon Ralph, M. A. (2020). The neural and neurocomputational bases of recovery from post-stroke aphasia. *Nature Reviews Neurology*, 16(1), 43–55. doi: [10.1038/s41582-019-0282-1](https://doi.org/10.1038/s41582-019-0282-1)
6 citations, pages 32, 45, 46, 52, 200 & 206
- Stevens, K. N., & Blumstein, S. E. (1978). Invariant cues for place of articulation in stop consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 64(5), 1358–1368. doi: [10.1121/1.382102](https://doi.org/10.1121/1.382102)
cité page 13
- Stoodley, C. J., & Schmahmann, J. D. (2009). Functional topography in the human cerebellum : a meta-analysis of neuroimaging studies. *NeuroImage*, 44(2), 489–501. doi: [10.1016/j.neuroimage.2008.08.039](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.08.039)
3 citations, pages 132, 202 & 205
- Stoodley, C. J., & Schmahmann, J. D. (2018). Functional topography of the human cerebellum. In M. Manto & T. A. Huisman (Eds.), *The cerebellum : From embryology to diagnostic investigations* (Vol. 154, pp. 59–70). Elsevier. doi: [10.1016/b978-0-444-63956-1.00004-7](https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63956-1.00004-7)
cité page 202
- Stoodley, C. J., Valera, E. M., & Schmahmann, J. D. (2012). Functional topography of the cerebellum for motor and cognitive tasks : an fMRI study. *NeuroImage*, 59(2), 1560–1570. doi: [10.1016/j.neuroimage.2011.08.065](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.08.065)
2 citations, pages 132, 205
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643–662. doi: [10.1037/h0054651](https://doi.org/10.1037/h0054651)
cité page 64
- Sturm, J. W., Donnan, G. A., Dewey, H. M., Macdonell, R. A. L., Gilligan, A. K., Srikanth, V., & Thrift, A. G. (2004). Quality of life after stroke. *Stroke*, 35(10), 2340–2345. doi:

10.1161/01.STR.0000141977.18520.3b

cité page 51

Sul, B., Lee, K. B., Hong, B. Y., Kim, J. S., Kim, J., Hwang, W. S., & Lim, S. H. (2019). Association of Lesion Location With Long-Term Recovery in Post-stroke Aphasia and Language Deficits. *Frontiers in Neurology, 10*, 776. doi: [10.3389/fneur.2019.00776](https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00776)

4 citations, pages 49, 90, 91 & 105

Szaflarski, J. P., Ball, A. L., Vannest, J., Dietz, A. R., Allendorfer, J. B., Martin, A. N., ... Lindsell, C. J. (2015). Constraint-induced aphasia therapy for treatment of chronic post-stroke aphasia : A randomized, blinded, controlled pilot trial. *Medical Science Monitor, 21*, 2861–2869. doi: [10.12659/MSM.894291](https://doi.org/10.12659/MSM.894291)

2 citations, pages 38, 39

Taub, E., Uswatte, G., & Pidikiti, R. (1999). Constraint-Induced Movement Therapy : a new family of techniques with broad application to physical rehabilitation - a clinical review. *Journal of rehabilitation research and development, 36*(3), 237–251.

cité page 37

Thiebaut de Schotten, M., Dell'Acqua, F., Ratiu, P., Leslie, A., Howells, H., Cabanis, E., ... Catani, M. (2015). From Phineas Gage and Monsieur Leborgne to H.M. : Revisiting Disconnection Syndromes. *Cerebral Cortex, 25*(12), 4812–4827. doi: [10.1093/cercor/bhv173](https://doi.org/10.1093/cercor/bhv173)

cité page 67

Thiebaut de Schotten, M., Urbanski, M., Batrancourt, B., Levy, R., Dubois, B., Cerliani, L., & Volle, E. (2017). Rostro-caudal architecture of the frontal lobes in humans. *Cerebral Cortex, 27*(8), 4033–4047. doi: [10.1093/cercor/bhw215](https://doi.org/10.1093/cercor/bhw215)

cité page 67

Thompson, C. K., den Ouden, D.-B., Bonakdarpour, B., Garibaldi, K., & Parrish, T. B. (2010). Neural plasticity and treatment-induced recovery of sentence processing in agrammatism. *Neuropsychologia, 48*(11), 3211–3227. doi: [10.1016/j.neuropsychologia.2010.06.036](https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.06.036)

cité page 202

Thye, M., & Mirman, D. (2018). Relative contributions of lesion location and lesion size to predictions of varied language deficits in post-stroke aphasia. *NeuroImage : Clinical, 20*, 1129–1138. doi: [10.1016/j.nicl.2018.10.017](https://doi.org/10.1016/j.nicl.2018.10.017)

cité page 49

Tian, X., & Poeppel, D. (2013). The effect of imagination on stimulation : The functional specificity of efference copies in speech processing. *Journal of Cognitive Neuroscience, 25*(7), 1020–1036. doi: [10.1162/jocn_a_00381](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00381)

cité page 25

Tippett, D. C., & Hillis, A. E. (2016). Vascular aphasia syndromes. In G. Hickok & S. L. Small (Eds.), *Neurobiology of language* (pp. 913–922). Academic Press.

5 citations, pages 29, 30, 32, 33 & 114

Torre, P., & Barlow, J. A. (2009). Age-related changes in acoustic characteristics of adult speech. *Journal of Communication Disorders, 42*(5), 324–333. doi: [10.1016/j.jcomdis.2009.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2009.03.001)

2 citations, pages 16, 215

Tovote, P., Fadok, J. P., & Lüthi, A. (2015). Neuronal circuits for fear and anxiety. *Nature Reviews Neuroscience, 16*(6), 317–331. doi: [10.1038/nrn3945](https://doi.org/10.1038/nrn3945)

cité page 202

- Triarhou, L. C. (2021). Cytoarchitectonics of the Rolandic operculum : morphofunctional ponderings. *Brain Structure and Function*, 226(4), 941–950. doi: [10.1007/s00429-021-02258-z](https://doi.org/10.1007/s00429-021-02258-z)
2 citations, pages 82, 219
- Trost, J. E., & Canter, G. J. (1974). Apraxia of speech in patients with broca's aphasia : A study of phoneme production accuracy and error patterns. *Brain and Language*, 1(1), 63–79. doi: [10.1016/0093-934x\(74\)90026-1](https://doi.org/10.1016/0093-934x(74)90026-1)
cité page 198
- Tsai, P.-Y., Wang, C.-P., Ko, J. S., Chung, Y.-M., Chang, Y.-W., & Wang, J.-X. (2014). The persistent and broadly modulating effect of inhibitory rTMS in nonfluent aphasic patients : a sham-controlled, double-blind study. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 28(8), 779–787. doi: [10.1177/1545968314522710](https://doi.org/10.1177/1545968314522710)
cité page 202
- Turkeltaub, P. E., Messing, S., Norise, C., & Hamilton, R. H. (2011). Are networks for residual language function and recovery consistent across aphasic patients? *Neurology*, 76(20), 1726–1734. doi: [10.1212/wnl.0b013e31821a44c1](https://doi.org/10.1212/wnl.0b013e31821a44c1)
5 citations, pages 201, 202, 204, 205 & 206
- Tzourio-Mazoyer, N., Crivello, F., & Mazoyer, B. (2018). Is the planum temporale surface area a marker of hemispheric or regional language lateralization? *Brain Structure and Function*, 223(3), 1217–1228. doi: [10.1007/s00429-017-1551-7](https://doi.org/10.1007/s00429-017-1551-7)
cité page 24
- Tzourio-Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., ... Joliot, M. (2002). Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain. *NeuroImage*, 15(1), 273–289. doi: [10.1006/nimg.2001.0978](https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0978)
11 citations, pages xv, 69, 76, 77, 98, 104, 131, 194, 196, 299 & 300
- Tzourio-Mazoyer, N., Perrone-Bertolotti, M., Jobard, G., Mazoyer, B., & Baciú, M. (2017). Multifactorial modulation of hemispheric specialization and plasticity for language in healthy and pathological conditions : A review. *Cortex*, 86, 314–339. doi: [10.1016/j.cortex.2016.05.013](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.05.013)
5 citations, pages 23, 24, 50, 83 & 90
- Vaissière, J. (2015). *La phonétique*. Presses universitaires de France.
5 citations, pages 9, 10, 12, 13 & 15
- Valdois, S., & Nespoulous, J.-L. (1994). Perturbations du traitement phonétique et phonologique du langage. *Neuropsychologie humaine*, 360–374.
2 citations, pages 154, 198
- Vanbellingen, T., Kersten, B., Van de Winckel, A., Bellion, M., Baronti, F., Müri, R., & Bohlhalter, S. (2011). A new bedside test of gestures in stroke : the apraxia screen of TULIA (AST). *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 82(4), 389–392. doi: [10.1136/jnnp.2010.213371](https://doi.org/10.1136/jnnp.2010.213371)
3 citations, pages 65, 138 & 164
- Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47(2), 599–604. doi: [10.2466/pms.1978.47.2.599](https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.2.599)
2 citations, pages 139, 166
- van den Heuvel, M. P., & Hulshoff Pol, H. E. (2010). Exploring the brain network : A review on resting-state fMRI functional connectivity. *European Neuropsychopharmacology*, 20(8), 519–534. doi: [10.1016/j.euroneuro.2010.03.008](https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2010.03.008)

cité page 27

Van Der Meulen, I., Van De Sandt-Koenderman, M. W. M. E., Heijenbrok, M. H., Visch-Brink, E., & Ribbers, G. M. (2016). Melodic intonation therapy in chronic aphasia : Evidence from a pilot randomized controlled trial. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*, 533. doi: [10.3389/fnhum.2016.00533](https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00533)

cité page 40

van de Sandt-Koenderman, W. M. (2011). Aphasia rehabilitation and the role of computer technology : can we keep up with modern times? *International Journal of Speech-Language Pathology*, *13*(1), 21–27. doi: [10.3109/17549507.2010.502973](https://doi.org/10.3109/17549507.2010.502973)

5 citations, pages 35, 43, 85, 226 & 228

van Hees, S., McMahon, K., Angwin, A., de Zubicaray, G., Read, S., & Copland, D. A. (2014). A functional MRI study of the relationship between naming treatment outcomes and resting state functional connectivity in post-stroke aphasia. *Human Brain Mapping*, *35*(8), 3919–3931. doi: [10.1002/hbm.22448](https://doi.org/10.1002/hbm.22448)

6 citations, pages 47, 168, 202, 230, 231 & 234

van Swieten, J. C., Koudstaal, P. J., Visser, M. C., Schouten, H. J., & van Gijn, J. (1988). Interobserver agreement for the assessment of handicap in stroke patients. *Stroke*, *19*(5), 604–607. doi: [10.1161/01.STR.19.5.604](https://doi.org/10.1161/01.STR.19.5.604)

cité page 64

van Vuuren, S., & Cherney, L. R. (2014). A virtual therapist for speech and language therapy. In T. Bickmore, S. Marsella, & C. Sidner (Eds.), *Intelligent virtual agents* (pp. 438–448). Springer International Publishing. doi: [10.1007/978-3-319-09767-1_55](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09767-1_55)

cité page 42

Varjačić, A., Mantini, D., Levenstein, J., Slavkova, E. D., Demeyere, N., & Gillebert, C. R. (2018). The role of left insula in executive set-switching : Lesion evidence from an acute stroke cohort. *Cortex*, *107*, 92–101. doi: [10.1016/j.cortex.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.11.009)

cité page 84

Venezia, J. H., Fillmore, P., Matchin, W., Isenberg, A. L., Hickok, G., & Fridriksson, J. (2016). Perception drives production across sensory modalities : A network for sensorimotor integration of visual speech. *NeuroImage*, *126*, 196–207. doi: [10.1016/j.neuroimage.2015.11.038](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.11.038)

3 citations, pages 107, 222 & 223

Verhaegen, C., Delvaux, V., Fagniat, S., Huet, K., Piccaluga, M., & Harmegnies, B. (2020). Phonological and phonetic impairment in aphasic speech : an acoustic study of the voice onset time of six french-speaking aphasic patients. *Clinical Linguistics & Phonetics*, *34*(3), 201–221. doi: [10.1080/02699206.2019.1619095](https://doi.org/10.1080/02699206.2019.1619095)

3 citations, pages 16, 32 & 215

Verhaegen, C., Delvaux, V., Huet, K., Fagniat, S., Piccaluga, M., & Harmegnies, B. (2018). La distinction entre les paraphasies phonologiques et phonétiques dans l'aphasie : Étude acoustique des productions de 6 patients aphasiques. In *XXXIIe Journées d'Études sur la Parole* (pp. 666–675). Aix-en-Provence, France. doi: [10.21437/JEP2018-76](https://doi.org/10.21437/JEP2018-76)

cité page 33

Verhaegen, C., Delvaux, V., Huet, K., Fagniat, S., Piccaluga, M., & Harmegnies, B. (2020). Capacités d'apprentissage phonétique chez des patients aphasiques francophones : étude de cas. In *Acte de la 6ème conférence conjointe Journées d'Études sur la Parole (JEP, 31^{ème} édition), Traitement*

Automatique des Langues Naturelles (TALN, 27^{ème} édition), Rencontre des Étudiants Chercheurs en Informatique pour le Traitement Automatique des Langues (RÉCITAL, 22^{ème} édition). Volume 1 : Journées d'Études sur la Parole (pp. 606–616). Nancy, France.

cité page 36

Viader, F. (2015). La classification des aphasies : un bref historique. *Revue de neuropsychologie*, 7(1), 5–14. doi: [10.3917/rne.071.0005](https://doi.org/10.3917/rne.071.0005)

2 citations, pages 30, 114

Viader, F., Lambert, J., de la Sayette, V., Eustache, F., Morin, P., Morin, I., & Lechevalier, B. (2010). Aphasie. *EMC Neurologie*, 7(1), 1–35. doi: [10.1016/S0246-0378\(09\)51369-3](https://doi.org/10.1016/S0246-0378(09)51369-3)

9 citations, pages 29, 30, 31, 32, 36, 44, 51, 114 & 225

Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P.-Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., ... Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas : Phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage*, 30(4), 1414–1432. doi: [10.1016/j.neuroimage.2005.11.002](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.11.002)

2 citations, pages 23, 47

Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P.-Y., Jobard, G., Petit, L., Crivello, F., ... Tzourio-Mazoyer, N. (2011). What is right-hemisphere contribution to phonological, lexico-semantic, and sentence processing? insights from a meta-analysis. *NeuroImage*, 54(1), 577–593. doi: [10.1016/j.neuroimage.2010.07.036](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.07.036)

2 citations, pages 23, 24

Vochin, A., Brambati, S. M., & Saj, A. (2022). Rehabilitation of post-stroke aphasia : Approach 2.0. *Revue de neuropsychologie*, 14(2), 121–131.

3 citations, pages 45, 200 & 234

Wallentin, M. (2018). Sex differences in post-stroke aphasia rates are caused by age. A meta-analysis and database query. *PLoS ONE*, 13(12), e0209571. doi: [10.1371/journal.pone.0209571](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209571)

3 citations, pages 51, 90 & 105

Wan, C. Y., Zheng, X., Marchina, S., Norton, A., & Schlaug, G. (2014). Intensive therapy induces contralateral white matter changes in chronic stroke patients with Broca's aphasia. *Brain and Language*, 136, 1–7. doi: [10.1016/j.bandl.2014.03.011](https://doi.org/10.1016/j.bandl.2014.03.011)

2 citations, pages 40, 231

Wang, G., Ge, L., Zheng, Q., Huang, P., & Xiang, J. (2020). Constraint-induced aphasia therapy for patients with aphasia : A systematic review. *International Journal of Nursing Sciences*, 7(3), 349–358. doi: [10.1016/j.ijnss.2020.05.005](https://doi.org/10.1016/j.ijnss.2020.05.005)

4 citations, pages 37, 38, 39 & 112

Watila, M. M., & Balarabe, S. A. (2015). Factors predicting post-stroke aphasia recovery. *Journal of the Neurological Sciences*, 352(1-2), 12–18. doi: [10.1016/j.jns.2015.03.020](https://doi.org/10.1016/j.jns.2015.03.020)

8 citations, pages 48, 49, 50, 58, 60, 90, 91 & 105

Watt, D., & Fabricius, A. (2002). Evaluation of a technique for improving the mapping of multiple speakers' vowel spaces in the $F_1 - F_2$ plane. *Leeds Working Papers in Linguistics and Phonetics*, 9, 159–173.

cité page 178

Weatherill, M., Tibus, E. O., & Rodriguez, A. D. (2022). Motivation as a predictor of aphasia treatment outcomes. *Topics in Language Disorders*, 42(3), 252–265. doi: [10.1097/tld.0000000000000286](https://doi.org/10.1097/tld.0000000000000286)

2 citations, pages 226, 228

Wechsler, D. (2008). *Wechsler Intelligence Scale–Fourth Edition (WAIS-IV) : Technical and interpretive*

manual. Pearson. doi: [10.1037/t15169-000](https://doi.org/10.1037/t15169-000)

cité page 64

Wechsler, D. (2012). *MEM-IV, Échelle clinique de mémoire de Wechsler*. Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.

2 citations, pages 139, 166

Wen, J., Yu, T., Liu, L., Hu, Z., Yan, J., Li, Y., & Li, X. (2017). Evaluating the roles of left middle frontal gyrus in word production using electrocorticography. *Neurocase*, 23(5-6), 263–269. doi: [10.1080/13554794.2017.1387275](https://doi.org/10.1080/13554794.2017.1387275)

cité page 206

Wernicke, C. (1874). *Der aphasische symptom-complex : eine psychologische studie auf anatomischer basis*. Cohn & Weigert.

3 citations, pages 17, 18 & 29

Whitfield-Gabrieli, S., & Ford, J. M. (2012). Default mode network activity and connectivity in psychopathology. *Annual Review of Clinical Psychology*, 8(1), 49–76. doi: [10.1146/annurev-clinpsy-032511-143049](https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-032511-143049)

cité page 27

Wilson, S. M., Eriksson, D. K., Brandt, T. H., Schneck, S. M., Lucanie, J. M., Burchfield, A. S., ... Kidwell, C. S. (2019). Patterns of recovery from aphasia in the first 2 weeks after stroke. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 62(3), 723–732. doi: [10.1044/2018_JSLHR-L-18-0254](https://doi.org/10.1044/2018_JSLHR-L-18-0254)

2 citations, pages 50, 79

Wilson, S. M., Eriksson, D. K., Yen, M., Demarco, A. T., Schneck, S. M., & Lucanie, J. M. (2019). Language mapping in aphasia. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 62(11), 3937–3946. doi: [10.1044/2019_jslhr-l-rsnp-19-0031](https://doi.org/10.1044/2019_jslhr-l-rsnp-19-0031)

cité page 204

Wilson, S. M., & Schneck, S. M. (2021). Neuroplasticity in post-stroke aphasia : A systematic review and meta-analysis of functional imaging studies of reorganization of language processing. *Neurobiology of Language*, 2(1), 22–82. doi: [10.1162/nol_a_00025](https://doi.org/10.1162/nol_a_00025)

cité page 46

Wolpert, D. M., Goodbody, S. J., & Husain, M. (1998). Maintaining internal representations : the role of the human superior parietal lobe. *Nature Neuroscience*, 1(6), 529–533. doi: [10.1038/2245](https://doi.org/10.1038/2245)

cité page 203

World Health Organization. (1989). Stroke 1989. recommendations on stroke prevention, diagnosis, and therapy. report of the WHO task force on stroke and other cerebrovascular disorders. *Stroke*, 20(10), 1407–1431. doi: [10.1161/01.str.20.10.1407](https://doi.org/10.1161/01.str.20.10.1407)

cité page 31

Xia, M., Wang, J., & He, Y. (2013). BrainNet Viewer : A network visualization tool for human brain connectomics. *PLoS ONE*, 8(7), e68910. doi: [10.1371/journal.pone.0068910](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068910)

2 citations, pages 69, 98

Yeh, F.-C. (2022). Population-based tract-to-region connectome of the human brain and its hierarchical topology. *Nature Communications*, 13(1), 4933. doi: [10.1038/s41467-022-32595-4](https://doi.org/10.1038/s41467-022-32595-4)

4 citations, pages xv, 69, 78 & 98

Yeo, B. T. T., Krienen, F. M., Sepulcre, J., Sabuncu, M. R., Lashkari, D., Hollinshead, M., ... Buckner, R. L. (2011). The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional

connectivity. *Journal of Neurophysiology*, 106(3), 1125–1165. doi: 10.1152/jn.00338.2011

cité page 27

Yeung, O., & Law, S.-P. (2010). Executive functions and aphasia treatment outcomes : Data from an ortho-phonological cueing therapy for anomia in chinese. *International Journal of Speech-Language Pathology*, 12(6), 529–544. doi: 10.3109/17549507.2011.516840

cité page 90

Younes, K., Hasan, K. M., Kamali, A., McGough, C. E., Keser, Z., Hasan, O., ... Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative Researchers (2019). Diffusion tensor imaging of the superior thalamic radiation and cerebrospinal fluid distribution in idiopathic normal pressure hydrocephalus. *Journal of Neuroimaging*, 29(2), 242–251. doi: 10.1111/jon.12581

2 citations, pages 84, 219

Yourganov, G., Smith, K. G., Fridriksson, J., & Rorden, C. (2015). Predicting aphasia type from brain damage measured with structural MRI. *Cortex*, 73, 203–215. doi: 10.1016/j.cortex.2015.09.005

5 citations, pages 80, 81, 82, 91 & 219

Zavanone, C., Samson, Y., Arbizu, C., Dupont, S., Dormont, D., & Rosso, C. (2018). Critical brain regions related to post-stroke aphasia severity identified by early diffusion imaging are not the same when predicting short- and long-term outcome. *Brain and Language*, 186, 1–7. doi: 10.1016/j.bandl.2018.08.005

8 citations, pages 59, 81, 82, 91, 105, 106, 219 & 231

Zhang, J., Zhong, S., Zhou, L., Yu, Y., Tan, X., Wu, M., ... Luo, B. (2021). Correlations between dual-pathway white matter alterations and language impairment in patients with aphasia : A systematic review and meta-analysis. *Neuropsychology Review*, 31(3), 402–418. doi: 10.1007/s11065-021-09482-8

4 citations, pages 82, 83, 219 & 231

Zheng, C., Lynch, L., & Taylor, N. (2016). Effect of computer therapy in aphasia : a systematic review. *Aphasiology*, 30(2-3), 211–244. doi: 10.1080/02687038.2014.996521

cité page 42

Zigmond, A. S., & Snaith, R. P. (1983). The hospital anxiety and depression scale. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 67(6), 361–370. doi: 10.1111/j.1600-0447.1983.tb09716.x

2 citations, pages 139, 166

Zumbansen, A., Peretz, I., & Hébert, S. (2014). The combination of rhythm and pitch can account for the beneficial effect of melodic intonation therapy on connected speech improvements in broca's aphasia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 592. doi: 10.3389/fnhum.2014.00592

cité page 40

Zumbansen, A., & Tremblay, P. (2019). Music-based interventions for aphasia could act through a motor-speech mechanism : a systematic review and case-control analysis of published individual participant data. *Aphasiology*, 33(4), 466–497. doi: 10.1080/02687038.2018.1506089

2 citations, pages 39, 40

ANNEXE **A**

Les différents types d'aphasie

Tableau A.1 – Tableau représentant les différents types d'aphasie, les troubles ainsi que la localisation de la lésion associée.

Type d'aphasie	Langage spontané	Lecture et Ecriture	Compréhension	Répétition et dénomination	Troubles associés	Localisation de la lésion
Aphasie de Broca (10-14% des aphasies)	Expression peu fluente, agrammatisme, manque du mot, production lente et laborieuse, défaut à l'initiation, stéréotypies.	Ecriture limitée (peu de production écrite), paragraphies, dysorthographies. Lecture altérée (la difficulté augmente avec la complexité).	Compréhension relativement préservée (les difficultés apparaissent avec la complexité).	Répétition altérée mais meilleure que l'expression spontanée. Dénomination perturbée (peut être améliorée avec l'ébauche orale).	Hémiplégie ou hémiparésie brachio-faciale sensitivomotrice droite, apraxie idéomotrice de la main gauche ou apraxie bucco-faciale.	Régions frontales (cortex frontal inférieur, substance blanche sous-corticale du lobe frontal) et temporales antérieures, noyaux gris centraux et possible étendue au cortex postcentral.
Aphasie de Wernicke (14 à 29% des aphasies)	Expression fluente (articulation, syntaxe et prosodie normales), nombreuses paraphasies, paraphasies verbales, sémantiques et phonémiques et néologismes.	Lecture et écriture perturbées. Paragraphies verbales et littérales et néologismes en écriture. Alexie en lecture.	Compréhension fortement altérée.	Répétition altérée (paraphasies). Manque du mot important en dénomination (non amélioré par l'ébauche orale).	Hémiparésie, troubles de la sensibilité ou hémianopsie.	Aire de Wernicke (GTS postérieur), et possiblement cortex pariétal inférieur (GA, GSM), GTM et GTI, atteinte thalamique possible (atteinte de la subdivision inférieure de l'artère cérébrale moyenne).
Aphasie globale (25-40% des aphasies)	Mutisme initialement puis expression spontanée très réduite (monosyllabes, stéréotypies).	Lecture et écriture altérées.	Compréhension verbale altérée.	Répétition et dénomination altérées.	Hémiplégie, hémianesthésie et hémianopsie latérale homonyme.	Atteinte de la région fronto-temporo-pariétale gauche à l'aire de Wernicke en passant par le GA et la substance blanche (atteinte de l'artère carotide interne ou de l'artère cérébrale moyenne proximale : subdivision inférieure et supérieure).

Tableau A.1 – Tableau représentant les différents types d'aphasie (suite).

Type d'aphasie	Langage spontané	Lecture et Ecriture	Compréhension	Répétition et dénomination	Troubles associés	Localisation de la lésion
Aphasie anomique (3-25% des aphasies)	Langage spontané fluent (prosodie et articulation normales), paraphasies sémantiques et manque du mot compensé par l'utilisation de périphrases et de définition par l'usage.	Lecture et écriture préservées.	Compréhension préservée.	Répétition préservée. Dénomination très affectée (manque du mot).		Cortex temporal inférieur gauche avec atteinte possible du thalamus et du lobe pariétal gauche avec une atteinte de la région hippocampique.
Aphasie de conduction (9-15% des aphasies, avec les aphasies transcorticales)	Langage spontané fluent, nombreuses paraphasies, longueur de phrases réduite, hésitations dans le discours.	Paraphasies phonémiques en lecture. Ecriture perturbée (paragraphies littérales, dysorthographe, atteinte phonologique), graphisme correct, troubles dans l'écriture des non-mots.	Compréhension préservée.	Répétition et dénomination perturbées (paraphasies phonémiques voire sémantiques).	Hémi-hypoesthésie, asymbolie à la douleur, hémianopsie ou quadranopsie supérieure ou inférieure, apraxie idéomotrice sur commande verbale et plus rarement hémiplégie.	Connexion entre le cortex frontal et temporal (entre les aires de Broca et Wernicke) avec une atteinte des faisceaux de substance blanche (FA et FLS) et du GSM, atteinte profonde également possible (capsule interne).
Aphasie transcorticale motrice	Langage spontané réduit, diminution de la fluence verbale, simplification de la syntaxe, agrammatisme.	Lecture préservée. Ecriture spontanée réduite, graphisme maladroit, omissions de lettres ou mots et agrammatisme.	Compréhension préservée.	Répétition préservée. Manque du mot en dénomination (difficulté d'initiation et persévérations).	Hémiplégie crurale inconstante.	Lobe frontal gauche (aires préfrontales, AMS et régions prémotrices, substance blanche sous-cortico-frontale et noyaux gris centraux).

Tableau A.1 – Tableau représentant les différents types d'aphasie (suite).

Type d'aphasie	Langage spontané	Lecture et Ecriture	Compréhension	Répétition et dénomination	Troubles associés	Localisation de la lésion
Aphasie trans-corticale sensorielle	Langage spontané fluent (sans troubles d'articulation), nombreuses paraphasies sémantiques ou phonologiques et écholalies.	Lecture et écriture altérées avec des paraphasies en lecture et des paraphasies en écriture.	Compréhension altérée.	Répétition préservée. Paraphasies et manque du mot en dénomination (compensé par des périphrases).	Déficit sensitif, hémianopsie ou quadranopsie supérieure ou inférieure.	Région temporo-pariétalo-occipitale (jonction temporo-occipitale et thalamus).
Aphasie transcorticale mixte	Langage spontané réduit, écholalique, articulation normale.	Lecture impossible ou mauvaise. Trouble d'écriture (agraphie).	Compréhension altérée.	Répétition préservée (se limite à quelques mots). Dénomination très altérée.	Hémiplégie, troubles sensitifs et hémianopsie.	Isolation fonctionnelle des aires du langage, apparition de plusieurs lésions au niveau des cortex associatifs antérieur et postérieur mais épargnant la région péri-sylvienne.
Aphasie croisée	Expression spontanée réduite, agrammatisme, paraphasies phonémiques.	Expression écrite moins atteinte que l'expression orale (moins réduite, moins d'agrammatisme) mais présence de jargon.	Compréhension préservée.		Apraxie visuospatiale, négligence gauche et dyscalculie.	Lésion située au niveau de l'HD.

Étude de cas : patientes P1 et P2

Les items du bilan acoustique (répétition de syllabes) réalisé par les patientes P1 et P2 sont présentés dans le Tableau B.1.

Tableau B.1 – Items contenus dans l'épreuve de répétition de monosyllabes ou bi-syllabes sémantisés (bilan acoustique). Les phonèmes travaillés étaient les voyelles, les consonnes et semi-consonnes du français. Les consonnes et semi-consonnes étaient accompagnées du phonème /a/ et elles étaient placées en position initiale ([Ca] ou [CaCa]) et médiane ([aCa]). La notation orthographique et le phonème cible associé (Alphabet Phonétique International, API) sont présentés.

Voyelles		Consonnes			
Items (orthographe)	API	Items (orthographe)			API
		[Ca]	[aCa]	[CaCa]	
hi	/i/	pas	apa	papa	/p/
hé	/e/	bas	aba	baba	/b/
haïe	/ɛ/	tas	ata	tata	/t/
ha	/a/	da	ada	dada	/d/
hue	/y/	cas	aka	kaka	/k/
eux	/ø/	gars	aga	gaga	/g/
œuf	/œ/	fa	afa	fafa	/f/
où	/u/	va	ava	vava	/v/
oh	/o/	sa	assa	sasa	/s/
or	/ɔ/	za	aza	zaza	/z/
an	/ɑ̃/	chat	acha	chacha	/ʃ/
on	/ɔ̃/	ja	aja	jaja	/ʒ/
hein	/ɛ̃/	la	ala	lala	/l/
		ma	ama	mama	/m/
		na	ana	nana	/n/
		rat	ara	rara	/ʁ/
		gna	agna	gnagna	/ɲ/
		ya	aya	yaya	/j/



Étude de cas : patient P3

1 Critères d'inclusion

Avant de participer à l'étude, un bilan orthophonique et une évaluation neuropsychologique ont été réalisés permettant de valider plusieurs critères d'inclusion. Les résultats de l'évaluation neuropsychologique montrent que le patient semble familier avec les outils numériques (Tableau C.1) et qu'il ne présente aucun trouble des praxies gestuelles et de négligence spatiale unilatérale (voir Tableau C.2).

Les résultats du bilan orthophonique montrent que le patient présente des troubles légers des praxies bucco-faciales (voir Tableau C.3). La compréhension orale lexicale et syntaxique est globalement préservée, cependant certaines erreurs apparaissent pour les mots appartenant aux mêmes catégories sémantiques (*i.e.*, identification des parties du corps). La compréhension écrite de mots et de phrases est préservée, sauf pour les textes écrits longs et complexes. Toutefois, ces difficultés n'entravent pas l'utilisation de la méthode de rééducation.

Tableau C.1 – Évaluation de la familiarité du patient P3 avec les outils numériques. Les cases grisées correspondent à la réponse du patient.

Utilisation des outils informatiques	Jamais	De temps en temps	Souvent	La plupart du temps	
Fréquence d'utilisation	Plusieurs fois par heure	Plusieurs fois par jour	Plusieurs fois par semaine	Plusieurs fois par mois	
Types d'activités	Internet, recherches	Internet, mails	Jeux en ligne	Réseaux sociaux	Logiciels (word, excel...)

Tableau C.2 – Scores aux épreuves du bilan neuropsychologique permettant de valider les critères d'inclusion dans le protocole pour le patient P3 : absence d'apraxie des membres supérieurs (pour le membre supérieur sain) et de négligence spatiale unilatérale.

Apraxie des membres supérieurs (AST)	Imitation	7/7
	Pantomimes	5/5
Négligence spatiale unilatérale (BEN)	Test des cloches	Omissions à gauche : 0/15
		Omissions à droite : 0/15
		Omissions au centre : 0/5
		Omissions totales : 0/35
		Score gauche - droite : 0
		Colonne (1 ^{ère}) : 1
		Temps : 112s
	Bissection de lignes (20cm)	Déviations ligne 1 : -2 mm
		Déviations ligne 2 : 3 mm
		Déviations moyennes : 0.5 mm

AST, *Apraxia Screen of Tulia*; BEN, Batterie d'Évaluation de la Négligence unilatérale.

Tableau C.3 – Scores aux épreuves du bilan orthophonique permettant d'évaluer les compétences de langage et de valider les critères d'inclusion dans le protocole pour le patient P3. Les critères d'inclusion comprennent : l'absence de troubles de la compréhension et d'apraxie bucco-faciale. Les performances en expression orale et écrite et en répétition et lecture de mots sont également évaluées.

Compréhension orale (BDAE)	Discrimination verbale	71/72
	Désignation des parties du corps	18/20
	Exécution d'ordres	15/15
	Logique et raisonnement	12/12
Compréhension écrite (BDAE)	Discrimination littérale et verbale	10/10
	Reconnaissance verbale	8/8
	Correspondance mot/image	10/10
	Compréhension de phrases et de textes	6/10
Expression orale (BDAE)	Séries automatiques	0/9
	Récitation	1/2
	Chant	0/2
	Dénomination par le contexte	1/10
Expression écrite (main gauche, BDAE)	Graphisme	3/3
	Écriture automatique	42/46
	Dictée élémentaire	15/15
	Dictée de mots	6/10
	Dictée de phrases	4/12
Transcodage (BDAE)	Dénomination par écrit	10/10
	Répétition de mots	2/10
	Lecture à voix haute de mots	Impossible
Praxies bucco-faciale (MT86)	Sur imitation	5/6

BDAE, *Boston Diagnostic Aphasia Examination*; MT86; Protocole Montréal-Toulouse d'examen linguistique de l'aphasie.

2 Rééducation

Le patient P3 a suivi 11 séances de rééducation à l'aide du logiciel *Ultraspeech-player*. Durant chaque séance le patient réalisait plusieurs exercices permettant de travailler de nouveaux phonèmes mais également les phonèmes travaillés lors de la séance précédente, en condition isolée (voyelle ou consonne seule) ou combinée (voyelle-consonne-voyelle). Le détail des séances de rééducation est présenté dans le Tableau C.4 et une illustration de l'interface du logiciel pour l'exercice 1 est présentée dans la Figure C.1.



FIGURE C.1 – Illustration de l'interface du logiciel *Ultraspeech-player* (Hueber, 2013) pour l'exercice 1 réalisé durant la première séance de rééducation. En rouge : le contour sagittal du conduit vocal, avec les lèvres à droite. Le tracé blanc à l'intérieur du conduit vocal représente le contour externe de la langue. La séquence vidéo est arrêtée sur le point de contact entre le dos de la langue et l'arrière du palais, lors de la production de la consonne /k/.

Tableau C.4 – Détail du contenu des séances de rééducation du patient P3. Les consonnes ou voyelles étaient produites de façon isolées ou combinées (Voyelle-Consonne-Voyelle). Le nombre de répétitions de chaque exercice est indiqué dans le tableau.

Séances	Exercice	Contenu	Nombre de répétitions
Séance 1	Exercice 1a	/p, t, k/ isolées	3 fois
	Exercice 1b	/p, t, k/ combinées avec /a, i, u, e, o, y, ø/	1 fois
Séance 2	Exercice 1a	/p, t, k/ isolées	2 fois
	Exercice 1b	/t/ combinée avec /a, i, u/	1 fois
	Exercice 2a	/b, d, g/ isolées	3 fois
Séance 3	Exercice 2b	/b, d, g/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/	1 fois
	Exercice 2a	/b, d, g/ isolées	2 fois
	Exercice 2c	/d, g/ combinées avec /i, y, u/	1 fois
	Exercice 3a	/m, n, l/ isolées	3 fois
Séance 4	Exercice 3b	/m, n, l/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/	1 fois
	Exercice 3a	/m, n, l/ isolées	2 fois
	Exercice 3c	/n/ combinée avec /a, i, u, e, o, y/	2 fois
Séance 5	Exercice 4	/i, a, u, y/ isolées	3 fois
	Exercice 4a	/i, a, u, y/ isolées	2 fois
	Exercice 4b	/n/ combinée avec /i, a, u, y/	2 fois
	Exercice 5a	/s, ʃ, f/ isolées	3 fois
Séance 6	Exercice 5b	/s, ʃ, f/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/	2 fois
	Exercice 5a	/s, ʃ, f/ isolées	2 fois
	Exercice 5c	/s, ʃ, f/ combinées avec /i, u, y/	2 fois
	Exercice 6a	/e, o, ɔ/ isolées	3 fois
Séance 7	Exercice 6b	/s, ʃ, f/ combinées avec /e, o, ɔ/	1 fois
	Exercice 6a	/e, o, ɔ/ isolées	2 fois
	Exercice 6c	/s, ʃ, f/ combinées avec /o, ɔ/	2 fois
	Exercice 7a	/v, z, ʒ/ isolées	3 fois
Séance 8	Exercice 7b	/v, z, ʒ/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/	1 fois
	Exercice 7a	/v, z, ʒ/ isolées	2 fois
	Exercice 7c	/ʒ/ combinée avec /a, i, u, e, o, y/	2 fois
	Exercice 8a	/ɛ, ø, œ/ isolées	3 fois
Séance 9	Exercice 8b	/v, z, ʒ/ combinées avec /ɛ, ø, œ/	1 fois
	Exercice 8a	/ɛ, ø, œ/ isolées	2 fois
	Exercice 9a	/ʁ, w, j/ isolées	3 fois
	Exercice 9b	/ʁ, w, j/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/	2 fois
Séance 10	Exercice 9a	/ʁ, w, j/ isolées	2 fois
	Exercice 9b	/ʁ, w, j/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/	1 fois
	Exercice 10a	/ã, õ, ê/ isolées	3 fois
	Exercice 10b	/ã, õ, ê/ combinées avec /ʁ, p, t/	2 fois
Séance 11	Exercice 10a	/ã, õ, ê/ isolées	2 fois
	Exercice 10c	/ã, õ, ê/ combinées avec /p, t/	1 fois
	Exercice 11a	/ʁ, b, d, g, m, n, l/ isolées	2 fois
	Exercice 11b	/u, ε, ø, œ/ isolées	2 fois
	Exercice 11c	/ʁ/ combinée avec /a, i, u, e, o, y/	1 fois

3 Évaluation du langage et de la parole

Avant et après la rééducation, nous avons effectué une évaluation du langage et de la parole (bilans langagier et acoustique). Le détail et le contenu des épreuves sont présentés dans le Tableau C.5.

Tableau C.5 – Contenu des tâches de l'évaluation du langage et de la parole du patient P3. Le contenu des tâches de répétition de syllabes et de mots, de lecture et de discrimination phonémique est présenté. Les notations orthographique ou phonétique sont utilisées.

Tâches	Répétitions	Items
Répétition de syllabes	Voyelles	3 fois <i>/a, œ, ø, e, ε, o, ɔ, y, u, i, ã, õ, ê/</i>
	Semi-consonnes [CV]	3 fois <i>/ja, wa, ʁi/</i>
	Consonnes [CV]	3 fois <i>/pa, ta, ka, ba, da, ga, fa, sa, ʃa, va, za, ʒa, ma, na, ɲa, la, ʁa/</i>
	Consonnes [VCV]	3 fois <i>/apa, ata, aka, aba, ada, aga, afa, asa, aʃa, ava, aza, aʒa, ama, ana, ala, aɲa, aʁa/</i>
Répétition de mots	1 fois	râteau, élu, cheminée, combine, gagnant, douceur, faute, singe, neveu, aise, appât, gnon, paix, moral, gère, tendon, azur, Yves, veuf, échasse, ligne, nous, occupe, zona, bague, onde, huche, égal, outil, léger, Europe, envie, aube, rein, sac, infâme
Lecture	3 fois	pa, ta, ka, ba, da, ga, fa, sa, cha, va, za, ja, ma, na, gna, la, ra
Discrimination phonémique	1 fois	pa/ba, si/ti, ma/ma, da/ta, za/za, ga/ca, fa/fa, ni/mi, da/da, vi/fi, ba/ba, ki/ki, sa/za, ʃi/ʒi



ANNEXE D

Étude préliminaire : patient P4

1 Protocole SEMO

Le déroulement en détail du protocole SEMO est présenté dans la Figure D.1.

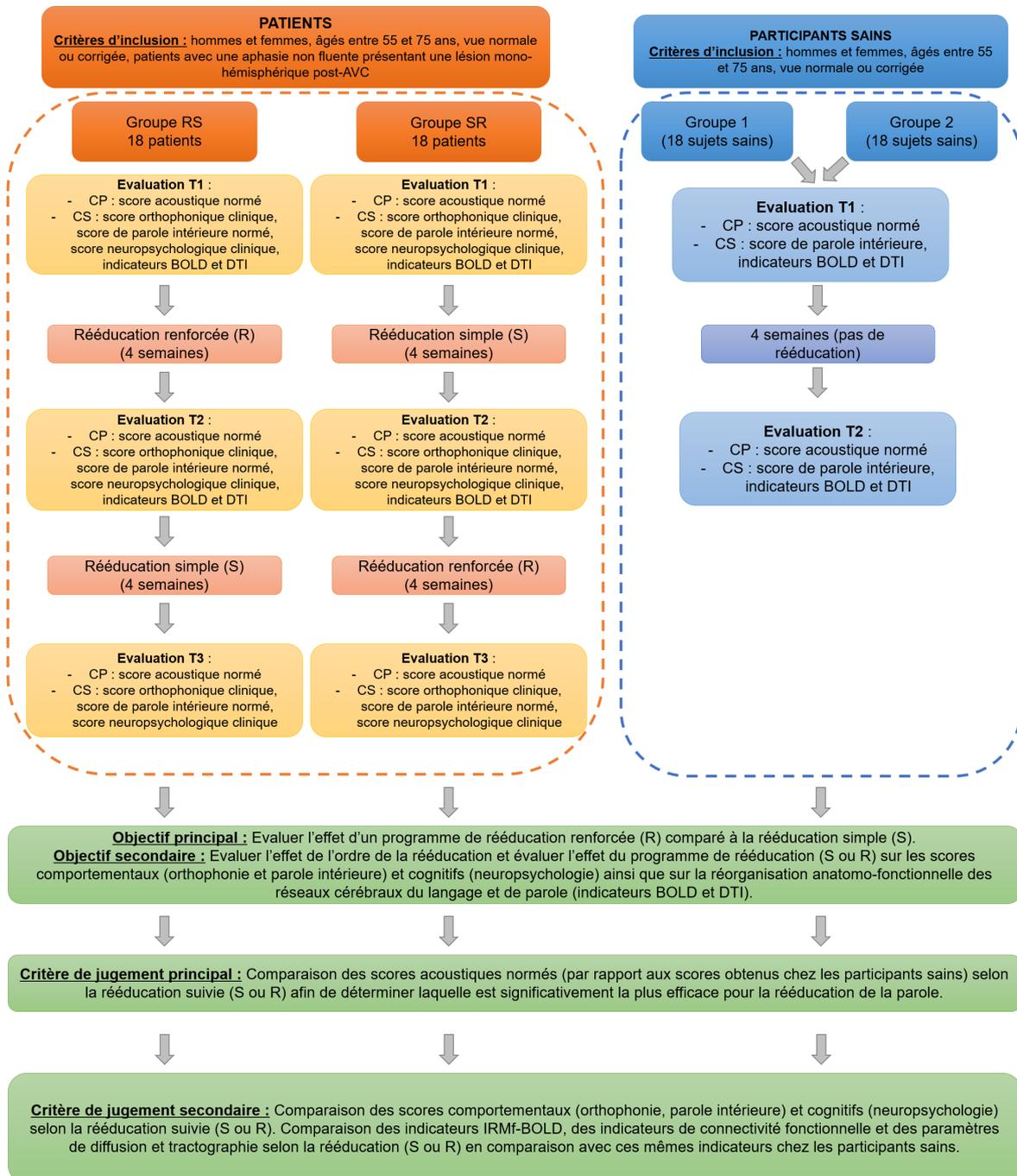


FIGURE D.1 – Déroulement détaillé du protocole SEMO. CS, critère secondaire et CP, critère principal.

2 Critères d'inclusion

Avant son inclusion dans l'étude, nous avons vérifié les critères d'inclusion suivants : pas de troubles de la compréhension, pas d'apraxie des membres supérieurs (au moins un membre sans apraxie) et pas de négligence spatiale unilatérale. Les scores des épreuves réalisées afin de valider ces critères sont présentés dans le Tableau D.1. Les scores n'indiquent aucun trouble de la compréhension (la compréhension est difficile pour les items syntaxiquement complexes), aucun trouble sévère des praxies du membre supérieur gauche (*cut-off* à 5) et aucun trouble de négligence spatiale (*cut-off* à 3).

Tableau D.1 – Scores aux épreuves permettant de valider les critères d'inclusion dans le protocole SEMO pour le patient P4 : absence de troubles de la compréhension, d'apraxie des membres supérieurs (au moins un membre sans apraxie) et de négligence spatiale unilatérale.

Compréhension orale (dialogique)		7/10
	Bras droit	impossible
Apraxie des membres supérieurs (AST)	Bras gauche	Imitations : 5/7 Pantomimes : 3/5 Total : 8/12
	Test des étoiles	Temps : 1 min 45 Omissions gauches : 4 Omissions droites : 1 Omissions (gauches – droites) : 3

AST, *Apraxia Screen of Tulia*; BIT, *Behavioral Inattention Test*.

Une évaluation de la familiarité du patient avec les outils numériques a également été réalisée à l'aide d'un test élaboré par les neuropsychologues du CHU Grenoble-Alpes. Les résultats sont présentés dans le Tableau D.2.

Tableau D.2 – Évaluation de la familiarité du patient P4 avec les outils numériques. Les cases grisées correspondent à la réponse du patient.

Utilisation des outils informatiques	Jamais	De temps en temps	Souvent	La plupart du temps	
Fréquence d'utilisation	Plusieurs fois par heure	Plusieurs fois par jour	Plusieurs fois par semaine	Plusieurs fois par mois	
Types d'activités	Internet, recherches	Internet, mails	Jeux en ligne	Réseaux sociaux	Logiciels (word, excel...)

3 Rééducation

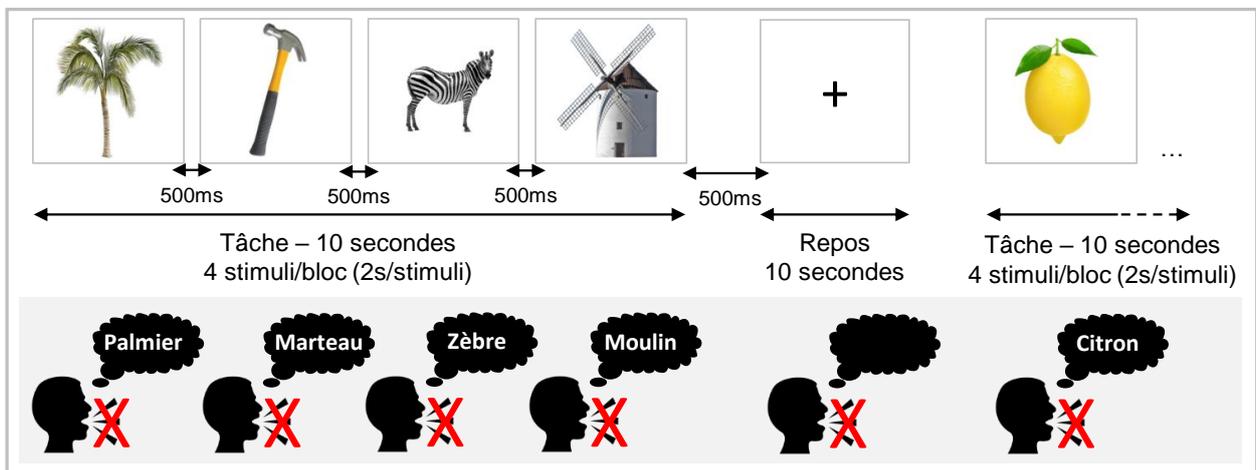
Le patient P4 a suivi 12 séances de rééducation à l'aide du logiciel *Ultraspeech-player*. Durant chaque séance, il réalisait plusieurs exercices permettant de travailler de nouveaux phonèmes et des phonèmes travaillés lors de la séance précédente, en condition isolée (voyelle ou consonne seule) ou combinée (voyelle-consonne-voyelle). Le détail des séances est présenté dans le Tableau D.3.

Tableau D.3 – Détail du contenu des séances de rééducation du patient P4. Les consonnes ou voyelles sont présentées de façon isolées ou combinées (VCV, voyelle-consonne-voyelle).

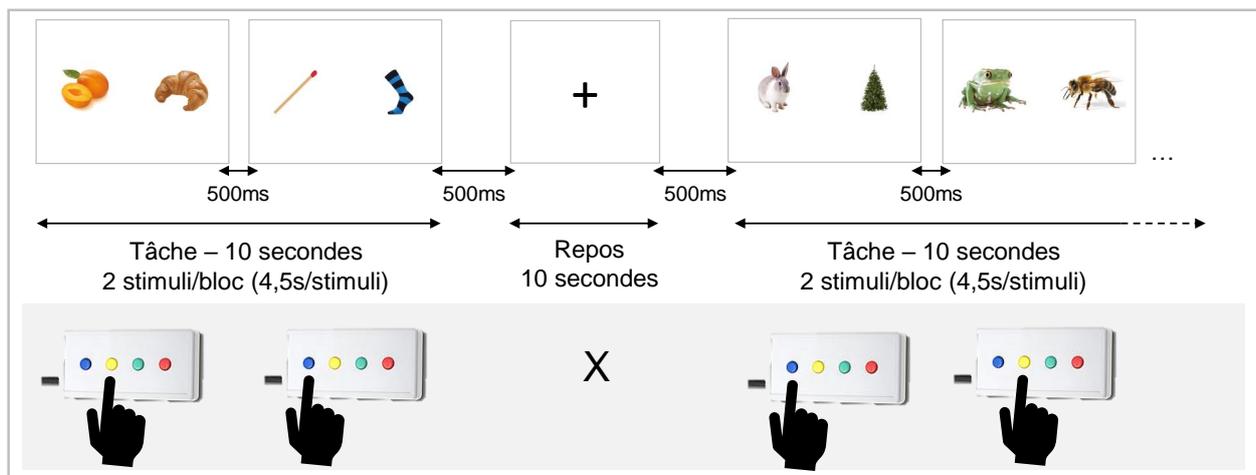
Séances	Exercices	Contenu
Séance 1	Exercice 1	/p, t, k/ isolées
	Exercice 2	/p, t, k/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
Séance 2	Exercice 3	/p, t, k/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
	Exercice 4	/b, d, g/ isolées
	Exercice 5	/b, d, g/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
Séance 3	Exercice 6	/b, d, g/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
	Exercice 7	/m, n, l/ isolées
	Exercice 8	m, n, l/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
Séance 4	Exercice 9	/m, n, l/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
	Exercice 10	/i, a, u, y/ isolées
	Exercice 11	/i, a, u, y/ combinées avec /p, t, k/
Séance 5	Exercice 12	/i, a, u, y/ combinées avec /p, t, k/
	Exercice 13	/f, s, ʃ/ isolées
	Exercice 14	/f, s, ʃ/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
Séance 6	Exercice 15	/f, s, ʃ/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
	Exercice 16	/e, o, ɔ/ isolées
	Exercice 17	/e, o, ɔ/ combinées avec /p, t, k/
Séance 7	Exercice 18	/e, o, ɔ/ combinées avec /p, t, k/
	Exercice 19	/v, z, ʒ/ isolées
	Exercice 20	/v, z, ʒ/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
Séance 8	Exercice 21	/v, z, ʒ/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
	Exercice 22	/ɛ, ø, œ/ isolées
	Exercice 23	/ɛ, ø, œ/ combinées avec /p, t, k/
Séance 9	Exercice 24	/ɛ, ø, œ/ combinées avec /p, t, k/
	Exercice 25	/β, w, j/ isolées
	Exercice 26	/β, w, j/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
Séance 10	Exercice 27	/β, w, j/ combinées avec /a, i, u, e, o, y/
	Exercice 28	/ã, õ, õ̃/ isolées
	Exercice 29	/ã, õ, õ̃/ combinées avec /p, t, k/
Séance 11	Exercice 30	/ã, õ, õ̃/ combinées avec /p, t, k/
	Exercice 31	/a, i, u, e, ε, o, ø, œ, ê, ã, õ̃/ isolées
Séance 11	Exercice 32	/p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, l, β, w, j/ isolées
	Exercice 33	/p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, l, β, w, j/ combinées avec /a/

4 IRMf de tâche

Le déroulement des tâches en IRMf est présenté dans la Figure D.2 pour les tâches de dénomination et détection de rimes et dans la Figure D.3 pour la tâche de répétition de syllabes. La tâche de répétition de syllabes a été acquise en *sparse sampling*, c'est-à-dire qu'un délai est ajouté après chaque volume d'acquisition, durant lequel les gradients sont « désactivés » et donc ne génèrent aucun bruit. Durant ce délai (4 secondes), les participants entendent la syllabe et doivent la répéter à haute voix. Une croix rouge apparaît avant que l'acquisition ne démarre, signalant au participant qu'il ne doit plus parler. Pour les patients, s'ils réalisent plusieurs tentatives, ceci leur indiquait qu'ils devaient arrêter de répéter.



(a) Dénomination d'images



(b) Détection de rimes en modalité visuelle

FIGURE D.2 – Déroulement des tâches de dénomination et détection de rimes en IRMf.

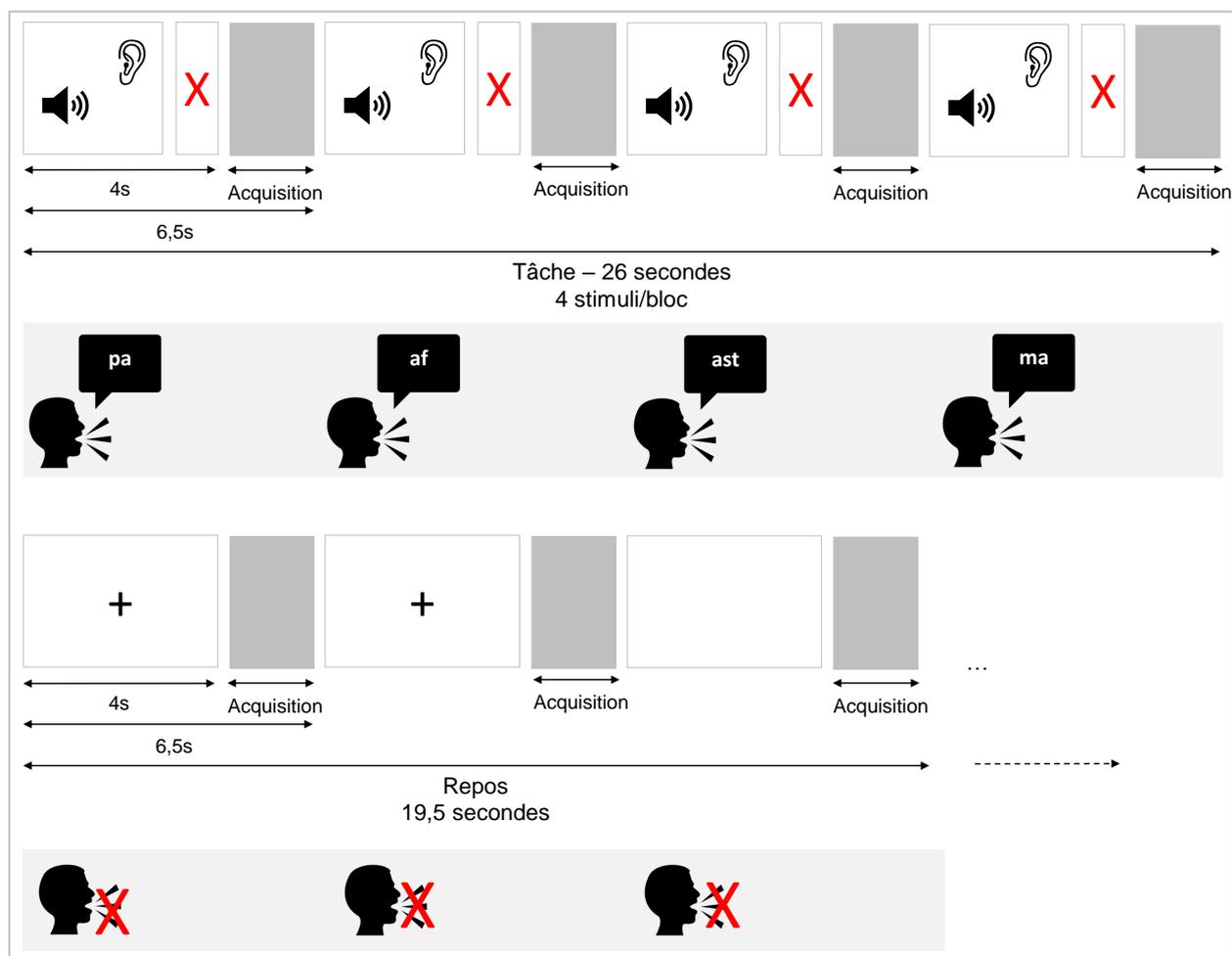


FIGURE D.3 – Déroulement de la tâche de répétition de syllabes.

5 Calcul des performances

Pour les différentes tâches, nous avons calculé un indice d'évolution afin de traduire les améliorations du patient entre les différentes évaluations. Ainsi, nous avons trois indices d'évolution (IE) : entre T1 et T2 (IE_{T2-T1}), entre T2 et T3 (IE_{T3-T2}), et entre T1 et T3 (IE_{T3-T1}). L'IE est calculé à partir d'un score obtenu pour chaque item de chaque tâche. Ce score par item est calculé différemment en fonction des tâches. Prenons l'exemple des évaluations T1 et T2.

Pour la discrimination de phonèmes et les praxies, le score par item était de : +1 lorsque la réponse pour un item donné était incorrecte à T1 et correcte à T2; -1 lorsque la réponse était correcte à T1 et incorrecte à T2; et 0 lorsque la réponse était correcte à T1 et T2 ou incorrecte à T1 et T2.

Pour la dénomination, le score par item était de : +1 lorsque le score pour un item donné à T1 était inférieur à celui à T2; -1 lorsque le score pour un item donné à T1 était supérieur à celui à T2; et 0 lorsque le score pour un item donné était équivalent à T1 et T2.

Pour la répétition de syllabes, dans le calcul de l'IE, nous avons pris en compte uniquement le phonème cible (*i.e.*, la consonne pour [CV] et [VCV] et la voyelle pour les voyelles isolées). Le score par item était de : +1 lorsque le phonème était incorrect à T1 et correct à T2; -1 lorsque le phonème était correct à T1 et incorrect à T2; et 0 lorsque le phonème était correct à T1 et T2 ou incorrect à T1 et T2.

Enfin, pour la répétition de mots, nous avons calculé le score par item sur la base du PPC sans épenthèses¹ (nous l'appelons ici « PPC-SansEp ») Le score par item était de : +1 lorsque le PPC-SansEp pour un item donné à T1 était inférieur à celui à T2; -1 lorsque le PPC-SansEp pour un item donné à T1 était supérieur à celui à T2; et 0 lorsque le PPC-SansEp pour un item donné était équivalent à T1 et T2.

En faisant la somme de ces scores pour chaque item, nous obtenons un IE entre les évaluations T1 et T2 (IE_{T2-T1}) pour chacune des tâches. Le calcul est similaire entre les évaluations T2 et T3 (IE_{T3-T2}) et entre T1 et T3 (IE_{T3-T1}).

6 Analyses acoustiques : statistiques

Afin de regrouper les données des deux sessions, nous avons montré qu'il n'existe pas de différence significative entre T1 et T2 pour les différents paramètres acoustiques mesurés chez les participants sains, à l'aide d'un test de Wilcoxon-Mann-Whitney avec le logiciel *R* (RStudio Team, 2020).

Pour les valeurs de F1 ou F2, nous avons montré qu'il n'existe pas de différence pour chaque voyelle :

- /a/ : pour F1 ($W = 105, p = 1$) et pour F2 ($W = 110, p = 0,85$)
- /e/ : pour F1 ($W = 122, p = 0,71$) et pour F2 ($W = 143, p = 0,21$)
- /ɛ/ : pour F1 ($W = 124, p = 0,65$) et pour F2 ($W = 118, p = 0,84$)
- /ø/ : pour F1 ($W = 123, p = 0,68$) et pour F2 ($W = 115, p = 0,93$)
- /œ/ : pour F1 ($W = 125, p = 0,40$) et pour F2 ($W = 112, p = 0,78$)

1. Ce PPC sans épenthèses permet de déterminer un score uniquement sur les phonèmes ciblés dans chaque mot. Nous utilisons ce score dans le calcul de l'IE afin de traduire une évolution sur les phonèmes ciblés dans chaque mot.

- /o/ : pour F1 ($W = 140, p = 0,27$) et pour F2 ($W = 85, p = 0,27$)
- /ɔ/ : pour F1 ($W = 123, p = 0,45$) et pour F2 ($W = 128, p = 0,33$)
- /y/ : pour F1 ($W = 102, p = 0,68$) et pour F2 ($W = 131, p = 0,46$)
- /u/ : pour F1 ($W = 120, p = 0,77$) et pour F2 ($W = 106, p = 0,81$)
- /i/ : pour F1 ($W = 94, p = 0,46$) et pour F2 ($W = 137, p = 0,32$)

Pour le VOT, nous avons montré qu'il n'existe pas de différence entre les deux évaluations T1 et T2 : pour les voisées ($W = 986, p = 0,88$) et pour les non voisées ($W = 971, p = 0,62$).

Enfin, pour les moments spectraux (CG et ET), nous avons montré qu'il n'existait pas de différence significative, entre T1 et T2. Premièrement, pour le CG spectral, il n'y a pas de différence pour la fricative alvéolaire ($W = 120, p = 0,77$), la post-alvéolaire ($W = 127, p = 0,57$) et la labiodentale ($W = 100, p = 0,85$). De même, pour l'ET spectral, il n'y a pas de différence pour l'alvéolaire ($W = 108, p = 0,87$), la post-alvéolaire ($W = 124, p = 0,65$) et la labiodentale ($W = 118, p = 0,59$).

7 Résultats : IRMf d'activation

Le Tableau D.4 présente les activations lors des trois tâches réalisées à T1 et T2 pour les participants sains. Les résultats pour ces mêmes tâches réalisées par le patient sont présentés dans le Tableau D.5.

Tableau D.4 – Activations cérébrales obtenues pour les participants sains lors des tâches de dénomination (DENO), détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), à T1 et T2.

	T1						T2					
	Régions (AAL)	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t	Régions (AAL)	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t
DENO	Occipital Mid L	5 431	-33	-88	11	21,41	Occipital Sup R	6 409	24	-88	14	17,95
	Frontal Inf Oper L	156	-51	11	14	9,64	Frontal Sup Medial L	294	-3	26	44	11,67
	Parietal Inf L	109	-36	-40	38	8,17	Vermis 8	107	6	-58	-31	7,52
	Hippocampus R	20	24	-4	-22	7,44	Insula R	24	30	29	-1	7,36
	Frontal Inf Orb 2 L	48	-33	26	-4	7,26	Amygdale R	11	33	-1	-16	6,00
	Supp Motor Area L	93	-6	8	56	7,21						
	Cerebellum 10 R	10	21	-37	-43	6,29						
	SupraMarginal R	10	42	-34	35	6,13						
	Insula R	12	33	26	-1	5,75						
	Thal LGN L	17	-24	-28	-1	4,84						
DR	Supp Motor Area L	483	-15	-4	62	11,86	Occipital Mid L	8 483	-21	-91	-1	17,36
	Insula R	237	42	17	-4	11,49	Insula R	256	36	23	-1	11,42
	Lingual R	7 500	9	-28	-7	10,85	Supp Motor Area L	650	3	20	53	9,32
	Precuneus R	204	15	-61	59	8,20	Insula L	590	-33	20	-7	7,96
	Precentral L	153	-48	-1	50	7,59	Precentral R	81	42	5	47	6,45
	Precentral R	70	42	2	47	7,18	SupraMarginal R	24	57	-16	23	6,12
	Cerebelum 9 R	15	6	-40	-43	6,97	Frontal Inf Tri R	35	45	29	26	6,09
	Insula R	11	36	-4	17	5,65	Hippocampus R	49	27	-28	-1	5,82
	SupraMarginal R	70	60	-25	47	5,42	Olfactory R	16	3	23	-1	5,08
	Postcentral R	18	57	-13	26	5,27	Pallidum R	28	18	-10	-4	4,68
	Thal PuM L	16	-3	-22	14	5,11						
	Frontal Inf Tri L	15	-33	29	20	4,90						
	RS	Temporal Sup R	795	57	-7	-4	17,45	Frontal Inf Oper L	5541	-48	11	17
Occipital Mid R		436	33	-85	5	15,38	Cingulate Mid R	739	6	14	32	11,02
Frontal Inf Oper L		1 275	-51	11	17	12,49	Cerebelum R R	2 363	27	-61	-22	10,24
Supp Motor Area L		52	-3	2	65	9,18	Paracentral Lobule R	27	18	-31	56	5,73
Frontal Inf Oper R		33	60	20	20	8,52	Frontal Mid 2 L	23	-30	32	26	5,08
Occipital Mid L		322	-27	-88	2	8,02	Occipital Sup L	10	-21	-73	32	4,60
Calcarine L		100	-15	-67	5	7,14						
Pallidum L		38	-24	-4	-4	6,78						
Pallidum R		31	27	-7	-7	6,21						

Seuls les pics d'activation les plus significatifs au niveau de chaque groupe de voxels activés (k voxels) sont mentionnés. Le nom des régions (issues de l'atlas AAL; [Tzourio-Mazoyer et al., 2002](#)), les coordonnées MNI (x, y, z) et les valeurs de t ($p < 0,001$ non-corrigé, $k \geq 10$) sont fournis.

Tableau D.5 – Activations cérébrales obtenues pour le patient P4 lors des tâches de dénomination (DENO), détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), à T1 et T2.

	T1					T2						
	Régions (AAL)	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t	Régions (AAL)	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	t
DENO	Fusiform L	5 502	-30	-67	-13	17,95	Occipital Mid L	5 411	-27	-85	2	16,88
	Frontal Inf Tri R	519	54	35	23	9,51	Frontal Inf Tri R	498	57	35	23	10,06
	Frontal Inf Tri L	67	-36	11	26	6,64	Supp Motor Area R	153	12	17	53	7,68
	Fusiform L	56	-27	-10	-40	6,02	Frontal Inf Tri L	51	-36	14	23	5,72
	Cerebelum 7b L	26	-6	-73	-40	5,7	Postcentral R	31	54	-25	56	5,48
	Supp Motor Area R	31	9	14	56	5,49	Frontal Sup Medial L	14	-9	65	23	4,97
	Frontal Sup 2 L	13	-15	68	14	5,11	Vermis 9	44	3	-55	-37	4,59
	Frontal Sup Medial L	14	-9	62	26	5,1	Postcentral L	11	-60	-13	41	3,67
	Cerebelum 7b R	13	15	-76	-46	4,76	Parietal Sup L	17	-24	-73	44	3,60
	Postcentral R	21	51	-25	56	4,56	Temporal Pole Mid L	10	-51	8	-31	3,50
	Thal LGN R	18	24	-25	-1	4,35						
	Hippocampus R	24	33	-7	-16	4,24						
	Temporal Sup R	18	51	-40	11	4,23						
	Frontal Mid 2 L	23	-39	53	11	4,18						
	Amygdala L	30	-21	-4	-16	4,1						
	Frontal Inf Tri L	16	-48	23	8	4						
	OFCpost L	10	-21	11	-25	3,6						
DR	Occipital Inf R	12 556	36	-85	-13	17,76	Occipital Mid L	12 560	-36	-82	2	18,27
	Frontal Sup Medial L	21	-6	68	2	6,51	Frontal Inf Tri L	159	-36	14	26	6,92
	Frontal Inf Tri L	57	-51	26	14	5,57	Cerebelum 10 L	14	-24	-37	-40	5,08
	Postcentral R	24	66	-10	32	4,86	Frontal Mid 2 L	29	-42	47	20	5,02
	Fusiform L	43	-27	-7	-34	4,76	Frontal Med Orb R	15	9	71	-4	4,92
	Fusiform R	29	30	-10	-34	4,64	Temporal Pole Sup L	103	-27	23	-31	4,88
	Frontal Mid 2 L	108	-33	53	-4	4,52	Postcentral L	66	-63	-10	23	4,42
	Temporal Sup R	15	51	-22	-7	4,37	Frontal Sup 2 R	14	18	47	44	4,17
	Frontal Sup Medial R	17	6	35	56	4,17	Caudate L	45	-12	8	8	4,06
	ACC sub R	17	9	29	2	4,14	Fusiform R	14	36	-10	-37	3,62
	Rolandic Oper L	46	-60	2	5	4,11						
	OFCmed L	42	-18	20	-22	3,89						
	Precentral L	16	-51	8	44	3,86						
	Temporal Pole Sup L	33	-45	17	-16	3,72						
Cerebelum Crus 1 R	10	24	-64	-34	3,64							
RS	Calcarine R	900	18	-100	-4	9,27	Occipital Mid R	495	27	-88	8	8,77
	Occipital Mid L	460	-24	-85	5	8,51	Occipital Inf L	205	-21	-91	-4	6,5
	Postcentral R	192	54	-4	32	5,91	Frontal Med Orb L	45	-12	41	-10	4,45
	Temporal Sup R	109	69	-16	2	5,41	Temporal Sup R	132	60	-19	2	4,39
	Temporal Mid L	92	-54	-25	-1	4,46	Precentral R	53	60	-1	38	4,22
	Temporal Inf L	13	-39	-46	-13	4,14	Fusiform R	29	39	-13	-37	3,99
	Temporal Sup L	19	-51	-4	-4	4,12	Precentral R	11	60	5	26	3,75
	Frontal Mid 2 L	10	-36	47	-4	3,64	Frontal Mid 2 R	11	36	38	17	3,65
	Calcarine R	30	24	-61	8	3,63						

Seuls les pics d'activation les plus significatifs au niveau de chaque groupe de voxels activés (k voxels) sont mentionnés.

Le nom des régions (issues de l'atlas AAL; Tzourio-Mazoyer et al., 2002), les coordonnées MNI (x, y, z) et les valeurs de t (pour $p < 0,001$ non-corrigé, $k \geq 10$) sont fournis.

ANNEXE E

Articles publiés ou en préparation

Ci-dessous les articles publiés ou en préparation. Les articles suivants sont présentés :

- Haldin et al. (2018) : pages 302-329
- Haldin et al. (2019) : pages 330-351
- Haldin et al. (2021) : pages 352-381
- Haldin et al. (2022) : pages 382-400
- Haldin et al. (in prep) : pages 401-425

Speech recovery and language plasticity can be facilitated by Sensori-Motor Fusion training in chronic non-fluent aphasia. A case report study

Célise Haldin¹, Audrey Acher², Louise Kauffmann⁶, Thomas Hueber⁴, Emilie Cousin^{1,3}, Pierre Badin⁴, Pascal Perrier⁴, Diandra Fabre⁴, Dominic Perennou^{1,5}, Olivier Detante^{1,2}, Assia Jaillard³, Hélène Loevenbruck¹ and Monica Baciú^{1,CA}

¹Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition, UMR CNRS 5105, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

²Unité neuro-vasculaire, Pavillon de Neurologie, CHU Grenoble Alpes, Grenoble, France

³IRMaGE, Plate-forme IRM 3T, CHU Grenoble Alpes, Université Grenoble Alpes, CNRS, INSERM, UMS3552, Grenoble, France

⁴GIPSA-lab, UMR CNRS 5216, Université Grenoble-Alpes, Grenoble, France

⁵Dept of NeuroRehabilitation, CHU Grenoble-Alpes, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

⁶Neural Mechanisms of Human Communication Research Group, Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences, Leipzig, Germany

^{CA}LPNC, UMR CNRS 5105, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, monica.baciu@univ-grenoble-alpes.fr

Abstract

The rehabilitation of speech disorders benefits from providing visual information which may improve speech motor plans in patients. We tested the proof of concept of a rehabilitation method (Sensori-Motor Fusion, SMF; Ultraspeech player) in one post-stroke patient presenting chronic non-fluent aphasia. SMF allows visualisation by the patient of target tongue and lips movements using high-speed ultrasound and video imaging. This can improve the patient's awareness of his/her own lingual and labial movements, which can, in turn, improve the representation of articulatory movements and increase the ability to coordinate and combine articulatory gestures. The auditory and oro-sensory feedback received by the patient as a result of his/her own pronunciation can be integrated with the target articulatory movements they watch. Thus, this method is founded on sensorimotor integration during speech. The SMF effect on this patient was assessed through qualitative comparison of language scores and quantitative analysis of acoustic parameters measured in a speech production task, before and after rehabilitation. We also investigated cerebral patterns of language reorganization for rhyme detection and syllable repetition, to evaluate the influence of SMF on phonological-phonetic processes. Our results showed that SMF had a beneficial effect on this patient who qualitatively improved in naming, reading, word repetition and rhyme judgment tasks. Quantitative measurements of acoustic parameters indicate that the patient's production of vowels and syllables also improved. Compared with pre-SMF, the fMRI data in the post-SMF session revealed the activation of cerebral regions related to articulatory, auditory and somatosensory processes, which were expected to be recruited by SMF. We discuss neurocognitive and linguistic mechanisms which may explain speech improvement after SMF, as well as the advantages of using this speech rehabilitation method.

Key-words: Sensori-motor fusion; therapy; non-fluent aphasia; speech disorder

Introduction

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

Aphasia occurs in about 38% of stroke cases (Cortese, Riganello, Arcuri, Pignataro, & Buglione, 2015) and results from the damage of specific cortico-subcortical regions in the left hemisphere predominant for language (Bookheimer, 2002; Démonet, Thierry, & Cardebat, 2005). Nonfluent (NF) or expressive (Broca's) aphasia impacts mainly the oral production of words and sentences (Ballard, Granier, & Robin, 2000) and is induced by lesions located within and around the left inferior frontal gyrus (Ardila, Bernal, & Rosselli, 2016). NFA is characterised by scarce production of speech, poor articulation, short sentences with only a few words and agrammatism (Benson & Ardila, 1996). Commonly used interventions for phonetic disorders in nonfluent aphasia rely on auditory skills. Patients compare their own productions with those of the speech therapist (ST) and try to correct for errors using auditory cues. Supplementing traditional audiovisual information (hearing the voice and seeing the face of a therapist), with visual information on speech articulators that are usually hidden and not visible (such as the internal movements of the tongue) has recently been introduced in speech therapy. It has been shown that the visual modality, which typically provides information on visible articulators such as the lips, jaw, face, tongue tip and teeth, plays a key role in speech perception, even in participants without speech or hearing impairments (see the McGurk effect, McGurk & Macdonald, 1976; see also the role of vision during speech perception in noise, Sumbly & Pollack, 1954). Although visible information on the lips, mouth and face are informative, they are phonetically limited. The internal tongue shapes and movements, which can only be partially seen, convey crucial phonetic information. Recent studies suggest that full vision of internal tongue movements can be natively used by human participants to facilitate speech perception (Badin, Tarabalka, Elisei, & Bailly, 2010). In addition to classical lip reading, tongue reading may therefore contribute to improved speech representations and it could be beneficial in speech therapy. A few recent studies on speech therapy in hearing impaired populations suggested that providing visual information on the movement of speech articulators indeed adds another modality which may supplement auditory information and may contribute to more adapted speech motor plans (Bacsfalvi, Bernhardt, & Gick, 2007; Bernhardt, Gick, Bacsfalvi, & Adler-Bock, 2005; Bernhardt, Gick, Bacsfalvi, & Ashdown, 2003). Multisensory training programs that combine visual, auditory and kinesthetic information, have also been suggested to improve reading abilities, typically in dyslexia children (see the Orton-Gillingham approach; Sparks, Ganschow, Kenneweg, & Miller, 1991; Vickery, Reynolds, & Cochran, 1987).

In this context, two remediation paradigms that include visual representation of the speech articulators can be used, namely visual biofeedback and visual illustration. Visual illustration is usually built from pre-recorded articulatory data. It displays sagittal views of the entire vocal tract, with the lips, teeth, jaw, palate, tongue, and even sometimes the velum, pharynx and larynx. These illustrations can either be computed from an articulatory model, itself controlled by articulatory data usually obtained with articulography, or be directly drawn from actual tongue ultrasound imaging. Tongue movement recordings are usually corrected for head movement, and are transformed to fit in a fixed display of the vocal tract that includes the palate, jaw, teeth and pharynx. Both methods provide typical lingual movements set in a realistic and interpretable vocal tract display. Visual biofeedback is another relevant paradigm. It provides online visual information about the patient's articulators, typically the patient's own tongue.

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

The easiest way to obtain online articulatory information about the tongue is by using ultrasound recording. Other methods, such as electromagnetic articulography (EMA), require sticking electromagnetic receptor coils to the tongue and wearing a heavy helmet, which is invasive and impractical in speech therapy (although see Katz, McNeil, & Garst, 2010). With ultrasound, patients can simply hold a probe under their own chin and directly visualise their own tongue shape. The ultrasound recording can be processed online and can even be displayed within a vocal tract drawing to facilitate the interpretation of the tongue movements. Using ultrasound feedback, even without a surrounding vocal tract display, Cleland, Scobbie, and Wrench (2015) showed improved pronunciation of targeted phonemes in children with speech sound disorders. The beneficial effect of visual feedback has also been shown in patients with NFA (Fridriksson et al., 2012), in children and adolescents suffering from developmental speech disorders (Bernhardt et al., 2005) or in adults with apraxia of speech (Preston & Leaman, 2014). Cleland et al. (2015) suggested that real-time visual feedback somehow boosted auditory and somatosensory feedback (patients could hear their sound productions and could feel their articulators in motion), leading to the acquisition of articulatory patterns which were not previously possible through traditional speech therapy. However, because it is displayed online, and because head movements are usually not controlled for in such contexts (unless a helmet is worn, like in the Cleland et al.'s (2015) study, which makes speech therapy demanding), it is difficult to adapt online tongue data to a fixed vocal tract display. Visual biofeedback is therefore sometimes difficult to interpret, because tongue movements may occur outside of the vocal tract drawing. This is particularly critical with patients with speech disorders, whose tongue movement may be erratic.

In this study, we have therefore opted for a visual illustration instead of a visual biofeedback paradigm. Chen et al. (2016) conducted a literature review of studies on computer-based speech therapy systems, many of them based on visual illustration. Their review suggests that such systems provide more engaging intervention than traditional explanation, and that the enriched information provided with the visual illustration paradigms is beneficial in various populations of patients with speech disorders, including hearing-impairments, phonological disorders, or aphasia. Among the several augmented-speech visual illustration paradigms that have been developed, Ultraspeech player (Hueber, 2013), Talking Head (Badin, Elisei, Bailly, & Tarabalka, 2008; Badin & Serrurier, 2006), Virtual Head (Fagel & Madany, 2008) or Diadolab (Menin-Sicard & Sicard, 2012) are promising. The Talking Head (TH) is both comprehensive, accurate and realistic (Badin et al., 2007, 2008). It allows the movements of many articulators (tongue, velum, lips, jaw, face) to be visualised, and these movements are derived from existing articulatory data on one speaker. It is based on 3D models of the speech organs (jaw, tongue, lips, velum and face), built from magnetic resonance imaging, computer tomography and video data acquired from one speaker and aligned on a skull-related reference coordinate system. The animation of the TH is based on motion capture obtained from one speaker (with EMA and video), so that the articulatory dynamics of the different organs is natural. Badin et al. (2010) showed that participants can derive phonetic information (typically on consonants) from the augmented visual display offered by the TH. They suggest that the TH could be used in speech therapy or second language acquisition. The virtual head developed by Fagel (Fagel & Clemens, 2004) includes a visual articulation module based on a simplified dominance model adapted

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

from Cohen and Massaro (1993) and an audio synthesis module based on the MBROLA (Dutoit, Pagel, Pierret, Bataille, & Van Der Vrecken, 1996) speech synthesis engine. It provides a variety of synthesised utterances. It is therefore less accurate and naturalistic than the TH. Yet its integration in a tool designed for speech therapy (“Vivian”) has proven to improve sibilant production ([s, z]) in a few children who trained with it (Fagel & Madany, 2008). The authors suggest that it may be applicable to speech therapy. The Diadolab software developed by Menin-Sicard, Sicard, & Bézard, (2016) displays simplified children-size articulatory contours that are inspired from articulatory data. A test with two hearing-impaired children showed that their speech intelligibility improved after training with Diadolab. Ultraspeech-player (Hueber, 2013) is based on a large database of tongue ultrasound movies that were synchronously captured with the audio signal and video recordings of the lips. It includes productions of phonemes and syllables, as well as words and short sentences uttered by several speakers. Since is based on real data, and not reconstructed from articulatory modelling, the articulatory dynamics, and crucially coarticulation patterns, is well preserved and realistic. It allows audio, ultrasound and video data to be displayed with varying rates, so that the tongue gesture can be slowed down to be better observed. By combining visual and auditory perceptual information during speech production training, this software presumably targets crucial speech processes. Speech is grounded or embodied in sensorimotor experiences, and involves intertwined sensory and motor processes (Guenther & Vladusich, 2012; Hickok, 2012; Indefrey & Levelt, 2004). A consequence of this embodiment is that speech abilities can be improved by using rehabilitation strategies targeting both action execution and observation (Marangolo et al., 2010). Improving the representation of the patient’s own articulatory movements could induce better selection, production and combination of speech gestures. Moreover, complementing articulatory training with visual perception of the articulators could be beneficial as visual information would be integrated by the central nervous system and used within the speech production network. Fabre et al. (2016) showed that using Ultraspeech-player software boosted articulatory awareness and improved the performance of children with phonological disorders (substitution of /tʃ/ with [kʃ]) after two rehabilitation sessions. This rehabilitation method seems to be beneficial to patients with speech disorders. In this study, we have therefore chosen to use the Ultraspeech-player instead of other visual illustration systems, given that it is based on real data: the observable tongue contour movies are not derived from an articulatory model but were recorded on actual speakers. The dynamic tongue movements displayed are therefore natural and realistic. In addition, Ultraspeech-player offers to display any types of speech sounds, from isolated phonemes to short sentences. Another therapeutic advantage is that the movies (and sound) can be slowed down to be watched at a more comfortable rate by the patient. Finally, the software is easy to use, does not require any cumbersome apparatus (helmet, probe) and can therefore be used at home, autonomously by the patient. This means that the patient can practice at home, daily, in addition to weekly or monthly training with a clinician.

In this study, we evaluated the effect of Sensory-Motor Fusion (SMF) training, using Ultraspeech-player software, on the speech recovery of one patient with NF chronic aphasia. Our method, referred to as SMF, is similar to that used in other visual illustration studies (with e.g. Ultraspeech player, Talking Head) which rely on visual and auditory information. We opted for the term “Sensory-Motor Fusion” as it evokes two important properties of this kind of

approach: (a) it requires interaction and integration between sensory and motor aspects of speech; (b) it is backed up by a theoretical model of speech production (Hickok's model) based on sensory and motor components. We thus speculate that SMF training could improve the interactions between auditory and somatosensory targets and motor programs. The SMF effect was assessed with qualitative comparison of scores during several language tests and quantitative analysis of the acoustic speech signal recorded in a speech production task, before and after rehabilitation. In addition, fMRI data were acquired for two tasks (syllable repetition and rhyme detection) to assess the SMF effect on the activation pattern for these tasks, pre- and post-rehabilitation.

Overall, through this case report we aim to illustrate the usefulness of a novel speech rehabilitation approach, to be used in non-fluent aphasic patients, targeting sensorimotor integration. The focus of this study is the detailed presentation of the SMF method and the multi-modal assessment of its effects. Specifically, the aim of this study was to evaluate the effect of SMF training on speech recovery in one patient with NF chronic aphasia, by using the Ultraspeech-player software. The SMF effect was assessed with two methods used before and after training: (a) the qualitative comparison of language scores (language assessment), and (b) the quantitative analysis of the acoustic speech signal based on several parameters related to vowel and consonant production. It is important to underline that this patient did not receive any direct feedback (i.e. via mirrors or ultrasound imaging) of her own productions. In addition, collecting fMRI data during two language tasks (Rhyme Detection, RD and Syllable Repetition, SR), we evaluated the effect of SMF on language networks after training. These tasks were chosen because they require cognitive and linguistic processes that bear on our hypothesis on the potential role of SMF, namely, the improvement of phonological, phonetic and articulatory mechanisms, due to the sensorimotor integration. Sensorimotor integration in Hickok's model (Hickok, 2012) is described in terms of two loops, somatosensory(articulatory)-motor and auditorymotor. These two loops could be activated by using a rhyme detection task and a syllable repetition task, which both strongly rely on somatosensory and auditory representations as well as motor programs. We speculate that SMF training could improve interactions between auditory and somatosensory targets resulting in more accurate motor programs which would improve RD and SR tasks resulting in a modulation of their cerebral substrates. A group of control participants was included in the fMRI experiment to obtain reference maps for the language tasks

Materials and methods

Patient 1 (P1)

The patient's clinical picture and demographic information is presented in Appendix A (Figure A.1 and Table A.1). This patient shows a typical NFA induced by a lesion restricted to frontal regions after ischemic stroke induced by the obstruction of anterior ramifications of the left medial cerebral artery, and associated with right hemiparesis. This study was approved by the Ethics Committee (CPP-ISIS 07PHR04-N°DCIC/06/25).

SMF rehabilitation procedure

SMF training was carried out using the Ultraspeech-player software (Hueber, 2013). Ultraspeech-player played sounds simultaneously with the videos of tongue movements recorded on a reference non-pathological speaker (typically the ST) using ultrasound and video imaging. P1 was seated in front of a computer screen and was presented with the production of various isolated vowels, isolated consonants, and vowel-consonant-vowel (VCV) sequences. The sounds and tongue movements were presented synchronously. If necessary, the movements were presented in slow-motion. After each presentation, P1 was invited to produce the sound. The targeted sounds were: isolated French vowels, V: /i, e, ε, a, y, ø, oe, u, o, ɔ, ã, õ, ẽ/; isolated French consonants, C: /p, t, k, b, d, g, f, v, s, z, ʃ, ʒ, l, m, n, ʁ, ɲ, j/ and VCV sequences. The rehabilitation started with an initial session in which the ST provided several explanations. Prototypical tongue images were visualised by P1 while the ST described the movements, so that P1 could train to better place the tip, the dorsum and the back of the tongue and could better pronounce the targeted phonemes and syllables. After this guided session, the SMF training included 13 training sessions at home, autonomously, during which P1 watched the target items and repeated them. P1 could hear herself and thus received auditory feedback from her own productions. Then P1 performed 3 supplementary sessions guided by the ST. Each training session lasted 45 minutes. Figure 1 illustrates the Ultraspeech-player software (www.ultraspeech.com).

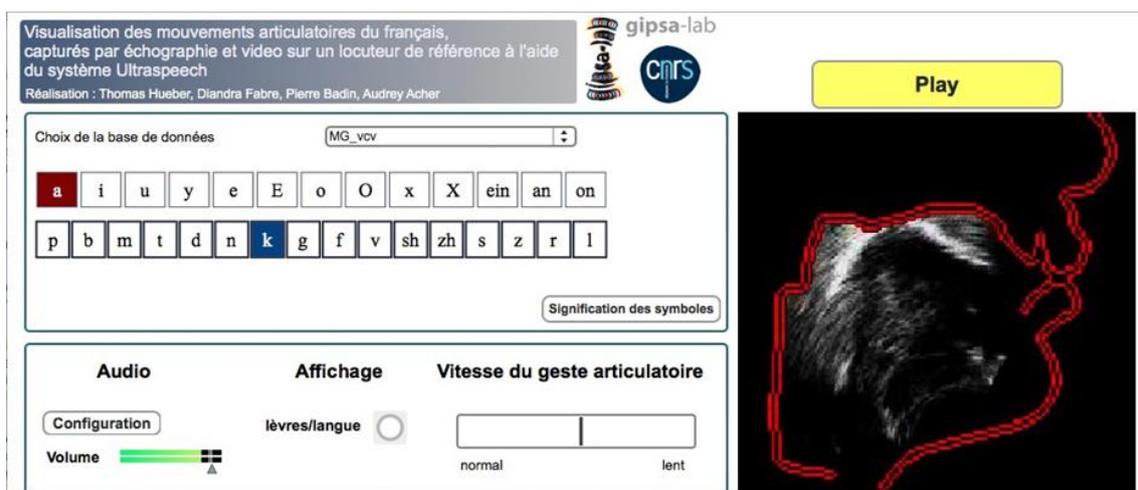


Figure 1. Illustration of the display provided by Ultraspeech-player (<http://www.ultraspeech.com> and http://www.ultraspeech.com/video/hueber_ultraspeech_player.mp4 Hueber, 2013).

Assessment of the SMF effect

Qualitative language assessment

Language abilities of P1 were evaluated by a ST during two evaluation sessions, before and after SMF training. Language production was evaluated with several tests generally used in our clinical environment, to access stages of word production (picture naming, DO80; Metz-Lutz et al., 1991), phonological output, buffer and phonetic encoding (syllables and words repetition), naming of written items (letters, syllables and words reading), phonological input

(rhyme judgment; Baudo & Vernisse, 2001) and lexical availability (phonemic and categorical fluency). In addition, ST explored verbal working memory (sentence repetition, rated regardless of the articulatory precision) as well as conceptual access and language comprehension (picture designation and morphosyntactical comprehension task, MT-86; Nespoulous, Lecours, & Lafond, 1986). Tests and scores obtained before and after rehabilitation with SMF, are presented in Table 1.

Quantitative speech assessment

We performed analysis of the acoustic parameters obtained in a speech production task before and after SMF. As detailed in Table A.2, the audio signal was recorded during several repetitions of various monosyllabic or bisyllabic words (or pseudo-words when no words could be found) that included all French vowels and consonants (e.g. “où” /u/, “where”, “gars” /ga/, “guy”). This allowed the production of all French phonemes inserted in real words (or in regular pseudo-words) to be tested before and after the SMF training. Although it would have been interesting to assess the patient’s ability on longer and more complex words, it was chosen to limit the recordings to simpler words, to make the task feasible (see the patient’s severe deficits in the word repetition task in the language test, Table 1). Three repetitions were performed during each evaluation. The first one consisted in the production of isolated vowels and of consonants in /a/ vowel context in different sequences, with the consonants (C) placed in initial (/Ca/, /CaCa/), medial (/aCa/) or final (/aC/) positions (latter analysis not described in this article). The other two repetitions only consisted of the production of isolated vowels and of /Ca/ syllables. Table A.2 (Appendix A) provides the corpus with written alphabetic forms as well as phonetic transcriptions (using IPA, the International Phonetic Alphabet).

Functional MRI assessment

P1 performed two language tasks (two separate runs), Syllable repetition (SR) and Rhyme detection (RD), using visual (RD) and auditory (SR) presentation of stimuli. Runs were block-designed and alternated task and control periods with similar features (5 periods of task/ control, 24 sec/period, 4 stimuli/period). P1 gave verbal (oral) responses during SR and manual responses during the RD task. Oral responses given during SR were recorded via an MRI compatible optical microphone (FOMRITM III, version 1.2). The total duration of the two runs was about 10 min.

Table 1: Scores obtained by P1 before and after rehabilitation during assessment of language production. We calculated global evolution indices (EI) for each test: each item was attributed a score (+1 if incorrect in pre-training but correct in post-training; -1 if correct in pre-training but incorrect in post-training; 0 if correct in pre and post-training or if incorrect in pre and post-training); scores/items were cumulated to provide a global EI/task.

	REPETITION	READING	NAMING /80	WORKING MEMORY (PHRASES)	VERBAL FLUENCY (2 MIN)	CONCEPTUAL ACCESS AND LANGUAGE COMPREHENSION	RHYME JUDGMENT	LANGUAGE SYMPTOMS SYNTHESIS
PATIENT 1 BEFORE SMF	Syllables 18/30	Letters, sounds 13/20			Categorical	Picture designation		- Repetition and reading impairment with phonetic, phonological and rare semantic paraphasia (output phonology, phonetic encoding and phonological buffer impairment) - Naming deficit - Significant decreased verbal fluency
	Simple words	Syllables 6/20			8	34/36		
	12/20	Regular words	67/80	10/10	Alphabetic	Morphosyntax (MT)	26/40	
	Complex words 6/20	Irregular words 6/10			7	86) 7/8		
PATIENT 1 AFTER SMF	Syllables 21/30	Letters, sounds 17/20			Categorical	Picture designation		- Preserved conceptual access and language comprehension - Significant deficit of input phonology - Lack of apraxia
	Simple words	Syllables 6/20			9	36/36		
	13/20	Regular words	69/80	10/10	Alphabetic	Morphosyntax (MT)	33/40	
	Complex words 9/20	Irregular words 6/10			3	86) 8/8		
SMF EFFECT EI	+3; +1; +3 (+7)	+4; 0; -2; 0 (+2)	+2	Normal	+1; -4 (-3)	+3	+7	→Improvement

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

Syllable repetition

During task periods, P1 repeated French mono-syllabic sequences, pronounced by a female voice and transmitted to P1 via MRI-compatible headphones. Syllables were composed of the 10 French oral vowels /i, e, ε, a, y, ø, oe, u, o, ɔ/ and of the 10 lingual consonants /t, d, s, z, ʃ, ʒ, k, g, l, v/ followed by vowel /a/. Each stimulus lasted the time of the production of the syllable and participants were required to repeat the syllable only once. During control periods, white noise was presented, without any response required from P1.

Rhyme detection

During task periods, P1 was required to judge whether written words presented in pairs rhymed or not. Half of them were phonologically and orthographically congruent (R + O+), the other half being phonologically and orthographically incongruent (R-O-) (Baudo & Vernisse, 2001). Words were written in black, one above the other. During control periods, two horizontal lines were presented, P1 being instructed to simply watch them.

MR acquisition

fMRI experiment was performed in a whole-body 3T MR scanner (Philips Achieva TX – Grenoble MRI facility IRMaGE) with a manufacturer-provided gradient-echo/T2*- weighted EPI sequence. Fifty-two adjacent axial slices parallel to the bi-commissural plane were acquired in non-interleaved ascendant mode. Acquisition parameters were: slice thickness 2.75 mm with a gap of 0.25 mm; in-plane voxel size 2.5 × 2.5 × 3 mm (220 × 220 × 156 mm field of view encoded with an 88 × 85 voxels matrix); TR = 3 sec, TE = 30 msec, flip angle = 80°. A T1-weighted high-resolution (1 × 1 × 1mm) three dimensional anatomical volume was also acquired.

Data processing

Language scores

Before participating in the study, P1 underwent language assessment with various tests, stimuli and speech-therapists, so that we could not apply a multiple measures baseline method (Nickels, 2002). The evaluation of language scores remained qualitative and we only calculated global evolution indices (EI) based on the comparison of two scores, one before and another one after SMF, for each test. To calculate a global EI for each test (Table 1), we analysed each item; we first attributed a score for each item (+1 if incorrect in pre-training but correct in post-training; -1 if correct in pre-training but incorrect in post-training; 0 if correct in pre- and post-training or if incorrect in pre- and posttraining).

Acoustic data

The acoustic signal obtained from the audio recordings before and after SMF training was recorded at 44.1 kHz and downsampled at 12 kHz in order to facilitate the extraction of phonetically relevant spectral parameters. Each recording contains the ST's stimulus productions followed by P1's productions. Before analysis, isolated vowels and syllables were

manually labelled using the Praat software (Boersma & Weenink, 2010). All the isolated vowels and all the consonants in the 3 contexts (/Ca/, /CaCa/, /aCa/) were rated for accuracy (78 oral vowels and 216 consonants for the ST and 78 oral vowels and 216 consonants for the patient). The phonemes were labelled as either “correct”, “incorrect”, or “emergent”. In our context we call emergent a phoneme that is preceded by a nontarget sound before being reached. It often occurs with voiced sibilants: for a target /v/ phoneme, the patient may start with an initial [f] that gradually transforms into [v]. When the place and manner of articulation were judged correct and only voicing was incorrect, the label was “voicing error”. In addition, typical acoustic parameters were examined for each repetition of the 10 oral vowels, of the 6 fricative (/f, v, s, z, ʃ, ʒ/) and of the 6 occlusives (/p, t, k, b, d, g/) consonants. Namely, we measured the first two formant frequencies (F1 and F2) for vowels, voice onset time (VOT) for occlusives and the first two spectral moments (Centre of Gravity, CG and Standard Deviation, SD) for fricatives (the transcription and coding were carried out by a trained transcriber and reliability of the scoring was ensured by having a second rater judge part of the data, see details in Appendix A).

MR data processing

Data analysis was performed using the general linear model (Friston et al., 1994) with SPM12 (Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, UK, www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm) implemented in MATLAB (Mathworks Inc., Sherborn, MA, USA).

Pre-processing of data

Data analysis was performed by using the general linear model (Friston et al., 1994) with SPM12 (Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, UK, www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm) implemented in MATLAB (Mathworks Inc., Sherborn, MA, USA). Images were initially preprocessed. First, the functional volumes were time-corrected with the mean image as the reference slice (the acquired brain volume was composed of 52 slices) in order to correct artefacts caused by the delay of time acquisition between slices. Subsequently, all volumes were realigned to correct for head motion, by using a rigid body transformation. For healthy participants, T1-weighted anatomical volume was coregistered to mean images created by the realignment procedure and was normalized within the MNI (Montreal Neurological Institute) space. The anatomical normalization parameters were subsequently used for the normalisation of functional volumes. Finally, each functional volume was smoothed by a Gaussian kernel of 8 mm FWHM (Full Width at Half Maximum). For patients, masks covering brain lesion were applied to the T1-weighted anatomical volume which was co-registered to mean images created by the realignment procedure. The masked anatomical volume was then segmented into six different tissues (white matter, grey matter, cerebrospinal fluid, bone, soft tissue and background) and normalised into the MNI space using the tissue probability maps provided in SPM12. The normalisation parameters were subsequently used for the normalization of functional volumes. Each functional volume was then smoothed by a Gaussian kernel of 7 mm FWHM (Full Width at Half Maximum). For both groups of participants, time series for each voxel were high-pass filtered (1/128 Hz cut-off) to remove low-frequency noise and signal drift.

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

Statistical analyses of data

Statistical analyses were subsequently performed on the preprocessed data. For each participant, each language paradigm (SR and RD) was declared as a specific fMRI run. It should be noted that since for P1 each paradigm was performed twice (before and after SMF), two runs were declared. For each run, the Task and Control conditions were modelled as two regressors constructed as box-car functions, convolved with a canonical hemodynamic response function in healthy subjects and with a canonical Hemodynamic Response Function (HRF) with its spatial and temporal derivatives (3HRF) for P1. Movement parameters derived from the realignment corrections (three translations and three rotations) were included into the design matrix as additional factors of no interest. We additionally identified motion-related outlier scans using the artefact detection toolbox (http://www.nitrc.org/projects/artifact_detect/) which were also modelled in the design matrix as regressors of no interest. In P1, the percentage of correct responses (CR) and the reaction time (RT ms) were also included in the design matrix as additional regressors of no interest to account for RT- and accuracy-related variance. The general linear model was then used to generate the parameter estimates of activity for each voxel, each condition and each participant. Statistical parametric maps were generated from the linear contrasts between the HRF parameter estimates for experimental conditions. The spatial resolution of statistical parametric maps was the same as the spatial resolution of functional MR images (3x3x3.5 mm). The statistical analysis was performed at a first level (Individual level analysis). We calculated the main contrast Task vs. Control, for each run (SR, RD). This contrast allowed us to identify language networks involved in syllable repetition (sub-lexical level, audio-motor and sensori-motor interactions) and rhyme detection (phonological processes, phoneme monitoring, phonological buffer and lexicosemantic associated processes). For healthy participants, contrast images were then entered into second-level random effect analyses to test for within group effects. We also computed the contrasts between the two acquisition sessions (before and after SMF) for each task, to examine the effect of SMF on cerebral activation.

Results

Language scores

Table 1 summarises the aphasic and language symptoms in P1 and their evolution after the SMF training. Before rehabilitation, P1 showed naming deficit with articulatory impairment, oral repetition and reading deficits. The level of verbal fluency was lower than the normal values. An analysis of each item indicated that her language production was characterised by phonetic and phonological paraphasias. P1 was not impaired for language comprehension and did not show apraxia of speech. After rehabilitation, based on the global EI for each test, P1 shows general improvement of language production, excepting a decline in phonemic fluency.

Acoustic results

Table 2 displays accuracy transcriptions for all the segments (all vowels and all consonants), including nasal vowels and the 6 consonants that were not further taken into account in the

acoustic analysis. Accuracy transcriptions for each phoneme separately are provided in Appendix A Table A.3.

Table 2. Accuracy (%) of the entire set of vowels and consonants judged by the transcriber as correct, incorrect, emergent or with voicing errors; before and after rehabilitation in P1.

Patient 1								
	Accuracy before SMF (%)				Accuracy after SMF (%)			
	Correct	Emergent	Voicing error	Incorrect	Correct	Emergent	Voicing error	Incorrect
All vowels	94.87	5.13	NA	0.00	97.44	2.56	NA	0.00
All consonants	32.41	0.93	24.07	42.59	43.64	0.00	17.27	39.09
All phonemes	48.98	2.04	17.69	31.29	57.72	0.67	12.75	28.86

Before the SMF training, the productions were correct for 48.98% of all phonemes, with 94.87% for vowels and 32.41% for consonants. After training, the percentage of correct vowels increased to 97.44% and the percentage of correct consonants increased to 43.64%. Voicing errors for consonants decreased (from 24.07% to 17.27%) which suggests that P1 improved her laryngeal control after training. Productions rated as “incorrect” also decreased, which suggests that improvement was not restricted to voicing control but also concerned the place and the manner of articulation. The percentage of productions labelled as “emergent” was also reduced, which argues for an improvement of the dynamic control of phoneme production. Moreover, in order to quantitatively describe the evolution in vowel and consonant production, acoustic measures were carried out on the phonemes rated as correct or emergent. Figure 2 provides vowel distributions in the (F1, F2) plan before and after training. Importantly, P1 and speech-therapist were female, allowing the comparison of their vocalic spaces. The ST’s vowel (F1, F2) plan shows typical small intra-vowel variability (good clustering of productions of each vowel across several repetitions) and large inter-vowel distances (no overlap between vowels). For P1, results for correctly judged vowels (Figure 2, top panel) show an increased similarity for the pronunciation of each of the /i, y/ vowels with a decreased intra-vowel variability after SMF, as well as an increased distance between these two vowels.

Results for occlusives are presented in Table 3 with Voice Onset Time (VOT) values, before and after SMF and for the ST as a reference. VOT values for ST are stable in the 2 sessions and show the typical distinction between voiced and unvoiced occlusive. For P1, the VOT values of unvoiced occlusives are stable, positive and in the range of normal production. For voiced occlusives, the VOT values decrease after training and become more negative and closer to the reference. Finally, for fricative consonants (Figure 3), P1 shows inability to produce alveolar fricatives before rehabilitation (absence of the alveolar category in Figure 3a and c). However, after rehabilitation, P1 correctly produced two of the six repetitions of the /s/ consonant (which explains the presence of the alveolar category in Figure 3b and d).

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

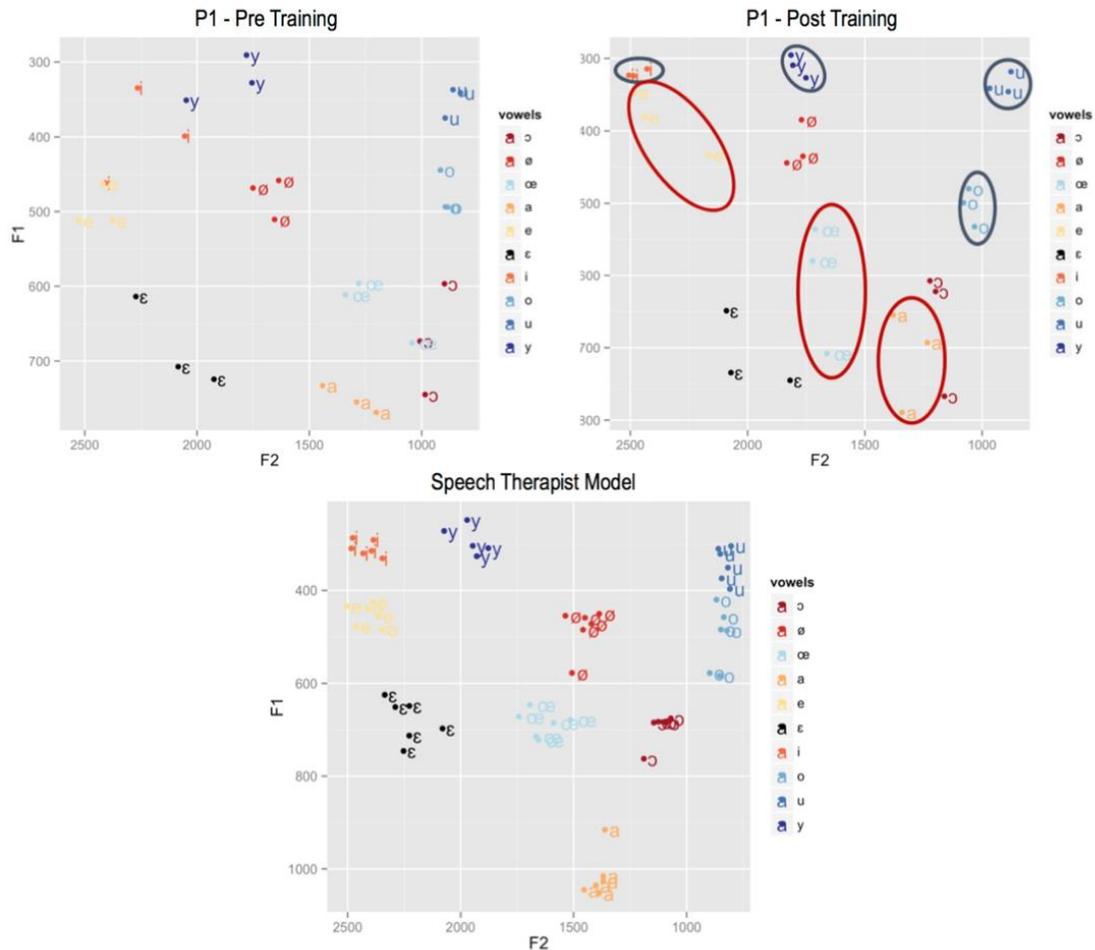


Figure 2. Vowel F1/F2 formant space for P1 (top) before (left) and after (right) rehabilitation, and for the speech therapist (ST, bottom).

Table 3. Mean values of VOT (Voice Onset Time) obtained before and after rehabilitation for P1 as well as by the speech therapist (ST) for voiced and unvoiced occlusives (/p, t, k, b, d, g/) in condition Ca (three repetitions), CaCa and aCa (see main text).

	VOT (sec) for occlusives			
	Voiced		Unvoiced	
	Before SMF	After SMF	Before SMF	Before SMF
PATIENT 1	-0.0321 (±0.0116)	-0.0594 (±0.0371)	0.0311 (±0.0201)	0.0306 (±0.0156)
SPEECH THERAPIST	-0.119 (±0.0346)	-0.106 (±0.0567)	0.0271 (±0.00907)	0.0267 (±0.0118)

Examining the pattern of production errors, not just the accuracy scores, is also informative. For stops, errors mainly consisted in voicing both before and after therapy, the place of

articulation being quite well preserved. Before therapy, the alveolar fricative /s/ could not be produced at all, whereas after therapy, when it became produced, its place of articulation was mostly affected. Instead of the alveolar /s/, the patient sometimes produced the post-alveolar fricative [ʃ] (with correct manner of articulation but backed tongue position) or the labiodental [f] (correct manner but fronted place). This reveals a difficult maintenance of tongue position during friction, when palate contact is not possible. The fact that SMF training improved fricative production suggests that it is effective in re-creating accurate somatosensory representations.

Overall, partial improvement for vowels as well as for consonants was observed for P1 after rehabilitation.

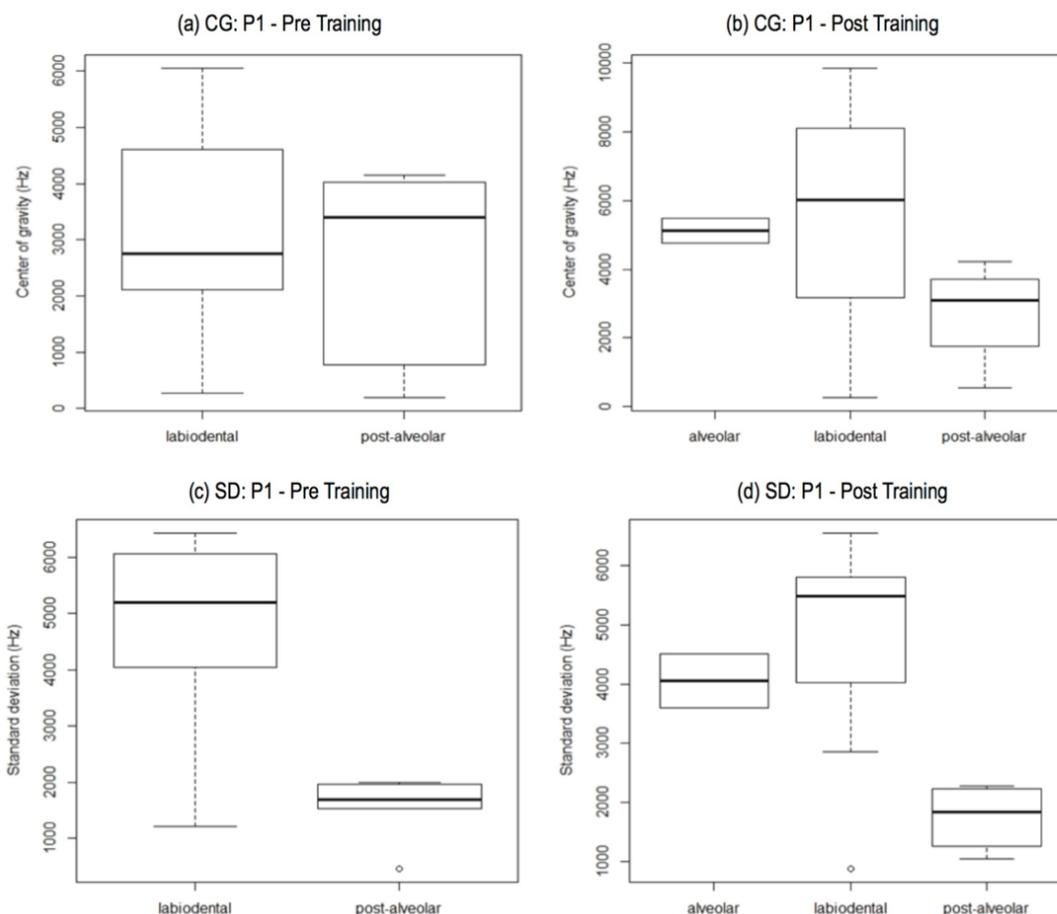


Figure 3. Boxplots of the two spectral parameters (center of gravity and standard deviation) obtained before and after rehabilitation for P1 for fricatives (/f, s, ʃ, v, z, ʒ/) in condition Ca (three repetitions), CaCa and aCa (see the main text).

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

fMRI results

fMRI result obtained before and after SMF are shown in Table 4 and Figure 4. SMF training modulated brain activity within the RD network in left superior and medial frontal and precentral gyri, right frontal middle and superior, right superior temporal gyri, as well as right cerebellum (Crus I). SMF training modulated also brain activity within the SR network within the left inferior frontal gyrus and left insula.

Discussion

This study is a proof of concept for using a novel speech rehabilitation method, the SMF with the Ultraspeech-player software, in chronic patients with non-fluent aphasia. The main objective of this work was to provide a description of the method and the procedure used as well as a multimodal evaluation of the effects. SMF effects were assessed by a qualitative comparison of language scores and by a quantitative analysis of acoustic characteristics of vowel and consonant production, before and after rehabilitation. Moreover, we examined how the SMF training modulates the cerebral networks elicited by two appropriate language tasks, RD and SR. It should be noted that the patient was included more than 1 year after stroke. It is very unlikely that spontaneous recovery still occurs so late after stroke (Lazar, Speizer, Festa, Krakauer, & Marshall, 2008; Lendrem & Lincoln, 1985). Consequently, it is safe to consider that the observed modulation of cerebral language networks, as assessed with fMRI, is the consequence of the rehabilitation training. RD and SR tasks mainly require phonological, phonetic and articulatory processes targeted by the SMF, such as sensori-motor, audio-motor and visuo-motor interactions. These interactions are supposed to improve internal models and motor plans necessary in speech production.

The patient P1 examined here shows typical NFA induced by a lesion of frontal regions after ischemic stroke induced by the obstruction of anterior ramifications of the left medial cerebral artery, and associated with right hemiparesis. The qualitative comparison of language scores (Table 1) indicates that after SMF training, P1's language production abilities improved, specifically for articulatory and phonological processes. Indeed, excepting a decline of verbal fluency, EI values (Table 1) for all tests were positive, indicating that SMF training might have had a positive effect. However, language improvement was not complete. Verbal fluency score remained low after SMF, suggesting remaining difficulties with word retrieval, attributable to an association between domain-specific (language) and domain-general (executive functions or cognitive control) deficits, frequently observed in patients with aphasia (Brownsett et al., 2014).

In addition, quantitative acoustic analyses revealed that P1 significantly improved pronunciation of several vowels and consonants after rehabilitation. Acoustic results on vowels (see Figure 2) suggest that rehabilitation facilitated lip rounding control (which distinguishes /i/ and /y/ vowels). In addition, the F2 values obtained for /o/ and /u/ are better differentiated (increased inter-vowel distance) after training, suggesting a better control of the tongue height in posterior position (which distinguishes between these two vowels). However, the rehabilitation did not reveal improved reproducibility across repetitions for /a, oe, e/, suggesting that tongue position remains imperfectly controlled (see Figure 2). As illustrated in Tables 2–3

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

Table 4. Activated regions obtained in Patient 1 in Syllable repetition (SR) and Rhyme detection (RD), before and after Sensori-Motor Fusion (SMF) training. Only the most significant peak within each cluster of activation is reported, with its corresponding size in voxels (k), MNI coordinates (AAL labelling Tzourio-Mazoyer et al., 2002) and t value (p<0.001, uncorrected, k > 10).

AAL Label	K	x	y	z {mm}	T value	AAL Label	k	x	y	z {mm}	T value
RD Task > Control - Before SMF						RD Task > Control - After SMF					
Occipital_Inf_L	925	-39	-85	-7	13.57	Occipital_Inf_R	2068	33	-85	-7	13.67
Occipital_Inf_R	557	30	-88	-7	12.11	Occipital_Inf_L	2590	-39	-82	-7	13.12
Precentral_L	375	-36	2	62	8.31	Precentral_L	1099	-36	2	62	10.45
Frontal_Mid_R	295	36	38	35	8.07	Precentral_R	22	27	-4	50	4.26
Frontal_Mid_L	34	-33	50	5	5.57	Precentral_R	18	33	-22	50	3.63
Frontal_Mid_L	40	-48	29	29	5.51	Frontal_Mid_R	123	39	41	35	7.71
Frontal_Mid_Orb_R	206	33	50	-1	7.97	Cerebellum_8_L	60	-21	-67	-49	6.74
Occipital_Mid_L	479	-27	-67	29	7.49	Frontal_Inf_Orb_R	165	45	26	-7	6.49
Parietal_Inf_R	679	33	-46	41	7.09	Frontal_Inf_Orb_R	15	21	17	-22	3.91
Frontal_Sup_L	110	36	-4	65	6.28	SupraMarginal_L	51	-60	-40	23	5.61
Temporal_Mid_L	39	-54	-58	17	6.20	SupraMarginal_R	44	60	-43	29	4.30
Cerebellum_8_L	83	-18	-64	-49	5.94	Precuneus_L	29	-3	-43	11	5.49
SupraMarginal_L	37	-60	-40	23	5.71	Temporal_Pole_Sup_R	27	36	20	-31	5.00
Supp_Motor_Area_L	38	0	2	56	4.91	Temporal_Pole_Sup_L	21	-39	17	-28	4.95
Fusiform_R	16	39	-37	-28	4.37	Supp_Motor_Area_L	26	-6	5	53	4.78
						Poscentral_R	19	15	-46	74	4.40
						Poscentral_L	15	-42	-22	44	3.80
						Insula_R	17	33	-22	8	4.39
RD Before > After SMF						RD After > Before SMF					
Cerebellum_Crus1_L	12	-42	-43	-34	4.09	Frontal_Mid_R	206	39	14	50	4.48
Poscentral_L	61	-27	-22	83	3.77	Temporal_Sup_R	11	45	-28	2	4.30
Frontal_Sup_L	25	-30	-1	71	3.72	Frontal_Sup_Medial_L	45	-9	35	44	4.08
Vermis_4_5_R	44	6	-58	-13	3.63	Cerebellum_Crus1_R	31	39	-67	-25	3.98
Parietal_Sup_L	40	-21	-52	80	3.56	Precentral_L	48	-36	2	47	3.92
Cerebellum_4_5_R	11	24	-37	-28	3.46	Frontal_Sup_R	20	24	5	68	3.78
Cerebellum_6_L	14	-21	-52	-28	3.44						
SR - Task>Control - Before SMF						SR - Task > Control - After SMF					
Frontal_Med_Orb_L	29	-9	65	-1	6.40	ParaHippocampal_R	213	21	-16	-22	6.04
Frontal_Inf_Tri_L	102	-42	44	8	6.30	Temporal_Pole_Sup_L	1406	-39	17	-28	5.94
Frontal_Inf_Tri_R	23	45	35	26	4.38	Frontal_Inf_Tri_L	37	-45	35	14	5.53
Postcentral_L	37	-51	-7	53	5.70	Parietal_Sup_L	320	-21	-67	68	4.71
Temporal_Sup_R	100	66	-16	8	5.63	Parietal_Sup_R	124	39	-43	71	4.02
Temporal_Sup_L	21	-60	-43	17	5.31	Cingulum_Mid_R	108	21	-31	44	4.50
Temporal_Sup_L	40	-54	-22	11	4.65	Frontal_Sup_L	17	-24	17	65	4.44
Temporal_Mid_L	33	-54	-58	17	5.46	Frontal_Inf_Orb_R	31	33	26	-19	4.39
Temporal_Mid_L	38	-54	-37	-1	5.15	Frontal_Inf_Orb_L	25	-30	26	-19	3.68
Temporal_Mid_R	22	48	-34	2	5.42	Temporal_Sup_R	16	57	-10	-10	4.35
Precentral_R	162	63	2	23	5.36	Temporal_Mid_R	26	54	-34	-1	4.15
Precentral_L	51	-33	-13	71	4.54	Postcentral_L	34	-27	-31	41	3.97
Supp_Motor_Area_R	31	9	8	74	4.81	Cerebellum_8_L	25	-24	-58	-52	3.90
Lingual_L	57	-21	-70	2	4.50	SupraMarginal_R	22	60	-46	32	3.79
Cuneus_R	36	6	-88	20	4.07	Heschl_R	16	54	-10	5	3.51
Cerebellum_4_5_L	21	-6	-45	-7	3.98						
SR Before > After SMF						SR After > Before SMF					
Precentral_L	1026	-27	-4	56	5.12	Frontal_Inf_Orb_L	101	-51	17	-4	4.73
Temporal_Mid_L	17	-51	-22	-10	4.54	Insula_L	17	-36	-1	-1	3.63
Frontal_Mid_R	140	48	-4	56	3.97						
Precuneus_L	13	-15	-52	74	3.94						

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

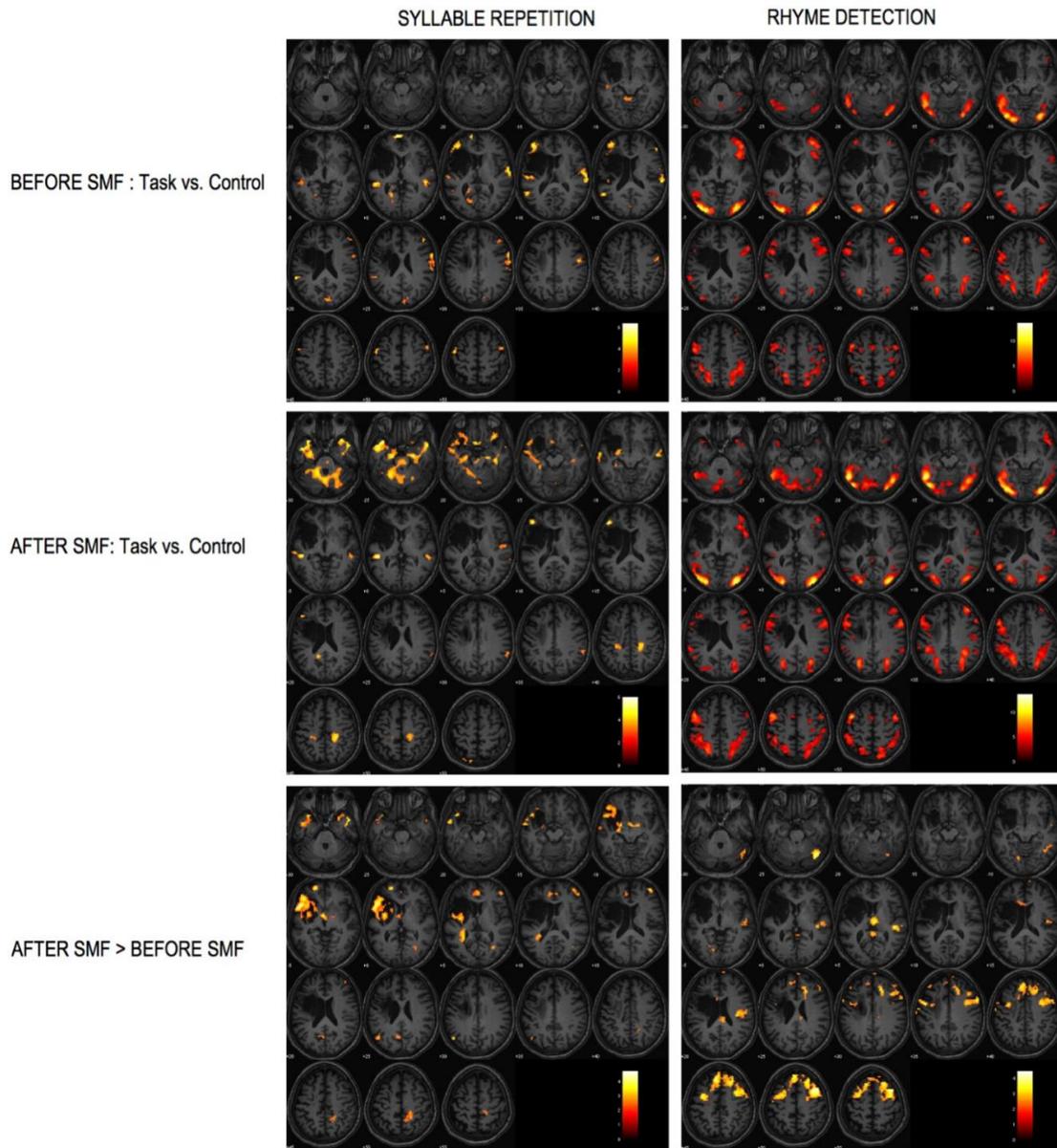


Figure 4. Activated regions projected onto 2D axial in Patient P1 obtained for syllable repetition and rhyme detection ($p < 0.001$, uncorrected, $k > 10$).

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

and Figure 3, acoustic results on occlusive consonants suggest that P1 improved her production of voicing after training. For fricative consonants, acoustic results showed that the /s/ and /ʃ/ distinction improved after SMF training, as well as the distinction of labiodentals /f, v/ from the other fricatives /s, z/ and /ʃ, ʒ/. Altogether, these patterns suggest that supplying visual articulatory information improved articulator placement and movement. Since voicing control was also improved, SMF seems to have additionally facilitated the coordination between laryngeal and supra-laryngeal movements. A better mastery of articulatory configurations and dynamics could have allowed her to better concentrate on an additional gesture (laryngeal closing and opening).

At the cerebral level, the comparison before vs. after rehabilitation revealed interesting results. We first discuss the effects related to the RD task. As illustrated in Table 4 and Figure 4, SMF modulated brain activity within the RD network in left superior-medial frontal and left precentral gyrus, right frontal middle and superior and superior temporal gyri, as well as the right cerebellum (Crus I). Left frontal and precentral activation might suggest supplementary audio-motor and sensori-motor interactions, as suggested by recent speech motor control models (Guenther & Vladusich, 2012; Hickok, 2012). Previous studies indicated that speech depends on strong relationships between production and perception networks, two functional systems which are intimately linked (Guenther, Ghosh, & Tourville, 2006; Indefrey & Levelt, 2004; Tomasello, Garagnani, Wennekers, & Pulvermüller, 2016) and whose links we assumed to be reinforced by the SMF rehabilitation. Hence our results provide evidence for the efficacy of the SMF rehabilitation in this patient. In addition, the activation of the right cerebellum and specifically the Crus I region, reflects the involvement of word generation processes (Stoodley, Valera, & Schmahmann, 2012). In a meta-analysis, Stoodley and Schmahmann (2009) suggested that among various processes, language and working memory were dependent on the lobules VI-Crus I and Crus II. This suggests that, after SMF, our patient might more strongly resort to linguistic and verbal memory processes to perform RD more efficiently. Our fMRI results indicating neurocognitive efficiency improvement were coherent with the positive EI (Table 1) obtained for rhyme detection in the language assessment. Finally, the right activation of the cerebellum may also be related to an improvement in speech production-related internal models (Hickok, 2012; Ito, 2005). All these processes could be boosted after SMF training. Furthermore, the SMF effect was also observed in terms of supplementary activation of the right middle and superior frontal gyri after training. These regions have been considered to play multiple roles, such as that of a gateway between top-down and bottom-up control of attention (Japee, Holiday, Satyshur, Mukai, & Ungerleider, 2015). This suggests that, after training, our patient might be able to recruit attentional resources to perform the task. The activation of right fronto-temporal regions has also been observed after applying other methods of rehabilitation in non-fluent aphasia, such as melodic intonation therapy, which engages fronto-temporal regions of the right hemisphere (Schlaug, Norton, Marchina, Zipse, & Wan, 2010).

In sum, the effect of SMF on the RD network seems to reflect improvement of sensorimotor interactions, attention, motor planning and internal models for speech, which is consistent with the expected impact of the SMF rehabilitation method.

We now turn to the effect of SMF on the SR network. After training, increased activation of the left inferior frontal gyrus and left insula was observed (see Table 4 and Figure 4). As already mentioned, the activation of the left inferior frontal gyrus after SMF might be related to the increase in sensori-motor interactions due to the supplied visual information and to a better phonological output and phonetic encoding. This finding is in agreement with the positive EI obtained for the repetition test in language assessment (Table 1). The activation of the left insula suggests an improvement in the intra- and inter-syllabic coordination movements during speech (Baldo, Wilkins, Ogar, Willock, & Dronkers, 2011; Dronkers, 1996). In sum, the effect of SMF on the SR network suggests an improvement in sensori-motor interactions and in coordination of articulation in our patient.

In future works, next to SMF, we will explore the acoustic, linguistic, cognitive and neurophysiological effects of other rehabilitation methods, including traditional speech therapy. Moreover, it will be also important to evaluate the effects of SMF when using a visual feedback paradigm (by means of an ultrasound probe), rather than mere visual illustration. We do not have sufficient data yet to compare the specific effects of all these methods, but we are currently including more patients and we will use randomized controlled trials to robustly assess the respective effects of the different methods. In addition, other questions should be addressed, such as for instance, the most appropriate timing for the use of SMF or other speech rehabilitation methods. Presumably, an efficient rehabilitation should not only use a specific method in isolation, but should associate several methods, which should be applied at different optimal times after stroke, and should be patient-tailored, meaning that they should be customised according to clinical variables specific to each patient. Another important aspect that should be highlighted is how much relevant to language recovery these different methods are, according to the post-stroke phase - acute, subacute or chronic. SLT (Speech and Language Therapy) is known to work in the first months after stroke, but we do not know how effective this method could be if was immediately associated with other rehabilitation approaches. Moreover, neurocognitive plasticity and its efficiency (whether cerebral reorganisation is useful for the patient because his/her language skills improve) in patients with non-fluent aphasia after stroke, are not fully described yet. Even if a majority of findings suggest that an efficient language network reorganisation should involve the left hemisphere (the right hemisphere activation typically measured in the acute phase should shift to the left in the chronic phase, Cornelissen et al., 2003; Saur et al., 2006), the activity of which is correlated with improvement in language performance (Léger et al., 2002; Meinzer et al., 2008; Musso et al., 1999; Saur et al., 2006), supplementary evidence is required. Overall, we should consider these results with caution. Essentially, our present study is a proof of concept in that it assesses the feasibility of using SMF training for speech recovery in one patient with post-stroke aphasia. This study has the merit to show that training in autonomy could be useful, engaging and even playful for the patients. Indeed, P1 improved in her speech abilities after training. Her speech production improvement was associated with the activation of a cerebral network typically underlying motor control, auditory and somatosensory processes. It is precisely these specific networks that we expected to be activated by using this speech recovery method. However, this study has several limitations: (a) it is a single case study, which means that the results and the conclusions

should be considered with caution and more patients should be tested in the future; (b) a monitoring of how the patient performs during the autonomous training at home is required; (c) the patient underwent both traditional speech therapy and the SMF training in parallel; thus, the acoustic, linguistic and neuroimaging effects are probably also related to traditional therapy, at least in part; future studies with group designs should compare the relative effects of the different methods. Moreover, there are still many aspects of the therapy that need to be assessed. In our future studies, we will collect more data for a better understanding of (a) the effect of using SMF autonomously vs. in accompaniment with a SLT; (b) the optimal duration of each training session, the ideal session number and frequency, and (c) the respective advantages of SMF training with visual illustration only vs with online visual feedback (with a tongue imaging ultrasound probe). In addition, although autonomous daily training seems to be feasible for the patient, given that the software is easy to use, non-invasive and engaging, we do not know yet whether autonomous daily training is more or less effective than daily or weekly training with a clinician (ST). Training with continuous support from a clinician could also be advantageous, as the ST can monitor the patient's performance, and can help the patient in adjusting articulatory execution and in avoiding error perseverations. In addition to monitoring errors, the clinician can also encourage and stimulate the patient. We think that mixing autonomous training with clinician-guided training would result in optimal rehabilitation scores. The amount of ST support should also be adapted to the post-stroke phase, patients with subacute post-stroke aphasia needing more significant support than patients with chronic aphasia.

Acknowledgments

We thank Geneviève Meloni and Manon Gabriel for their help with the acoustic data processing. The Ultraspeech-player software is free to download at www.ultraspeech.com.

Declaration of interest statement

The authors report no conflicts of interest.

Funding

This work was partly funded by the French program "Investissement d'Avenir" run by the 'Agence Nationale pour la Recherche'; grant 'Infrastructure d'avenir en Biologie Santé -ANR-11-INBS-0006.

References

- Ardila, A., Bernal, B., & Rosselli, M. (2016). Why Broca's area damage does not result in classical Broca's Aphasia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 249.
- Bacsfalvi, P., Bernhardt, B. M., & Gick, B. (2007). Electropalatography and ultrasound in vowel remediation for adolescents with hearing impairment. *Advances in Speech Language Pathology*, 9(1), 36–45.
- Badin, P., Elisei, F., Bailly, G., Savariaux, C., Serrurier, A., & Tarabalka, Y. (2007). Têtes parlantes audiovisuelles virtuelles: Données et modèles articulatoires: Applications. *Revue De Laryngologie Otologie Rhinologie*, 128(5), 289–295.

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

- Badin, P., Elisei, F., Bailly, G., & Tarabalka, Y. (2008). An audiovisual talking head for augmented speech generation: Models and animations based on a real speaker's articulatory data. *Vth Conference on Articulated Motion and Deformable Objects (AMDO 2008, LNCS 5098)* (Vol.5098, pp. 132–143).
- Badin, P., & Serrurier, A. (2006). Three-dimensional linear modeling of tongue: Articulatory data and models. In H. C. Yehia, D. Demolin, & R. Laboissière (ed.), *7th International Seminar on Speech Production, ISSP7* (pp. 395–402). Ubatuba, SP, Brazil: UFMG, Belo Horizonte, Brazil.
- Badin, P., Tarabalka, Y., Elisei, F., & Bailly, G. (2010). Can you 'read' tongue movements? Evaluation of the contribution of tongue display to speech understanding. *Speech Communication*, 52(6), 493–503.
- Baldo, J. V., Wilkins, D. P., Ogar, J., Willock, S., & Dronkers, N. F. (2011). Role of the precentral gyrus of the insula in complex articulation. *Cortex*, 47(7), 800–807.
- Ballard, K. J., Granier, J. P., & Robin, D. A. (2000). Understanding the nature of apraxia of speech: Theory, analysis, and treatment. *Aphasiology*, 14(10), 969–995.
- Baudo, K., & Vernisse, A.-L. (2001). Influence de la mémoire de travail sur l'ordre de réussite aux épreuves métaphonologiques. (Mémoire pour l'obtention du Certificat de capacité d'orthophonie). Lyon: Université Claude Bernard Lyon 1.
- Benson, D. F., & Ardila, A. (1996). *Aphasia: A clinical perspective*. New York, NY: Oxford University Press.
- Bernhardt, B., Gick, B., Bacsfalvi, P., & Adler-Bock, M. (2005). Ultrasound in speech therapy with adolescents and adults. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 19(6–7), 605–617.
- Bernhardt, B., Gick, B., Bacsfalvi, P., & Ashdown, J. (2003). Speech habilitation of hard of hearing adolescents using electropalatography and ultrasound as evaluated by trained listeners. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 17(3), 199–216.
- Boersma, P., & Weenink, D. (2010). Praat: Doing phonetics by computer (Version 6.0.05). Retrieved from <http://www.praat.org/>
- Bookheimer, S. Y. (2002). Functional MRI of language: New approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annual Review of Neuroscience*, 25(1), 151–188.
- Brownsett, S. L. E., Warren, J. E., Geranmayeh, F., Woodhead, Z., Leech, R., & Wise, R. J. S. (2014). Cognitive control and its impact on recovery from aphasic stroke. *Brain*, 137(1), 242–254.
- Chen, Y.-P.-P., Johnson, C., Lalbakhsh, P., Caelli, T., Deng, G., Tay, D., . . . Morris, M. E. (2016). Systematic review of virtual speech therapists for speech disorders. *Computer Speech & Language*, 37, 98–128.
- Cleland, J., Scobbie, J. M., & Wrench, A. A. (2015). Using ultrasound visual biofeedback to treat persistent primary speech sound disorders. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 29(8–10), 575–597.

- Cohen, M. M., & Massaro, D. W. (1993). Modeling coarticulation in synthetic visual speech. In N. Magnenat-Thalmann & D. Thalmann (eds.), *Models and techniques in computer animation* (pp. 139–156). Tokyo, Japan: Springer.
- Cornelissen, K., Laine, M., Tarkiainen, A., Järvensivu, T., Martin, N., & Salmelin, R. (2003). Adult brain plasticity elicited by anomia treatment. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(3), 444–461.
- Cortese, M. D., Riganello, F., Arcuri, F., Pignataro, L. M., & Buglione, I. (2015). Rehabilitation of aphasia: Application of melodic-rhythmic therapy to Italian language. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 520.
- Démonet, J. F., Thierry, G., & Cardebat, D. (2005). Renewal of the neurophysiology of language: Functional neuroimaging. *Physiological Reviews*, 85(1), 49–95.
- Dronkers, N. F. (1996). A new brain region for coordinating speech articulation. *Nature*, 384(6605), 159–161.
- Dutoit, T., Pagel, V., Pierret, N., Bataille, F., & Van Der Vrecken, O. (1996). The MBROLA project: Towards a set of high-quality speech synthesizers free of use for non-commercial purposes. *Proceedings ICSLP*, 3, 1393–1396 vol.3.
- Fabre, D., Hueber, T., Canault, M., Bedoin, N., Acher, A., Bach, C., . . . Badin, P. (2016). Apport de l'échographie linguale à la rééducation orthophonique. In N. Joyeux & S. Topouzkhaniyan (eds.), *XVIèmes Rencontres Internationales d'Orthophonie: "Orthophonie et technologies innovantes"* (pp. 199–225). Paris, France: Ortho Edition.
- Fagel, S., & Clemens, C. (2004). An articulation model for audiovisual speech synthesis: Determination, adjustment, evaluation. *Speech Communication*, 44(1), 141–154.
- Fagel, S., & Madany, K. (2008). A 3-D virtual head as a tool for speech therapy for children. *Proceedings of Interspeech*, 2008, 2643–2646.
- Fridriksson, J., Hubbard, H. I., Hudspeth, S. G., Holland, A. L., Bonilha, L., Fromm, D., & Rorden, C. (2012). Speech entrainment enables patients with Broca's aphasia to produce fluent speech. *Brain*, 135(12), 3815–3829.
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Worsley, K. J., Poline, J.-P., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. J. (1994). Statistical parametric maps in functional imaging: A general linear approach. *Human Brain Mapping*, 2(4), 189–210.
- Guenther, F. H., Ghosh, S. S., & Tourville, J. A. (2006). Neural modeling and imaging of the cortical interactions underlying syllable production. *Brain and Language*, 96(3), 280–301.
- Guenther, F. H., & Vladusich, T. (2012). A neural theory of speech acquisition and production. *Journal of Neurolinguistics*, 25(5), 408–422.
- Hickok, G. (2012). Computational neuroanatomy of speech production. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(2), 135–145.
- Hueber, T. (2013). Ultraspeech-player: Intuitive visualization of ultrasound articulatory data for speech therapy and pronunciation training. *Proceedings of Interspeech (show&tell)*, Lyon, France. (pp. 752–753).

- Indefrey, P., & Levelt, W. J. (2004). The spatial and temporal signatures of word production components. *Cognition*, 92(1–2), 101–144.
- Ito, M. (2005). Bases and implications of learning in the cerebellum-adaptive control and internal model mechanism. *Progress in Brain Research*, 148, 95–109.
- Japee, S., Holiday, K., Satyshur, M. D., Mukai, I., & Ungerleider, L. G. (2015). A role of right middle frontal gyrus in reorienting of attention: A case study. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9, 23.
- Katz, W. F., McNeil, M. R., & Garst, D. M. (2010). Treating apraxia of speech (aos) with EMA supplied visual augmented feedback. *Aphasiology*, 24(6–8), 826–837.
- Lazar, R. M., Speizer, A. E., Festa, J. R., Krakauer, J. W., & Marshall, R. S. (2008). Variability in language recovery after first-time stroke. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 79(5), 530–534.
- Léger, A., Démonet, J.-F., Ruff, S., Aithamon, B., Touyeras, B., Puel, M., . . . Cardebat, D. (2002). Neural substrates of spoken language rehabilitation in an aphasic patient: An fMRI study. *NeuroImage*, 17(1), 174–183.
- Lendrem, W., & Lincoln, N. B. (1985). Spontaneous recovery of language in patients with aphasia between 4 and 34 weeks after stroke. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 48(8), 743–748.
- Marangolo, P., Bonifazi, S., Tomaiuolo, F., Craighero, L., Coccia, M., Altoè, G., . . . Cantagallo, A. (2010). Improving language without words: First evidence from aphasia. *Neuropsychologia*, 48 (13), 3824–3833.
- Mcgurk, H., & Macdonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264(5588), 746–748.
- Meinzer, M., Flaisch, T., Breitenstein, C., Wienbruch, C., Elbert, T., & Rockstroh, B. (2008). Functional re-recruitment of dysfunctional brain areas predicts language recovery in chronic aphasia. *NeuroImage*, 39(4), 2038–2046.
- Menin-Sicard, A., & Sicard, E. (2012). *Intérêt de la visualisation de la position et du mouvement des articulateurs dans la prise en charge des troubles phonologiques*. Paris, France: Les entretiens de Bichat.
- Menin-Sicard, A., Sicard, E., & Bézard, M. (2016). *Intérêt de la visualisation de la position et du mouvement des articulateurs pour améliorer l’intelligibilité : Plate-forme Diadolab*. In N. Joyeux & S. Topouzkhaniyan (eds.), *XVIèmes Rencontres Internationales d’Orthophonie. Orthophonie et technologies innovantes* (pp. 261–289). Paris, France: Ortho Edition.
- Metz-Lutz, M. N., Kremin, H., Deloche, G., Hannequin, D., Ferrand, R. A., Perrier, N. D., . . . Larroque, C. (1991). Standardisation d’un test de dénomination orale: Contrôle des effets de l’âge, du sexe et du niveau de scolarité chez les sujets adultes normaux. *Reviews Neuropsychology*, 1(1), 73–95.
- Musso, M., Weiller, C., Kiebel, S., Müller, S. P., Bülau, P., & Rijntjes, M. (1999). Training-induced brain plasticity in aphasia. *Brain*, 122, 1781–1790.

- Nespoulous, J.-L., Lecours, A. R., & Lafond, D. (1986). MT-86-Protocole Montréal-Toulouse d'examen linguistique de l'aphasie. Isbergues, France: Ortho-Edition.
- Nickels, L. (2002). Therapy for naming disorders: Revisiting, revising, and reviewing. *Aphasiology*, 16(10–11), 935–979.
- Preston, J. L., & Leaman, M. (2014). Ultrasound visual feedback for acquired apraxia of speech: A case report. *Aphasiology*, 28(3), 278–295.
- Saur, D., Lange, R., Baumgaertner, A., Schraknepper, V., Willmes, K., Rijntjes, M., & Weiller, C. (2006). Dynamics of language reorganization after stroke. *Brain*, 129(6), 1371–1384.
- Schlaug, G., Norton, A., Marchina, S., Zipse, L., & Wan, C. Y. (2010). From singing to speaking: Facilitating recovery from nonfluent aphasia. *Future Neurology*, 5(5), 657–665.
- Sparks, R. L., Ganschow, L., Kenneweg, S., & Miller, K. (1991). Use of an orton-gillingham approach to teach a foreign language to dyslexic/learning-disabled students: Explicit teaching of phonology in a second language. *Annals of Dyslexia*, 41(1), 96–118.
- Stoodley, C. J., & Schmahmann, J. D. (2009). Functional topography in the human cerebellum: A meta-analysis of neuroimaging studies. *NeuroImage*, 44(2), 489–501.
- Stoodley, C. J., Valera, E. M., & Schmahmann, J. D. (2012). Functional topography of the cerebellum for motor and cognitive tasks: An fMRI study. *NeuroImage*, 59(2), 1560–1570.
- Sumby, W. H., & Pollack, I. (1954). Visual contribution to speech intelligibility in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 26(2), 212–215.
- Tomasello, R., Garagnani, M., Wennekers, T., & Pulvermüller, F. (2016). Brain connections of words, perceptions and actions: A neurobiological model of spatio-temporal semantic activation in the human cortex. *Neuropsychologia*, 98, 111–129.
- Tzourio-Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., Mazoyer, B., Joliot, M. (2002). Automated Anatomical Labeling of Activations in SPM Using a Macroscopic Anatomical Parcellation of the MNI MRI Single-Subject Brain. *NeuroImage*, 15(1), 273–289.
- Vickery, K. S., Reynolds, V. A., & Cochran, S. W. (1987). Multisensory teaching approach for reading, spelling, and handwriting, Orton-Gillingham based curriculum, in a public school setting. *Annals of Dyslexia*, 37(1), 189–200.

Supplementary Material

Appendix A – Description of the analysis of acoustic parameters for phonemes

Four tiers were used in the Praat software (Boersma & Weenink, 2010): the first one described the phonetic target, the second one included several acoustic landmarks, the third one described sound accuracy and the last tier included comments from the transcriber. For vowels, the first tier provided the beginning and the end of the vowel and the second tier included a landmark for a stable point at which formant frequencies would be later automatically extracted (most often corresponding to vowel midpoint). For consonants, /Ca/ syllables were extracted from the following sequences: /Ca/ /aCa/, /CaCa/ (2 syllables). For occlusives (/p, b, t, d, k, g/), the landmarks on the first tier were the beginning and the end of the /Ca/ syllable, and on the second tier, the time of the burst peak and the onset of voicing. For occlusives with double or triple burst, the largest burst was considered. The onset of voicing was defined as the first indication of voicing, as evident from the voicing bar in the spectrogram, as well as from visible initiation of regular cycle of periodicity in the waveform. The first zero-crossing of that periodic waveform was marked as voicing onset. For fricatives (/f, v, s, z, ʃ, ʒ/), the landmarks on the first tier were the beginning and the end of the /Ca/ syllable, and on the second tier, the onset of the fricative and the onset of vowel /a/. The onset of the fricative was defined as the first appearance of aperiodic noise on the waveform, simultaneously accompanied with friction noise above 2500 Hz from the spectrogram. The onset of the vowel was defined as the beginning of the periodic waveform after the fricative. For each target vowel or consonant, the accuracy tier coded accuracy in the following way. When the phoneme was judged correct, a “1” was keyed in the accuracy tier; when it was judged incorrect, a “0” was keyed. When the phoneme was emergent, i.e. preceded by a different sound before reaching the correct phoneme, an “E” was keyed. When place and manner of articulation were judged correct and only voicing was incorrect (such as when the voiced consonants /b, d, g, z, ʒ, v/ were pronounced as their unvoiced counterparts /p, t, k, s, ʃ, f/ respectively, and vice versa), “V” was keyed. The comment tier allowed the transcriber to provide details about the incorrect production, describing substitutions, emergences, deletions, insertions, intelligibility. When a patient repeated a sequence, only the best produced syllable was kept for analysis. Transcriptions and coding were carried out by a trained native speaker transcriber. Part of the data was re-transcribed by a second trained native speaker, with more than 70% agreement, which is standard in patient audio data transcription. The Praat textgrid files provided by the transcription were fed into custom Praat scripts which derived acoustic parameters for all phonemes that were judged as correct or emergent (“1” or “E” in the accuracy tier).

For vowels, F1 and F2 formant frequencies were obtained using the Burg algorithm for formant detection available in Praat, with a time shift of 10 msec, a 25 msec Gaussian analysis window and a preemphasis filter with a cut on frequency of 50 Hz. The formant search range was 0 - 5500 Hz. F1 and F2 values were subsequently all manually checked and corrected by the experimenters when necessary. An R script (R Development Core Team, 2008) was used to plot formant spaces for each speaker, i.e. F1 as a function of F2 for each repetition of each vowel. Interspeaker variability is usually dealt with by normalizing data (Adank, Smits, & van

Hout, 2004). Normalization procedures were not used, however, because only 3 repetitions were available for each vowel. Therefore, only visual inspection of the patient' formant spaces compared with the ST's was possible. Two features of vowel spaces were considered: intra-vowel distance, which captures the acoustic stability of the productions of the same vowel across several repetitions (and should be small) and inter-vowel distance, which captures the degree of acoustic distance between different vowels (and should be large). For occlusives, VOT was determined by subtracting the instant of the burst from the instant of voicing onset. In French, VOT values are negative for voiced occlusives (/b, d, g/) and are positive for unvoiced occlusives (/p, t, k/). For fricatives, the spectral moments' analysis used algorithms implemented in Praat. An FFT spectrum was made over a 40 msec Hamming window centered at the midpoint of the fricative noise (where the fricative is most stable). The first two spectral parameters were considered in this study: center of gravity (CG) and standard deviation (SD). Center of gravity usually allows to distinguish between alveolar (/s, z/) and post-alveolar (/ʃ, ʒ/) fricatives, while standard deviation allows to distinguish between labiodental (/f,v/) and alveolar and post-alveolar fricative consonants (Li, Edwards, & Beckman, 2009). As shown by Nissen & Fox (2005), in normal condition, center of gravity values are ranked in the following order: alveolar > labiodental > post-alveolar. In normal condition, standard deviation values are expected to be ordered as follows: labiodental > alveolar > post-alveolar.

References

- Adank, P., Smits, R., & van Hout, R. (2004). A comparison of vowel normalization procedures for language variation research. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(5), 3099–3107.
- Boersma, P., & Weenink, D. (2010). Praat: Doing phonetics by computer (Version 6.0.05). Retrieved from <http://www.praat.org/>
- Li, F., Edwards, J., & Beckman, M. E. (2009). Contrast and covert contrast: The phonetic development of voiceless sibilant fricatives in English and Japanese toddlers. *Journal of Phonetics*, 37(1), 111–124.
- Nissen, S. L., & Fox, R. A. (2005). Acoustic and spectral characteristics of young children's fricative productions: A developmental perspective. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(4), 2570–2578.
- R Development Core Team. (2008). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <http://www.R-project.org>

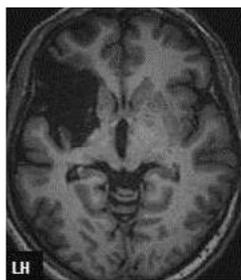


Figure A.1. Anatomical MR (T1) axial slice for the female patient (P1) illustrating the localisation of the post-stroke lesion.

Table A.1. Demographic and clinical information of patient P1.

GENDER, AGE (YEARS)	HANDEDNESS	EDUCATION	STROKE ONSET (YEARS)	ISCHEMIC LESION	LANGUAGE DEFICIT	ASSOCIATED NEUROLOGICAL DEFICIT	SPEECH LANGUAGE THERAPY (DURATION, FREQUENCY)
F,64	Right	Bachelor's Degree	60	Anterior territory of left sylvian artery (superficial and profound)	Broca's aphasia Symptoms: naming deficit, phonetic, phonological and rare semantic paraphasias	Initial: Right hemiplegia Right Hemiparesis (facia-brachial)	First year after stroke: 5 sessions/week; After 1 year: Periodic sessions

Table A.2. Vowel and consonant corpora Ca, aC, aCa, CaCa used for the acoustic evaluation; with orthographic and phonetic notations; C=consonant (/p, t, k, b, d, g, f, v, s, z, ʃ, ʒ, l, m, n, ʁ, ɲ, j/).

Vowel corpus		Consonant corpora				IPA
Orthographic	IPA	Conditions (orthographic)				
		Ca	aC	aCa	CaCa	
hi (<i>oh</i>)	/i/	pas (<i>step</i>)	ape	apa	papa (<i>dad</i>)	/p/
hé (<i>he</i>)	/e/	bas (<i>down</i>)	abe	aba	baba (<i>small cake</i>)	/b/
haie (<i>hedge</i>)	/ɛ/	tas (<i>heap</i>)	ate	ata	tata (<i>aunty</i>)	/t/
ha (<i>ah</i>)	/a/	da (<i>yes</i>)	ade	ada	dada (<i>hobby-horse</i>)	/d/
hue (<i>gee up</i>)	/y/	cas (<i>case</i>)	ake	aka	kaka (<i>poo</i>)	/k/
eux (<i>them</i>)	/ø/	gars (<i>guy</i>)	ague	aga	gaga (<i>doting</i>)	/g/
œuf (<i>egg</i>)	/œ/	fa (<i>fa</i>)	afe	afa	fafa	/f/
où (<i>where</i>)	/u/	va (<i>go</i>)	ave	ava	vava	/v/
oh (<i>oh</i>)	/o/	sa (<i>her</i>)	asse	assa	sasa	/s/
or (<i>gold</i>)	/ɔ/	za	aze	aza	zaza	/z/
an (<i>year</i>)	/ã/	chat (<i>cat</i>)	ache	acha	chacha	/ʃ/
on (<i>one</i>)	/õ/	ja	aje	aja	jaja (<i>wine</i>)	/ʒ/
hein (<i>what</i>)	/ẽ/	la (<i>la</i>)	ale	ala	lala	/l/
		ma (<i>my</i>)	ame	ama	mama	/m/
		na	ane	ana	nana (<i>girl</i>)	/n/
		rat (<i>rat</i>)	are	ara	rara	/ʁ/
		gna	agne	agna	gnagna	/ɲ/
		ya	aye	aya	yaya	/j/

<https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>

Table A.3. Accuracy (%) of each phoneme separately judged by the transcriber as correct, incorrect, emergent or with voicing error, before and after rehabilitation for P1.

	P1							
	Accuracy before SMF (%)				Accuracy after SMF (%)			
	Correct	Emergent	Voicing error	Incorrect	Correct	Emergent	Voicing error	Incorrect
/i/	100	0	NA	0	100	0	NA	0
/y/	100	0	NA	0	100	0	NA	0
/u/	100	0	NA	0	100	0	NA	0
/e/	100	0	NA	0	100	0	NA	0
/ø/	100	0	NA	0	100	0	NA	0
/o/	100	0	NA	0	100	0	NA	0
/ɛ/	66.67	33.33	NA	0	100	0	NA	0
/œ/	100	0	NA	0	100	0	NA	0
/ɔ/	100	0	NA	0	100	0	NA	0
/a/	100	0	NA	0	100	0	NA	0
/ã/	100	0	NA	0	66.67	33.33	NA	0
/ẽ/	100	0	NA	0	100	0	NA	0
/õ/	66.67	33.33	NA	0	100	0	NA	0
ALL VOWELS	94.87	5.13	NA	0	97.44	2.56	NA	0
/b/	0	0	100	0	50	0	33.33	16.67
/d/	33.33	0	50	16.67	66.67	0	16.67	16.67
/g/	0	0	66.67	33.33	0	0	83.33	16.67
/p/	100	0	0	0	66.67	0	16.67	16.67
/t/	50	0	33.33	16.67	100	0	0	0
/k/	50	0	0	50	50	0	0	50
/f/	100	0	0	0	100	0	0	0
/s/	0	0	0	100	28.57	0	0	71.43
/ʃ/	66.67	0	16.67	16.67	50	0	0	50
/v/	0	16.67	66.67	16.67	16.67	0	83.33	0
/z/	0	0	0	100	0	0	14.29	85.71
/ʒ/	16.67	0	83.33	0	16.67	0	50	33.33
/l/	16.67	0	0	83.33	33.33	0	0	66.67
/ʁ/	16.67	0	16.67	66.67	33.33	0	16.67	50
/j/	0	0	0	100	0	0	0	100
/m/	83.33	0	0	16.67	100	0	0	0
/n/	50	0	0	50	66.67	0	0	33.33
/ɲ/	0	0	0	100	16.67	0	0	83.33
ALL CONSONANTS	32.41	0.93	24.07	42.59	43.64	0	17.27	39.09
ALL PHONEMES	48.98	2.04	17.69	31.29	57.72	0.67	12.75	28.86

Effet de la rééducation perceptivo-motrice sur la récupération de la parole chez deux patientes avec aphasie non fluente chronique post-AVC.

Effect of perceptual-motor rehabilitation on speech recovery in two patients with chronic post-stroke aphasia.

Céline Haldin¹, Audrey Acher², Louise Kauffmann^{1,3}, Thomas Hueber³, Emilie Cousin^{1,4}, Pierre Badin³, Pascal Perrier³, Diandra Fabre³, Dominic Pérennou^{1,5}, Olivier Detante^{1,2}, Assia Jaillard⁴, Hélène Loevenbruck¹,
Monica Baciú^{1,CA}

¹Université Grenoble-Alpes, Laboratoire de psychologie et neurocognition, UMR CNRS 5105, 1251 avenue Centrale, 38058 Grenoble cedex 9, France

²CHU Grenoble-Alpes, Pôle psychiatrie, neurologie et rééducation fonctionnelle, Unité neurovasculaire, Grenoble, France

³Université Grenoble-Alpes, GIPSA-lab, UMR CNRS 5216, Grenoble, France

⁴CHU Grenoble-Alpes, IRMaGE, Plate-forme IRM 3T, Grenoble, France

⁵CHU Grenoble-Alpes, Médecine physique et de réadaptation, Grenoble, France

^{CA} LPNC, UMR CNRS 5105, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, monica.baciou@univ-grenoble-alpes.fr

Résumé

Des études portant sur la rééducation de la parole chez des patients aphasiques montrent que l'ajout d'un support visuel, en complément du support auditif utilisé classiquement, peut être utile pour la récupération de la parole. Nous avons évalué une méthode de rééducation basée sur l'intégration perceptivo-motrice (IPM) via le logiciel Ultraspeech player, chez deux patientes présentant une aphasie non fluente chronique post-accident vasculaire cérébral (AVC). L'évaluation de l'effet de cette méthode s'est appuyée sur la comparaison, avant et après rééducation, de données multimodales permettant : une évaluation quantitative des paramètres acoustiques du signal de parole, une évaluation qualitative des performances langagières et scores de langage, et une évaluation neurophysiologique des réseaux recrutés dans des tâches langagières. Nos résultats montrent l'efficacité de l'IPM chez P1 mais un bénéfice limité chez P2. Qualitativement, la dénomination, la lecture, la répétition des mots et le jugement de rimes s'améliorent chez P1, tandis que P2 décline en lecture et jugement de rimes. Quantitativement, P1 améliore sa production de voyelles et consonnes alors que P2 s'améliore pour quelques consonnes et voyelles uniquement. En IRMf, nous observons, chez P1, une modulation de l'activité des réseaux langagiers, en accord avec l'amélioration comportementale du langage ainsi que des patrons de réorganisation fonctionnelle efficaces.

Mots clés : aphasie, langage, AVC, rééducation, IRMf

Abstract

Recent studies on speech rehabilitation in aphasic patients show that a visual articulatory input can be useful for speech recovery, alongside the auditory input conventionally used. Moreover, the persistence of disorders, despite speech-therapy training generally undergone by these patients, emphasizes the need to develop new methods of speech rehabilitation. In this study, we evaluated a method of rehabilitation based on perceptual motor integration (PMI) – via the Ultraspeech player software – in two patients with chronic non-fluent aphasia after stroke. P1 showed a clinical picture of Broca's aphasia, while P2 presented a global aphasia after stroke, which later transformed into a Broca's aphasia. The Ultraspeech player software allows the visualization by the patient of reference tongue movements using ultrasound and video imaging for phonemes. The evaluation of the effect of this method was based on the comparison, before and after reeducation, of multimodal data allowing: a quantitative analysis of the acoustic parameters of the speech signal, a qualitative analysis of language performances and language scores, and a neurophysiological assessment of the anatomo-functional networks recruited in several language tasks. Our results show the efficiency of PMI in P1 but only a limited benefit in P2. In qualitative terms, naming, reading, word repetition, and rhyme detection improved in P1, while P2 declined in reading and rhyme detection. Quantitatively speaking, P1 improved in her production of vowels and consonants whereas P2 only partially improved in the quality of some consonants and vowels. In terms of cerebral correlates, in P1, we observed a modulation of the cerebral activity in language networks, in agreement with the behavioral improvement in speech and language, as well as efficient functional reorganization patterns. We discuss these results in the framework of theoretical models of speech motor control and we describe the conditions of PMI application in patients with non-fluent aphasia.

Keywords: aphasia, non-fluent, speech, PMI, rehabilitation

1. Introduction

L'accident vasculaire cérébral (AVC) est à l'origine d'environ 38 % des cas d'aphasie, dont le type dépend de la localisation cérébrale de la lésion. Un AVC dans le territoire de l'artère cérébrale moyenne gauche avec lésion du gyrus frontal inférieur (GFI) et des structures sous-corticales à gauche est à l'origine des troubles rencontrés dans l'aphasie non fluente ou de Broca [1-3]. Plus spécifiquement, ce type d'aphasie est caractérisé par une altération de la production lexicale, une expression langagière pauvre, une production de phrases courtes, souvent syllabiques et dysprosodiques, avec des déficits morphosyntaxiques et un agrammatisme. Les patients aphasiques sont pris en charge cliniquement afin de retrouver les capacités de parole perdues. Dans ce cadre, la rééducation orthophonique est couramment utilisée et montre des effets positifs, notamment dans les phases aiguës de l'aphasie [4]. L'effet de la rééducation orthophonique, lorsqu'elle est effectuée à raison de moins de cinq heures par semaine, décroît après quelques mois en phase chronique [5]. Dans ce contexte, les nouvelles méthodes de rééducation fondées sur des technologies innovantes (logiciels informatiques, réalité virtuelle, etc.) peuvent apporter un complément ou représentent une alternative novatrice à la rééducation orthophonique traditionnelle. En effet, ce type de rééducation dite traditionnelle se base sur une comparaison des propres productions du patient par rapport à celles de l'orthophoniste et, dans ce cadre, la rééducation se déroule sans support informatique.

La production de parole s'appuie, à la fois, sur des aspects moteurs des articulateurs de parole pour la production effective des gestes produisant les sons de parole, et sur des aspects perceptifs, en lien avec les représentations visuelles et somatosensorielles de ces gestes ainsi qu'avec les représentations auditives des sons associés [4]. Sur la base de cette interaction entre les aspects moteurs et perceptifs (interaction perception-action), il pourrait être envisageable d'améliorer les capacités de production langagière, grâce à des stratégies de réadaptation basées sur l'exécution et l'observation d'actions motrices. En effet, plusieurs études suggèrent que l'utilisation d'un support visuel représentant les articulateurs de parole, en complément des informations auditive et/ou visuelle (miroir ou guides-langues) fournies lors de la rééducation classique, permettrait d'améliorer les performances langagières [4, 6, 7]. Deux types de paradigmes de représentation visuelle des articulateurs peuvent être envisagés :

- le retour lingual, pour visualiser les mouvements de la propre langue du patient ;
- l'illustration linguale, pour visualiser les mouvements linguaux cibles enregistrés au préalable chez un locuteur de référence.

Dans cette étude, nous appliquons le paradigme d'illustration linguale. En effet, la vision (lecture labiale et linguale) est une composante essentielle de la perception de la parole, tel que démontré par l'effet McGurck [8] et le rôle de la perception visuelle dans le bruit [9]. Différentes techniques d'illustration des articulateurs de la parole ont été développées telles que Ultraspeech player [10], les têtes parlantes [6], les têtes virtuelles [11] ou le dispositif Diadolab [12]. À titre d'exemple, les têtes parlantes, qui permettent de visualiser les articulateurs de parole visibles et non visibles (langue, voile du palais, mâchoire, lèvres), ont été utilisées de façon prometteuse dans le cadre de travaux sur le développement du langage (voir [6, 12]). Des études effectuées chez des enfants avec ou sans troubles de la parole de type sigmatisme ont montré que l'utilisation des têtes parlantes permettait l'apprentissage implicite de la lecture linguale et d'améliorer la conscience articulatoire, phonologique

et l'intelligibilité, après un entraînement [6, 11, 12]. Une autre méthode de visualisation des articulateurs de parole peut être utilisée, il s'agit du logiciel Ultraspeech player [10]. Ce logiciel permet aux patients de visualiser des vidéos préenregistrées des mouvements linguaux et labiaux d'un locuteur de référence, généralement un(e) orthophoniste, synchronisées avec le signal audio, pour les différents sons du français (voyelles et consonnes isolées ou combinées). Les vidéos linguales proviennent d'images échographiques obtenues avec une sonde placée sous le menton du locuteur de référence et les vidéos labiales sont obtenues à l'aide d'une caméra placée en face de ses lèvres. Fabre et al. [7] ont montré que l'utilisation du logiciel Ultraspeech player permettait une amélioration des performances chez des enfants présentant des troubles phonologiques (substitution de /tR/ par /kR/), après deux séances de rééducation. Ce logiciel met en œuvre une interaction entre la perception visuelle des gestes articulatoires à accomplir, la perception auditive des sons résultant de ces gestes et l'action articulatoire elle-même produite par le patient. Il implique ainsi l'intégration perceptivo-motrice (IPM) évoquée dans le modèle neurocognitif du contrôle moteur de la production orale du langage, proposé par Hickok en 2012. Hickok postule en effet l'existence de deux boucles, une auditivo-motrice et une autre somato-sensorimotrice, impliquant des représentations auditives et somatosensorielles pour produire des sons de parole [13]. Grâce à l'utilisation d'Ultraspeech player, le patient peut bénéficier d'informations cibles de nature multisensorielle et peut ainsi intégrer les informations visuelles (articulatoires) et auditives cibles, fournies par le logiciel, avec les informations somesthésiques/proprioceptives liées à ses propres productions.

L'objectif de cette étude est d'illustrer, à travers deux cas de patients présentant une aphasie non fluente chronique, l'efficacité d'un programme novateur de rééducation, fondé sur l'IPM en utilisant le logiciel Ultraspeech player. Nous avons évalué l'effet de la rééducation sur l'amélioration de la parole, en comparant les performances des patients, avant et après la rééducation, avec une démarche multimodale fondée sur :

- l'évaluation qualitative des scores de langage issus du bilan orthophonique, afin de déterminer si la rééducation permet d'améliorer les performances au niveau du langage oral ;
- l'analyse quantitative du signal de parole et l'analyse détaillée des paramètres acoustiques afin d'évaluer si la rééducation permet d'améliorer les performances acoustiques de parole ;
- l'évaluation en IRMf des réseaux cérébraux recrutés par diverses tâches langagières afin d'identifier les patrons de réorganisation anatomo-fonctionnelle efficaces, en nous appuyant sur le modèle de Hickok [13] pour l'interprétation des activations cérébrales.

2. Matériel et Méthode

2.1. Participants

Les données démographiques et cliniques des deux patientes (patiente 1 [P1] et patiente 2 [P2]) sont présentées dans le tableau 1 et sur la figure 1. P1 présente une lésion au niveau du lobe frontal gauche (GFI) incluant des structures sous-corticales (ganglions de la base) ; il s'agit d'une lésion typique rencontrée lors d'une aphasie de Broca post-AVC (figure 1A). P2 présente une lésion plus large et localisée, au-delà de la région frontale, au niveau temporo-pariétal, plus typique d'une aphasie globale (figure 1B), même si la symptomatologie au moment de l'évaluation a été celle d'une aphasie de Broca. Cette étude a été approuvée par le comité d'éthique local (CPP - ISIS 07PHR04 - n°DCIC/06/25).

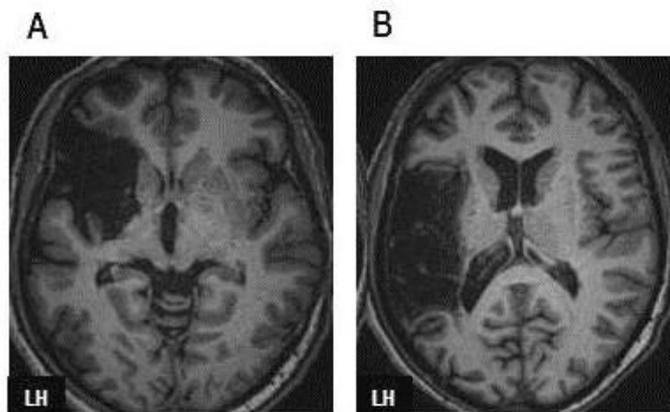


Figure 1 : Images IRM (T1) obtenues chez les patientes P1 (A) et P2 (B) pour visualiser la localisation de la lésion post-AVC au niveau de l’hémisphère gauche : frontale et ganglions de la base pour P1 et fronto-temporo-pariétale pour P2.

Tableau 1 : Données démographiques et cliniques des deux patientes. Les données suivantes sont mentionnées : sexe (F=Femme), âge au moment de l’étude, niveau d’étude, âge de survenue de la lésion, cause de la lésion, déficits langagiers et autres déficits neurologiques associés, informations concernant la rééducation orthophonique suivie par les patientes.

	PATIENTE 1	PATIENTE 2
SEXE, ÂGE	F, 64 ans	F, 52 ans
PRÉFÉRENCE MANUELLE	Droitière	Droitière
NIVEAU D’ÉTUDES	Bac + 3	Bac
ÂGE DE SURVENUE DE LA LÉSION	61 ans	48 ans
CAUSE ET LOCALISATION DE LA LÉSION	AVC au niveau du territoire antérieur de l’artère sylvienne gauche (superficiel et profond)	AVC au niveau de l’artère sylvienne gauche (superficiel)
DÉFICITS LANGAGIERS	Initialement : Aphasie de Broca Actuellement : Aphasie de Broca Symptômes : Déficit en dénomination, paraphasies phonétiques, phonologiques et sémantiques (rares)	Initialement : Aphasie globale Actuellement : Aphasie de Broca Symptômes : Anomie, paraphasies phonétiques et phonologiques
AUTRES DÉFICITS ASSOCIÉS	Initialement : hémiplégie droite (facio-brachiale) et hémiparésie droite (facio-brachiale)	Aucun déficit moteur
RÉÉDUCATION ORTHOPHONIQUE CLASSIQUE (DURÉE ET FRÉQUENCE)	Durant la première année : 5 séances par semaine Après 1 an : séances périodiques	Durant la première année : 5 séances par semaine Après 1 an : séances périodiques

2.2. Rééducation de la parole

Les patientes ont suivi, en plus de la rééducation orthophonique traditionnelle, une rééducation avec le logiciel Ultraspeech player (figure 2). Durant les séances de rééducation, elles étaient placées face à un ordinateur sur l’écran duquel elles visualisaient des images échographiques préenregistrées des mouvements linguaux d’un sujet normo-locuteur, synchronisées avec le signal audio, également préenregistré, pour différents phonèmes du français. Après chaque présentation synchrone du son et

des vidéos, les patientes devaient répéter le son entendu. Les phonèmes ciblés étaient les voyelles /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ā, ã, ã/ et les consonnes /p, t, k, b, d, g, f, v, s, z, ʃ, ʒ, l, m, n, ʁ/ produites de façon isolées ou combinées (voyelle-consonne-voyelle). Après vérification des capacités de compréhension des patientes (voir bilan orthophonique), l'orthophoniste a présenté le logiciel aux patientes en décrivant les mouvements de la langue affichés, pour bien situer la racine, le dos et la pointe de la langue, ainsi que le contour du palais. Après cette première séance d'initiation, P1 a effectué successivement 13 séances en autonomie, et trois séances accompagnées par l'orthophoniste (deux fois 20 minutes et une fois 10 minutes). P2 a effectué neuf séances en autonomie. La durée d'une séance a été d'environ 45 minutes.

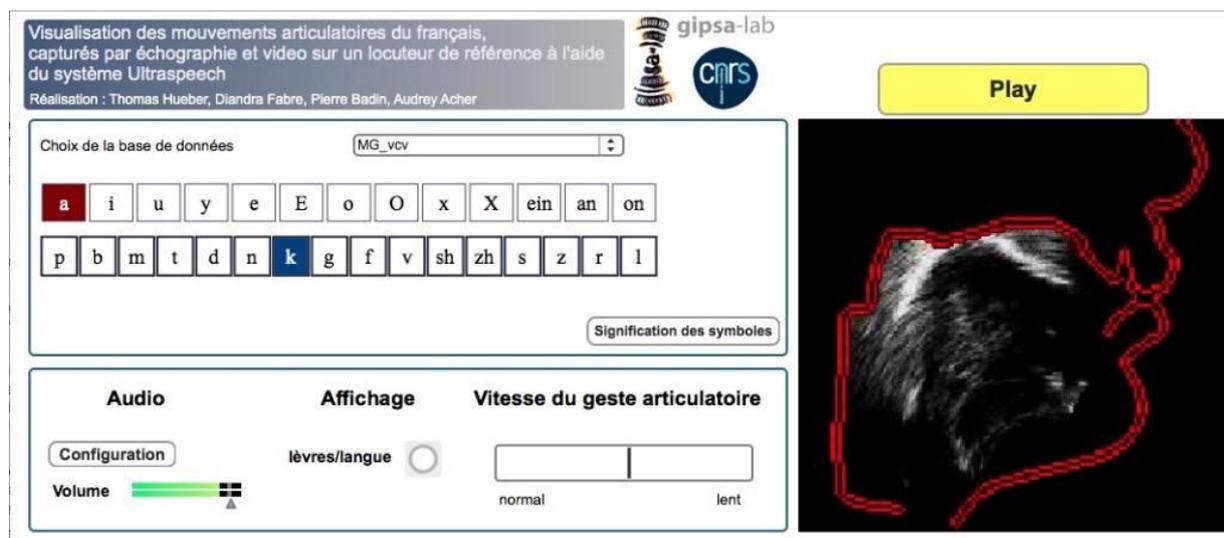


Figure 2 : Illustration de l'interface du logiciel Ultraspeech player [10] qui permet au patient de visualiser une séquence d'images échographiques préenregistrées des mouvements de la langue, lors de la production de phonèmes/syllabes par une orthophoniste (son et images échographiques synchronisés). En rouge : contour sagittal du conduit vocal, avec les lèvres à droite. Le tracé blanc à l'intérieur du conduit vocal représente le contour externe de la langue. La séquence vidéo est arrêtée sur le point de contact du dos de la langue avec l'arrière du palais, lors de la production de la séquence /aka/.

2.3. Evaluation expérimentale

2.3.1. Acoustique

Les performances sur le plan acoustique ont été évaluées avant et après rééducation, grâce à une tâche de répétition de monosyllabes ou bisyllabes simples, sémantisées dans la mesure du possible et qui incluaient toutes les consonnes et voyelles du français (e.g. « où » /u/, « gars » /ga/, « tata » /tata/). Les patientes devaient répéter la séquence produite par l'orthophoniste, celle-ci étant également présentée à l'écrit sur une feuille de papier. Trois répétitions ont été réalisées. La première répétition comprenait des voyelles isolées (V = /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ə, ā, ã, ã/) et des consonnes (C = /p, t, k, b, d, g, f, v, s, z, ʃ, ʒ, l, m, n, ʁ, ɲ, j/) suivies de /a/ en position initiale (Ca et CaCa), médiane (aCa) et finale (aC). Les deuxième et troisième répétitions comprenaient les voyelles seules et les consonnes en position initiale.

2.3.2. Orthophonie

Un bilan orthophonique (tableau 2) a été réalisé chez les patientes, avant et après rééducation. Ce bilan comprend plusieurs tâches pour évaluer :

- la production lexicale grâce à une épreuve de dénomination d'images (DO80 [14]) ;
- l'accès au lexique phonologique de sortie (buffer phonologique) et à l'encodage phonétique grâce à la répétition des mots et des logatomes ;
- la dénomination de lettres écrites grâce à la lecture des lettres, syllabes et mots ;
- l'accès au lexique phonologique d'entrée grâce au jugement de rimes [15] ;
- la disponibilité lexicale en lien avec les fonctions exécutives grâce aux épreuves de fluence verbale alphabétique et catégorielle ;
- la mémoire de travail avec la répétition de phrases ;
- la compréhension du langage avec la désignation d'images et l'évaluation de la morphosyntaxe (MT86 [16]) ;
- les praxies bucco-faciales réalisées sur demande (ordre oral) ou, en cas d'échec, sur imitation (un exemple d'ordre : « Ouvrir la bouche »).

2.3.3. IRM fonctionnelle

Avant et après rééducation, les patientes ont réalisé un examen en IRM fonctionnelle (IRMf) comprenant deux tâches, répétition de syllabes (RS) et détection de rimes (DR), permettant de tester le fonctionnement des boucles auditivo- et somato-sensorimotrices telles que postulées par le modèle de Hickok [13]. Pendant la RS, les patientes devaient répéter 20 monosyllabes simples sémantisés présentés en modalité auditive. Ces monosyllabes étaient composés de dix voyelles orales /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/ et de dix consonnes /t, d, k, g, s, z, ʃ, ʒ, l, v/ suivies de /a/. Nous avons utilisé des monosyllabes sémantisés plutôt que des syllabes sans signification, afin de créer un contexte facilitateur et plus écologique, pour amorcer la production des mots et observer des capacités de production proche de la vie réelle [17]. Les réponses orales des patientes ont été enregistrées grâce à un microphone compatible IRM (FOMRITM III, version 1.2). La condition contrôle associée à cette tâche était un bruit blanc ne requérant aucune réponse. Pour la DR, les patientes devaient juger si les paires de mots, présentés en modalité visuelle, rimaient ou non. La moitié des paires étaient phonologiquement et orthographiquement congruentes (ex. : alphabet-chalet) et l'autre moitié, incongruentes (ex. : allumette-tonnerre) [15]. Les mots étaient présentés par paires (20 paires), l'un en dessous de l'autre et écrits en noir. Si les mots rimaient, les patientes devaient appuyer sur une clé de réponse. La condition contrôle pour cette tâche était représentée par deux lignes horizontales, que les patientes devaient simplement regarder. Le logiciel E-Prime (Psychology Software Tools, Pittsburgh, PA) a été utilisé afin de présenter les stimuli lors de ces deux tâches et d'enregistrer les réponses manuelles pendant la DR. Les deux tâches étaient présentées dans un paradigme de type bloc qui alternait cinq périodes de tâche et de contrôle. Chaque condition (tâche, contrôle) durait 24 secondes et quatre stimuli par condition étaient présentés. La durée totale pour les deux acquisitions était de dix minutes.

Ces protocoles ont été conçus de façon à être plus facilement réalisables par les patients, qui présentent en général des performances plus faibles que les sujets contrôles. Ainsi, en conséquence de ces conditions non optimalement contrôlées, les activations observées ne représentent pas exclusivement les processus langagiers étudiés mais reflètent autant les bonnes que les mauvaises réponses.

Tableau 2 : Scores obtenus par P1 (à gauche) et P2 (à droite) pour les différentes tâches du bilan orthophonique, avant et après la rééducation. Ce bilan comprend des tâches de répétition, lecture à haute voix, mémoire de travail, fluence verbale, accès aux concepts et compréhension orale, pratiques bucco-faciales et jugement de rimes. Afin d'évaluer l'évolution des compétences langagières entre avant et après la rééducation, nous avons évalué un score de langage, nommé indice d'évaluation (IE). Ce score est de -1 dans le cas où la patiente a donné une réponse correcte avant et incorrecte après la rééducation ; +1 si la réponse est incorrecte avant et correcte après la rééducation ; et 0 si la réponse est incorrecte avant et après la rééducation ou correcte avant et après la rééducation. L'indice d'évolution (IE) global pour chaque tâche est présenté dans le tableau et montre l'amélioration (en bleu) ou le déclin (en rouge) pour chacune des tâches.

	PATIENTE 1			PATIENTE 2		
	AVANT RÉÉDUCATION	APRÈS RÉÉDUCATION	INDICE D'ÉVALUATION (IE)	AVANT RÉÉDUCATION	APRÈS RÉÉDUCATION	INDICE D'ÉVALUATION (IE)
RÉPÉTITION	Syllabes : 18/30 Mots simples : 12/20 Mots complexes : 6/20	Syllabes : 21/30 Mots simples : 13/20 Mots complexes : 9/20	+3 ; +1 ; +3 (+7)	Syllabes : 1/30 Mots simples : 5/20 Mots complexes : 0/20	Syllabes : 4/30 Mots simples : 4/20 Mots complexes : 0/20	+3 ; -1 ; 0 (+2)
LECTURE	Lettres, sons : 13/20 Syllabes : 6/20 Mots réguliers : 7/10 Mots irréguliers : 6/10	Lettres, sons : 17/20 Syllabes : 6/20 Mots réguliers : 5/10 Mots irréguliers : 6/10	+4 ; 0 ; -2 ; 0 (+2)	Lettres, sons : 7/20 Syllabes : 7/20 Mots réguliers : 3/10 Mots irréguliers : 2/10	Lettres, sons : 4/20 Syllabes : 10/20 Mots réguliers : 2/10 Mots irréguliers : 2/10	-3 ; 3 ; -1 ; 0 (-1)
DÉNOMINATION DO80	67/80	69/80	+2	21/80	31/80	+10
MÉMOIRE DE TRAVAIL (RÉPÉTITION DE PHRASES)	10/10	10/10	Normal	0/10	0/10	Trouble en mémoire de travail
FLUENCE VERBALE (2 MINUTES)	Catégorielle : 8 Alphabétique : 7	Catégorielle : 9 Alphabétique : 3	+1 ; -4 (-3)	Catégorielle : 4 Alphabétique : 0	Catégorielle : 3 Alphabétique : 1	-1 ; +1 (0)
ACCÈS AUX CONCEPTS ET COMPRÉHENSION ORALE	Désignation d'images : 34/36 Morphosyntaxe (MT86) : 7/8	Désignation d'images : 36/36 Morphosyntaxe (MT86) : 8/8	+2 ; +1 (+3)	Désignation d'images : 35/36 Morphosyntaxe (MT86) : 7/8	Désignation d'images : 36/36 Morphosyntaxe (MT86) : 7/8	+1 ; 0 (+1)
PRAXIES BUCCO-FACIALES	15/15 (dont 3 sur imitation)	15/15 (dont 2 sur imitation)	Normal	15/15 (dont 4 sur imitation)	15/15 (dont 3 sur imitation)	Normal
JUGEMENT DE RIMES	26/40	33/40	+7	32/40	28/40	-4
SYNTHÈSE DES SYMPTOMES ASSOCIÉS AU LANGAGE	- Déficit en répétition et en lecture avec paraphrasies phonémiques, phonologiques et sémantiques plus rarement (altération du lexique phonologique de sortie, de l'encodage et du buffer phonologique de sortie) - Déficit en dénomination - Diminution significative de la fluence verbale - Préservation de l'accès au concept et de la compréhension du langage - Déficit significatif du lexique phonologique d'entrée - Pas d'apraxie bucco-faciale	- Déficit en répétition et en lecture avec paraphrasies phonémiques, phonologiques et sémantiques plus rarement (altération du lexique phonologique de sortie, de l'encodage et du buffer phonologique de sortie) - Déficit en dénomination - Diminution significative de la fluence verbale - Préservation de l'accès au concept et de la compréhension du langage - Déficit significatif du lexique phonologique d'entrée - Pas d'apraxie bucco-faciale	→ Amélioration	- Déficit en répétition et en lecture avec paraphrasies phonémiques, phonologiques (altération du lexique phonologique de sortie, de l'encodage et du buffer phonologique de sortie) - Déficit en dénomination significatif - Diminution significative de la mémoire de travail - Diminution significative de la fluence verbale - Préservation de la compréhension orale - Déficit du traitement phonologique - Pas d'apraxie bucco-faciale	→ Amélioration	

2.4. Acquisition IRMf

Les acquisitions IRMf ont été réalisées avec l'imageur 3T corps entier (Philips Achieva, TX) sur la plateforme IRMaGe du CHU de Grenoble. Une séquence d'acquisition FE-EPI pondérée en T2* a été utilisée. Cinquante-deux coupes adjacentes, parallèles au plan bi-commissural et d'une épaisseur de 2,75 mm chacune, ont été acquises en mode séquentiel. La taille des voxels a été de 2,5×2,5×3 mm avec un champ de vue de 220×220×156 mm et encodés par une matrice d'acquisition de 88×85. Les autres paramètres étaient : TR=3s, TE=30ms et l'angle de bascule = 80°. Une image anatomique pondérée en T1 avec haute résolution spatiale (1×1 ×1 mm) a été également acquise.

2.5. Analyse de données

2.5.1. Données acoustiques

Le signal acoustique obtenu avant et après rééducation a été enregistré à 44,1 kHz et rééchantillonné à 12 kHz pour faciliter l'analyse acoustique. Les analyses réalisées ont concerné les répétitions des voyelles seules et des consonnes, en position initiale et médiane. Les données ont été traitées avec le logiciel Praat [18]. Nous avons annoté les phonèmes comme corrects, incorrects, émergents (la prononciation passe par un autre phonème avant de produire le phonème cible, e.g. pour produire un /v/ la patiente peut initialement produire un [f] qui se transforme progressivement en [v]) et avec erreur de voisement (le mode et le lieu d'articulation sont corrects mais le voisement est incorrect, e.g. production de /t/ au lieu de /d/). Les analyses nous ont permis d'extraire, pour les phonèmes corrects ou émergents, les paramètres acoustiques, notamment les formants F1 et F2 pour les dix voyelles orales /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/ ; et les deux premiers moments spectraux (Centre de Gravité, CG et Ecart Type, ET) pour les six consonnes fricatives /f, v, s, z, ʃ, ʒ/. Pour rappel, les formants représentent les zones de fréquences les plus intenses du spectre vocalique, et les moments spectraux décrivent les propriétés spectrales du bruit de friction présent lors de la production des consonnes fricatives. Les valeurs de formants ont été obtenues à l'aide d'un script Praat permettant de détecter les formants (entre 0 et 5500 Hz) avec un pas de 0,01 s, une fenêtre gaussienne d'analyse de 0,025 s et une pré-emphase de 50 Hz.

Un script R [19] nous a permis de tracer les trapèzes vocaliques (représentation graphique de F1 en fonction de F2) pour les productions de l'orthophoniste et de chacune des patientes, avant et après rééducation. Le fait que l'on dispose uniquement de trois répétitions par voyelle ne nous a pas permis d'effectuer une normalisation des données [20]. Les deux paramètres suivants ont été utilisés dans nos analyses :

- distance intervoyelles qui montre la différence acoustique entre les voyelles (en condition normale, cette valeur doit être importante) ;
- distance intravoyelle qui indique la stabilité acoustique des différentes répétitions d'une même voyelle (en condition normale, cette valeur doit être faible).

Pour les consonnes fricatives, un script Praat nous a permis d'extraire les moments spectraux, en prenant une fenêtre de 40 ms centrée sur le milieu du bruit de friction engendré par la consonne. Nous nous sommes intéressés aux deux premiers moments spectraux, le CG qui permet de distinguer les fricatives alvéolaires (/s, z/) des post-alvéolaires (/ʃ, ʒ/), et l'ET qui distingue les fricatives labiodentales (/f, v/) des alvéolaires et post-alvéolaires [21]. Classiquement, les valeurs du CG doivent

suivre l'ordre suivant : alvéolaire>labiodentale>post-alvéolaire, tandis que les valeurs d'ET doivent suivre cet ordre : labiodentale > alvéolaire > post-alvéolaire [22]. Enfin, un script R nous a permis d'évaluer les performances des patientes grâce aux pourcentages des réponses correctes, incorrectes, émergentes et avec erreur de voisement pour les voyelles et/ou les consonnes.

2.5.2. Orthophonie

Les patientes ont été suivies par différent(e)s orthophonistes lors de leur rééducation, avant d'être incluses dans ce protocole. Les évaluations et programmes de rééducation orthophonique antérieurs à notre étude n'ont pas été strictement les mêmes selon les patientes. Ainsi, nous n'avons pas pu bénéficier, pour une épreuve donnée, de plusieurs mesures permettant des comparaisons statistiques sur l'évolution de l'aphasie à travers les patientes [23]. En effet, pour chaque épreuve de langage, nous disposons de deux mesures, avant et après rééducation, ce qui ne nous a permis d'évaluer les progrès en production du langage que de façon qualitative. Ainsi, nous avons calculé un indice d'évolution (IE) des performances langagières, fondé sur la comparaison des scores obtenus avant et après la rééducation, pour chaque item de chacun des tests du bilan orthophonique (tableau 2). Cet indice peut prendre la valeur de -1 si la patiente a donné une réponse correcte avant mais incorrecte après la rééducation, +1 si la réponse était incorrecte avant et correcte après la rééducation, et 0 si la réponse était incorrecte avant et après la rééducation ou correcte avant et après rééducation. De cette façon, cet indice rend compte de l'amélioration ou du déclin des performances des patientes, pour chacune des tâches du bilan orthophonique.

2.5.3. IRM fonctionnelle

L'analyse des données d'IRMf a été réalisée en utilisant le modèle linéaire général avec le logiciel SPM12 (Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, Royaume-Uni, www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm) utilisé sous MATLAB (Mathworks Inc., Natick, MA, États-Unis). Les analyses IRMf ont été réalisées en deux étapes : prétraitement des données et analyses statistiques. Le prétraitement spatial des données est décrit en détail dans nos travaux précédents [4].

Analyse statistique des données.

Les analyses statistiques ont été réalisées sur les données prétraitées pour chaque tâche (DR et RS) séparément. Pour chaque tâche, nous avons déclaré deux régresseurs d'intérêt (tâche et contrôle), convolués avec la réponse hémodynamique canonique, avec les dérivés spatiales et temporelles associées (trois *hemodynamic response function* [HRF]). Les paramètres de mouvements ainsi que les paramètres comportementaux ont été modélisés comme des régresseurs de non-intérêt. L'objectif étant de prendre en compte la contribution de ces régresseurs dans le signal BOLD, sans tester directement leur effet. Ils permettent donc d'avoir une meilleure estimation du signal et de l'erreur résiduelle. Le modèle linéaire général a été utilisé pour générer des paramètres estimés d'activation pour chaque voxel, chaque condition et chaque patiente. Pour chaque condition, RS et DR, nous avons calculé :

- les contrastes principaux tâche versus contrôle pour identifier les réseaux langagiers recrutés pour chacune des tâches ;
- les contrastes avant versus après rééducation afin d'identifier l'effet de la rééducation sur les réseaux du langage.

3. Résultats

3.1. Acoustiques

Les performances des patientes pour les répétitions de phonèmes sont présentées dans le tableau 3. P1 améliore ses performances après rééducation, puisque le pourcentage de réponses correctes augmente, avec 57,72 % de phonèmes corrects après rééducation (97,44 % pour les voyelles et 43,64 % pour les consonnes) contre 48,98 % avant (94,87 % pour les voyelles et 32,41 % pour les consonnes). Cette augmentation est associée à une diminution du pourcentage d’erreurs de voisement pour les consonnes (de 24,07 % à 17,27 %), suggérant un meilleur contrôle du larynx après rééducation. On observe également une diminution du pourcentage de répétitions incorrectes, indiquant un meilleur contrôle du lieu et du mode d’articulation (position de la langue). Enfin, le pourcentage de phonèmes émergents diminue (de 2,04 % à 0,67 %), suggérant une amélioration du contrôle dynamique des articulateurs du langage lors de la production des phonèmes. Pour P2, on observe une augmentation du pourcentage de voyelles correctes après rééducation (de 48,72 % à 50 %), même si le pourcentage de consonnes correctes diminue (de 55,05 % à 48,18 %). Le pourcentage d’erreurs de voisement et de phonèmes émergents reste inchangé tandis que le pourcentage de phonèmes incorrects augmente, ce qui suggère une absence d’amélioration du contrôle laryngé, du mode et du lieu de l’articulation ainsi que du contrôle dynamique des articulateurs du langage lors de la production des phonèmes.

Tableau 3 : Pourcentage de phonèmes (voyelles : /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ, ã, ã̃, ã̃/ ; consonnes : /p, t, k, b, d, g, f, v, s, z, ʃ, ʒ, l, m, n, ŋ/) jugés par le transcripteur comme correct, incorrect, émergent, ou avec une erreur de voisement. Les pourcentages sont indiqués pour les voyelles seules, consonnes seules ou les deux. Ces pourcentages permettent de rendre compte des performances de P1 (en haut) et P2 (en bas), avant et après rééducation.

PATIENTE 1								
	Performances avant rééducation (%)				Performances après rééducation (%)			
	Correct	Emergent	Erreur de voisement	Incorrect	Correct	Emergent	Erreur de voisement	Incorrect
Voyelles	94,87	5,13	NA	0,00	97,44	2,56	NA	0,00
Consonnes	32,41	0,93	24,07	42,59	43,64	0,00	17,27	39,09
Phonèmes	48,98	2,04	17,69	31,29	57,72	0,67	12,75	28,86

PATIENTE 2								
	Performances avant rééducation (%)				Performances après rééducation (%)			
	Correct	Emergent	Erreur de voisement	Incorrect	Correct	Emergent	Erreur de voisement	Incorrect
Voyelles	48,72	15,38	NA	35,90	50,00	7,89	NA	42,11
Consonnes	55,05	0,00	26,61	18,35	48,18	2,73	26,36	22,73
Phonèmes	53,38	4,05	19,59	22,97	48,65	4,05	19,59	27,70

Afin d’évaluer plus finement les productions correctes des patientes, nous avons extrait les paramètres acoustiques des voyelles orales et des consonnes fricatives correctes et émergentes. Nous avons tracé les trapèzes vocaliques pour l’orthophoniste et les patientes (figures 3 et 4). Cette comparaison (entre orthophoniste et patientes) est appropriée, étant donné que les locutrices ont des caractéristiques de conduit vocal similaires. Pour l’orthophoniste (figure 3), nous avons obtenu des résultats typiques

suggérant une bonne distinction entre les voyelles (grande distance intervoyelles) et une stabilité acoustique entre les répétitions d'une même voyelle (faible distance intravoyelle). Les résultats obtenus chez P1 (figure 4A) montrent une augmentation de la reproductibilité et une meilleure distinction des voyelles /i, y/ (diminution de la distance intravoyelle et augmentation de la distance intervoyelles) après rééducation. Ceci suggère un meilleur contrôle de l'arrondissement des lèvres. On observe également une meilleure distinction entre /o/ et /u/ (augmentation de la distance intervoyelles) après rééducation, ce qui suggère un meilleur contrôle de la position postérieure de la langue. Cependant, les résultats montrent également une dégradation de la reproductibilité entre les répétitions des voyelles /œ, e, a/ (augmentation de la distance intravoyelle) après rééducation, ce qui suggère un contrôle encore imparfait de la position de la langue. Pour P2 (figure 4B), les résultats nous montrent une amélioration de la production des voyelles /i, y, e/ avec une meilleure reproductibilité entre les répétitions (diminution de la distance intervoyelles) et une meilleure distinction entre ces voyelles (augmentation de la distance intravoyelle). Ceci suggère un meilleur contrôle de l'arrondissement des lèvres et un meilleur positionnement antérieur de la langue. Les résultats montrent aussi une meilleure reproductibilité entre les répétitions de /a/ (diminution de la distance intervoyelles). Cependant, il n'y a pas d'amélioration pour /o, u/ avec un chevauchement entre ces voyelles, suggérant un mauvais contrôle postérieur de la langue. Certaines voyelles ne sont pas produites avant et/ou après rééducation, tel que le /ø/ qui n'est produit ni avant ni après rééducation et /œ/ produit avant mais pas après rééducation, suggérant un contrôle imparfait de la langue chez P2.

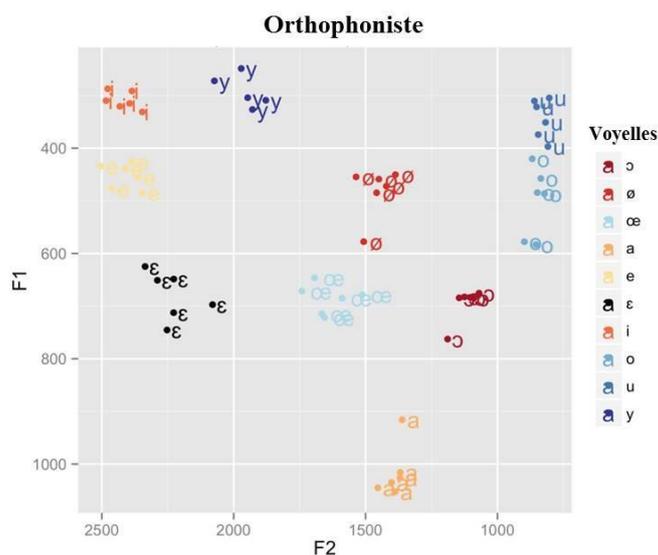


Figure 3 : Trapèze vocalique représentant les valeurs de formant F1 en fonction de F2, pour les productions vocaliques de l'orthophoniste, avant et après la rééducation de P1. Les valeurs des formants correspondent aux voyelles orales /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/ isolées à partir des répétitions de l'orthophoniste (6 répétitions pour chaque voyelle sauf /y/ qui a été répétée 5 fois). Ce trapèze permet d'identifier la position de la langue dans la cavité buccale selon les axes antéro-postérieur (F2) et haut-bas (F1). On observe sur l'ensemble des répétitions une distance intra-voyelle faible (bonne reproductibilité des répétitions) et distance inter-voyelles élevée (bonne distinction des voyelles entre elles).

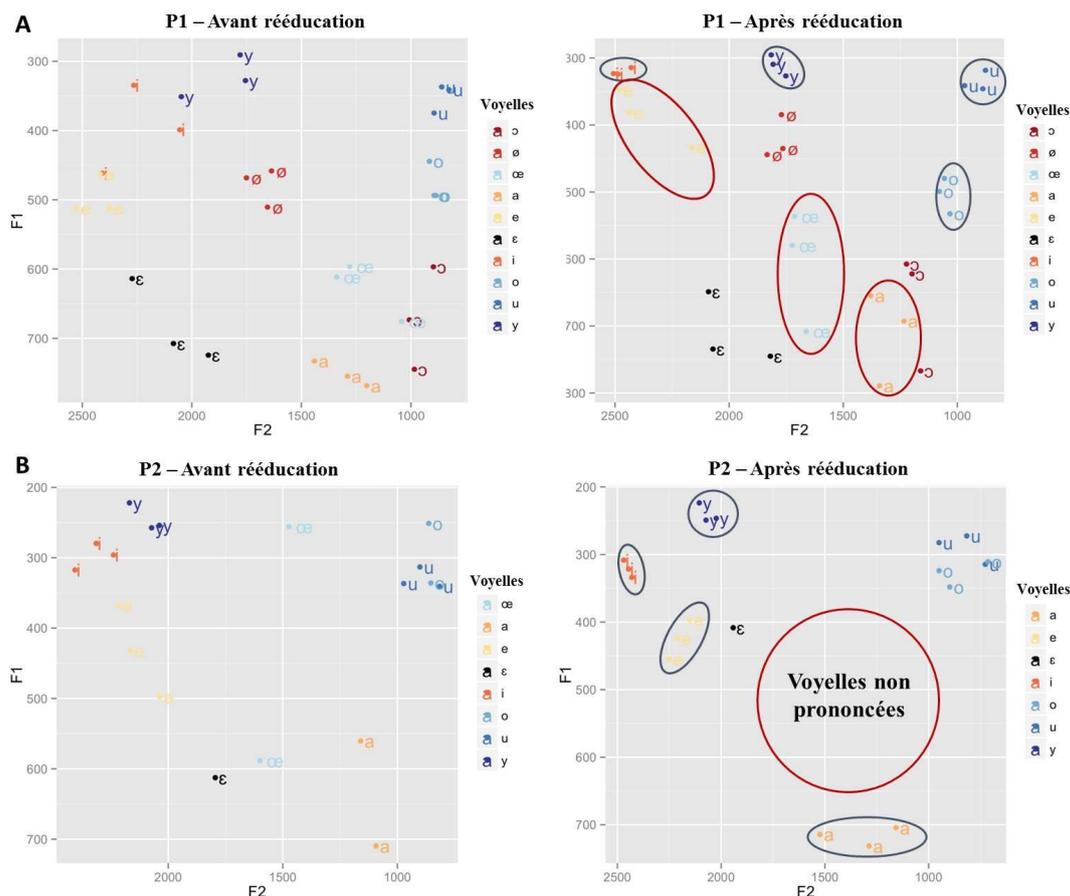


Figure 4 : Trapèze vocalique représentant les valeurs de formant F1 en fonction de F2, obtenu à partir des répétitions de P1 (A) et P2 (B) (3 répétitions avant et 3 répétitions après rééducation de chaque voyelle). Seuls les formants des répétitions jugées correctes ou émergentes par le transcripneur, ont été représentés graphiquement. Les voyelles pour lesquelles on observe une amélioration après rééducation, sont entourées par une ellipse **bleue** ; les voyelles avec prononciation détériorée sont entourées par une ellipse **rouge**.

Pour les consonnes fricatives correctes et émergentes, les valeurs des moments spectraux sont représentées par des diagrammes en boîtes à moustache (figure 5). Les résultats de P1 (figure 5a-d) nous montrent que la patiente ne peut pas produire les fricatives alvéolaires avant rééducation alors qu'elle en est capable après rééducation, avec deux répétitions correctes de /s/ sur six. Lorsque le /s/ est produit de façon incorrecte, P1 produit en majorité la fricative post-alvéolaire [ʃ] (mode d'articulation correct mais lieu d'articulation incorrect, la langue étant trop en arrière), mais aussi [t, d] (lieu d'articulation correct mais mode d'articulation incorrect) et [f] (mode d'articulation correct mais lieu d'articulation incorrect). De plus, au lieu de prononcer /z/, P1 prononce [ʃ] ou [ʒ] lieu d'articulation correct mais mode d'articulation incorrect, la langue est trop en arrière). Les valeurs du CG (figure 5a, b) indiquent que P1 distingue bien /s/ de /ʃ/ après rééducation (CG : alvéolaires > post-alvéolaires). Les valeurs d'ET (figure 5 c, d) indiquent que P1 distingue mieux /f, v/ de /s, z/ et /ʃ, ʒ/ après rééducation (ordre typique : labiodentales > alvéolaires > post-alvéolaires). Pour P2 (figure 5e-h), les résultats indiquent qu'elle ne peut pas produire les fricatives post-alvéolaires ni avant ni après rééducation. En effet, au lieu de produire /ʃ, ʒ/, P2 produit [s] (mode d'articulation correct mais lieu

d'articulation incorrect, la langue étant placée trop en arrière). Les valeurs du CG (figure 5e, f) indiquent que P2 produit correctement les fricatives alvéolaires et labiodentales, avant et après rééducation. Cependant, les valeurs d'ET (figure 5g, h) mettent en évidence une production atypique des fricatives alvéolaires et post-alvéolaires (les valeurs ne suivent pas l'ordre typique), suggérant une production atypique du /f/.

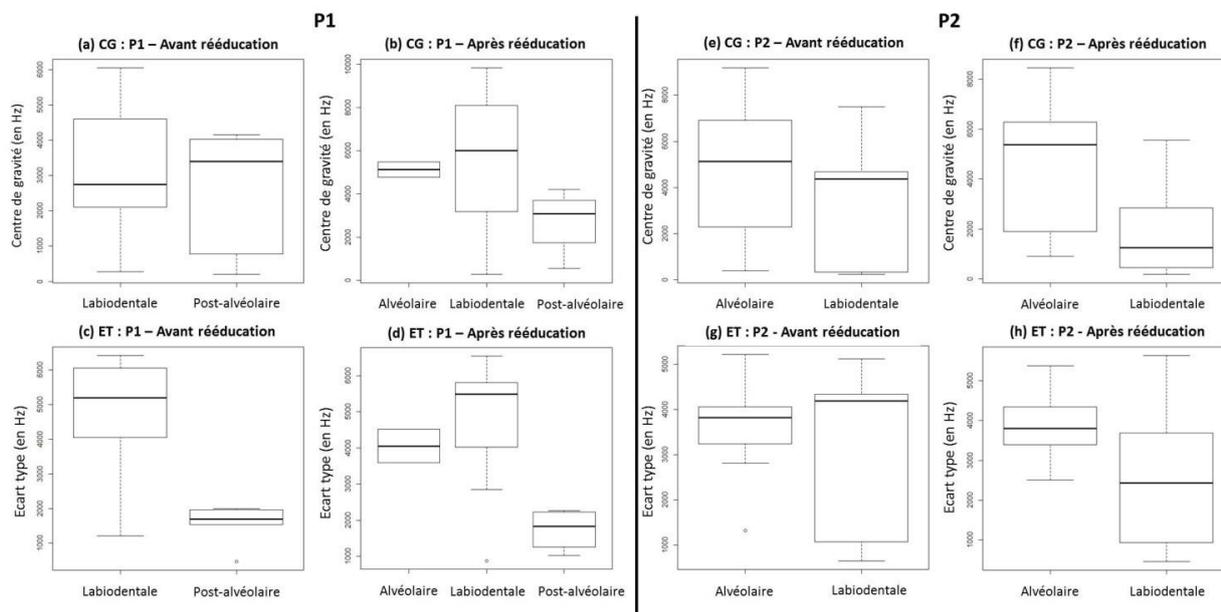


Figure 5 : Diagrammes en boîtes à moustache représentant les valeurs des deux premiers moments spectraux (centre de gravité, CG et écart type, ET) avant et après rééducation, pour P1 (a-d) et pour P2 (e-h). Les moments spectraux sont déterminés lors de la production des consonnes fricatives alvéolaire /s, z/, labiodentales /f, v/ et post-alvéolaires /ʃ, ʒ/. Seuls les moments spectraux des consonnes fricatives jugées correctes ou émergentes par le transcripteur, ont été représentés.

Ces différents résultats suggèrent que P1 progresse en termes de pourcentage de productions correctes mais aussi dans la qualité de la production de certaines voyelles et consonnes sur le plan acoustique. Cependant, les résultats de P2 sont plus mitigés. En effet, P2 semble progresser pour certaines voyelles mais reste incapable de prononcer les consonnes fricatives post-alvéolaires après rééducation.

3.2. Bilan orthophonique

Les performances aux différentes tâches de langage sont présentées dans le tableau 2. Les résultats montrent qu'avant la rééducation, les patientes présentaient des troubles de répétition, dénomination, fluence verbale et lecture. L'analyse de résultats par item a montré que les patientes présentaient des paraphasies phonémique et phonologique, avant rééducation. Cependant, les patientes ne présentaient pas de troubles de la compréhension ni d'apraxie de la parole. Après rééducation, les patientes présentaient une amélioration. Typiquement, l'IE indique que P1 s'est améliorée pour la répétition, la lecture, la dénomination et le jugement de rimes, mais pas pour la fluence verbale et alphabétique. P2 progresse pour la répétition et la dénomination, cependant, ses performances déclinent pour la lecture et le jugement de rimes. Cette patiente présente des troubles de mémoire de travail et de fluence

verbale, maintenus après rééducation. Les résultats montrent que les performances de langage se sont améliorées de façon plus significative chez P1 mais moins chez P2. Par ailleurs, chez P2, la rééducation semble perturber la lecture et l'accès au lexique phonologique d'entrée.

3.3. IRM fonctionnelle

Les résultats en IRMf sont présentés dans le tableau 4. Pour P1 (tableau 4A), lors de la DR, on observe un effet modulateur de la rééducation au niveau des gyri précentral, frontal supérieur et médian gauche, des gyri frontal supérieur et frontal médian (GFM) droit et du cervelet droit (Crus I). Lors de la RS on observe un effet modulateur de la rééducation au niveau du GFI (*pars orbitalis*) et de l'insula gauche. Pour P2 (tableau 4B), lors de la DR, on observe un effet modulateur de la rééducation au niveau des gyri lingual et frontal supérieur (*pars orbitalis*) gauche. Lors de la RS, on observe un effet de la rééducation sur l'aire motrice supplémentaire (AMS), le gyrus post-central gauche, ainsi que le GFI (*pars orbitalis*) et le GFM droit.

Tableau 4 : Activations cérébrales obtenues pour P1 (A) et P2 (B) durant les tâches de détection de rimes (DR) et répétition de syllabes (RS), avant vs après rééducation. Seuls les pics d'activation les plus significatifs au niveau de chaque groupe de voxels activés (k voxels), sont mentionnés. Les coordonnées MNI (label aal) ainsi que les valeurs de t ($p < 0,001$, non corrigé, $k > 10$) sont fournies.

A	AAL	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	T	AAL	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	T
DR Avant > Après rééducation							DR Après > Avant rééducation					
	Cerebellum_Crus1_L	12	-42	-43	-34	4,09	Frontal_Mid_R	206	39	14	50	4,48
	Poscentral_L	61	-27	-22	83	3,77	Temporal_Sup_R	11	45	-28	2	4,30
	Frontal_Sup_L	25	-30	-1	71	3,72	Frontal_Sup_Medial_L	45	-9	35	44	4,08
	Vermis_4_5_R	44	6	-58	-13	3,63	Cerebellum_Crus1_R	31	39	-67	-25	3,98
	Parietal_Sup_L	40	-21	-52	80	3,56	Precentral_L	48	-36	2	47	3,92
	Cerebellum_4_5_R	11	24	-37	-28	3,46	Frontal_Sup_R	20	24	5	68	3,78
	Cerebellum_6_L	14	-21	-52	-28	3,44	RS Après > Avant rééducation					
RS Avant > Après rééducation							Frontal_Inf_Orb_L	101	-51	17	-4	4,73
	Precentral_L	1026	-27	-4	56	5,12	Insula_L	17	-36	-1	-1	3,63
	Temporal_Mid_L	17	-51	-22	-10	4,54						
	Frontal_Mid_R	140	48	-4	56	3,97						
	Precuneus_L	13	-15	-52	74	3,94						

B	AAL	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	T	AAL	k	x (mm)	y (mm)	z (mm)	T
DR Avant > Après rééducation							DR Après > Avant rééducation					
	Cerebellum_4_5_R	11	15	-40	-22	3,73	Lingual_L	11	-21	-52	-7	3,94
	Frontal_Mid_Orb_L	12	-21	44	-16	3,86	Frontal_Sup_Orb_L	59	-30	56	-4	4,37
RS Avant > Après rééducation							RS Après > Avant rééducation					
	Temporal_Sup_L	314	-57	-37	11	5,32	Poscentral_L	397	-66	-4	14	5,56
	Rolandic_Oper_R	117	45	-13	20	5,15	Frontal_Inf_Orb_R	141	48	35	-4	4,70
	Cingulum_Post_L	146	-18	-46	11	4,94	Supp_Motor_Area_L	220	-6	8	68	4,37
	SupraMarginal_L	55	-45	-31	29	4,45	Frontal_Mid_R	59	39	41	8	4,32

4. Discussion et conclusion

Dans cette étude, nous avons évalué un programme de rééducation de la parole basé sur l'IPM, illustré chez deux patientes présentant une aphasie non fluente chronique post-AVC. L'efficacité de ce programme de rééducation a été évaluée de façon multimodale, en comparant, avant et après rééducation, des paramètres acoustiques, langagiers et neurophysiologiques.

P1 présentait une aphasie non fluente associée à une hémiparésie droite, suite à une lésion frontale gauche après un AVC dans le territoire antérieur de l'artère sylvienne gauche (figure 1, tableau 1). L'augmentation de la proportion de phonèmes corrects, associée à la diminution de la proportion de sons incorrects, émergents et d'erreurs de voisement après la rééducation (tableau 3), suggère une amélioration du contrôle dynamique des articulateurs de parole, du contrôle laryngé et du lieu et du mode d'articulation. Par ailleurs, l'amélioration des paramètres acoustiques, pour les productions correctes, suggère un meilleur contrôle de l'arrondissement des lèvres (meilleure distinction entre /i/ et /y/) et du positionnement postérieur de la langue (meilleure distinction entre /o/ et /u/). Cependant, le contrôle de la langue reste encore imparfait (mauvaise reproductibilité pour /œ, e, a/) figure 4A). Pour les consonnes fricatives, les valeurs du CG indiquent une bonne distinction de /s/ et /ʃ/ après rééducation (figure 5a-d). Il apparaît également que P1 distingue mieux les labiodentales des alvéolaires et post-alvéolaires. L'évaluation des performances langagières met en évidence une amélioration des performances (IE positif) au niveau de la production du langage, avec une amélioration des processus phonologiques et articulatoires (tableau 2). Cependant, les performances en fluence alphabétique semblent décliner (IE négatif), ce qui suggère que P1 présente des difficultés lors de la récupération des mots. Ceci pourrait relever d'un défaut de compétences lexicales mais également d'un déficit de contrôle cognitif et fonctions exécutives, souvent rencontré chez les patients aphasiques, et qui interfère avec la récupération [24]. Pour la DR, les résultats en IRMf (tableau 4A) montrent, après rééducation, des activations au niveau du gyrus précentral gauche et de Crus I à droite, suggérant une implication significative de la boucle somato-sensorimotrice (telle qu'elle est décrite dans le modèle de Hickok [13]) pour réaliser la tâche. Le cervelet, et en particulier le Crus I et le lobule VI à droite, est impliqué dans les tâches de langage telles que la génération des mots. Crus I, bilatéralement, est généralement impliqué dans la mémoire de travail verbale, le traitement émotionnel et les fonctions exécutives [25]. Après rééducation, P1 recrute davantage les régions impliquées dans la mémoire de travail verbale et les processus linguistiques, notamment Crus1 du cervelet, afin de réussir la tâche de DR [13, 25-27]. Ces résultats sont en accord avec une augmentation des performances lors de la tâche de jugement de rimes réalisée lors du bilan orthophonique (IE positif, tableau 2). L'effet de la rééducation est également reflété par la modulation de l'activation du GFM droit qui sert de passerelle entre les processus top-down et bottom-up du contrôle attentionnel [28]. Ceci suggère que P1 recrute davantage de ressources attentionnelles afin de réussir la tâche. Ainsi, on peut supposer un renforcement de l'interaction somato-sensorimotrice mis en évidence par le recrutement supplémentaire des régions impliquées dans cette boucle somato-sensorimotrice [13], après la rééducation, mais également une amélioration de la programmation motrice et de l'attention. De plus, les régions impliquées dans la boucle somato-sensorimotrice sont à l'origine des caractéristiques au niveau articulatoire et donc associées à la configuration du conduit vocal [13]. Ainsi, un renforcement de cette boucle confirme les résultats du bilan acoustique et suggère une amélioration du contrôle dynamique des articulateurs de la parole, du contrôle laryngé et du lieu et

mode d'articulation (figure 4A et tableau 3). Lors de la RS on observe après rééducation, une implication du GFI (pars orbitalis) gauche qui est impliqué dans l'activation des programmes moteurs syllabiques, avec récupération des gestes articulatoires de la parole, ainsi que dans l'encodage phonétique et phonologique de sortie [4, 13]. Ainsi, cette activation suggère un meilleur contrôle de l'encodage phonétique avec facilitation de l'accès au lexique phonologique de sortie sollicité dans cette tâche, et un renforcement de l'interaction auditivo-motrice. Ces résultats sont en accord avec la valeur positive de l'IE pour la répétition (tableau 2). On observe également une activation de l'insula gauche, suggérant une amélioration de la coordination des mouvements articulatoires intra- et inter-syllabiques, durant la production de la parole [29]. De plus, l'insula gauche et l'aire de Broca sont impliqués dans le réseau de planification du langage [4]. Ainsi, ces résultats suggèrent que la rééducation permet une amélioration de l'interaction auditivo-motrice mais également de la coordination articulatoire et de la planification du langage.

P2 présentait initialement une aphasie globale, induite par une lésion fronto-temporo-pariétale, suite à un AVC au niveau de l'artère sylvienne gauche (figure 1, tableau 1). Bien qu'initialement globale, l'aphasie était non fluente au moment de l'inclusion de cette patiente dans l'étude. Sur la base de ses performances acoustiques, P2 montre une amélioration de la production de certaines voyelles, mais sans amélioration pour les consonnes. Par ailleurs, les résultats obtenus indiquent qu'il n'y a pas d'amélioration du contrôle dynamique des articulateurs de la parole (tableau 3). Les paramètres acoustiques des voyelles indiquent un meilleur contrôle de l'arrondissement des lèvres et du positionnement de la langue en avant, après rééducation, reflété par une meilleure reproductibilité et meilleure distinction des voyelles /i, y, e/. On observe également une meilleure reproductibilité de la voyelle /a/, même si le contrôle de la langue apparaît encore imparfait, étant donné l'incapacité de P2 à produire certaines voyelles (/o, u, ø, œ/) avant et/ou après rééducation (figure 4B). Par ailleurs, P2 est incapable de produire les fricatives post-alvéolaires avant et après rééducation, le positionnement de la langue restant encore imparfait (langue trop en arrière). Cependant, les valeurs du CG suivent l'ordre typique pour les fricatives alvéolaires et labiodentales. Les valeurs d'ET suggèrent une production atypique des fricatives labiodentales (figure 5e-h). L'analyse qualitative des scores de langage indique que P2 présente des déficits en mémoire de travail avant et après rééducation. La comparaison des scores de langage montre une amélioration pour les tâches de dénomination et de répétition (IE positif) et un déclin pour le jugement de rimes (IE négatif, tableau 2). Lors de la DR en IRMf, nous observons après rééducation, une activation du gyrus frontal supérieur (*orbitalis*) gauche ce qui, combinée à la valeur négative de l'IE pour cette tâche, pourrait refléter l'échec de la patiente pour recruter des régions nécessaires pour réaliser le traitement phonologique nécessaire pour la DR (tableau 4B). On observe également une activation du gyrus lingual impliqué dans le traitement des mots présentés visuellement, tels que ceux présentés dans les stimuli de la tâche de DR, ce qui suggère que P2 fait appel à une stratégie visuo-graphique pour réaliser cette tâche [30]. La RS induit, après rééducation, une activation de l'AMS (programmation motrice) et du gyrus post-central (aire somesthésique primaire) à gauche, suggérant une augmentation de l'interaction somato-sensorimotrice et un effort supplémentaire de P2 pour la programmation motrice de la prononciation des phonèmes. On observe également une activation du GFM droit suggérant un recrutement supplémentaire des ressources attentionnelles, pour réussir la tâche. Enfin, l'activation supplémentaire du GFI droit après rééducation pourrait être associée à la prise de décision au niveau phonologique [31]. Ainsi, l'IE positif pour la tâche de répétition, indiquant l'amélioration après la rééducation, pourrait suggérer un meilleur

contrôle de l'interaction somato-sensorimotrice, de l'encodage phonétique et du traitement du lexique phonologique de sortie. Au vu de ces résultats, nous suggérons que l'IPM a peu d'effet et perturbe plutôt la production de la parole chez P2. En effet, au niveau du bilan orthophonique, la dégradation des scores de jugement de rimes (défaut d'accès au lexique phonologique d'entrée) ainsi que les troubles de mémoire de travail pourraient être expliqués par la taille et la localisation de la lésion, qui s'étend au-delà de la région frontale, vers les régions temporo-pariétales. L'intégrité des régions temporales et pariétales est, en effet, nécessaire pour l'intégration multisensorielle et, dans ce cadre, justifie l'utilisation d'une méthode fondée sur l'IPM. Le cortex pariétal est impliqué dans la représentation corporelle, recevant en entrée des informations multisensorielles (auditives, visuelles, somatosensorielles et proprioceptives) générant après intégration un signal, transmis aux cortex pré-moteur et moteur. Ainsi, cette région est impliquée dans la coordination vision-proprioception-audition-articulation [32, 33].

Le programme de rééducation utilisé dans cette étude demande aux patients d'associer un son (retour auditif de leur propre production et du son préenregistré comme modèle) aux mouvements articulatoires correspondants (retours somesthésique et proprioceptif de leur propre production), avec l'intervention supplémentaire de l'information visuelle des mouvements linguaux (visualisés grâce au logiciel). Nous suggérons que la visualisation de l'information articulatoire permettrait une amélioration de la représentation de la langue et un meilleur contrôle moteur, lorsqu'on ajoute les retours auditif, somesthésique et proprioceptif. Ainsi, la lésion plus étendue chez P2 (atteinte des régions fronto-temporo-pariétales) pourrait expliquer l'absence d'amélioration de la parole, due à l'incapacité d'associer l'image visuelle des mouvements linguaux aux informations somesthésique, proprioceptive et au son correspondant. Ainsi, nous suggérons que cette lésion étendue chez P2 pourrait limiter l'interaction auditivo-motrice, cruciale dans ce type de rééducation.

Les résultats obtenus dans cette étude nous montrent une amélioration variable de la parole selon les patients. Plus spécifiquement, l'IPM a un effet bénéfique sur les performances de P1 mais l'effet est nul, voire défavorable, pour P2. Les différences en termes d'efficacité de la méthode de rééducation chez les deux patientes pourraient être expliquées non seulement en termes de localisation de la lésion (frontale chez P1 et étendue aux régions fronto-temporo-pariétales chez P2), mais également par d'autres facteurs, tels que : le tableau clinique (aphasie de Broca chez P1 et aphasie globale ayant évolué en aphasie de Broca chez P2), l'historique, le traitement (16 séances chez P1 dont trois avec l'orthophoniste et neuf chez P2), le délai depuis la survenue de l'AVC (trois ans chez P1 et quatre ans chez P2). Une combinaison de plusieurs mécanismes pourrait donc intervenir dans la récupération. Celle-ci peut soit survenir de façon spontanée et, dans ce cas, la récupération est dépendante de facteurs tels que la localisation ou encore la taille de la lésion, soit être liée à des facteurs externes tels que la rééducation (type, motivation, durée). Dans ce contexte, et pour ces patientes, il reste donc assez spéculatif de mettre en évidence des schémas spécifiques de réorganisation et de récupération liés à des facteurs spécifiques, compte tenu des multiples mécanismes et stratégies qui ont pu se produire tout au long de la pathologie post-AVC. Toutefois, sur les données en IRMf, malgré la bilatéralité de certaines activations (notamment chez P1), on observe une réactivation de certaines régions au niveau de l'hémisphère gauche en accord avec une amélioration des performances. Des études ont montré que la récupération du langage s'accompagne d'activation au niveau de l'hémisphère gauche (au niveau péri-lésionnel) chez des patients aphasiques non fluents chroniques [34, 35] mais également que les

modifications au niveau fonctionnel (modifications du signal BOLD) sont corrélées à une amélioration des performances au niveau langagier (parole, compréhension etc.) chez des patients aphasiques en phase chronique [34, 36-38]. Dans cette étude, nous avons pu montrer que la méthode de rééducation basée sur l'IPM permet une amélioration des performances sur le plan langagier, mais également sur le plan phonétique et articulatoire, notamment chez P1. Cette amélioration s'accompagne d'une modulation des réseaux cérébraux avec une réactivation des régions impliquées dans le langage, situées au niveau de l'hémisphère gauche, ce qui suggère une efficacité de la réorganisation cérébrale [34]. Au niveau cérébral, on observe un renforcement des interactions auditivo- et somato-sensorimotrices, décrites par Hickok [13], pour P1 (uniquement somato-sensorimotrice pour P2). Chez P1, pour qui l'efficacité de la méthode est démontrée, on constate une amélioration au niveau du contrôle des articulateurs de la parole (amélioration du contrôle dynamique des articulateurs de la parole, du contrôle laryngé et du lieu et mode d'articulation), ce qui est en accord avec le renforcement de l'interaction somato-sensorimotrice. En effet, cette boucle intègre les régions associées à la représentation somatosensorielle du phonème – i.e. les caractéristiques articulatoires associées à la configuration du conduit vocal lors de la production de la parole [13]. Les résultats de cette étude suggèrent que la rééducation basée sur l'IPM peut être considérée comme une méthode de rééducation utile, en complément des méthodes classiques, pour améliorer les performances du langage oral chez des patients ayant une aphasie non fluente chronique (de type Broca), avec une lésion au niveau frontal (sans atteinte des régions temporo-pariétales impliquées dans l'intégration vision-audition-proprioception-somesthésie).

Ces résultats sont toutefois à considérer avec précaution. En effet, il s'agit de résultats préliminaires qui doivent être validés statistiquement avec une cohorte plus importante de patients. Il reste également un ensemble de questions à considérer, tel que : évaluer séparément l'effet de la rééducation classique et de la rééducation IPM, évaluer l'effet de la plasticité spontanée chez ces patients, préciser le nombre et la durée des séances de rééducation, ainsi que la possibilité d'effectuer des analyses quantitatives basées sur des mesures répétées des performances des patients, tout au long de leur évolution pathologique. Cependant, ces résultats, même s'ils sont qualitatifs, révèlent le potentiel de cette méthode de rééducation de la production de la parole, en phase chronique. Il s'agit d'une étude de preuve de concept qui évalue l'efficacité de l'IPM, via le logiciel Ultraspeech player, sur la récupération de la parole et sur la plasticité du langage, qui a le mérite de montrer :

- l'intérêt d'utiliser, même en autonomie, et en phase chronique, une nouvelle méthode de rééducation de la parole ;
- l'intérêt d'une évaluation multimodale de l'effet de la récupération de la parole (langage, signal de parole et activation cérébrale).

Enfin, étant donné le rôle des régions temporo-pariétales, leur implication dans l'intégration multisensorielle (vision-audition-somesthésie-proprioception) et les résultats obtenus, nous soulignons l'importance d'utiliser l'IPM chez des patients aphasiques non fluents pour lesquels l'intégrité structurelle des régions temporo-pariétales est conservée.

5. Liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt en rapport avec cet article.

Références

1. Cortese MD, Riganello F, Arcuri F, et al. Rehabilitation of aphasia : application of melodic-rhythmic therapy to Italian language. *Front Hum Neurosci* 2015 ; 9.
2. Viader F, Lambert J, de la Sayette V, et al. Aphasie. *Encycl Méd-Chir Neurol* 2002 ; 17 : 1-32.
3. Hamilton RH, Chrysikou EG, Coslett B. Mechanisms of Aphasia Recovery After Stroke and the Role of Noninvasive Brain Stimulation. *Brain Lang* 2011 ; 118 : 40-50.
4. Acher A, Fabre D, Hueber T, et al. « Retour visuel en aphasiologie : résultats comportementaux, acoustiques et en neuroimagerie ». In : Joyeux N, Topouzkhianian S (eds). *XVIes Rencontres Internationales d'Orthophonie. Orthophonie et technologies innovantes*. Paris: Ortho Edition, 2016. pp. 227-60.
5. Breitenstein C, Grewe T, Flöel A, et al. Intensive speech and language therapy in patients with chronic aphasia after stroke : a randomised, open-label, blinded-endpoint, controlled trial in a health-care setting. *Lancet Lond Engl* 2017 ; 389 : 1528-38.
6. Badin P, Elisei F, Bailly G, et al. "An Audiovisual Talking Head for Augmented Speech Generation: Models and Animations Based on a Real Speaker's Articulatory Data". In: Perales FG, Fisher RB (eds). *Proceedings of the Vth Conference on Articulated Motion and Deformable Objects (AMDO2008)*. Berlin, Heidelberg (Germany): Springer Verlag 2008. pp. 132-43.
7. Fabre D, Hueber T, Canault M, et al. « Apport de l'échographie linguale à la rééducation orthophonique ». In: Joyeux N, Topouzkhianian S (eds). *XVIes Rencontres Internationales d'Orthophonie. Orthophonie et technologies innovantes*. Paris, France : Ortho Edition, 2016. pp. 199-225.
8. McGurk H, Macdonald J. Hearing lips and seeing voices. *Nature* 1976 ; 264 : 746-8.
9. Sumbly WH, Pollack I. Visual Contribution to Speech Intelligibility in Noise. *J Acoust Soc Am* 1954; 26 : 212-5.
10. Hueber T. Ultraspeech-player : Intuitive visualization of ultrasound articulatory data for speech therapy and pronunciation training. In : *Proceedings of Interspeech (show & tell)*. Lyon, France : 2013. pp. 752-3.
11. Fagel S, Madany K. A 3-D virtual head as a tool for speech therapy for children. In : *Proceedings of Interspeech*. Brisbane (Australia): 2008. pp. 2643-6.
12. Menin-Sicard A, Sicard E, Bezard M. « Intérêt de la visualisation de la position et du mouvement des articulateurs pour améliorer l'intelligibilité : Plate-forme Diadolab ». In : Joyeux N, Topouzkhianian S (eds). *XVIes Rencontres Internationales d'Orthophonie. Orthophonie et technologies innovantes*. Paris (France) : Ortho Edition, 2016. pp. 261-89.
13. Hickok G. Computational neuroanatomy of speech production. *Nat Rev Neurosci* 2012 ; 13 : 135-45.
14. Deloche G, Hannequin D. *DO 80 : Test de dénomination orale d'images*. Paris, France : Editions du Centre de Psychologie appliquée, 1997.
15. Baudo K, Vernisse AL. Influence de la mémoire de travail sur l'ordre de réussite aux épreuves métaphonologiques. [Mémoire pour l'obtention du Certificat de capacité d'orthophonie.] 2001.

16. Nespoulous JL, Lecours AR, Lafond D. MT-86-Protocole Montréal-Toulouse d'examen linguistique de l'aphasie. Isbergues, France : Ortho-Edition, 1986.
17. Saur D, Kreher BW, Schnell S, et al. Ventral and dorsal pathways for language. *Proc Natl Acad Sci* 2008 ; 105 : 18035-40.
18. Boersma P, Weenink D. Praat : doing phonetics by computer, 2010, <http://www.praat.org/>.
19. R Development Core Team. R : A language and environment for statistical computing. Vienna (Austria) : R Foundation for Statistical Computing 2008. <http://www.R-project.org>.
20. Adank P, Smits R, van Hout R. A comparison of vowel normalization procedures for language variation research. *J Acoust Soc Am* 2004 ; 116 : 3099-107.
21. Li F, Edwards J, Beckman ME. Contrast and covert contrast : The phonetic development of voiceless sibilant fricatives in English and Japanese toddlers. *J Phon* 2009 ; 37 : 111-24.
22. Nissen SL, Fox RA. Acoustic and spectral characteristics of young children's fricative productions : A developmental perspective. *J Acoust Soc Am* 2005 ; 118 : 2570-8.
23. Nickels L. Therapy for naming disorders : Revisiting, revising, and reviewing. *Aphasiology* 2002 ; 16 : 935-79.
24. Brownsett SLE, Warren JE, Geranmayeh F, et al. Cognitive control and its impact on recovery from aphasic stroke. *Brain* 2014 ; 137 : 242-54.
25. Stoodley CJ, Valera EM, Schmahmann JD. Functional topography of the cerebellum for motor and cognitive tasks : an fMRI study. *NeuroImage* 2012 ; 59 : 1560-70.
26. Stoodley CJ, Schmahmann JD. Functional topography in the human cerebellum : a meta-analysis of neuroimaging studies. *NeuroImage* 2009 ; 44 : 489-501.
27. Mariën P, Ackermann H, Adamaszek M, et al. Consensus paper : Language and the cerebellum : an ongoing enigma. *Cerebellum* 2014 ; 13 : 386-410.
28. Japee S, Holiday K, Satyshur MD, et al. A role of right middle frontal gyrus in reorienting of attention : a case study. *Front Syst Neurosci* 2015 ; 9.
29. Baldo JV, Wilkins DP, Ogar J, et al. Role of the precentral gyrus of the insula in complex articulation. *Cortex* 2011 ; 47 : 800-7.
30. Kuriki S, Takeuchi F, Hirata Y. Neural processing of words in the human extrastriate visual cortex. *Cogn Brain Res* 1998 ; 6 : 193-203.
31. Hartwigsen G, Price CJ, Baumgaertner A, et al. The right posterior inferior frontal gyrus contributes to phonological word decisions in the healthy brain : Evidence from dual-site TMS. *Neuropsychologia* 2010 ; 48 : 3155-63.
32. Culham JC, Cavina-Pratesi C, Singhal A. The role of parietal cortex in visuomotor control : What have we learned from neuroimaging? *Neuropsychologia* 2006 ; 44 : 2668-84.
33. Ishida H, Nakajima K, Inase M, et al. Shared mapping of own and others' bodies in visuotactile bimodal area of monkey parietal cortex. *J Cogn Neurosci* 2010 ; 22 : 83-96.
34. Saur D, Lange R, Baumgaertner A, et al. Dynamics of language reorganization after stroke. *Brain* 2006 ; 129 : 1371-84.
35. Cornelissen K, Laine M, Tarkiainen A, et al. Adult Brain Plasticity Elicited by Anomia Treatment. *J Cogn Neurosci* 2003 ; 15 : 444-61.

36. Léger A, Démonet J-F, Ruff S, et al. Neural Substrates of Spoken Language Rehabilitation in an Aphasic Patient : An fMRI Study. *NeuroImage* 2002 ; 17 : 174-83.
37. Meinzer M, Flaisch T, Breitenstein C, et al. Functional rerecruitment of dysfunctional brain areas predicts language recovery in chronic aphasia. *NeuroImage* 2008 ; 39 : 2038-46.
38. Musso M, Weiller C, Kiebel S, et al. Training-induced brain plasticity in aphasia. *Brain* 1999 ; 122 : 1781-90.

Speech rehabilitation in post-stroke aphasia using visual illustration of speech articulators. A case report study.

Céline Haldin¹, Hélène Lœvenbruck¹, Thomas Hueber², Valérie Marcon³, Céline Piscicelli^{1,3}, Pascal Perrier², Anne Chrispin³, Dominic Pérennou^{1,3} and Monica Baciu^{1,CA}

¹Laboratoire De Psychologie Et Neurocognition, UMR CNRS 5105, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

²GIPSA-lab, UMR CNRS 5216, Université Grenoble-Alpes, Grenoble, France

³CHU Grenoble-Alpes, Médecine Physique Et De Réadaptation, Grenoble, France

^{CA}LPNC, UMR CNRS 5105, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, monica.baciu@univ-grenoble-alpes.fr

Abstract

Recent studies on the remediation of speech disorders suggest that providing visual information of speech articulators may contribute to improve speech production. In this study, we evaluate the effectiveness of an illustration-based rehabilitation method on speech recovery of a patient with non-fluent chronic aphasia. The *Ultraspeech-player* software allowed visualization by the patient of reference tongue and lips movements recorded using ultrasound and video imaging. This method can improve the patient's awareness of their own lingual and labial movements, which can increase the ability to coordinate and combine articulatory gestures. The effects of this method were assessed by analyzing performance during speech tasks, the phonological processes identified in the errors made during the phoneme repetition task and the acoustic parameters derived from the speech signal. We also evaluated cognitive performance before and after rehabilitation. The integrity of visuo-spatial ability, short-term and working memory and some executive functions supports the effectiveness of the rehabilitation method. Our results showed that *illustration-based rehabilitation technique* had a beneficial effect on the patient's speech production, especially for stop and fricative consonants which are targeted (high visibility of speech articulator configurations) by the software, but also on reading abilities. Acoustic parameters indicated an improvement in the distinction between consonant categories: voiced and voiceless stops or alveolar, post-alveolar and labiodental fricatives. However, the patient showed little improvement for vowels. These results confirmed the advantage of using *illustration-based rehabilitation technique* and the necessity of detailed subjective and objective intra-speaker evaluation in speech production to fully evaluate speech abilities.

Key-words: speech, aphasia, recovery, Ultraspeech, neuropsychology, speech signal

Introduction

Aphasia is an acquired communication disorder that impairs language functions (expression or comprehension) following brain damage (Benson & Ardila, 1996; Damasio, 1998). Stroke is the most common cause of aphasia (21-38%, Cortese, Riganello, Arcuri, Pignataro, & Buglione, 2015; Engelter et al., 2006). The focus of the present study is on post-stroke non-fluent aphasia (expressive or Broca's aphasia) that is frequently associated with lesions located within the left inferior frontal gyrus (Ardila et al., 2016; Van Der Meulen et al., 2016). Broca's aphasia is characterized by non-fluent spontaneous speech, apraxia of speech, agrammatism, anomia, effortful speech production, limited vocabulary access and short sentence production, while language comprehension remains relatively intact (Baque' et al., 2015; Cortese et al., 2015; Feenaughty et al., 2017). These deficits often include symptoms such as articulation errors or dysfluencies that are also typical of dysarthria or apraxia of speech. These speech and language disturbances may be due to one or several impaired speech production processes, such as selection and planning of speech output, articulatory implementation of selected and planned speech segments, articulatory implementation of speech phonetic parameters and coordination of speech articulators (Kurowski, Hazen, & Blumstein, 2003; Nespoulous, Baque', Rosas, Marczyk, & Estrada, 2013). Recent studies have shown that less fluent speech may be caused by the inability to create and use an efference copy (internal representation of the speech plan) for speech motor control (Feenaughty et al., 2017; Fridriksson et al., 2012, 2015). For patients with aphasia following stroke, speech and language therapy has been shown to be beneficial in terms of improving language comprehension and production (Brady et al., 2016). Speech and language therapy (SLT) is commonly adapted to fit the individual's ability to integrate auditory and visual speech information and allows the patient to compare his or her own productions (auditory feedback) with those of the speech therapist (auditory and visual feedback – lip reading). This type of SLT should be applied as early as possible, as it is most effective when started early. The most substantial language recovery tends to occur during the first few weeks after the stroke onset (Bhogal et al., 2003). However, according to Hamilton et al. (2011), some degree of spontaneous recovery occurs within 2-3 months after stroke, corresponding to the acute and subacute post-stroke phases. Thus, during the first months after stroke, it is impossible to disentangle between the contributions of rehabilitation and of spontaneous recovery to language improvement (Gerstenecker & Lazar, 2019). It is generally accepted that language recovery slows down significantly and often plateaus after 3 to 6 months, even if some patients experience continued periodic improvement throughout the rest of their lives (El Hachoui et al., 2013; Gerstenecker & Lazar, 2019). A recent study by Breitenstein et al., (2017) reported that in cases where patients receive fewer than 5 hours of SLT per week, the effect of the therapy decreases after a few months during the chronic stage (6 months post-stroke). In this context, more recent innovative approaches to SLT based on emerging assistive speech technologies (i.e., speech recognition software, virtual reality interfaces) could act as valuable supplements or promising alternatives to conventional SLT techniques. Given that aphasia often results in articulation disorders a rehabilitation program aiming at improving language production by training articulation is relevant.

Speech production is based on both motor aspects (articulatory gestures that produce speech sounds) and perceptual aspects (visual and somatosensory representations of these gestures and

auditory representations of corresponding sounds) (Sato & Grabski, 2014). The dynamics of this perception-action interaction suggest that speech communication skills might be improved using speech and language rehabilitation strategies that center on the observation and the execution of motor gestures. Indeed, a number of studies have shown how important visible articulatory features (e.g. lips, jaw, tongue tip, teeth) are to speech production and perception (Benoît & Le Goff, 1998; Erber, 1975; Garnier et al., 2018; McGurk & Macdonald, 1976; Sumbly & Pollack, 1954). Moreover, representations of non-visible articulators, such as the tongue or velum, could also play a role. Montgomery, (1981) showed that children display awareness of articulation processes as early as 8 years of age. In this study, children were able to match phoneme sounds with pictures of sagittal sections of the mouth displaying typical configurations of the lips, teeth and tongue. In this line, it has been suggested that tongue reading abilities, similar to lip reading, can be used in SLT for speech perception and production rehabilitation or for pronunciation training (Badin et al., 2007, 2010). Two distinct methods of speech and language rehabilitation have developed on this principle of visual guidance: visual illustration and visual biofeedback (Blyth et al., 2016; Cleland et al., 2015; Fabre et al., 2016; Gibbon et al., 2001; Preston et al., 2013; Roxburgh et al., 2015). The present study focuses exclusively on the visual illustration method, which allows for the visualization of speech articulator movements via pre-recorded images. Among visual illustration methods, audiovisual articulatory synthesis, that involves virtual talking heads, offers potential speech and language rehabilitation outcomes. This technology uses life-like representations to visualize the different active articulators (tongue, jaw, lips, velum) in motion during speech production (Badin, Elisei, et al., 2008; Badin, Tarabalka, et al., 2008; Fagel & Madany, 2008; Massaro & Light, 2004). Several studies have reported integrating animated 3D talking-head interfaces into SLT for aphasic patients (for a review see Chen et al., 2016). Another example of technology that builds on the method of using visual illustration is the *Ultraspeech-player* software (Hueber, 2013). This software allows to visualize movements of actual speech articulators (tongue and lips) recorded on a reference speaker during production of vowels or consonants (isolated or combined). Sagittal movements of the tongue are recorded using ultrasound and front views of lip movements are captured through video imaging. When using this software, the patients deal with three types of information: auditory (recorded sounds produced by the reference speaker and auditory feedback of their own speech production), visual (images of both visible and non-visible speech articulators – front views of the lips and sagittal views of the tongue, respectively) and somatosensory (feeling one's own articulators in motion). Fabre et al., (2016) showed that using the *Ultraspeech-player* improved articulatory awareness and performance of children with phonological disorders (substitution of /tʁ/ by /kʁ/).

Our primary interest in conducting this study was to investigate changes in the quality of speech production (mainly at the phoneme level) following a visual illustration-based rehabilitation therapy (based on the *Ultraspeech-player* software). The quality of phonemic production can be assessed with respect to articulatory (e.g. tongue position) and acoustic features (voice onset time, spectral moments or formants). Voiceless and voiced stop consonants in French (/p, t, k/ vs /b, d, g/) are distinguished by the voice onset time (VOT) which is the time between the voicing onset and the instant of the burst (the release of a stop consonant). In French, VOT is negative for voiced stops and null or positive for voiceless stops. French fricative consonants

(/f, v, s, z, ʃ, ʒ/) are characterized by their spectral moments (center of gravity, standard deviation, skewness and kurtosis) that describe the spectral properties of the frication noise observed when these consonants are produced (Li et al., 2009; Nissen & Fox, 2005). Spectral moments can distinguish between labiodental (/f, v/), alveolar (/s, z/) and post-alveolar (/ʃ, ʒ/) fricative places of articulation. Fricatives can further be described by their VOT, which can distinguish between voiced (/v, z, ʒ/) and voiceless (/f, s, ʃ/) fricatives (see e.g. Abramson & Whalen, 2017). Oral vowels can be characterized by the first and second formant frequencies (F1 and F2). A graphical representation of F1 as a function of F2 is typically used to assess vowel formant space (Meunier, 2007). Nespoulous et al., (2013) studied voicing control disorders with respect to consonants in non-fluent aphasic patients. They showed that patients were more likely to make devoicing errors on voiced target consonants than voicing errors on voiceless target consonants. Several studies on patients with aphasia have shown that deficits occur in VOT production (suggesting a disorder in temporal coordination of laryngeal and supralaryngeal gestures) and also in the production of voiced fricatives (Baum et al., 1990; Freeman et al., 1978; K. M. Kurowski et al., 2007). Acher et al., (2016) reported that following rehabilitation therapy, a patient with chronic non-fluent aphasia exhibited improved vowel formant production as well as improved voicing for several consonants.

Our primary focus here was to evaluate the effect of a visual illustration therapy on speech recovery in a patient with non-fluent chronic aphasia. The effects of the therapy were assessed by comparing the patient's scores on speech tasks performed both before and after the SLT. As Nespoulous et al., (2013) reported in their work, comparing intra-speaker variations in speech production is essential for evaluating both deficits and speech and language rehabilitation methods. Speech performance can be simply assessed using accuracy scores (% correct responses), but such broad measures do not provide a thorough description of the patients' attempts at producing the target sounds. To better describe speech production patterns, errors themselves can be informative, as they can reveal specific acoustic or articulatory trends. For instance, a sound may be substituted for another acoustically or articulatorily close sound. Therefore, it is interesting to assess the distance between phoneme targets and their actual realizations, by examining confusion matrices. Moreover, an entire class of sounds may be substituted for another class of sounds in a systematic way, such as velars replaced with alveolars. Such a substitution reflects a fronting process and informs on the patients' deficit in the control of the antero-posterior position of the tongue. Consequently, characterizing errors in terms of underlying phonological processes can provide a better description of patients' articulation abilities. Phonological processes that are typically examined in articulation and phonological disorder assessment include velar and nasal assimilations, substitution (fronting, stopping, gliding) and devoicing (Bauman-Waengler, 2012). We therefore assessed the presence of such processes in the errors made by our patient. However, even though, these measures are obtained from transcriptions made by trained phoneticians, they remain subjective assessment. It is interesting to complement these subjective findings with more objective acoustic measurements. Acoustic measurements made on the correctly produced sounds can further characterize the patient's performance. The speech scores examined here are the following: (i) overall speech performance (% of correct responses) during tasks involving phoneme repetition, word repetition, reading, phonemic discrimination; (ii) consonant and

vowel confusion matrices associated with phoneme repetition; (iii) phonological processes at play in the errors identified during phoneme repetition; and (iv) acoustic parameters derived from the analyses of the audio speech signal recorded during phoneme repetition. The *Ultraspeech-player* software used during the rehabilitation permits the patient to train on all phonemes, however some are specifically targeted by the software because of the higher visibility of tongue and lips configuration (in contrast to *non-targeted* phonemes which have less informative tongue and lip configurations). We suggest that integrating this technology into SLT could improve speech abilities and could result in (a) improved speech performance, with specific increase in phoneme awareness during the phoneme repetition task; (b) a decrease in the percentage of errors associated with typical phonological processes; and (c) a closer alignment of acoustic parameters (formant frequencies, spectral moments and VOT) with the standard values, specifically on the phonemes targeted by the training.

Materials and methods

Patient MG

Demographic and clinical features of the patient are presented in Figure 1 and Table 1. This 41-year-old male patient was included in our study in the chronic phase, at 6 months after the stroke (chronic phase). Clinically, the patient showed Broca's aphasia associated with right hemiparesis, induced by a left hemispheric lesion with damage of the inferior frontal gyrus, insula, primary motor and premotor cortices and partially the superior temporal gyrus (see Figure 1). The lesion was induced by an ischemic stroke caused by the obstruction of the left middle cerebral artery, superficial territory. Right after the stroke, in the acute phase, the patient showed symptoms of a global aphasia (fluent and non-fluent aphasia) but at the moment of examination in the chronic phase, he showed only a non-fluent aphasia. The selection criteria for recruitment of this patient included: (i) the absence of upper limb apraxia (Apraxia Screen of Tulia, AST; Vanbellingen et al., 2011) to ensure the patient's ability to use the computer mouse; (ii) the absence of spatial neglect (bells test and line bisection; GEREN, 2002) to ensure that the patient could visualize all information on the computer screen; (iii) the absence of any comprehension disorder (written and oral comprehension; Boston Diagnostic Aphasia Examination, BDAE; Mazaux & Orgogozo, 1981) to ensure that the patient could understand the explanations about the rehabilitation software; (iv) the absence of bucco-facial apraxia (Montreal-Toulouse protocol, MT86; Nespoulous, Lecours, & Lafond, 1986); and (v) patient familiarity with digital tools (test developed by the neuropsychologist from the Hospital). The language and neuropsychological assessments of the patient validated all these inclusion criteria (see Supplementary Material Table A-B). However, the patient showed a slight bucco-facial apraxia but not prejudicial when using the rehabilitation method. As mentioned in Supplementary Material Table A, the patient's lexical and syntactic oral comprehension was generally preserved, however some errors were made with words belonging to same semantic categories (e.g. body part identification). Written comprehension of words and sentences were preserved; however, the comprehension of written text was more difficult and appeared to depend on length and complexity. Most importantly, the patient exhibited noticeable difficulty with oral expression, produced many perseverations and appeared to suffer from severe arthritis that hindered motor functioning. Written expression was preserved; it became the patient's favorite mode of communication. However, he struggled to write long and infrequent words

and he presented written dysyntaxia. The patient successfully performed word repetition for monosyllabic words without complex consonant groups but struggled with longer more complex words and resorted to phonetic pronunciation trial and error without reaching the target word. Oral word reading was impossible (the patient was unable to access articulatory representations from written forms).

Table 1. Demographic and clinical information of the patient.

GENDER, AGE	M, 41 years
HANDEDNESS	Right (Edinburgh test = 0,7)
WORK SITUATION	Painter-craftsman
ISCHEMIC LESION	Left sylvian artery, superficial territory
STROKE ONSET (AGE)	2017-10-13 (40 years)
LANGUAGE DEFICITS	Initial: Global aphasia Symptoms: stereotypies, preserved written language, preserved comprehension, mute. Non-verbal communication (mimes, gestures, facial mimicry), write isolated words without syntax. Actual: Broca’s aphasia Symptoms: preserved oral and written comprehension (except long text), arthritic disorders, many perseverations, significant deficit of overt reading (except simple syllables with trial and error), and preserved written expression (with the left hand).
ASSOCIATED NEUROLOGICAL DEFICIT	Right hemiparesis

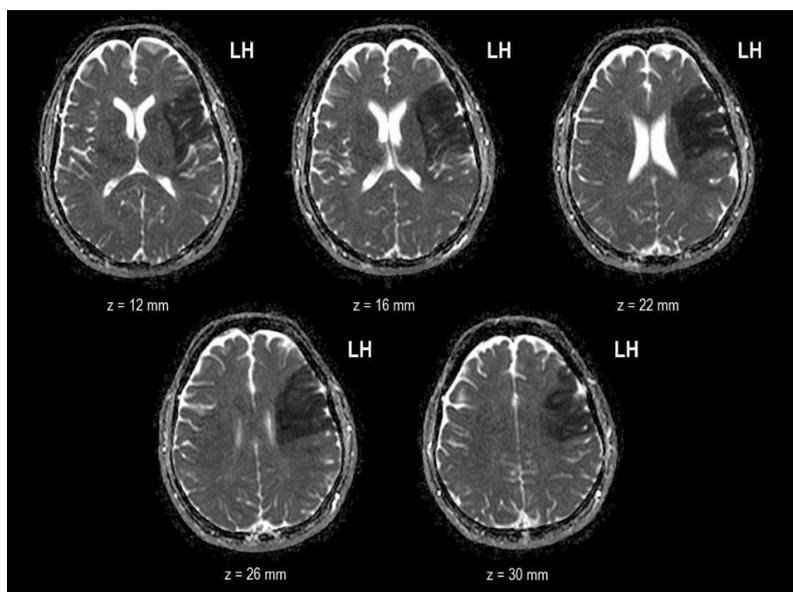


Figure 1. Anatomical MR (T1) axial slices illustrating the lesion observed in the patient, with damage of the left hemisphere (LH) in the inferior frontal gyrus, insula, partially the superior temporal gyrus, motor and premotor cortices, induced by an ischemic stroke in the superficial territory of the left middle cerebral (sylvian) artery.

Rehabilitation procedure

Rehabilitation consisted of 11 sessions using the *Ultraspeech-player* software (Hueber, 2013). Each session lasted 30 minutes and was administered 3 times per week over a four-week period.

During the same time period, the patient received conventional SLT (3 times/week). The first session was dedicated to presenting the software to the patient and explaining how it worked. The patient was seated in front of the computer screen and the experimenter manipulated the *Ultraspeech-player* software to play the sounds associated with different consonants and vowels and to simultaneously show videos of corresponding tongue or lip movements. The *Ultraspeech-player* software includes several sets of sounds and video recordings, made on several of reference speakers (speech therapists, phoneticians). In this rehabilitation program, the recordings from a female trained phonetician were used. The speaker's midsagittal tongue movements had been recorded using ultrasound imaging (60fps, 640x480pixels) and the lip movements had been captured using a video camera (60fps, 640x480pixels), with frontal view. Both sensors were maintained fixed relatively to the speaker's head using a customized version of the helmet manufactured by Articulate Instruments (www.articulateinstruments.com). Importantly, the software also allows the user to slow-down both the articulatory gesture and its corresponding acoustic realization (allowing a more intuitive visualization). The *Ultraspeech-player* software is illustrated in Supplementary Material Figure A. After the initial introductory session, the SLT based on sensory-motor integration (SMI) started and continued during eleven sessions. During each of these sessions, the patient observed and listened to the target item which he was then asked to repeat back (about five times) and then moved on to the next item, with the agreement of the experimenter. During each session, the patient performed two exercises: the first based on phonemes trained in the previous session (three or four items) and the second contained new phonemes for which he had never trained before (three or four new items). Each session was personalized according to the patient's progress and difficulties encountered during previous sessions. The trained phonemes were: French consonants and semi-consonants /w, j, p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, l, ʁ/ and vowels /a, œ, ø, e, ε, o, ɔ, y, u, i, ě, ã, õ/, isolated or combined (vowel-consonant-vowel, VCV).

All phonemes mentioned above were integrated into the software for the rehabilitation procedure, but they were classified into distinct categories as targeted phonemes and non-targeted phonemes. Indeed, the *Ultraspeech-player* software is particularly suited to train phonemes with visibly specific sagittal configurations of the tongue or frontal views of the lips. Specifically, stop consonants /p, t, k, b, d, g/, fricative consonants /f, v, s, z, ʃ, ʒ/, and the liquid consonant /l/ were selected as target phonemes. Phonemes for which the tongue and lip configurations were less informative, were considered as non-target phonemes. These include: (i) the oral vowels /i, y, u, a, œ, O, E/ (with archiphoneme: /œ/ = /œ, ø/, /O/ = /ɔ, o/ and /E/ = /e, ε/) and glides /j, w/, which can be difficult to discriminate because the difference in the oral aperture or lip configuration may be visually unnoticeable; (ii) the uvular fricative /ʁ/, whose place of articulation is difficult to extract because the uvula is not visible; (iii) the nasal vowels and consonants /ě, ã, õ, m, n/, for which information on velum lowering is not provided.

Neuropsychological assessment

The patient underwent a neuropsychological evaluation carried out by a neuropsychologist, before and after rehabilitation (Table 2). The assessment included different tests in order to evaluate: cognitive performance (Cognitive Assessment Scale for Stroke Patients, CASP; Barnay et al., 2012); executive functions (visuo-spatial span, Ruff figural fluency test, Trail

Making Test; Godefroy & GREFEX, 2008; Ruff, Light, & Evans, 1987; Wechsler, 2012); visual episodic memory (*Batterie d'Efficiency Mnésique de Signoret*, BEM84; Signoret, 1991); mental rotation abilities (Albaret & Aubert, 1996; Vandenberg & Kuse, 1978); and mood (Hospital Anxiety and Depression Scale, HAD; Zigmond & Snaith, 1983).

Table 2. Scores obtained by the patient during the neuropsychological assessment performed before and after rehabilitation (* low score; ** pathological score). This neuropsychological assessment evaluated: cognitive performance (Cognitive Assessment for Stroke Patients, CASP); executive functions (visuo-spatial span; Ruff Figural Fluency Test, RFFT; and Trail making test, TMT); visual episodic memory (“*Batterie d'efficiency mnésique*”, BEM84); mental rotation abilities; and mood (Hospital Anxiety and Depression scale, HAD).

	TASKS	BEFORE REHABILITATION	AFTER REHABILITATION
COGNITIVE ASSESSMENT FOR STROKE PATIENTS (CASP)	Naming	0.5/3	1/3
	Comprehension	3/3	3/3
	Reproducing a copy of a cube	3/4	3/4
	Graphic series	2/2	2/2
	Inhibition/Flexibility (total)	4/4	4/4
	Conflicting orders	2/2	2/2
	Go / NoGo	2/2	2/2
	Bisection of a horizontal line	2/2	2/2
	Image recall	6/6	6/6
	Praxis (total)	6/6	6/6
	Meaningless gestures - imitation	2/2	2/2
	Symbolic gestures - pantomime	2/2	2/2
	Recognition	2/2	2/2
	Calendar	6/6	6/6
Global score (CASP)	32.5/36	33/36	
EXECUTIVE FUNCTIONS ASSESSMENT	Visuo-spatial span		
	Span forward	6	6
	Span backward	6	6
	Figural fluency (RFFT)		
	Number of unique designs generated	26	24
	Percentage of perseverations (cut-off: 15%)	15.4*	16.6**
	Trail Making Test (TMT)		
	Part A: time (seconds) (cut-off : 67)	33 s	29 s
	Part A: error (cut-off: 2)	0	1
	Part B: time (seconds) (cut-off: 151)	161 s**	117 s
	Part B: error (cut-off: 3)	1	1
	Part B-A: time (seconds) (cut-off: 120)	128 s**	88 s
	Part B-A: error (cut-off: 1)	1 *	0
VISUAL EPISODIC MEMORY (BEM 84)	Immediate recall	10/12 (-0.3σ)	8.5/12 (-1.45σ)*
	Delayed recall	7.5/12 (-1.97σ)**	8/12 (-1.6σ)*
MENTAL ROTATION ABILITIES	Score	22 (standard value)	22 (standard value)
	Time (total)	3min 35	8min 06
MOOD ASSESSMENT (HAD SCALE)	Anxiety score (cut-off ≤ 7)	5	15**
	Depression score (cut-off ≤ 7)	0	13**

Speech assessment

In order to evaluate speech performance, before and after rehabilitation, the patient performed: a phoneme repetition task (PR) with isolated vowels (V = /a, œ, ø, e, ε, o, ɔ, y, u, i, ê, ã, ÷/), semi-consonants in vowel context (/ja, wa, qi/) and consonants in /a/ context with the consonants placed in initial (/Ca/) or medial (/aCa/) positions (C = /p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, ɲ, l, ʁ/); a simple word repetition task (WR); a reading task; a phonemic discrimination task. The PR (for isolated vowels and consonants in /Ca/ condition) and WR are derived from the “*Batterie d’Evaluation Clinique de la Dysarthrie*” (BECD; Auzou & Rolland-Monnoury, 2006) and the phonemic discrimination task is derived from the “*Batterie Analytique du langage écrit*” (BALE; Jacquier-Roux, Lequette, Pouget, Valdois, & Zorman, 2010). During the PR and WR the speech therapist produced the phonemes or words and the patient was asked to repeat them. The reading task was developed by the speech therapists in Grenoble hospital. During the reading task, the patient was asked to read aloud a series of syllables presented one above the other on a piece of paper. During the phonemic discrimination task, the speech therapist produced a pair of syllables and the patient was asked to indicate whether they were identical or not by using his finger to point to the words "Same" or "Not Same" written on a piece of paper. PR and reading tasks were performed three times, while WR and phonemic discrimination were performed once. All tasks were recorded via a microphone. Supplementary Material Table C showed items used in each task.

Data processing

Acoustic data

The acoustic signal obtained from the recording of PR and WR tasks, before and after rehabilitation, was recorded at 44.1 kHz. Each recording was labeled and phonetically transcribed by a trained phonetician using Phon (Hedlund & Rose, 2018; Rose et al., 2006; Rose & MacWhinney, 2014) and acoustic analyses were performed using the Praat (Boersma & Weenink, 2010) software (see Appendix A for more details). All data from PR were re-transcribed by a second phonetically-trained native speaker of French, with 82% agreement, which is more than standard values observed in patient audio data transcription.

In addition to the phonetic transcription, an acoustic analysis was carried out on the sounds judged as correctly produced, in order to assess their degree of accuracy more objectively. Typical acoustic parameters were extracted for phonemes judged as correct or emergent during the PR: the first two formants F1 and F2 for the 10 oral vowels /i, e, ε, a, y, ø, œ, u, o, ɔ/; the first two spectral moments (Center of Gravity, CG and Standard Deviation, SD) for the 6 fricative consonants /f, v, s, z, ʃ, ʒ/ in /Ca/ and /aCa/ conditions; and the voice onset time (VOT) for the 6 stop consonants /p, t, k, b, d, g/ in /Ca/ and /aCa/ conditions.

Speech performance

As concern the PR and WR tasks, the percent phonemes correct (PPC) and the PPC in words were extracted, respectively, using Phon scripts. For the reading and phonetic discrimination tasks, the average percentage of syllables correctly read and the percentage of correctly discriminated syllable pairs were extracted. In order to evaluate the accuracy during each task

we calculated global evolution indices (EI) based on scores determined for each item, allowing us to compare performance levels before and after rehabilitation. The score was +1 if the item was incorrect before but correct after rehabilitation, -1 if the item was correct before but incorrect after rehabilitation, 0 if the item was correct before and after rehabilitation or incorrect before and after rehabilitation.

Complementary analyses of the errors observed during the PR was performed. First, in order to assess the distance between phoneme targets and their actual realizations, an R script was used to create confusion matrices that represent target phonemes as a function of phonemes actually produced, both before and after rehabilitation. We performed three confusion matrices: one for vowels with archiphonemes (/E/ = /œ, ø/, /O/ = /ɔ, o/, /E/ = /e, ε/), one for consonants and semi-consonants in /Ca/ condition and one for consonants in /aCa/ condition. These archiphonemes were used because the underlying open-mid and close-mid vowels are often confused, even by typical speakers (Durand et al., 2014). Secondly, the Phon software allowed us to extract several typical phonological processes in the errors observed during the PR, especially for the consonants identified as incorrect in /Ca/ and /aCa/ conditions, before and after rehabilitation. The Phon software compares “target phonemes” with “actual phonemes”, and uses phonological rules adapted to French to extract the percentages of occurrence of a set of phonological processes identified in the errors. We extracted seven processes: devoicing (producing an voiceless consonant instead of a voiced consonant, e.g. /p/ instead of /b/); voicing (producing a voiced consonant instead of a voiceless consonant, e.g. /d/ instead of /t/); velar fronting (producing an alveolar consonant /t/ or /d/ instead of a velar /k/ or /g/, respectively); fricative stopping (producing a stop instead of a fricative or continuous consonant, e.g. /p/ instead of /f/); coronal backing (producing a posterior consonant instead of a coronal, e.g. /k/ instead of /t/); lateralization (producing a lateral consonant instead of the target consonant, e.g. /l/ instead of /n/); nasalization (producing an oral consonant instead of a nasal consonant, e.g. /b/ instead of /m/).

Statistical analyses of data

Statistical analyses were carried out to determine if there was a significant difference between before and after rehabilitation in the speech assessment tasks. Logistic regression was used to evaluate the association between accuracy during speech assessment tasks and rehabilitation. Thus, we performed five logistic regressions for: (i) the PR task of consonants in /Ca/ condition; (ii) the PR task of consonants in /aCa/ condition; (iii) the PR task of vowels; (iv) the WR task; (v) the reading task. These statistical analyses were carried out using R software. To perform each logistic regression we defined two variables: (i) a binary dependent variable, which is accuracy (correct or incorrect response to the task); (ii) a binary independent variable, which is the time (before or after rehabilitation).

Results

Neuropsychological results

The neuropsychological assessment (Table 2) indicated that the patient exhibited a picture naming deficit but comprehension, visuo-constructive abilities, mental flexibility (CASP), temporo-spatial orientation and recognition ability, before and after rehabilitation, appeared

unaffected. The patient showed correct performance in working memory and visuospatial short-term memory tasks, before and after rehabilitation. He did exhibit a deficit in cognitive flexibility during figural fluency before and after rehabilitation, and only before rehabilitation during TMT (Part B). The patient also showed impaired visual episodic memory reflected in a pathological score before rehabilitation but a low (non-pathological) score after rehabilitation. Finally, the patient presented preserved mental rotation abilities with increased processing duration and mood aggravation after rehabilitation.

Speech performance

Accuracy

Table 3 shows the patient’s performance levels during the speech assessment. The recorded values show a significant improvement in the production of consonants in /Ca/ (from 57.30% before to 80.30% after rehabilitation; $z = 2.95, p < .01$) and /aCa/ (from 32.65% before to 65.67% after; $z = 4.09, p < .001$) conditions, with an EI of +8 and +12, respectively. However, there was no significant improvement for vowels between before and after rehabilitation (34.48% before and 39.68% after rehabilitation), with an EI of +1. During the WR, the PPC contained in words increased significantly after rehabilitation (from 43.04% to 56.27%; $z = 3.06, p < .01$), with an EI of +13. Regarding the reading task, a significant improvement was observed with an increase in the percentage of correctly read syllables (from 39.22% to 66.67%; $z = 2.74, p < .01$), with an EI of +11. Finally, the patient's performance was 100% in the phonemic discrimination task, before and after rehabilitation (EI = 0).

Table 3. Accuracy (%) of each tasks performed during the speech assessment, before and after rehabilitation, judged by the transcripator as correct: the percent phonemes correct (PPC) during the phoneme repetition task for each condition (isolated vowels /a, œ, ø, e, ε, o, ə, y, u, i, ê, â, ã/, semi-consonants /j, w, ɥ/ and consonants in /Ca/ and /aCa/ conditions with C = /p, t, k, b, d, g, f, s, ʃ, v, z, ʒ, m, n, ɲ, l, ʁ/); the PPC in words during word repetition; the average percentage of syllables correctly read; and the percentage of correctly discriminated syllable pairs. We also calculated global evolution indices (EI) for each task and we performed logistic regressions for each task to assess whether the evolution of the patient's performance was significant (* $p < .01$ and ** $p < .001$).

		BEFORE REHABILITATION	AFTER REHABILITATION	EI	z value	p-value
PHONEME REPETITION	/Ca/	57.30%	80.30%	+8	2.95	0.00316*
	/aCa/	32.65%	65.67%	+12	4.09	4.31*10⁻⁵**
	/V/	34.48%	39.68%	+1	0.59	0.55462
SIMPLE WORD REPETITION		43.04%	56.27%	+13	3.06	0.00218*
READING		39.22%	66.67%	+11	2.74	0.00614*
PHONEMIC DISCRIMINATION		100.00%	100.00%	0	-	-

Confusion matrices

Figure 2 shows the confusion matrices for vowels, semi-consonants and/or consonants in /Ca/ and /aCa/ conditions. The confusion degree (CD) is a value between 0 and 1. A CD value equals to 1 indicates no confusion, i.e. the actually produced phoneme is the target phoneme (the phoneme production was 100% correct). A CD value equals to 0 means that the correct phoneme was never produced like the corresponding target.

We observed that the vowels /a, i, u/ were mastered by the patient after the SLT (Figure 2A-B). Post-therapy, the production of /E/ improved from 38% to 67% correct, with a substitution by [a] (CD = 0.25) and [i] (CD = 0.08). However, the production of /y, œ/ was impaired after rehabilitation with substitution of /y/ by [i] (correct place of articulation but incorrect lip rounding) and substitution of /œ/ by [O, y] (correct lip rounding but incorrect place of articulation) and [a, E] (incorrect manner and place of articulation). Concerning nasal vowels, the patient substituted /õ/ by [O] (CD = 1.00), /ã/ by [a] (CD = 0.50, with 25% of success of /ã/). The percentage of correct production of /ẽ/ increased (from 0% to 67%, with 33% of substitution by [a]). The nasal vowel substitution shows that while the patient was able to control the place of articulation, nasalization was never fully mastered.

For consonants in /Ca/ condition (Figure 2C-D), the results show confusion among stops /t, d, k, g/ and fricatives /f, s, z/, before rehabilitation. Post-rehabilitation, the patient perfectly produced the phonemes /t, d, k, s/. The production of /g/ improved (from 0 to 67% correct) with a substitution by [d], suggesting that voicing was correct but place of articulation was incorrect (anteriorization of the tongue). The patient also improved his production of /z, m/ but manner and place of articulation were still imperfectly controlled. The phoneme /n/ was perfectly mastered following the therapy. However, after rehabilitation, the percentage of correct production of /f/ decreased (from 100% to 75%) with a substitution by [s], suggesting correct manner of articulation, but the place of articulation was still imperfectly controlled. Finally, the semi-consonants (/j, w, ɥ/) were perfectly mastered before rehabilitation but the patient substituted /ɥ/ by /j, y/ (CD = 0.25) after rehabilitation, suggesting that the dynamics of articulators was imperfectly controlled.

Before rehabilitation, the patient exhibited difficulty producing consonants in /aCa/ condition (Figure 2 E-F) and made numerous perseveration by substituting /p, b, t/ by [k], /d, k, g/ by [t], or /z, ʒ, m, n, ɲ/ by [v]. After rehabilitation, the patient perfectly mastered the phonemes /p, b, k, ʃ, z, m, ɲ/ and he improved in his production of /t, d, g, v, ʒ, n/ while the manner and/or place of articulation as well as the voicing were imperfectly controlled for these consonants. After rehabilitation, the patient perfectly mastered the phoneme /ɲ/, which was not produced in /Ca/ condition. Finally, before and after rehabilitation, in /Ca/ and /aCa/ conditions, the patient substituted /ʁ/ by [χ] (correct place of articulation but incorrect voicing).

Phonological processes

The phonological processes that were observed in the errors (incorrectly produced phonemes) during the PR of consonants are shown in Table 4. The percentage of devoicing errors decreased between before and after rehabilitation (from 24.8% to 13.5%), suggesting better coordination between laryngeal and supra-laryngeal movements. The percentage of velar fronting decreased between before and after rehabilitation (from 50.0 to 11.1%), suggesting better control of the tongue in the anterior position. The percentage of nasalization errors decreased after rehabilitation (from 58.0% to 18.2%), suggesting better coordination between speech articulators. Finally, there was no change in the percentage of voicing errors (from 1.9% to 2.3%), fricative stopping (from 1.6 to 2.0%), coronal backing (from 4.0 to 4.1%) and lateralization errors (from 1.5 to 0.3%), between before and after rehabilitation.

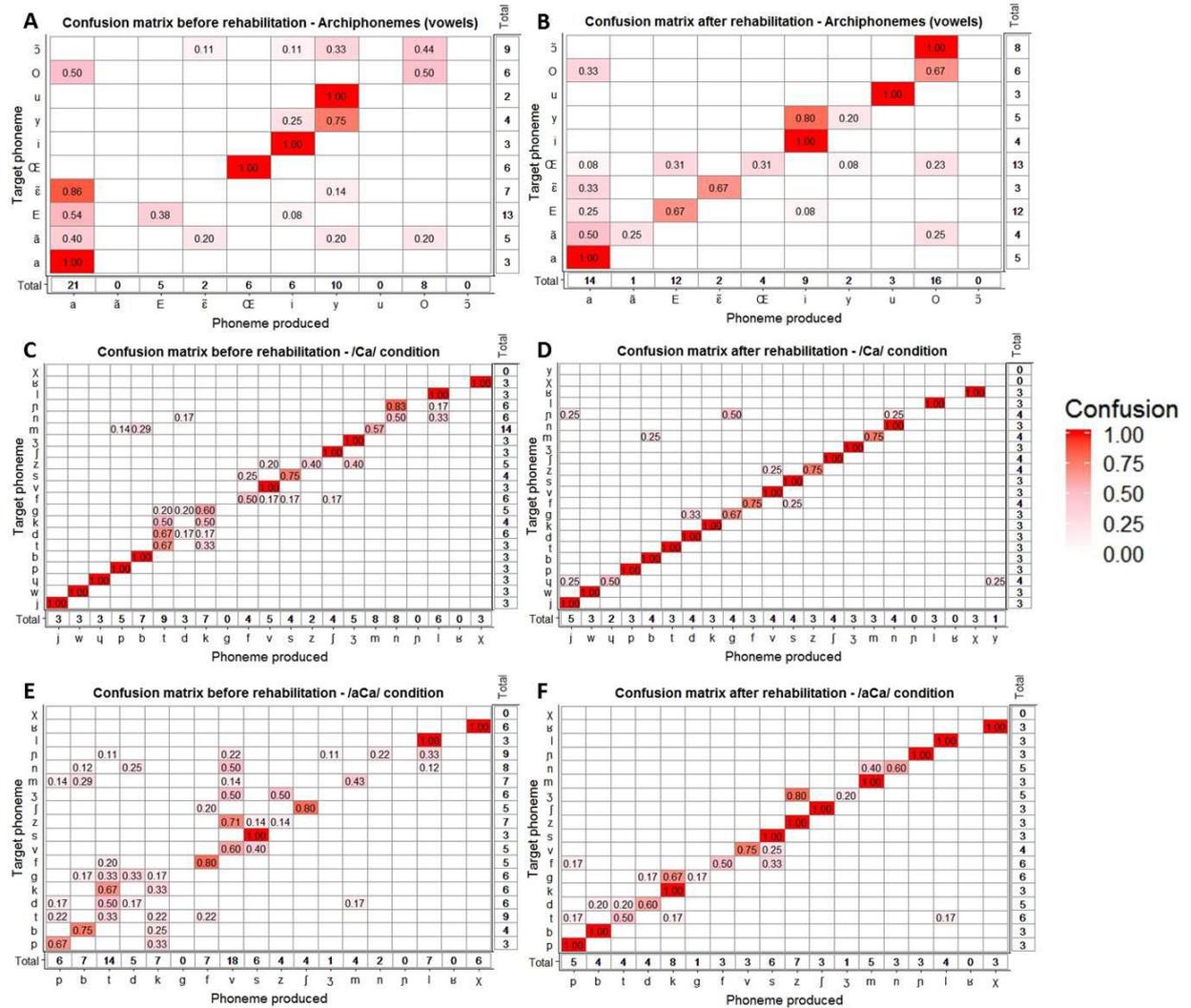


Figure 2. Confusion matrices showing target phonemes as a function of phonemes produced, as well as the number of target phonemes requested (in row) and the number of actual produced phonemes (in column). The confusion matrices show: (A-B) isolated vowels with archiphonemes ($V = /a, y, u, I, \text{E}, E, O, \text{ɛ}, \text{ã}, \text{õ}/$); (C-D) consonants and semi-consonants in /Ca/ condition ($C = /j, w, \text{ɥ}, p, t, k, b, d, g, f, s, \text{ʃ}, v, z, m, n, \text{ɲ}, l, \text{ʁ}/$); (E-F) consonants in /aCa/ condition ($C = /p, t, k, b, d, g, f, s, \text{ʃ}, v, z, \text{ʒ}, m, n, \text{ɲ}, l, \text{ʁ}/$). The confusion degree (CD) is a value between 0 (the correct phoneme was never produced like the corresponding target) and 1 (no confusion; the actually produced phoneme is the target phoneme; phoneme production was 100% correct).

Table 4. Percentage of typical phonological processes in the errors observed during the phoneme repetition task of consonants in /Ca/ and /aCa/ conditions, before and after rehabilitation. We identified 7 processes: devoicing, voicing, velar fronting, fricative stopping, coronal backing, lateralization and nasalization.

	BEFORE REHABILITATION	AFTER REHABILITATION
DEVOICING	24.8%	13.5%
VOICING	1.9%	2.3%
VELAR FRONTING	50.0%	11.1%
FRICATIVE STOPPING	1.6%	2.0%
CORONAL BACKING	4.0%	4.1%
LATERALIZATION	1.5%	0.3%
NASALIZATION	58.0%	18.2%

Acoustic results

Formant spaces (F1/F2) and intra-vowel distances obtained before and after rehabilitation, for the vowels judged as correctly produced, are presented in Figure 3 (see also Appendix A for more details on intra-vowel distance). The intra-vowel distance decreases for /i, o, œ/ while it increases for /a, e/ (Figure 3C). The vowel /ø/ was correctly produced only before but not after rehabilitation, while /ɔ, u/ were produced only after rehabilitation. The vowel /y/ was produced 3 times before rehabilitation but only one time after and the vowel /ɛ/ was produced neither before nor after rehabilitation (Figure 3A, B). The values of spectral moments (CG and SD) obtained for the voiceless fricatives are presented in Figure 4. The CG values (Figure 4 A-B) did not show the expected order (alveolar > labiodental > post-alveolar), before and after rehabilitation. However, the CG value was higher for the alveolar fricative /s/ than for the post-alveolar one /ʃ/, suggesting that the patient was able to make a distinction between the alveolar consonant /s/ and the post-alveolar /ʃ/. Whereas the SD values (Figure 4 C-D) presented the expected order (labiodental > alveolar > post-alveolar) before and after rehabilitation, suggesting that the patient successfully distinguished the labiodental /f/ from the alveolar and post-alveolar /s, ʃ/. For stops, mean VOT values are shown in Table 5. The VOT values obtained for the speech therapist (from Haldin et al., 2018) show the typical distinction between voiced (negative value) and voiceless (positive value) stop consonants. For voiceless stops produced by the patient, mean VOT values were positive and close to the normal value (compared with reference data from a speech therapist), before and after rehabilitation, whereas for voiced stops, mean VOT values were more negative than normal values, before and after rehabilitation, but values increased after rehabilitation (gradually became less negative).

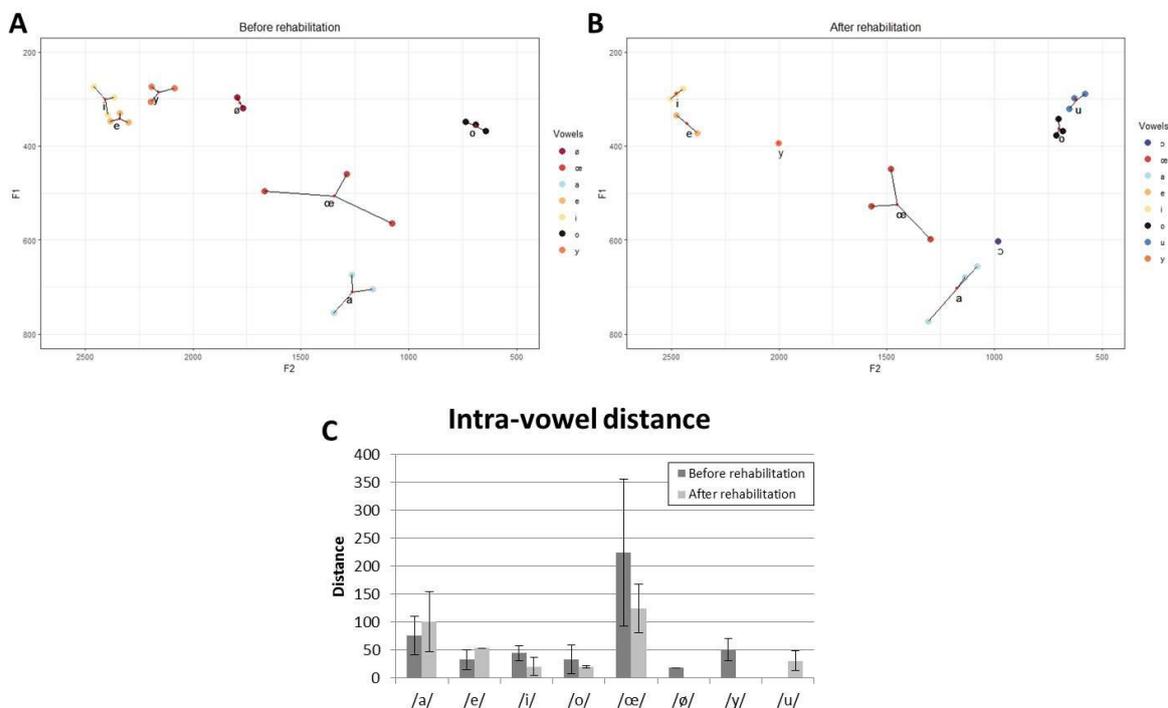


Figure 3. Vowel F1/F2 formant space for the patient before (A) and after (B) rehabilitation. The centroid (barycenter) of each vowel was identified (red dot) and intra-vowel distance (C) was calculated (distance between each vowel and its centroid).

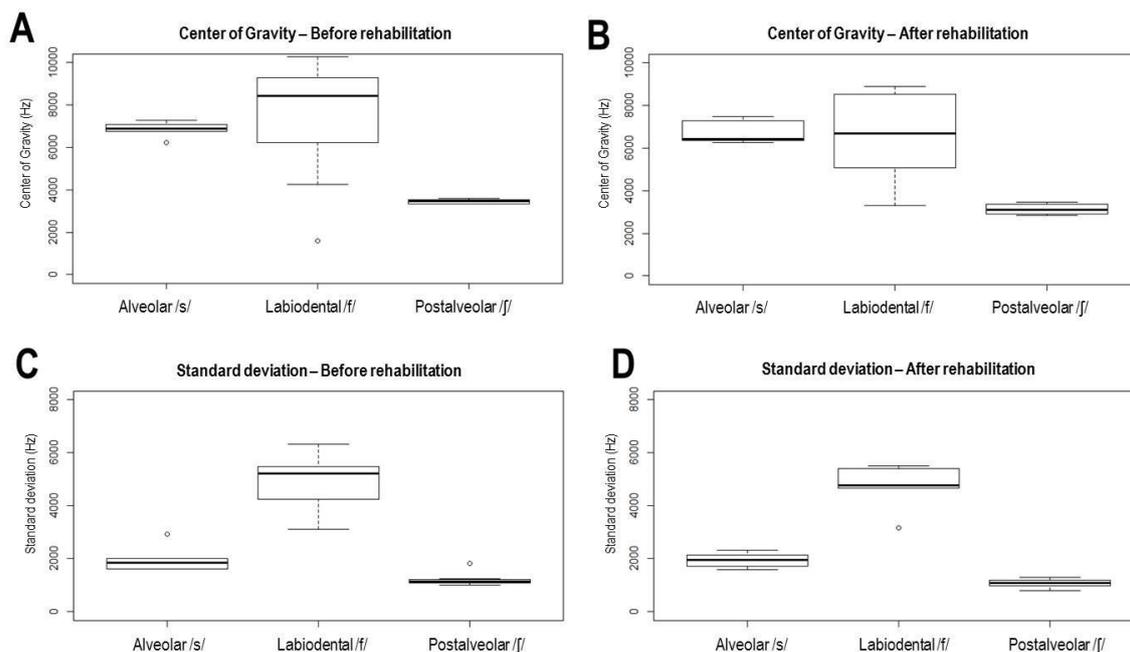


Figure 4. Boxplots of the two spectral parameters: Center of Gravity (CG) and Standard Deviation (SD), obtained before and after rehabilitation, for voiceless fricative consonants /f, s, ʃ/ in /Ca/ and /aCa/ conditions.

Table 5. Mean values of voice onset time (VOT, in ms) obtained for the patient and the speech therapist (from Haldin et al., 2018) for voiced (/b, d, g/) and voiceless (/p, t, k/) stop consonants produced during the phoneme repetition task in /Ca/ and /aCa/ conditions.

	VOT (in ms)	
	Voiced stops	Voiceless stops
BEFORE REHABILITATION	- 314.042 (± 124.057)	28.772 (± 20.727)
AFTER REHABILITATION	-264.480 (± 69.458)	31.639 (± 23.477)
SPEECH THERAPIST	-112.574 (± 46.698)	26.902 (± 10.382)

Discussion

In the present study, we evaluated the effectiveness of using visual illustration of tongue movements (pre-recorded using ultrasound imaging on a reference speaker and displayed in an intuitive manner via the *Ultraspeech-player* software) as a speech and language rehabilitation tool and assessed speech recovery in a 41-year-old male patient with non-fluent chronic aphasia (associated with right hemiparesis). The lesion was located within the left hemisphere, inducing damage of the inferior frontal gyrus, insula, primary motor and premotor cortices and partially the superior temporal gyrus. This lesion has been induced by an ischemic stroke caused by the obstruction of the left middle cerebral artery (superficial territory). Our evaluation was based on a thorough analysis of the patient’s speech performance (percentage of correct responses during specific tasks, calculation of an evolution index, confusion matrices, and phonological processes identified in the errors) and acoustic parameters measured during a phoneme repetition task (PR). We also evaluated cognitive abilities of the patient (neuropsychological assessment).

The patient showed oral expression disorders manifested through numerous perseverations and severe arthritis that hindered motor programming. The patient did not show signs of disorders of cognitive abilities evaluated during the CASP (Barnay et al., 2012), except for the naming task (Table 2). The naming disorders we observed may have been attributed to the patient's severe arthritis that made it difficult for him to produce the words containing more than two syllables, which were presented during the CASP naming task (e.g., “*papillon*”, butterfly or “*pantalon*”, pants). Murray & Coppens (2017) showed that language disorders (expression or comprehension) have a negative impact on the performance of cognitive abilities that are language-mediated. The patient showed mental flexibility disorders during figural fluency (with many perseverations) before and after rehabilitation, and only before the therapy for the TMT (Part B). Aphasic patients with left hemispheric stroke often show language production disorders but also motor deficits (e.g. hemiparesis) which are additional factors that contribute to difficulties of patients during cognitive assessment. Tasks requiring motor activity, such as TMT or figural fluency, depend on motor speed and motor abilities, which represent additional obstacles for these patients and hinder their performance (Bonini et al., 2015; Lee & Pyun, 2014). The patient also showed visual episodic memory disorders with a lack of consolidation, before rehabilitation. Bonini et al., (2015) showed that post-stroke patients with aphasia presented poorer performance than non-aphasic patients during visual memory task. This result, also observed in our study, combined with correct performance in picture recognition task suggests that non-verbal encoding was preserved but that there was a deficit in the ability to retrieve visual information which may be stored using verbal encoding. Non-verbal ability disorders were difficult to interpret and may be due to: the involvement of verbal skills in nonverbal tests; the dysfunction of brain because of the lesion; or the involvement of language as additional resource to realize nonverbal task (Ardila & Rubio-Bruno, 2018; Fonseca et al., 2017). Finally, the patient did not exhibit any mental rotation disorders, but processing duration increased after rehabilitation, which could be linked to the decline in mood related to his personal life situation at the time of the assessment. As mentioned in previous studies, it is necessary to maintain the integrity of some cognitive abilities (verbal and visuo-spatial short-term memory, working memory, executive function) because of their impact on aphasia severity, language function and its recovery (Dignam et al., 2017; Fonseca et al., 2017; Seniów et al., 2009). Indeed, deficits in memory, executive functions, speed processing have been shown to be associated with an increase of aphasia severity (Fonseca et al., 2018). In addition, maintaining visuo-spatial processing abilities is necessary since the *Ultraspeech-player* software requires the patient to visualize typical articulatory gestures (lip and tongue movements) performed during speech production, in order to correct his own articulatory movements. Thus, the results of the neuropsychological assessment (integrity of some cognitive abilities) are in favour of the use of this rehabilitation method.

The speech assessment showed that the patient's speech production abilities improved after rehabilitation and the patient's phonological awareness remained preserved both pre- and post-therapy (Table 3). Indeed, naming of written items and phoneme production abilities in words significantly improved after rehabilitation (positive EI). Improvement in reading performance suggests an enhancement in the grapheme-phoneme conversion ability. Results of the PR task showed no significant improvement for vowels: the patient's oral production of /E, u, O/ and

nasal /ɛ̃, ã/ appeared to improve after the therapy, while his production of /ɛ, y/ vowels declined (Figure 2). The intra-vowel distances decreased after the rehabilitation for /i, o, œ/ (suggesting a better reproducibility of these vowels across repetitions) but increased for /a, e/ (suggesting an increase in intra-vowel variability). For /i, e/, post-therapy, the patient produced one repetition less than pre-therapy, which may in part explain the variation of the intra-vowel distances measured pre- and post-therapy. It should be noted that some vowels are visually quite similar (in their lip or tongue configurations) in the *Ultraspeech player* software (/ø, œ/, /o, ɔ/ or /e, ε/). Thus, vowels do not constitute a privileged target for the software-based rehabilitation which could explain the absence of improvement, in contrast to consonants. Indeed, consonant production abilities, during PR, improved between before and after rehabilitation in both /Ca/ (EI = +8) and /aCa/ (EI = +12) conditions. The patient improved in the production of stops and fricatives (less perseveration in /aCa/ condition and less confusion in both /Ca/ and /aCa/ conditions). He also improved in the production of nasal consonants /m, n/ in /Ca/ and /aCa/ conditions, but also /ɲ/ in /aCa/ condition, after rehabilitation. However, under both conditions, the patient failed to produce the phoneme /ʁ/ which he substituted with /χ/ (devoicing). These results, in accordance with the analysis of phonological processes identified in the errors, suggest a better control of speech articulators (tongue, velum, larynx...) which is attested by a decrease in velar fronting, devoicing and nasalization errors after rehabilitation. Several previous works have reported that patients with Broca's aphasia present voicing and nasalization disorders characterized by impairments in the timing and coordination of articulators (between the release of supra-glottal closure and the onset of glottal excitation, for voiced stops; between the release of the closure in the oral cavity and the velum opening, for nasal consonants), as well as laryngeal control deficit for fricative consonants (Blumstein, 2016; K. Kurowski et al., 2003; K. M. Kurowski et al., 2007). Our results are also consistent with the findings of Nespoulous et al., (2013). They showed that patients produce devoicing errors more frequently than voicing errors, although voicing errors (voicing of a voiceless target consonant) do remain (see also Valdois & Nespoulous, 1998). The decrease in devoicing and nasalization errors observed here suggests a more adequate timing and coordination of articulators (laryngeal and supra-laryngeal for voicing; closure in the oral cavity and velum opening for nasalization). The articulatory improvements observed in our patient therefore suggest that this rehabilitation strategy is potentially adapted to intervention with Broca's aphasia patients. Moreover, as mentioned by Valdois & Nespoulous (1998), patients with Broca's aphasia also show errors in place of articulation for voiceless consonants leading to substitutions such as /t/ instead of /k/ (velar fronting). Visualizing the target (correct) tongue movements may help the patient to correct his own production. The decrease in velar fronting errors suggests that our patient did gain greater control of his tongue position.

In addition, acoustic analyses on the stop consonants judged as correctly produced (Table 5) attest that the patient correctly produced voiceless stops, in terms of VOT, before and after rehabilitation. However, he improved his production of voiced stops with an increase of mean VOT value (approaching what is considered as a typical value, and closer to the values obtained for the speech therapist) but this value remained lower than normal, with an important amount of prevoicing. These results are consistent with those of some studies that have shown that patients maintain the difference in VOT between voiced and voiceless stops (Nespoulous et al.,

2013; Ryalls et al., 1995). The longer prevoicing observed in our patient for voiced stops (relative to reference values in French), may be associated with an anticipatory strategy to prepare voicing long before consonantal occlusion, in order to facilitate voiced consonant production. These VOT measurements further attest that coordination between laryngeal and supralaryngeal gestures was improved after therapy, although not reaching typical values.

For fricative consonants, the CG values (Figure 4) objectively attests that following the therapy the patient was able to make a distinction between alveolar /s/ and post-alveolar /ʃ/ fricatives (CG values: alveolar > post-alveolar; Nissen & Fox, 2005) and between labiodental /f/ and alveolar and post-alveolar /s, ʃ/ fricatives (SD values: labiodental > alveolar > post-alveolar; Nissen & Fox, 2005). These acoustic measurements further attest that place of articulation was better controlled after therapy.

An important aspect and advantage of integrating a visual articulatory illustration software (such as *Ultraspeech-player*) into SLT is that it offers the patient both flexibility and autonomy. The patients can self-regulate the training, by selecting the phoneme to train on during the exercise and by moving to the next item at will, e.g. after about five repetitions. They can also slow down or speed up the articulatory gesture and its corresponding acoustic realization. Autonomy and self-adaptation is a potentially significant factor in terms of motivation and sustained engagement that are both clearly linked to progress and ultimately recovery (Kirmess & Maher, 2010). Given that the experimenter was present during the rehabilitation, she could help the patient if errors persisted during the trained phonemes repetition, which could have influenced rehabilitation and recovery. Nevertheless, in order to enhance the autonomy of the patient, the experimenter tried to interfere as little as possible. At the time of this study, our patient was relatively young, which may also be a contributing factor in successful speech recovery. Several studies have reported that age does play a role and that full speech recovery is more likely in younger patients (Ferro & Crespo, 1988; Holland et al., 1989; OGREZEANU et al., 1994). Other authors posit that age is not a factor and dispute these results (for a review see Ellis & Urban, 2016). Moreover, adding *illustration-based rehabilitation technique* to conventional SLT increases the total duration of rehabilitation (intensive rehabilitation), which can also contribute to improving speech production abilities after rehabilitation. Taken together, our results show that visual illustration clearly facilitated improvement in terms of the patient's control of the position and coordination of his speech articulators (e.g., tongue, lips, velum, teeth etc.), notably for stop and fricative consonants pronunciation (phonemes targeted by this specific therapy). These results were observed not only in the percentage of phonemes judged as correct but also attested in terms of objective acoustic parameters. The patient improved in his production of target consonants in /Ca/ and /aCa/ conditions and exhibited greater control over his tongue position and voicing. It should be noted that the patient had no previous experience (lacked familiarity and training) with consonant repetition in /aCa/ condition before the therapy began. Visual illustration allowed this patient to focus specifically on practicing vowel or consonant pronunciation in isolated and combined conditions (vowel-consonant-vowel). The patient's improved performance in producing consonants in /aCa/ condition supports the argument that visual articulatory illustration is an effective approach for speech recovery, particularly for a few target phonemes. The patient simultaneously received the conventional therapy and the illustration-based rehabilitation program; thus, the results can be

attributed to either of these methods. However, some results, such as the specific improvement on items which were never trained in the conventional therapy but which were included in the new method, are in favor of the latter. The fact that the patient showed little to no improvement in terms of vowel production did, however, indicate that he was still not fully able to control his speech articulators after this therapy.

Certain important limitations of this study should be noted: (i) this is a single case study and our results should be confirmed in further investigations involving multiple subjects; (ii) we used the same tasks before and after rehabilitation and the improved performance may be due to a task learning effect or a test-retest effect; (iii) at the time of this study wherein the patient received SLT using the *Ultraspeech-player*, he was simultaneously receiving conventional SLT, which could mean that certain results may be attributed to either the conventional therapy alone or a combination of the two. The specificity in the articulatory improvement observed, suggests that the *Ultraspeech-player*-based therapy was indeed effective, however. The *Ultraspeech-player* software is particularly suited to train phonemes that are clearly distinct in terms of sagittal configuration of the tongue or of frontal view of the lips. The sagittal lingual configurations associated with French vowels that only differ in terms of aperture, from close to mid-open (e.g. /i, e, ε/ or /u, o, ɔ/ or /ø, œ/), are not sufficiently visually distinct in ultrasound imaging. Therefore, the *Ultraspeech-player* software is not the best help for distinguishing between vowels on the aperture dimension. The fact that the patient's improvements are more important for consonants than vowels, suggest that his evolution was mainly due to the use of the *Ultraspeech-player* software, rather than to the simultaneous conventional SLT that he also benefited from.

In future studies we plan to add to our current speech evaluations, an assessment dedicated to modulations of brain activity during fMRI speech production tasks both before and after SLT, and a separate assessment dedicated to resting-state functional connectivity. We also plan to evaluate speech and language rehabilitation using a cross-over protocol, in which patients will perform illustration-based rehabilitation (in addition to conventional therapy) and then conventional SLT only and vice-versa. This will allow us to compare the two rehabilitation methods and to better describe which improvements are specifically due to the illustration-based rehabilitation.

Conclusion

This study shows the effect of visual articulatory illustration (provided by the *Ultraspeech-player* software), on speech recovery (improvement of speech production with better positioning of speech articulators) in a patient with post-stroke non-fluent aphasia in chronic stage. Our results need to be confirmed in a more controlled study with multiple subjects. However, this study shows: (i) the appropriateness of using a novel method based on visual illustration of speech articulators for speech and language rehabilitation, in semi-autonomy; and (ii) the necessity of using detailed subjective and objective intra-speaker evaluation in speech production in order to fully evaluate speech abilities and speech and language rehabilitation methods.

Acknowledgments

We thank the patient coordinator (Emmanuel Clarac) for her helpful contribution to this study. We also thank the patient MG for having accepted to participate in our study.

Declaration of interest statement

The authors report no conflict of interest.

References

- Abramson, A. S., & Whalen, D. H. (2017). Voice Onset Time (VOT) at 50: Theoretical and practical issues in measuring voicing distinctions. *Journal of Phonetics*, 63, 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.wocn.2017.05.002>
- Acher, A., Fabre, D., Hueber, T., Badin, P., Detante, O., Cousin, E., Pichat, C., Loevenbruck, H., Haldin, C., & Baciú, M. (2016). Retour visuel en aphasiologie : résultats comportementaux, acoustiques et en neuroimagerie. In N. Joyeux & S. Topouzkhaniyan (Eds.), *XVIèmes Rencontres Internationales d'Orthophonie. Orthophonie et technologies innovantes* (pp. 227–260). Ortho Edition.
- Albaret, J.-M., & Aubert, E. (1996). Test de rotation mentale de Vandenberg : Étalonnage 15-19 ans. *Evolutions Psychomotrices*, 8(34), 169-178. <https://www.semanticscholar.org/paper/Etalonnage-15-19-ans-du-test-de-rotation-mentale-de-Albaret-Aubert/e92c437ac501de1f746ade82df1de5bbafb41284>
- Ardila, A., Bernal, B., & Rosselli, M. (2016). Why Broca's Area Damage Does Not Result in Classical Broca's Aphasia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(249). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00249>
- Ardila, A., & Rubio-Bruno, S. (2018). Aphasia from the inside: The cognitive world of the aphasic patient. *Applied Neuropsychology: Adult*, 25(5), 434–440. <https://doi.org/10.1080/23279095.2017.1323753>
- Auzou, P., & Rolland-Monnoury, V. (2006). BECD: batterie d'évaluation clinique de la dysarthrie. Ortho édition.
- Badin, P., Elisei, F., Bailly, G., Savariaux, C., Serrurier, A., & Tarabalka, Y. (2007). Têtes parlantes audiovisuelles virtuelles : Données et modèles articulatoires - applications. *Revue de Laryngologie Otologie Rhinologie*, 128(5), 289–295. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00260326>
- Badin, P., Elisei, F., Bailly, G., & Tarabalka, Y. (2008). An audiovisual talking head for augmented speech generation: models and animations based on a real speaker's articulatory data. In F. G. Perales & R. B. Fisher (Eds.), *Proceedings of the Vth Conference on Articulated Motion and Deformable Objects (AMDO 2008)* (Vol.5098, pp. 132–143). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70517-8_14
- Badin, P., Tarabalka, Y., Elisei, F., & Bailly, G. (2008). Can you “read tongue movements”? In 9th Annual Conference of the International Speech Communication Association (Interspeech 2008) (pp. 2635–2637). Brisbane, Australia. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00333688>
- Baqué, L., Marczyk, A., Rosas, A., & Estrada, M. (2015). Disability, repair strategies and communicative effectiveness at the phonic level: Evidence from a multiple-case study. In C. Astésano & M. Jucla (Eds.), *Neuropsycholinguistic Perspectives in Language Cognition* (pp. 144–165). Routledge.

- Barnay, J.-L., Gregoire, W., Marc, R., Huei-Yune, B. K., Dischler, F., De Boissezon, X., Lucas-Pineau, B., & Bénaim, C. (2012). Presentation of the cognitive assessment scale for stroke patient (CASP). *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 55(1), e188. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2012.07.481>
- Baum, S. R., Blumstein, S. E., Naeser, M. A., & Palumbo, C. L. (1990). Temporal dimensions of consonant and vowel production: An acoustic and CT scan analysis of aphasic speech. *Brain and Language*, 39(1), 33–56. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(90\)90003-Y](https://doi.org/10.1016/0093-934X(90)90003-Y)
- Bauman-Waengler, J. A. (2012). *Articulatory and phonological impairments: a clinical focus*. Pearson.
- Benoît, C., & Le Goff, B. (1998). Audio-visual speech synthesis from French text: Eight years of models, designs and evaluation at the ICP. *Speech Communication*, 26(1), 117–129. [https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(98\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(98)00045-4)
- Benson, D. F., & Ardila, A. (1996). *Aphasia: a clinical perspective*. Oxford University Press.
- Bhogal, S. K., Teasell, R., & Speechley, M. (2003). Intensity of Aphasia Therapy, Impact on Recovery. *Stroke*, 34(4), 987–993. <https://doi.org/10.1161/01.STR.0000062343.64383.D0>
- Blumstein, S. E. (2016). Psycholinguistic Approaches to the Study of Syndromes and Symptoms of Aphasia. In G. Hickok & S. L. Small (Eds.), *Neurobiology of Language* (pp. 923–933). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407794-2.00074-2>
- Blyth, K. M., McCabe, P., Madill, C., & Ballard, K. J. (2016). Ultrasound visual feedback in articulation therapy following partial glossectomy. *Journal of Communication Disorders*, 61, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2016.02.004>
- Boersma, P., & Weenink, D. (2010). Praat: doing phonetics by computer (Version 6.0.05) [Computer software]. <http://www.praat.org/>
- Bonini, M. V., Radanovic, M., Bonini, M. V., & Radanovic, M. (2015). Cognitive deficits in post-stroke aphasia. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, 73(10), 840–847. <https://doi.org/10.1590/0004-282X20150133>
- Brady, M. C., Kelly, H., Godwin, J., Enderby, P., & Campbell, P. (2016). Speech and language therapy for aphasia following stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 6, 1-314. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD000425.pub4>
- Breitenstein, C., Grewe, T., Flöel, A., Ziegler, W., Springer, L., Martus, P., Huber, W., Willmes, K., Ringelstein, E. B., Haeusler, K. G., Abel, S., Glindemann, R., Domahs, F., Regenbrecht, F., Schlenck, K.-J., Thomas, M., Obrig, H., de Langen, E., Rucker, R., ... Bamborschke, S. (2017). Intensive speech and language therapy in patients with chronic aphasia after stroke: A randomised, open-label, blinded-endpoint, controlled trial in a health-care setting. *Lancet*, 389(10078), 1528-1538. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30067-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30067-3)
- Chen, Y.-P. P., Johnson, C., Lalbakhsh, P., Caelli, T., Deng, G., Tay, D., Erickson, S., Broadbridge, P., El Refaie, A., Doube, W., & Morris, M. E. (2016). Systematic review of virtual speech therapists for speech disorders. *Computer Speech & Language*, 37(Supplement C), 98–128. <https://doi.org/10.1016/j.csl.2015.08.005>

- Cleland, J., Scobbie, J. M., & Wrench, A. A. (2015). Using ultrasound visual biofeedback to treat persistent primary speech sound disorders. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 29(8–10), 575–597. <https://doi.org/10.3109/02699206.2015.1016188>
- Cortese, M. D., Riganello, F., Arcuri, F., Pignataro, L. M., & Buglione, I. (2015). Rehabilitation of aphasia: application of melodic-rhythmic therapy to Italian language. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 520. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00520>
- Damasio, A. R. (1998). Signs of aphasia. In M. T. Sarno, *Acquired aphasia* (pp. 25–41). Elsevier.
- Dignam, J., Copland, D., O'Brien, K., Burfein, P., Khan, A., & Rodriguez, A. D. (2017). Influence of Cognitive Ability on Therapy Outcomes for Anomia in Adults With Chronic Poststroke Aphasia. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, 60(2), 406–421. https://doi.org/10.1044/2016_JSLHR-L-15-0384
- Durand, J., Laks, B., & Lyche, C. (2014). French phonology from a corpus perspective: The PFC program. In D. Jacques, G. Ulrike, & K. Gjert (Eds.), *The Oxford Handbook of Corpus Phonology* (p. 486-497). Oxford University Press. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01330704>
- El Hachioui, H., Lingsma, H. F., Sandt-Koenderman, M. E., Dippel, D. W. J., Koudstaal, P. J., & Visch-Brink, E. G. (2013). Recovery of aphasia after stroke: a 1-year follow-up study. *Journal of Neurology*, 260(1), 166–171. <https://doi.org/10.1007/s00415-012-6607-2>
- Ellis, C., & Urban, S. (2016). Age and aphasia: a review of presence, type, recovery and clinical outcomes. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 23(6), 430–439. <https://doi.org/10.1080/10749357.2016.1150412>
- Engelter, S. T., Gostynski, M., Papa, S., Frei, M., Born, C., Ajdacic-Gross, V., Gutzwiller, F., & Lyrer, P. A. (2006). Epidemiology of Aphasia Attributable to First Ischemic Stroke. *Stroke*, 37(6), 1379–1384. <https://doi.org/10.1161/01.STR.0000221815.64093.8c>
- Erber, N. P. (1975). Auditory-visual perception of speech. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 40(4), 481–492.
- Fabre, D., Hueber, T., Canault, M., Bedoin, N., Acher, A., Bach, C., Labourion, L., & Badin, P. (2016). Apport de l'échographie linguale à la rééducation orthophonique. In N. Joyeux & S. Topouzkhaniyan (Eds.), *XVIèmes Rencontres Internationales d'Orthophonie. Orthophonie et technologies innovantes* (pp. 199–225). Ortho Edition.
- Please replace the reference with: Fagel, S., & Madany, K. (2008). A 3-D virtual head as a tool for speech therapy for children. *9th Annual Conference of the International Speech Communication Association (Interspeech 2008)* (pp. 2643-2646). Brisbane, Australia. https://www.isca-speech.org/archive/interspeech_2008/i08_2643.html
- Feenaughty, L., Basilakos, A., Bonilha, L., den Ouden, D.-B., Rorden, C., Stark, B., & Fridriksson, J. (2017). Non-fluent speech following stroke is caused by impaired efference copy. *Cognitive Neuropsychology*, 34(6), 333–346. <https://doi.org/10.1080/02643294.2017.1394834>
- Ferro, J. M., & Crespo, M. (1988). Young adult stroke: neuropsychological dysfunction and recovery. *Stroke*, 19(8), 982–986. <https://doi.org/10.1161/01.STR.19.8.982>

- Fonseca, J., Ferreira, J. J., & Pavão, M. I. (2017). Cognitive performance in aphasia due to stroke: a systematic review. *International Journal on Disability and Human Development*, 16(2), 127–139. <https://doi.org/10.1515/ijdh-2016-0011>
- Fonseca, J., Raposo, A., & Martins, I. P. (2018). Cognitive functioning in chronic post-stroke aphasia. *Applied Neuropsychology: Adult*, 26(4), 355-364. <https://doi.org/10.1080/23279095.2018.1429442>
- Freeman, F. J., Sands, E. S., & Harris, K. S. (1978). Temporal coordination of phonation and articulation in a case of verbal apraxia: A voice onset time study. *Brain and Language*, 6(1), 106–111. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(78\)90048-2](https://doi.org/10.1016/0093-934X(78)90048-2)
- Fridriksson, J., Basilakos, A., Hickok, G., Bonilha, L., & Rorden, C. (2015). Speech Entrainment Compensates for Broca's Area Damage. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 69, 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.04.013>
- Fridriksson, J., Hubbard, H. I., Hudspeth, S. G., Holland, A. L., Bonilha, L., Fromm, D., & Rorden, C. (2012). Speech entrainment enables patients with Broca's aphasia to produce fluent speech. *Brain*, 135(12), 3815–3829. <https://doi.org/10.1093/brain/aws301>
- Garnier, M., Ménard, L., & Alexandre, B. (2018). Hyper-articulation in Lombard speech: An active communicative strategy to enhance visible speech cues? *Journal of the Acoustical Society of America*, 144(2), 1059–1074. <https://doi.org/10.1121/1.5051321>
- GEREN. (2002). Batterie d'évaluation de la négligence unilatérale: BEN. Ortho Edition.
- Gerstenecker, A., & Lazar, R. M. (2019). Language recovery following stroke. *The Clinical Neuropsychologist*, 0(0), 1–20. <https://doi.org/10.1080/13854046.2018.1562093>
- Gibbon, F., Hardcastle, W. J., Crampin, L., Reynolds, B., Razzell, R., & Wilson, J. (2001). Visual feedback therapy using electropalatography (EPG) for articulation disorders associated with cleft palate. *Asia Pacific Journal of Speech, Language and Hearing*, 6(1), 53–58. <https://doi.org/10.1179/136132801805576798>
- Godefroy, O., & GREFEX. (2008). Fonctions exécutives et pathologies neurologiques et psychiatriques : Evaluation en pratique clinique. De Boeck université.
- Haldin, C., Acher, A., Kauffmann, L., Hueber, T., Cousin, E., Badin, P., Perrier, P., Fabre, D., Perennou, D., Detante, O., Jaillard, A., Lœvenbruck, H., & Baciú, M. (2018). Speech recovery and language plasticity can be facilitated by Sensori-Motor Fusion training in chronic non-fluent aphasia. A case report study. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 32(7), 595–621. <https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>
- Hamilton, R. H., Chrysikou, E. G., & Coslett, B. (2011). Mechanisms of Aphasia Recovery After Stroke and the Role of Noninvasive Brain Stimulation. *Brain and Language*, 118(1–2), 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.02.005>
- Hedlund, G., & Rose, Y. (2018). Phon (Version 3.0.0) [Computer software].
- Holland, A. L., Greenhouse, J., Fromm, D., & Swindell, C. (1989). Predictors of language restitution following stroke: a multivariate analysis. *Journal of Speech and Hearing Research*, 32(2), 232–238. <https://doi.org/10.1044/jshr.3202.232>

- Hueber, T. (2013). Ultraspeech-player : Intuitive visualization of ultrasound articulatory data for speech therapy and pronunciation training. In *14th Annual Conference of the International Speech Communication Association (Interspeech 2013)*, 752-753. https://www.isca-speech.org/archive/interspeech_2013/i13_0752.html
- Jacquier-Roux, M., Lequette, C., Pouget, G., Valdois, S., & Zorman, M. (2010). BALE: batterie analytique du langage écrit. Groupe Cogni-Sciences, Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition.
- Kirmess, M., & Maher, L. M. (2010). Constraint induced language therapy in early aphasia rehabilitation. *Aphasiology*, 24(6–8), 725–736. <https://doi.org/10.1080/02687030903437682>
- Kurowski, K., Hazen, E., & Blumstein, S. E. (2003). The nature of speech production impairments in anterior aphasics: An acoustic analysis of voicing in fricative consonants. *Brain and Language*, 84(3), 353–371. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(02\)00555-2](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(02)00555-2)
- Kurowski, K. M., Blumstein, S. E., Palumbo, C. L., Waldstein, R., & Burton, M. W. (2007). Nasal Consonant Production in Broca's and Wernicke's Aphasics: Speech Deficits and Neuroanatomical Correlates. *Brain and Language*, 100(3), 262–275. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2006.10.002>
- Lee, B., & Pyun, S.-B. (2014). Characteristics of Cognitive Impairment in Patients With Post-stroke Aphasia. *Annals of Rehabilitation Medicine*, 38(6), 759–765. <https://doi.org/10.5535/arm.2014.38.6.759>
- Li, F., Edwards, J., & Beckman, M. E. (2009). Contrast and covert contrast: The phonetic development of voiceless sibilant fricatives in English and Japanese toddlers. *Journal of Phonetics*, 37(1), 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.wocn.2008.10.001>
- Massaro, D. W., & Light, J. (2004). Using visible speech to train perception and production of speech for individuals with hearing loss. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 47(2), 304–320. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2004\)025](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2004)025)
- Mazaux, J.-M., & Orgogozo, J.-M. (1981). *Echelle d'évaluation de l'aphasie adaptée du Boston Diagnostic Aphasia examination*. Issy les Moulineaux: EAP Editions Psychotechniques.
- Mcgurk, H., & Macdonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264(5588), 746–748. <https://doi.org/10.1038/264746a0>
- Meunier, C. (2007). Phonétique acoustique. In P. Auzou (Éd.), *Les dysarthries* (p. 164-173). De Boeck Solal. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00250272>
- Montgomery, D. (1981). Do dyslexics have difficulty accessing articulatory information? *Psychological Research*, 43(2), 235–243. <https://doi.org/10.1007/BF00309832>
- Murray, L., & Coppens, P. (2017). Formal and informal assessment of aphasia. In I. Papathanasiou & P. Coppens (Eds.), *Aphasia and Related Neurogenic Communication Disorders* (2nd ed., pp. 81-108). Jones & Bartlett Learning.
- Nespoulous, J.-L., Baqué, L., Rosas, A., Marczyk, A., & Estrada, M. (2013). Aphasia, phonological and phonetic voicing within the consonantal system: preservation of phonological oppositions and compensatory strategies. *Language Sciences*, 39, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.langsci.2013.02.015>

- Nespoulous, J.-L., Lecours, A. R., & Lafond, D. (1986). MT-86-Protocole Montréal-Toulouse d'examen linguistique de l'aphasie. Ortho-Edition.
- Nissen, S. L., & Fox, R. A. (2005). Acoustic and spectral characteristics of young children's fricative productions: A developmental perspective. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(4), 2570–2578. <https://doi.org/10.1121/1.2010407>
- Ogrezeanu, V., Voinescu, I., Mihăilescu, L., & Jipescu, I. (1994). « Spontaneous » recovery in aphasics after single ischaemic stroke. *Romanian Journal of Neurology and Psychiatry*, 32(2), 77-90. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8075023/#>
- Preston, J. L., Brick, N., & Landi, N. (2013). Ultrasound biofeedback treatment for persisting childhood apraxia of speech. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 22(4), 627–643. [https://doi.org/10.1044/1058-0360\(2013/12-0139\)](https://doi.org/10.1044/1058-0360(2013/12-0139))
- Rose, Y., & MacWhinney, B. (2014). The PhonBank Project: Data and Software-Assisted Methods for the Study of Phonology and Phonological Development. In J. Durand, U. Gut, & G. Kristoffersen (Eds.), *The Oxford Handbook of Corpus Phonology* (pp. 308–401). Oxford University Press.
- Rose, Y., MacWhinney, B., Byrne, R., Hedlund, G., Maddocks, K., O'Brien, P., & Wareham, T. (2006). Introducing Phon: A Software Solution for the Study of Phonological Acquisition. In D. Bamman, T. Magnitskaia, & C. Zaller (Eds.), *Proceedings of the 30th Annual Boston University Conference on Language Development* (pp. 489–500). Somerville, MA: Cascadilla Press.
- Roxburgh, Z., Scobbie, J. M., & Cleland, J. (2015). Articulation therapy for children with cleft palate using visual articulatory models and ultrasound biofeedback. *Proceedings of the 18th International Congress of Phonetic Sciences*. Glasgow.
- Ruff, R. M., Light, R. H., & Evans, R. W. (1987). The ruff figural fluency test: A normative study with adults. *Developmental Neuropsychology*, 3(1), 37–51. <https://doi.org/10.1080/87565648709540362>
- Ryalls, J., Provost, H., & Arsenault, N. (1995). Voice Onset Time production in French-speaking aphasics. *Journal of Communication Disorders*, 28(3), 205–215. [https://doi.org/10.1016/0021-9924\(94\)00009-O](https://doi.org/10.1016/0021-9924(94)00009-O)
- Sato, M., & Grabski, K. (2014). La nature sensorimotrice de la parole. *Rééducation Orthophonique*, 260, 33–57. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01486067/>
- Seniów, J., Litwin, M., & Leśniak, M. (2009). The relationship between non-linguistic cognitive deficits and language recovery in patients with aphasia. *Journal of the Neurological Sciences*, 283(1–2), 91–94. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2009.02.315>
- Signoret, J.-L. (1991). Batterie d'efficience mnésique, BEM 144. Elsevier.
- Sumbly, W. H., & Pollack, I. (1954). Visual Contribution to Speech Intelligibility in Noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 26(2), 212–215. <https://doi.org/10.1121/1.1907309>
- Valdois, S., & Nespoulous, J.-L. (1998). Perturbations du traitement phonétique et phonologique du langage. In X. Seron & M. Jeannerod (Eds.), *Neuropsychologie humaine* (Mardaga, pp. 360–374).

Van Der Meulen, I., Van De Sandt-Koenderman, M. W. M. E., Heijenbrok, M. H., Visch-Brink, E., & Ribbers, G. M. (2016). Melodic Intonation Therapy in Chronic Aphasia: Evidence from a Pilot Randomized Controlled Trial. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(533).

<https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00533>

Vanbellingen, T., Kersten, B., Van de Winkel, A., Bellion, M., Baronti, F., Müri, R., & Bohlhalter, S. (2011). A new bedside test of gestures in stroke: the apraxia screen of TULIA (AST). *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 82(4), 389–392. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2010.213371>

Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47(2), 599–604. <https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.2.599>

Wechsler, D. (2012). MEM-IV, Échelle clinique de mémoire de Wechsler (Éditions du Centre de psychologie appliquée, Ed.). Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.

Zigmond, A. S., & Snaith, R. P. (1983). The hospital anxiety and depression scale. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 67(6), 361–370. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0447.1983.tb09716.x>

Supplementary Material

Appendix A – Description of analysis of acoustic data

Five tiers were created in the Phon software (Hedlund & Rose, 2018; Rose & MacWhinney, 2014; Rose et al., 2006): the first tier contains the spelling of phoneme or word, the second contains target phoneme or word (in International Phonetic Alphabet, IPA), the third contains actual phoneme or word (in IPA), the fourth contains the sound accuracy (only for phoneme repetition task, PR) and the fifth contains comments from the transcriber. The level of accuracy was labeled as “correct”, “incorrect”, “emergent” (the target phoneme is preceded by a non-target phoneme, for example: for the target /z/ the patient produces the sound /s/ that gradually transforms into /z/) or “voicing error” (place and manner of articulation were correct but voicing was incorrect, for example the phoneme /p/ instead of /b/ or /b/ instead of /p/).

Praat scripts (Boersma & Weenink, 2010) allowed us to extract typical acoustic parameters for phonemes judged as correct or emergent during the PR: the first two formants F1 and F2 for the oral vowels; the first two spectral moments (Center of Gravity, CG and Standard Deviation, SD) for the fricative consonants; and the voice onset time (VOT) for the stop consonants. For vowels, formant values (F1 and F2) were obtained using a Praat script to detect the formants (between 0 and 5000 Hz) with a pitch of 0.01s, a Gaussian analysis window of 0.025s and a preemphasis of 50Hz. An R script (R Development Core Team, 2008) was used to plot formant spaces (F1 as a function of F2 for each repetition of each vowel). Intra-vowel distance was considered in order to capture acoustic stability of productions of the same vowel across repetitions, which is normally small. This measure refers to the distance within each vowel between its coordinate point in the (F2, F1) space and the corresponding centroid (barycenter). For each vowel, we computed the centroid point as the arithmetic mean of each coordinate (F2, F1). For fricative consonants, a Praat script allowed us to extract the spectral moments. These values were calculated by taking a 40ms Hamming window centered on the middle of the noise bandwidth generated by the consonant. Only the first two spectral moments (CG and SD) were considered here. The CG allows for the distinction between alveolar /s/ and post-alveolar /ʃ/; whereas the SD lets us distinguish between labiodental /f/ and alveolar and post-alveolar fricatives /s, ʃ/ (Li, Edwards, & Beckman, 2009). Conventionally, CG values should be in the following order: alveolar > labiodental > post-alveolar, while SD values should follow this order: labiodental > alveolar > post-alveolar (Nissen & Fox, 2005). An R script allowed us to represent these values as a boxplot. For stop consonants, VOT was determined by subtracting the instant of the burst (beginning of the consonant explosion) from the instant of voicing onset. We then calculated the average VOT values obtained, before and after rehabilitation, for voiced and voiceless stop consonants. The standard VOT values for the speech therapist were obtained in Haldin et al., (2018).

Figure A. Illustration of the display provided by Ultraspeech-player software (Hueber, 2013; <http://www.ultraspeech.com>).



Table A. Scores obtained by the patient during the assessment of language comprehension and production, performed before rehabilitation.

	Tasks	Scores
Oral comprehension BDAE	Word discrimination	71/72
	Body part identification	18/20
	Commands	15/15
	Complex ideational material	12/12
Written comprehension BDAE	Symbol and word discrimination	10/10
	Word recognition	8/8
	Word/picture matching	10/10
	Sentences-paragraphs comprehension	6/10
Oral expression BDAE	Automatized sequences	0/9
	Recitation	1/2
	Singing	0/2
	Responsive naming	1/10
Written expression (left hand) BDAE	Writing mechanics	3/3
	Serial writing	42/46
	Primer-level dictation	15/15
	Spelling to dictation	6/10
	Sentences to dictation	4/12
	Written naming	10/10
Transcoding BDAE	Word repetition	2/10
	Word reading	Impossible
Praxis MT86	Buccofacial praxis	5/6

Table B. Scores obtained by the patient during the neuropsychological assessment performed before rehabilitation. This assessment validates the inclusion criteria: absence of upper limb apraxia (Apraxia Screen of Tulia, AST); absence of spatial neglect (bells test and line bisection); familiarity with digital tools.

NEUROPSYCHOLOGICAL ASSESSMENT – INCLUSION CRITERIA					
UPPER LIMB APRAXIA (AST)	Imitation				
	Meaningless gestures	1/1			
	Intransitive (communicative) gestures	1/1			
	Transitive (tool-related) gestures	5/5			
	Pantomime				
	Intransitive (communicative) gestures	2/2			
	Transitive (tool-related) gestures	3/3			
	Global score	12/12			
SPATIAL NEGLECT	Bells test				
	Omissions (left)	0/15			
	Omissions (right)	0/15			
	Omissions (middle)	0/5			
	Omissions (total number)	0/35			
	Omissions (left minus right)	0			
	Omission column 1	1			
	Time (seconds)	112 sec			
	Bisection 20 cm				
	Deviation line 1	-2 mm			
	Deviation line 2	3 mm			
	Mean deviation	0.5 mm			
	FAMILIARITY WITH DIGITAL TOOLS	Use of the computer tools	Never	Occasionally	Often
Use frequency		Several time/hour	Several time/day	Several time/week	Several time/month
Activity type		Internet-research	Internet-email	Online games	Social networks

Table C. Syllables, vowels and words used for the speech evaluation, with orthographic or phonetic notation.

TASKS	NUMBER OF REPETITION	ITEMS
PHONEME REPETITION	Vowels	3 times a, œ, ø, e, ε, o, ɔ, y, u, i, ê, ã, õ
	Semi-consonants	3 times ja, wa, ɥi
	Consonants /Ca/	3 times pa, ta, ka, ba, da, ga, fa, sa, ʃa, va, za, ʒa, ma, na, ɲa, la, ʁa
	Consonants /aCa/	3 times apa, ata, aka, aba, ada, aga, afa, asa, aʃa, ava, aza, aʒa, ama, ana, apa, ala, aʁa
SIMPLE WORD REPETITION	1 time	Râteau (<i>rake</i>), élu (<i>elected</i>), cheminée (<i>chimney</i>), combine (<i>combine</i>), gagnant (<i>winner</i>), douceur (<i>gentleness</i>), faute (<i>fault/mistake</i>), singe (<i>monkey</i>), neveu (<i>nephew</i>), aise (<i>easy</i>), appât (<i>bait</i>), gnon (<i>wallop</i>), paix (<i>peace</i>), moral (<i>moral</i>), gère (<i>manage</i>), tendon (<i>tendon</i>), azur (<i>azure</i>), Yves (<i>Yves</i>), veuf (<i>widower</i>), échasse (<i>stilt</i>), œuf (<i>egg</i>), ligne (<i>line</i>), nous (<i>us</i>), occupe (<i>occupy/assume</i>), zona (<i>zoster or hang around</i>), bague (<i>ring</i>), onde (<i>wave</i>), huche (<i>bin for bread</i>), égal (<i>equal</i>), outil (<i>tool</i>), léger (<i>light</i>), Europe (<i>Europe</i>), envie (<i>wish</i>), aube (<i>sunrise</i>), rein (<i>kidney</i>), sac (<i>bag</i>), infâme (<i>nefarious</i>)
READING	3 times	pa, ta, ka, ba, da, ga, fa, sa, ʃa, va, za, ʒa, ma, na, ɲa, la, ʁa
PHONEMIC DISCRIMINATION	1 time	pa/ba, si/ti, ma/ma, da/ta, za/za, ga/ca, fa/fa, ni/mi, da/da, vi/fi, ba/ba, ki/ki, sa/za, chi/ji

References

- Boersma, P., & Weenink, D. (2010). Praat: doing phonetics by computer (Version 6.0.05). Retrieved from <http://www.praat.org/>
- Haldin, C., Acher, A., Kauffmann, L., Hueber, T., Cousin, E., Badin, P., ... Baciú, M. (2018). Speech recovery and language plasticity can be facilitated by Sensori-Motor Fusion training in chronic non-fluent aphasia. A case report study. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 32(7), 595–621. <https://doi.org/10.1080/02699206.2017.1402090>
- Hedlund, G., & Rose, Y. (2018). Phon (Version 3.0.0).
- Li, F., Edwards, J., & Beckman, M. E. (2009). Contrast and covert contrast: The phonetic development of voiceless sibilant fricatives in English and Japanese toddlers. *Journal of Phonetics*, 37(1), 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.wocn.2008.10.001>
- Nissen, S. L., & Fox, R. A. (2005). Acoustic and spectral characteristics of young children's fricative productions: A developmental perspective. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(4), 2570–2578. <https://doi.org/10.1121/1.2010407>
- Rose, Y., & MacWhinney, B. (2014). The PhonBank Project: Data and Software-Assisted Methods for the Study of Phonology and Phonological Development. In J. Durand, U. Gut, & G. Kristoffersen (Eds.), *The Oxford Handbook of Corpus Phonology* (pp. 308–401). Oxford: Oxford University Press.
- Rose, Y., MacWhinney, B., Byrne, R., Hedlund, G., Maddocks, K., O'Brien, P., & Wareham, T. (2006). Introducing Phon: A Software Solution for the Study of Phonological Acquisition. In D. Bamman, T. Magnitskaia, & C. Zaller (Eds.), *Proceedings of the 30th Annual Boston University Conference on Language Development* (pp. 489–500). Somerville MA: Cascadilla Press.

Complémenter la méthode orthophonique avec des nouvelles approches de rééducation du langage et de la parole dans l'aphasie post-AVC

Complementing the speech therapy method with new approaches to speech and language rehabilitation in post-stroke aphasia

Céline Haldin¹, Hélène Loevenbruck¹, Monica Baciu^{1,CA}

¹Université Grenoble-Alpes, Laboratoire de psychologie et neurocognition, UMR CNRS 5105, 1251 avenue Centrale, 38058 Grenoble cedex 9, France

^{CA} LPNC, UMR CNRS 5105, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, monica.baciu@univ-grenoble-alpes.fr

Résumé

La rééducation du langage et de la parole dans le cadre de l'aphasie post-AVC est fondamentale pour aider le patient à retrouver ses capacités de communication, ainsi que son insertion familiale, sociale et professionnelle. Cependant, en phase chronique, l'efficacité de la méthode classique de rééducation, la méthode orthophonique, diminue et l'accès aux soins se complique dû aux limites géographiques, financières et liées à la santé des patients. Ainsi, de nouveaux programmes de rééducation combinant la rééducation classique avec de nouvelles approches de rééducation, semblent nécessaires. Dans cette brève revue, nous présenterons de telles méthodes potentiellement utiles dans l'aphasie chronique, telle que la thérapie par contrainte induite, la thérapie musicale et les méthodes technologiques (télé-rééducation). Nous postulons qu'afin de choisir le programme de rééducation le plus adapté, il convient de respecter trois principes : l'intensité (appliquer une rééducation intensive), l'engagement social (favoriser les interactions sociales et la communication) et la personnalisation (s'adapter aux compétences des patients et prendre en compte leurs objectifs de récupération). Nous proposons un programme de rééducation qui combine la rééducation classique et la télé-rééducation (rééducation en autonomie, via des applications sur ordinateur ou tablette). Ce programme présente de nombreux avantages : augmentation de l'intensité de la rééducation, favorisation de l'engagement social avec l'implication de l'entourage, et adaptation aux difficultés du patient et aux compétences qu'il ou elle souhaite améliorer.

Mots clés : aphasie post-AVC, orthophonie, rééducation, contrainte induite, thérapie musicale, télé-rééducation, langage

Abstract

Speech and language rehabilitation in post-stroke aphasia is fundamental to help patients regain their communication skills, as well as their family, social, and professional integration. However, in the chronic phase, the effectiveness of the classic rehabilitation method (the speech therapy method) decreases and the access to care becomes more complicated due to geographical, financial, and health-related limitations. Thus, new rehabilitation programs combining conventional rehabilitation approaches with new ones seem to be necessary. In this brief review, we will present several potentially useful methods in chronic aphasia, such as induced constraint therapy, music therapy, and technological methods (tele-rehabilitation). We postulate that in order to choose the most appropriate rehabilitation program, three principles should be respected: intensity (apply intensive rehabilitation), social engagement (promote social interaction and communication), and personalization (adapt to the patients' skills and take into account their recovery goals). We propose a rehabilitation program that combines traditional rehabilitation and tele-rehabilitation (rehabilitation in autonomy, via applications on a computer or tablet). This program has several advantages: it increases the intensity of the rehabilitation, promotes social involvement with the involvement of family and friends, and adapts to the patient's difficulties and the skills this patient wishes to improve.

Keywords: post-stroke aphasia, speech therapy, rehabilitation, constraint, music therapy, tele-rehabilitation, language

Introduction

Les troubles du langage tels que ceux observés dans l'aphasie survenant après une lésion cérébrale, interfèrent avec les capacités de communication des patients, avec des conséquences familiales, sociales et professionnelles importantes [1]. L'aphasie est un trouble de la production ou de la compréhension du langage et de la parole, dû à des lésions acquises des aires cérébrales spécialisées dans le langage [2]. Parmi les différentes causes pouvant endommager ces régions, l'accident vasculaire cérébral (AVC) est la plus fréquente, avec 21-38 % d'aphasie post-AVC [3].

De manière générale, deux types d'aphasies sont décrits, en fonction de la fluence du langage observée chez le patient : l'aphasie fluente et l'aphasie non fluente. L'aphasie non fluente, qui inclut les aphasies globale, transcorticale motrice et de Broca, est caractérisée par une réduction de la production de parole, une production de parole laborieuse, un accès au vocabulaire limité, des phrases courtes, une prosodie altérée, des erreurs articulatoires et un agrammatisme. Ce type d'aphasie est généralement associé à des lésions au niveau des territoires cérébraux antérieurs (régions frontales et temporales antérieures). L'aphasie fluente, quant à elle, inclut l'aphasie transcorticale sensorielle, de conduction, de Wernicke et l'aphasie anomique. Ce type d'aphasie se caractérise par une production de parole avec des phrases sans signification, de longueur normale ou supranormale, et une compréhension altérée du langage. Ces troubles s'associent à des lésions plutôt postérieures avec une atteinte des régions temporales, pariétales, temporo-pariéto-occipitales, ou de la connexion entre les régions frontales et temporales, généralement par le faisceau arqué [2, 4].

Classiquement, le trouble du langage observé chez ces patients est pris en charge avec une rééducation orthophonique mise en place très rapidement et de façon intensive, dans les jours qui suivent l'AVC. Cette rééducation se poursuit au cours des mois, voire années, suivant l'AVC, afin d'accompagner et de permettre aux patients de récupérer leurs capacités de communication, favorisant ainsi leur réintégration sociale [5, 6]. En effet, la rééducation du langage et de la parole a pour objectif, non seulement la récupération des capacités langagières et de communication, mais également une meilleure réinsertion sociétale des patients, de manière générale [1]. La durée moyenne de la rééducation orthophonique classique est d'environ deux ans avec une diminution de la fréquence des séances de rééducation après trois mois. Celle-ci varie en fonction des patients et de leur autonomie [6] et permet au patient de s'adapter à son environnement, en optimisant ses capacités de communication et d'échange avec autrui dans la vie quotidienne [5]. L'une des manifestations les plus fréquentes des troubles langagiers étant l'anomie, parfois appelée manque du mot (i.e. la difficulté à récupérer les mots dans la mémoire lexicale et à les produire), les méthodes utilisées lors de la rééducation orthophonique ont comme objectif la facilitation de ce processus. Pour cela, la rééducation orthophonique est fondée sur l'observation et la répétition par le patient des productions langagières de l'orthophoniste. Différentes stratégies comportementales sont proposées par les orthophonistes lors des séances. À titre d'exemple, on utilise la stratégie analytique, s'appuyant sur des mécanismes de restauration (rétablissement des comportements linguistiques tels qu'ils étaient avant l'AVC) et de réorganisation (contourner le déficit en utilisant les voies ou les mécanismes préservés). Une autre stratégie est l'approche fonctionnelle, fondée principalement sur des mécanismes palliatifs, faisant appel à des modes de communication plutôt non verbale (gestes, mimiques, dessins, etc.), s'appuyant ainsi sur les fonctionnalités intactes [5, 6].

Malgré l'efficacité indéniable de la rééducation orthophonique classique dans les phases aiguë et subaiguë post-AVC, son bénéfice décroît au cours du temps et la récupération du langage ralentit en phase chronique. Par conséquent, les compétences langagières atteignent un plateau après trois à six mois post-AVC [7], avec la persistance de troubles. Étant donné cette situation, il semble nécessaire de développer de nouvelles méthodes de rééducation pouvant être utilisées en complément de la rééducation orthophonique classique, dans le cadre de programmes de rééducation qui pourraient être adaptés et implémentés selon le profil de chaque patient. En effet, de nombreuses méthodes, basées sur de nouvelles approches issues du domaine de la recherche, ont été proposées récemment, telles que des méthodes comportementales (thérapie par contrainte induite, thérapie musicale, méthodes technologiques, etc. [8-10]), des approches neurophysiologiques avec neurostimulation (stimulation magnétique transcrânienne ou stimulation transcrânienne à courant direct [11, 12]) et la thérapie pharmacologique [13, 14]. Cependant, ces méthodes sont peu utilisées dans la pratique clinique courante, au-delà du cadre de la recherche expérimentale. Une des raisons qui pourraient expliquer leur faible utilisation en pratique courante, est la nécessité de les normer, de former des orthophonistes pour les utiliser avec une bonne compréhension des principes thérapeutiques qui les sous-tendent, et/ou une maîtrise adéquate du matériel technique à utiliser. Par ailleurs, un plus grand effort doit être fait par les chercheurs qui développent ces nouvelles approches, pour faire connaître, diffuser et expliquer les principes de ces différentes méthodes. Ainsi, un tandem recherche-orthophonie devrait être mis en place, au bénéfice des patients, afin d'explorer et d'évaluer l'efficacité de différentes méthodes et de faire l'inventaire de celles qui maximisent l'efficacité de la rééducation pour les patients [15].

Dans cette revue non exhaustive, que nous proposons à titre plutôt pratique, nous nous focalisons sur quelques méthodes comportementales qui pourraient être utilisées en complément de l'orthophonie classique, en raison de leur plus grande facilité d'utilisation, de leur nature non-invasive, de leur faible coût et de leur utilisation d'un matériel facilement transportable. Ces méthodes pourront donc être mises en place plus aisément en complément de la rééducation orthophonique, c'est-à-dire dans des programmes de rééducation combinant plusieurs méthodes. En effet, nous soulignons que l'objectif selon nous, n'est pas de remplacer la rééducation orthophonique classique, mais de proposer de nouvelles pistes à intégrer dans des programmes de rééducation et qui permettraient de mettre à profit le potentiel de récupération de chaque patient et de l'aider à récupérer le langage et la parole, même en phase chronique post-AVC, quand la méthode orthophonique classique semble atteindre ses limites.

Dans ce contexte, nous partons du principe que la rééducation du langage (a) doit être adaptée à chaque patient, en tenant compte de son profil linguistique et neurocognitif, et (b) doit se baser sur des programmes de rééducation associant diverses méthodes, fondées sur les nouvelles technologies et les modèles théoriques actuels du traitement du langage [1, 16].

Concrètement, nous présenterons diverses méthodes de rééducation comportementale complémentaires, leurs objectifs, leurs conditions d'applications ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. En particulier, nous nous focaliserons sur la thérapie par contrainte induite, la thérapie musicale et la thérapie basée sur des méthodes technologiques nouvellement développées, car il s'agit de méthodes développées à l'origine pour des patients aphasiques en phase chronique, lorsque le potentiel de récupération diminue et que l'accès aux soins se complique pour des raisons de santé, géographiques ou financières [17, 18]. Une synthèse des études utilisant ces méthodes dans l'aphasie fluente et non fluente en phase chronique est présentée dans le tableau 1. Cela nous permettra, *in fine*,

de présenter les paramètres importants à prendre en compte et de proposer des pistes pour la constitution de programmes de rééducation pour optimiser la récupération du langage et de la parole chez les patients aphasiques en phase chronique.

Thérapie par contrainte induite

La thérapie par contrainte induite (TCI), adaptée de la thérapie par contrainte motrice post-AVC, peut être utilisée pour la rééducation de patients atteints d'aphasie fluente ou non fluente post-AVC, présentant une capacité de production du langage partiellement préservée [17]. La thérapie par contrainte motrice a été proposée, à l'origine, pour permettre une récupération des capacités de mouvements des membres au-delà d'un an après l'AVC, là où les autres méthodes échouent. De la même façon, la TCI a été proposée initialement pour permettre la récupération du langage chez les patients aphasiques en phase chronique [19]. En effet, cette méthode était peu proposée dans les phases précoces suivant l'AVC, en raison de l'intensité importante de la rééducation et de la difficulté d'accès aux patients capables de suivre cette thérapie. Cependant, certaines études ont évalué l'effet de cette méthode en phase subaiguë (pour un exemple, voir [20]). Rappelons que dans notre revue, nous traitons uniquement des études évaluant les méthodes de rééducation en phase chronique.

La TCI est donc fondée sur trois principes : la contrainte, l'intensité et la personnalisation. En effet, lors de la TCI, les patients doivent utiliser uniquement la parole (production orale), les autres moyens de communication (gestes, écriture, etc.) sont proscrits. De plus, la thérapie est effectuée à haute intensité (5 jours/semaine) et la difficulté des tâches est progressivement augmentée en fonction des performances des patients [10, 21]. La TCI est fondée sur le postulat que l'échec, lors de la production de parole, entraîne une frustration chez les patients, ce qui entraîne une diminution des tentatives de production orale et une augmentation de l'utilisation de stratégies compensatoires, associée à une diminution de la stimulation des régions cérébrales impliquées dans la production du langage. L'utilisation de la TCI à haute intensité encourage donc les patients à la production orale, ce qui permet de stimuler la réorganisation corticale et l'activation des régions cérébrales impliquées dans la production de la parole et favorise l'utilisation de la parole pour communiquer [10, 19]. En pratique, les séances de rééducation sont organisées en groupes de deux à quatre patients qui réalisent des jeux de langage. Un exemple est l'utilisation d'un jeu de cartes avec des images. Chaque carte est en double, et l'objectif est d'obtenir le plus de paires d'images possibles. Pour cela, les patients doivent demander verbalement, sans utiliser de gestes iconiques ni de pointage, à l'un des autres patients s'il possède la carte. Celui-ci devra également répondre verbalement, avec une réponse de type confirmation, demande de clarification ou négation [19].

Afin d'évaluer l'efficacité de la TCI, différentes études ont mesuré les performances langagières (répétition, dénomination, compréhension, communication dans la vie quotidienne, fluence verbale) avant et après une période de rééducation. Dans ces études, les auteurs ont comparé des groupes ayant bénéficié de la TCI, à des groupes contrôles bénéficiant d'une thérapie classique (non contrainte) ou ne suivant aucune rééducation [19, 22-24]. L'évaluation de la TCI peut également être réalisée de façon croisée (en crossover). Dans ce cas, un sous-groupe de patients bénéficie de la TCI puis d'une thérapie non contrainte, et un autre sous-groupe bénéficie de la combinaison inverse (thérapie non contrainte puis TCI) [25]. Dans une revue systématique et méta-analyse, Wang, et al. [10] ont montré que la TCI semblait efficace pour améliorer les performances en dénomination, compréhension,

Tableau 1 : Design et principaux résultats des études évaluant l'effet des nouvelles méthodes de rééducation.

Auteurs	Type d'intervention (nombre des sessions, temps, durée)	Combiné avec TC	Nombre de participants I/C	I/C	Type d'aphasie	Délai post-onset (mois)	Mesures	Résultats
Pulvermüller et al., 2001 [19]	TCI (10jours, 3-4h/jour, total moyen de 31,5h) ou TC (3-5 semaines, total moyen de 33,9h)	Non	10/7	TCI/TC	NF, F/NF, F	98,2 (74,2)/24,0 (20,6)	Evaluation du langage (dénomination, répétition, compréhension, Token test ; AAT) et des capacités de communication dans la vie quotidienne (CAL).	Amélioration des performances de langage (Token test, dénomination et compréhension) et des capacités de communication dans la vie quotidienne après la TCI. Pas d'effet similaire de la TC.
Szafarski et al., 2015 [22]	TCI (10jours consécutifs, 4h/jour dont 4 * 45min avec 15-15min de pause)	Non	14/10	TCI/Aucune	Non précisé	38 (59)/30 (58)	Evaluation de la dénomination (BNT), fluence alphabétique (COWAT) et catégorielle (SFT), compréhension de phrase (BDAE), vocabulaire réceptif (PPVT III) et capacité de communication dans la vie quotidienne (Mini-CAL).	Pas de différence significative entre les deux groupes pour les différentes tâches de langage, sauf pour les capacités de communication qui s'améliore de façon plus importante à 12 semaines post-traitement dans le groupe TCI.
Kurland et al., 2016 [23]	TCI (10 jours consécutifs, 3h/jour) ou PACE (10 jours consécutifs, 3h/jour)	Non précisé	12/12	TCI/PACE	NF, F/NF, F	35,6/17,8	Evaluation de la sévérité de l'aphasie, la compréhension orale, la répétition de phrases (BDAE), la dénomination (BNT), le nombre d'unités produites (CTPD), les capacités de communication (PICA) et la dénomination d'objets et d'actions sur des items entraînés et non-entraînés.	Amélioration sur les items entraînés et non-entraînés lors de la dénomination dans les deux groupes. Amélioration sur les autres tâches de langage dans les deux groupes sauf pour le nombre d'unité qui augmente dans le groupe TCI et diminue dans le groupe PACE. Pas de différence significative entre les groupes.
Stahl et al., 2016 [25]	Adaptation de la TCI avec ILAT (6sessions, 1 semaine, 3,5h/session) ou	Non	9/9 Dont 2 avec un traumatisme	ILAT - NT/NT - ILAT (cross-over)	NF/NF	45,4 (21,9)/105,8 (80,3)	Evaluation du langage : répétition, dénomination,	Effet plus important de la TCI par rapport à la NT avec une amélioration du langage après la TCI, indépendamment du

	NT (6sessions, 1 semaine, 3,5h/session)	crânien et une encéphalopathie virale	compréhension et Token test (A.A.T).	moment d'administration de la TCI (en premier ou après la NT).
Nenert et al., 2017 [24]	Non TCI (10 sessions, 10jours, 4h/jour)	11/8 (38 sujets sains)	60,2/41,9 NF, F/NF, F	Amélioration en dénomination (BNT) au cours du temps (mesure avant/après rééducation et à 3mois post-traitement) corrélée à une réorganisation au niveau cérébral, pour les 2 groupes. Amélioration non spécifique au groupe ayant la TCI.
Wan et al., 2014 [36]	Non MIT (5 sessions/semaine, 15 semaines, 90min/jour), 2 conditions : MIT intensive ou aucun traitement	11/9	MIT/Aucune NF/NF	Réduction de la FA au niveau de la substance blanche qui sous-tend le GFI, le GTS postérieur et le cingulum postérieur à droite, dans le groupe ayant eu la MIT. Amélioration de la fluence associée à la réduction de la FA au niveau du GFI droit, dans le groupe MIT.
Cortese et al., 2015 [31]	Non Thérapie musicale (4sessions/semaine, 16 semaines, 30-40min)	6	MRT	Amélioration de la parole spontanée (langage automatique, prosodie, communication, sémantique, phonétique) et des performances en répétition, dénomination et compréhension. Maintien de l'effet à 6 mois post-intervention.

Van Der Meulen et al., 2016 [33]	MIT (6 semaines, 5h/semaine dont 3h avec l'orthophoniste)	Oui	10/7	MIT - Aucune/Aucune - MIT (cross over)	NF/NF	33,1 (19,4)/42,6 (23,7)	Répétition (items entraînés et non-entraînés), AAT (dénomination, répétition, compréhension orale), ANELT, Rappel d'histoire (Sabadel). Evaluation de l'effet direct (items entraînés), indirect (items non-entraînés et répétition de l'AAT) et de la généralisation aux tâches de langage (dénomination, ANELT, Sabadel)	Amélioration pour les items entraînés, pas de généralisation aux éléments non-entraînés, à la récupération de mots ou à la communication dans la vie quotidienne. Pas de maintien de l'effet à 6 mois post-intervention.
Haro-Martínez et al., 2019 [34]	MIT (12 sessions, 6 semaines, 30min/jour)	Non	10/10	MIT - Aucune/Aucune - MIT (cross over)	NF/NF	21,8 (17,5)/27,7 (18)	Evaluation de la répétition et la compréhension (BDAE) et des capacités de communication dans la vie quotidienne (CAL).	Amélioration des compétences de communication (CAL) après la rééducation et maintien de l'effet à 3 mois. Pas d'effet sur la répétition et la compréhension (BDAE).
Van Vuuren & Cherney 2014 [42]	TR avec AphasiaRx™ (6 sessions/semaine, 3 semaines, 90minutes/jour avec 3 * 30min), 2 conditions : avec ou sans support auditif et visuel	Non précisé	4/4	TR condition 1 - <i>word</i> - TR condition 2 (cross-over)	Non précisé	26,4 (19,2)	Evaluation des performances des participants : mesure d'un pourcentage de productions correctes des mots contenus dans des phrases.	Amélioration des performances avec une récupération plus rapide et un gain plus important lors de la rééducation avec support auditif et visuel, par rapport à la rééducation sans support (récupération 2,3 fois plus rapide).
Meltzer et al., 2018 [15]	TR ou TC en personne (10 semaines, 1h/semaine) avec 3 sessions (30min) dédiées à la communication avec l'entourage (enseignement de	Non	17/16	TR/TC	Non précisé	> 6	Mesure de quotient d'aphasie (AQ, WAB) et des capacités de communication évaluées par le patient lui-même (CCRSA) ou l'entourage (CETI).	Amélioration de l'AQ et des capacités de communication selon l'entourage (mesure subjective, CETI) dans les deux groupes. Amélioration plus importante de la confiance du patient en ses capacités de communication (mesure subjective, CCRSA)

répétition, langages écrit et oral. Cependant, selon certaines études, la TCI n'est pas plus efficace que la rééducation non contrainte (pour une revue, voir aussi [21]). En effet, selon Nenert, et al. [24], une amélioration des performances en dénomination, corrélée à la réorganisation cérébrale, est observée après la TCI chez des patients aphasiques. Notamment, l'amélioration des performances en dénomination est corrélée à une modification de l'activité au niveau des gyri temporal, précentral et post-central à droite, du thalamus et des gyri frontaux supérieur et médian à gauche. Cependant, cette amélioration et cette réorganisation ne sont pas spécifiques à la TCI. Des résultats similaires ont été observés dans une étude récente [23], dans laquelle les auteurs ont montré que la TCI n'était pas plus efficace qu'une autre méthode de rééducation non contrainte (*Promoting Aphasic Communicative Effectiveness* [PACE]). Certaines études ont toutefois montré une efficacité plus importante de la TCI par rapport à une rééducation non contrainte, avec une amélioration sur certaines tâches de langage telles que la dénomination, la répétition, la compréhension ou encore les capacités de communication dans la vie quotidienne [19, 22, 25].

Il semble donc que l'efficacité de cette méthode, lors de la rééducation de patients aphasiques fluents et non fluents en phase chronique, soit démontrée, puisqu'elle permet une amélioration des performances langagières (dénomination, répétition, compréhension, communication dans la vie quotidienne) [19, 22-25]. Cependant, selon certaines études, son efficacité n'est pas supérieure à celles d'autres méthodes de rééducation [23, 24]. Toutefois, cette méthode qui se déroule avec un programme intensif (2-4 heures/jour, 5 jours/semaine), présente des avantages liés à sa courte durée (1-2 semaines). En effet, il est possible d'observer une amélioration des performances de langage même après une courte période [19]. Cette méthode présente également des avantages pour l'orthophoniste. En effet, les séances de rééducation se déroulent principalement en groupe (de 2 à 4 patients), ce qui permet donc à l'orthophoniste de voir plusieurs patients en même temps. De plus, la rééducation en groupe ainsi que l'intensité et la durée, plus importantes que dans la rééducation orthophonique classique, constituent un avantage pour les patients en leur donnant de nombreuses occasions de pratiquer, et de progresser avec de multiples opportunités de réorganisation au niveau cérébral [22]. Cependant un inconvénient de la TCI est qu'elle cible la dénomination, en travaillant le nom d'objets, ce qui induit à une sous-représentation des autres items du lexique et des autres capacités langagières [10]. De plus, l'intensité importante (5 jours/semaine) peut être une contrainte puisque le patient doit se déplacer sur le lieu de la rééducation tous les jours de la semaine.

Thérapie par intonation musicale

La thérapie musicale a été développée, à l'origine, pour la rééducation de l'aphasie non fluente [26]. En effet, cette thérapie repose sur le postulat que chez les patients aphasiques, les capacités musicales sont préservées. En particulier, les patients atteints d'aphasie non fluente parviennent à produire les mots plus facilement lorsqu'ils chantent une chanson familière ou une chanson nouvelle, en écoutant un modèle [27]. Cette méthode repose sur l'utilisation de différents éléments musicaux (mélodie, rythme, dynamique, tempo et métrique) pour la rééducation de la parole [28]. Les régions impliquées dans le traitement de la musique sont principalement situées au niveau de l'hémisphère non lésé (hémisphère droit). Ainsi l'utilisation des éléments musicaux et l'ajout d'un rythme avec la main gauche (« hand-tapping »), dans certains cas, stimuleront les régions de l'hémisphère droit impliquées dans le langage, en engageant les réseaux sensori-moteurs qui contrôlent les mouvements des

articulateurs et de la main. Cette méthode renforce ainsi l'implication de l'hémisphère droit dans le traitement du langage [29].

Il existe différents types de thérapie musicale. La plus courante est la thérapie par intonation musicale (*Musical Intonation Therapy*) [MIT]), qui utilise des composantes mélodiques (tons hauts et bas) et rythmiques (durées longues et courtes), avec une prosodie simplifiée et exagérée, afin de faciliter la production de la parole et d'améliorer le langage [28]. Cette thérapie a été introduite en anglais par Sparks, et al. [30] et a ensuite été adaptée dans différentes langues comme le français, le néerlandais, l'italien ou encore l'espagnol [31-34]. La MIT semble plus adaptée pour les patients avec : (i) une bonne compréhension orale, (ii) des capacités d'auto-correction, (iii) une production de la parole limitée, (iv) un empan attentionnel fonctionnel et (v) une stabilité émotionnelle [35]. Ainsi, elle est davantage utilisée chez des patients avec une aphasie non fluente, dans les phases précoce et/ou chronique [17]. En pratique, durant la rééducation, l'orthophoniste demande au patient de répéter, en chœur avec lui ou elle, une série de phrases produites de façon mélodique, ce qui permet de simplifier et d'exagérer la prosodie. La méthode peut inclure également de techniques telles que taper en rythme avec la main gauche (« *hand-tapping* ») ou réduire le débit d'élocution. Graduellement, les phrases intonées pourront être remplacées par de la parole normale [27, 33].

Afin d'évaluer l'efficacité de la MIT, différents travaux de recherche ont mesuré les performances de patients (fluence verbale, répétition, dénomination, compréhension, communication dans la vie quotidienne, production orale) avant et après une période de rééducation. Dans la plupart de ces études, une comparaison est effectuée entre les améliorations de performance obtenues après une MIT et en l'absence de rééducation, soit en comparant deux groupes [36], soit en cross-over [33, 34]. Une étude n'avait cependant pas de groupe contrôle [31]. Dans cette étude préliminaire, Cortese, et al. [31] ont montré, chez des patients atteints d'aphasie non fluente post-AVC en phase chronique, que la thérapie mélodique et rythmique (MRT, adaptation italienne de la MIT) permettait une amélioration de la production de parole spontanée et de la dénomination, répétition et compréhension après quatre mois de rééducation. Ils ont également montré que cette amélioration était maintenue six mois après la fin du traitement. Dans une autre étude, Haro-Martínez, et al. [34] ont montré que la MIT, comparée à une absence de rééducation, permettait une amélioration des capacités de communication dans la vie quotidienne avec un maintien de l'effet à trois mois chez des patients atteints d'aphasie non fluente chronique. Cependant, ils n'ont observé aucun effet sur la répétition ou la compréhension. Van Der Meulen, et al. [33], quant à eux, ont montré que la MIT ne permettait une amélioration que lors de la répétition des items entraînés durant la rééducation et qu'il n'y avait pas de généralisation lors de la répétition des éléments non entraînés ou lors d'autres tâches telles que la dénomination ou la communication dans la vie quotidienne. De plus, cette amélioration était transitoire et ne persistait pas à six semaines post-traitement. Enfin, dans une étude de Wan, et al. [36] s'intéressant aux effets neurophysiologiques de la rééducation, les auteurs ont montré que la MIT pouvait réduire la fraction d'anisotropie¹ au niveau du gyrus frontal inférieur (GFI), du gyrus temporal supérieur postérieur et du cingulum postérieur à droite et que l'amélioration de la fluence verbale après la rééducation était associée à la réduction de la fraction d'anisotropie au niveau du GFI droit. Ainsi, au-delà des bénéfices sur la performance langagière, il existe également des modifications structurelles cérébrales à l'issue

¹ La fraction d'anisotropie est un paramètre qui rend compte de la direction de la diffusion des molécules d'eau, reflétant les propriétés microstructurelles des fibres de substance blanche.

de la thérapie musicale, en accord avec la théorie selon laquelle la MIT favorise la réorganisation et le recrutement des réseaux sensori-moteurs à droite [29].

Ainsi, la MIT semble être une méthode partiellement efficace pour la récupération du langage dans l'aphasie non fluente chronique. Elle semble avoir un effet bénéfique sur les items entraînés et la répétition. Cependant, l'effet sur la communication dans la vie quotidienne n'est pas systématiquement démontré et paraît donc limité, et le maintien de l'effet à long terme, lui non plus, n'est pas démontré dans toutes les études (pour une revue, voir [9]). Par ailleurs, la MIT semble favoriser la plasticité fonctionnelle et structurelle cérébrale, en faveur de l'hémisphère droit, ce qui permet la récupération de certaines fonctions langagières [37]. Dans la plupart des études, cette méthode est utilisée en substitution à la rééducation orthophonique classique, cependant il s'agit d'une méthode de rééducation réalisée dans le cadre de séances orthophoniques, elles sont donc encadrées par un(e) orthophoniste spécialisé(e). Toutefois, il est possible de coupler la MIT avec la rééducation orthophonique classique, c'est le cas de la thérapie parole-musique pour l'aphasie (*Speech-Music Therapy for Aphasia* [SMTA]), qui combine les deux types de méthode mais utilise davantage d'éléments musicaux que la MIT (dynamique, tempo et métrique) [28].

En outre, il a été montré que les patients sont satisfaits de cette approche, puisque celle-ci leur « donne l'impression de parler », ce qui est apprécié par les patients atteints d'aphasie non fluente [38]. Cette méthode présente également des avantages en termes d'engagement des patients. En effet, l'utilisation d'éléments musicaux lors de la rééducation peut augmenter la motivation des patients, ce qui favorise la récupération [37]. Cependant, cette méthode présente des inconvénients, tels que la nécessité d'une intensité importante des séances, l'utilisation de ressources importantes lors de la thérapie et les risques lors de la prédiction de l'effet de la méthode pour chaque patient. La personnalisation de la thérapie à chaque patient, en fonction de ses troubles et ses compétences, permettrait d'optimiser l'efficacité et d'assurer une meilleure récupération [38].

Thérapie fondée sur les méthodes technologiques

Parmi les nouvelles méthodes fondées sur les méthodes technologiques, des études se sont intéressées à l'efficacité de la rééducation fondée sur l'utilisation des nouvelles technologies (logiciels, applications, visioconférence) par rapport à la rééducation avec un(e) thérapeute. Ce type de méthode est généralement proposé aux patients aphasiques ayant un accès limité à la thérapie classique pour des raisons de santé, géographiques ou financières, avec une couverture d'assurance limitée, des difficultés de transport vers le lieu de la rééducation ou encore la fatigue [17]. En outre, depuis la pandémie de Covid-19, l'accès aux centres de rééducation est plus difficile en raison des restrictions sanitaires, ce qui a exacerbé les disparités en matière de soins de santé pour ces patients [39]. Ainsi, afin d'éviter une rééducation irrégulière ou insuffisante, des méthodes de rééducation à domicile (télé-rééducation) ont été développées [8]. Deux types de télé-rééducation (TR) peuvent être proposés : la TR asynchrone qui repose sur l'utilisation de jeux de langage ou de logiciels ou applications sur ordinateur, dans lesquels le ou la thérapeute n'interagit pas avec les patients en temps réel, et la TR synchrone dans laquelle le patient interagit directement avec l'orthophoniste en distanciel (visioconférence) [15]. Ce type de méthode s'adressait initialement aux patients aphasiques fluents ou non fluents en phase chronique, présentant des effets à long terme, avec une diminution des compétences de langage qui affecte leur participation dans les différentes activités sociales et dans la vie quotidienne [8, 15]. La rééducation intensive est bénéfique pour les patients aphasiques en phase

chronique. Cependant, il semble difficile d'envisager le maintien de la rééducation avec cinq séances par semaine avec un(e) orthophoniste (en personne) sur le long terme [40]. Ainsi différentes méthodes reposant sur des applications, logiciels ou encore la visioconférence ont été proposées pour la rééducation du langage chez ces patients aphasiques en phase chronique. Enfin, les méthodes de TR et les exercices réalisés peuvent être personnalisés en fonction des troubles des patients mais également en fonction de leur priorité et de leur but lors de la récupération [15].

Des travaux ont donc cherché à évaluer l'effet de ces méthodes de TR en mesurant les performances de langage (expression orale, fluence verbale, capacité de communication, quotient d'aphasie, dénomination, répétition, compréhension) avant et après une période de rééducation. Les auteurs ont effectué une comparaison entre la TR et une rééducation « contrôle », soit en comparant deux groupes [15, 40] soit avec un cross-over [41, 42]. Dans une étude récente, les auteurs ont montré que la TR synchrone semblait aussi efficace que la rééducation avec un(e) orthophoniste (en personne). Cependant, il semble que la rééducation avec un(e) orthophoniste améliore davantage la confiance du patient en ses capacités de communication (évaluation subjective des améliorations du patient plus importante pour la rééducation avec un(e) thérapeute par rapport à la TR) [15]. Toutefois, il semble que la TR soit plus efficace que l'absence de rééducation [43]. De la même façon, des études ont montré des effets bénéfiques de la TR asynchrone basée sur l'illustration visuelle² [42] et sur des applications sur tablette [40, 41]. En effet, van Vuuren et Cherney [42] ont montré que la thérapie virtuelle, via AphasiaRX (pour une illustration, voir les figures 1 et 3 dans l'article original [42]), avec ou sans support auditif (production orale du thérapeute virtuel) et visuel (visualisation des mouvements des lèvres) durant la phase d'entraînement, permettait d'améliorer les performances chez des patients aphasiques en phase chronique, mesurées lors de la production de phrases. La récupération est plus importante et elle est 2,3 fois plus rapide lors de la thérapie avec support, par rapport à la thérapie sans support. De plus, dans une étude récente, Stark et Warburton [41] ont montré un effet ciblant quatre domaines du langage (lecture, dénomination, compréhension et écriture) : Language Therapy. Plus spécifiquement, ils ont observé, chez des patients aphasiques non fluents, une amélioration de la production orale du langage (expression orale, nombre d'unités produites, fluence verbale) après la rééducation à l'aide de l'application, par rapport au groupe contrôle qui réalisait un jeu travaillant la conscience spatiale et la prise de décision, sans composante langagière. Ils ont également montré que l'effet de la rééducation se maintenait à six mois post-traitement. Des résultats similaires ont été observés dans une autre étude [40] évaluant l'effet d'une application sur tablette chez des patients aphasiques fluents et non fluents, avec une amélioration du langage (parole spontanée, compréhension, dénomination, répétition, lecture et écriture) et des performances cognitives (apraxie, construction visuospatiale et calcul) plus importantes dans le groupe suivant la TR avec l'application que dans le groupe contrôle réalisant des exercices sur papier, à domicile.

Ces méthodes de TR ont de nombreux avantages pour les patients mais également pour les orthophonistes. En effet, elles permettent aux patients de faire la rééducation en autonomie (à domicile) et de suivre une rééducation plus intensive puisqu'elle ne dépend pas des visites à l'hôpital ou au centre de rééducation [8]. Ce type de méthode soulage également les orthophonistes puisque les patients réalisent les exercices à leur domicile et non plus en séance. Les patients peuvent aussi avoir un retour (correct ou incorrect) automatisé et les exercices peuvent être adaptés à leur niveau en fonction des progrès et des difficultés [40, 41]. Certaines de ces méthodes permettent également aux patients d'avoir accès à un modèle pour le positionnement des articulateurs de la parole avec les méthodes d'illustration

² Les méthodes d'illustration visuelle permettent de visualiser les mouvements des articulateurs de la parole d'un autre locuteur (lèvres, langue, mâchoire, vélum et visage) lors de la production de la parole.

visuelle [42] (voir aussi [44]). Malgré les différents avantages de la pratique de la TR en autonomie, un inconvénient est lié à la diminution potentielle de la motivation et de l'engagement social. En effet, une plus faible confiance du patient en ses capacités suite à la TR, telle qu'elle a été montrée dans une précédente étude [15], pourrait mener à un isolement du patient avec une baisse de la motivation pour les interactions sociales (voir aussi [45]). En effet, l'interaction sociale entre le patient et son entourage, y compris l'orthophoniste, joue un rôle bénéfique important dans le processus de récupération [1]. Une autre limite qui peut être observée dans les méthodes de TR est liée à l'utilisation de la technologie. En effet, avant l'utilisation de ces méthodes, il sera nécessaire d'évaluer les compétences et les besoins des patients afin d'éliminer tous les obstacles potentiels liés à la technologie et son utilisation [17].

Discussion

Notre objectif a été de présenter quelques méthodes de rééducation qui pourraient être utilisées en complément ou comme alternative à la rééducation orthophonique classique chez des patients présentant une aphasie fluente ou non fluente en phase chronique. Ce que nous avons souhaité souligner dans ce papier sont les différents principes à prendre en compte dans le choix de la méthode, afin de proposer ensuite des pistes pour des programmes de rééducation à mettre en place dans l'aphasie en phase chronique.

Le premier principe est **l'intensité** de la rééducation. En effet, il a été montré qu'elle joue un rôle dans la récupération du langage chez les patients aphasiques [46]. Classiquement, l'intensité de la rééducation varie selon la phase post-AVC, avec une diminution de l'intensité au cours du temps [6]. Cependant, une revue récente a montré qu'une rééducation intensive, sur plusieurs séances ou durant une longue période permet une meilleure récupération des capacités de communication [47]. Toutes les études recensées ici concernent des patients en phase chronique bénéficiant d'une rééducation intensive, avec un rythme de quatre à six sessions par semaine de 3-4 heures pour la TCI, 30-90 minutes pour la MIT et 20-90 minutes pour la TR (sauf pour deux études qui ont un rythme de 1 ou 3 sessions/semaine [15, 34]). Cependant, dans le contexte actuel, la pratique clinique est limitée en termes de ressources humaines et financières. Ainsi, il est impossible de maintenir une rééducation intensive à un rythme soutenu de cinq séances par semaine pour tous les patients, y compris les patients en phase chronique [40].

Une solution alternative à ce problème est l'utilisation de la rééducation en autonomie, telle que la thérapie virtuelle ou la télé-rééducation. En effet, les études récentes sont en faveur des méthodes qui peuvent être utilisées en autonomie, qui sont faciles d'utilisation et qui engendrent des frais réduits. Dans ce cadre, la TR permet d'augmenter l'intensité de la rééducation et de diminuer les coûts (en évitant les déplacements à l'hôpital ou au centre de rééducation). Ce type de rééducation améliore également les performances de langage, elle est aussi efficace que la rééducation avec un(e) orthophoniste (en personne) et plus efficace que l'absence de rééducation [8, 15]. Parmi ces méthodes de rééducation informatisées, on retrouve les méthodes de TR asynchrones à l'aide de logiciel ou d'application permettant d'effectuer des exercices [40, 41], mais aussi les méthodes reposant sur l'illustration visuelle [42]. Ces méthodes peuvent être utilisées au domicile du patient, elles nécessitent peu de matériel, les patients bénéficient de retours leur indiquant si leurs productions ou leurs réponses sont correctes et la rééducation peut être personnalisée en fonction du niveau du patients. Les autres méthodes décrites dans cette revue (MIT, TCI) nécessitent la présence d'un(e) orthophoniste et ne sont donc pas réalisables en autonomie. Toutefois, notons qu'une étude récente a évalué l'effet et la faisabilité de la TCI adaptée à la réalisation en autonomie, au domicile du patient [48].

La présence de l'orthophoniste ou d'autres patients (dans le cas de la rééducation en groupe) constitue un avantage dans les méthodes telles que la TCI ou la MIT. Ainsi, elles favorisent les interactions sociales et la communication en donnant l'occasion aux patients de pratiquer. Il s'agit là du second principe : **l'engagement social**. En effet, ces méthodes améliorent la qualité de vie et augmentent la motivation du patient pour les interactions sociales. Notons que pour les méthodes de TR, il est possible d'impliquer de façon plus importante l'entourage du patient, en les entraînant et en leur apprenant des techniques qui permettront de favoriser la communication avec les patients et de s'assurer du suivi de la rééducation par le patient. Ainsi, la présence de l'entourage est importante et elle peut jouer un rôle en favorisant l'interaction et l'engagement social [15, 49].

Lors de l'évaluation des méthodes de rééducation, les auteurs mesurent leur efficacité sur les compétences langagières (production du langage, dénomination, répétition, compréhension, fluence verbale, communication dans la vie quotidienne). Un des objectifs lors de la rééducation sera de permettre une récupération des capacités de communication dans la vie quotidienne, afin d'améliorer la qualité de vie des patients et donc de favoriser l'engagement social. Il semble donc crucial d'évaluer la généralisation de l'effet de la méthode de rééducation à d'autres tâches que celles ciblées par la méthode, et le maintien de l'effet dans les mois suivant la rééducation. Ainsi, certaines études ont montré un maintien de l'efficacité à long terme [22, 31, 34, 41] mais également la généralisation de l'effet sur les items non entraînés ou dans la vie quotidienne [19, 22, 31, 34, 40, 41]. Cependant, ceci n'est pas mesuré de façon comparable entre les études.

Toutes les méthodes présentées ici (MIT, TCI, TR) permettent d'améliorer les compétences de langage pour certaines tâches, cependant cette amélioration n'est pas toujours spécifique à la méthode utilisée [15, 23, 24]. De plus, la méthode et les exercices réalisés devraient être adaptés à chaque patient, en fonction de ses troubles mais également de ses objectifs. Il s'agit du troisième principe : la **personnalisation** selon les compétences et caractéristiques des patients. Ainsi, il est important d'adapter la difficulté des exercices (ni trop faciles, ni trop difficiles) mais également de prendre en compte les objectifs du patient (les compétences qu'il ou elle souhaite retrouver), afin faire progresser le patient [5, 6, 15].

Ainsi, comme nous l'avons mentionné précédemment, les différentes méthodes présentées ici ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients. Toutefois, afin de choisir la méthode de rééducation la plus adaptée, qui pourra être incluse dans un programme de rééducation et qui permettra une meilleure récupération pour le patient, il convient de prendre en compte les trois principes : intensité, engagement social et personnalisation. Cependant, d'autres facteurs sont connus pour influencer la récupération du langage : (i) les mécanismes neurophysiologiques tels que la levée du diaschisis, la plasticité cérébrale, la vicariance, les processus cellulaires (régénérescence nerveuse, germination, modification de la neurotransmission etc.) ; (ii) les facteurs liés à la lésion tels que sa taille et sa localisation ; et (iii) les variables individuelles telles que le sexe, l'âge, les troubles associés, la préférence manuelle, le niveau d'éducation, la motivation, les facteurs psychosociaux, les capacités cognitives, la sévérité et le type d'aphasie et la spécialisation hémisphérique du langage [4].

Il sera donc important de prendre en compte ces différents facteurs afin de proposer une combinaison adaptée à chaque patient pour une meilleure récupération dans l'aphasie en phase chronique. Nous savons que les limites géographiques, financières et liées à la santé des patients peuvent ralentir la rééducation [17, 18], surtout en phase chronique lorsque celle-ci doit être réalisée de façon intensive [47]. Ainsi, il serait intéressant de proposer un programme de rééducation comprenant la rééducation orthophonique classique combinée à une méthode de rééducation en autonomie, au domicile du patient,

reposant sur une application ou un logiciel sur ordinateur ou tablette, avec un rythme optimal pour la récupération de cinq séances par semaine. En effet, comme nous l'avons vu, les méthodes de rééducation en autonomie ont de nombreux avantages : augmentation de l'intensité de la rééducation, adaptation aux patients, apport de retour personnalisé, engagement social avec l'implication de l'entourage. Une étude a également démontré un bon rapport coût-bénéfice lié à l'utilisation de la thérapie virtuelle lors de la rééducation des patients aphasiques en phase chronique [50]. Enfin, ce type de méthode permet également de soulager les orthophonistes en diminuant le temps de la réalisation d'exercices en faveur de la planification du plan de traitement, durant laquelle ils ou elles pourront prendre en compte d'autres facteurs individuels du patient pouvant interférer avec la rééducation [15].

Il existe de nombreux logiciels ou applications permettant d'effectuer cette rééducation en autonomie à l'aide de jeux ou d'exercices [40, 41] ou encore avec un(e) orthophoniste en temps réel (visioconférence) ou non (TR asynchrone) [15, 42, 51], qui ont prouvé leur efficacité. Ainsi, il conviendra de mettre en place des collaborations entre orthophonistes et chercheurs pour proposer des logiciels ou applications tels que Language Therapy [41], Constant Therapy [40] ou encore AphasiaRX [42] qui ont été présentés ici. Il en existe de nombreux autres (pour une revue, voir [52]). Ceci permettrait ainsi de promouvoir l'utilisation de ces logiciels ou applications, mais également d'en tester cliniquement l'efficacité sur un plus grand nombre de patients. Une combinaison de TR asynchrone et de rééducation orthophonique de façon intensive (5 séances/semaine) pourrait donc être mise en place. Les exercices à réaliser ainsi que le plan thérapeutique précis pourront être proposés par l'orthophoniste et ajustés au cours de la thérapie. Ainsi, la rééducation sera adaptée en fonction des performances des patients, de leurs difficultés et des objectifs à atteindre. Les objectifs varieront en fonction des troubles des patients mais également en fonction des objectifs qu'ils se seront fixés.

Conclusion

En présentant ces quelques méthodes de rééducation du langage et de la parole pouvant être utilisées en complément de la rééducation orthophonique classique dans l'aphasie fluente et non fluente en phase chronique, nous pensons qu'il convient de choisir celle qui permettrait d'améliorer au mieux les capacités de communication en respectant trois principes importants : l'intensité, l'engagement social et la personnalisation. Ainsi, nous avons montré les nombreux avantages que présenterait un programme de rééducation incluant une rééducation orthophonique classique combinée à la TR en autonomie, au domicile des patients. Ce programme augmenterait l'intensité de la rééducation, favoriserait l'engagement social avec l'implication de l'entourage et s'adapterait aux difficultés du patient ainsi qu'aux compétences qu'il souhaite améliorer.

Lien d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt en rapport avec cet article

Références

1. van de Sandt-Koenderman WME. Aphasia rehabilitation and the role of computer technology: can we keep up with modern times? *Int J Speech Lang Pathol* 2011 ; 13 : 21-7.
2. Damasio AR. Signs of aphasia. In : Sarno MT, éd. *Acquired aphasia*. Cambridge (MA) : Academic Press, 1998, p. 25-41.
3. Engelter ST, Gostynski M, Papa S, et al. Epidemiology of aphasia attributable to first ischemic stroke. *Stroke* 2006 ; 37 : 1379-84.

4. Gerstenecker A, Lazar RM. Language recovery following stroke. *Clin Neuropsychol* 2019 ; 33 : 928-47.
5. Chomel-Guillaume S, Leloup G, Bernard I. Conceptions contemporaines de la rééducation des aphasies. *Les aphasies: évaluation et rééducation*. Issy-les-Moulineaux : Elsevier Masson, 2010, p. 185-223.
6. Viader F, Lambert J, de la Sayette V, et al. Aphasie. *EMC Neurol* 2010 ; 7 : 1-35.
7. El Hachioui H, Lingsma HF, Sandt-Koenderman ME, et al. Recovery of aphasia after stroke: a 1-year follow-up study. *J Neurol* 2013 ; 260 : 166-71.
8. Godlove J, Anantha V, Advani M, et al. Comparison of therapy practice at home and in the clinic: a retrospective analysis of the constant therapy platform data set. *Front Neurol* 2019 ; 10 : 140.
9. Popescu T, Stahl B, Wiernik BM, et al. Melodic Intonation Therapy for aphasia: A multi-level meta-analysis of randomised-controlled-trial and individual-participant data. *medRxiv* 2022: 1-14.
10. Wang G, Ge L, Zheng Q, et al. Constraint-induced aphasia therapy for patients with aphasia: a systematic review. *Int J Nurs Sci* 2020 ; 7 : 349-58.
11. Biou E, Cassoudeulle H, Cogné M, et al. Transcranial direct current stimulation in post-stroke aphasia rehabilitation: a systematic review. *Ann Phys Rehabil Med* 2019 ; 62 : 104-21.
12. Coslett HB. Noninvasive brain stimulation in aphasia therapy: lessons from TMS and tDCS. In : Hickok G, Small SL, eds. *Neurobiology of language*. San Diego : Academic Press, 2016, p. 1035-54.
13. Berthier ML. Ten key reasons for continuing research on pharmacotherapy for post-stroke aphasia. *Aphasiology* 2021 ; 35 : 824-58.
14. Small SL, Llano DA. Biological approaches to aphasia treatment. *Curr Neurol Neurosci Rep* 2009 ; 9 : 443-50.
15. Meltzer JA, Baird AJ, Steele RD, et al. Computer-based treatment of poststroke language disorders: a non-inferiority study of telerehabilitation compared to in-person service delivery. *Aphasiology* 2018 ; 32 : 290-311.
16. Shrubsole K, Worrall L, Power E, et al. Recommendations for post-stroke aphasia rehabilitation: an updated systematic review and evaluation of clinical practice guidelines. *Aphasiology* 2017 ; 31 : 1-24.
17. Cichon N, Włodarczyk L, Saluk-Bijak J, et al. Novel advances to post-stroke aphasia pharmacology and rehabilitation. *JCM* 2021 ; 10 : 3778.
18. Allen L, Mehta S, McClure JA, et al. Therapeutic interventions for aphasia initiated more than six months post stroke: a review of the evidence. *Top Stroke Rehabil* 2012 ; 19 : 523-35.
19. Pulvermüller F, Neininger B, Elbert T, et al. Constraint-induced therapy of chronic aphasia after stroke. *Stroke* 2001 ; 32 : 1621-6.
20. Sickert A, Anders L-C, Munte TF, et al. Constraint-induced aphasia therapy following sub-acute stroke: a single-blind, randomised clinical trial of a modified therapy schedule. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2014 ; 85 : 51-5.
21. Zhang J, Yu J, Bao Y, et al. Constraint-induced aphasia therapy in post-stroke aphasia rehabilitation: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *PLoS One* 2017 ; 12 : e0183349.

22. Szaflarski JP, Ball AL, Vannest J, et al. Constraint-induced aphasia therapy for treatment of chronic post-stroke aphasia: a randomized, blinded, controlled pilot trial. *Med Sci Monit* 2015 ; 21 : 2861-9.
23. Kurland J, Stanek EJ, Stokes P, et al. Intensive language action therapy in chronic aphasia: a randomized clinical trial examining guidance by constraint. *Am J Speech Lang Pathol* 2016 ; 25 : S798-812.
24. Nenert R, Allendorfer JB, Martin AM, et al. Age-related language lateralization assessed by fMRI: The effects of sex and handedness. *Brain Res* 2017 ; 1674 : 20-35.
25. Stahl B, Mohr B, Dreyer FR, et al. Using language for social interaction: communication mechanisms promote recovery from chronic non-fluent aphasia. *Cortex* 2016 ; 85 : 90-9.
26. Albert ML, Sparks RW, Helm NA. Melodic intonation therapy for aphasia. *Arch Neurol* 1973 ; 29 : 130-1.
27. Zumbansen A, Tremblay P. Music-based interventions for aphasia could act through a motor-speech mechanism: a systematic review and case-control analysis of published individual participant data. *Aphasiology* 2019 ; 33 : 466-97.
28. Hurkmans J, de Bruijn M, Boonstra AM, et al. Music in the treatment of neurological language and speech disorders: a systematic review. *Aphasiology* 2012 ; 26 : 1-19.
29. Leonardi S, Cacciola A, De Luca R, et al. The role of music therapy in rehabilitation: improving aphasia and beyond. *Int J Neurosci* 2018 ; 128 : 90-9.
30. Sparks R, Helm N, Albert M. Aphasia rehabilitation resulting from melodic intonation therapy. *Cortex* 1974 ; 10 : 303-16.
31. Cortese MD, Riganello F, Arcuri F, et al. Rehabilitation of aphasia: application of melodic-rhythmic therapy to Italian language. *Front Hum Neurosci* 2015 ; 9 : 520.
32. Zumbansen A, Peretz I, Hébert S. The combination of rhythm and pitch can account for the beneficial effect of melodic intonation therapy on connected speech improvements in Broca's aphasia. *Front Hum Neurosci* 2014 ; 8 : 592.
33. van der Meulen I, van de Sandt-Koenderman MW, Heijenbrok MH, et al. Melodic intonation therapy in chronic aphasia: evidence from a pilot randomized controlled trial. *Front Hum Neurosci* 2016 ; 10 : 533.
34. Haro-Martínez AM, Lubrini G, Madero-Jarabo R, et al. Melodic intonation therapy in post-stroke nonfluent aphasia: a randomized pilot trial. *Clin Rehabil* 2019 ; 33 : 44-53.
35. Helm-Estabrooks N, Albert ML. *Manual of aphasia and aphasia therapy*. Austin (Tex, USA) : Pro-Ed, 2004.
36. Wan CY, Zheng X, Marchina S, et al. Intensive therapy induces contralateral white matter changes in chronic stroke patients with Broca's aphasia. *Brain Lang* 2014 ; 136 : 1-7.
37. Merrett DL, Peretz I, Wilson SJ. Neurobiological, cognitive, and emotional mechanisms in melodic intonation therapy. *Front Hum Neurosci* 2014 ; 8 : 401.
38. Curtis S, Nicholas ML, Pittmann R, et al. Tap your hand if you feel the beat: differential effects of tapping in melodic intonation therapy. *Aphasiology* 2020 ; 34 : 580-602.

39. Kong AP-H. The impact of COVID-19 on speakers with aphasia: what is currently known and missing? *J Speech Lang Hear Res* 2021 ; 64 : 176-80.
40. Braley M, Pierce JS, Saxena S, et al. A virtual, randomized, control trial of a digital therapeutic for speech, language, and cognitive intervention in post-stroke persons with aphasia. *Front Neurol* 2021 ; 12 : 626780.
41. Stark BC, Warburton EA. Improved language in chronic aphasia after self-delivered iPad speech therapy. *Neuropsychol Rehabil* 2018 ; 28 : 818-31.
42. van Vuuren S, Cherney LR. A virtual therapist for speech and language therapy. *Intell Virtual Agents* 2014 ; 8637 : 438-48.
43. Zheng C, Lynch L, Taylor N. Effect of computer therapy in aphasia: a systematic review. *Aphasiology* 2015 ; 30 : 211-44.
44. Cherney LR, Halper AS, Holland AL, et al. computerized script training for aphasia: preliminary results. *Am J Speech Lang Pathol* 2008 ; 17 : 19-34.
45. Babbitt EM, Cherney LR. Communication confidence in persons with aphasia. *Top Stroke Rehabil* 2010 ; 17 : 214-23.
46. Bhogal SK, Teasell R, Speechley M. Intensity of aphasia therapy, impact on recovery. *Stroke* 2003 ; 34 : 987-93.
47. Brady MC, Kelly H, Godwin J, et al. Speech and language therapy for aphasia following stroke. *Cochrane Database Syst Rev* 2016 ; 2016 : CD000425.
48. Pitt R, Theodoros D, Hill AJ, et al. The feasibility of delivering constraint-induced language therapy via the internet. *Digit Health* 2017 ; 3 : 1-11.
49. Simmons-Mackie N, Raymer A, Cherney LR. Communication partner training in aphasia: an updated systematic review. *Arch Phys Med Rehabil* 2016 ; 97 : 2202-21.e8.
50. Latimer NR, Dixon S, Palmer R. Cost-utility of self-managed computer therapy for people with aphasia. *Int J Technol Assess Health Care* 2013 ; 29 : 402-9.
51. Abad A, Pompili A, Costa Â, et al. Automatic word naming recognition for an on-line aphasia treatment system. *Computer Speech Language* 2013 ; 27 : 1235-48.
52. Repetto C, Paolillo MP, Tuena C, et al. Innovative technology-based interventions in aphasia rehabilitation: a systematic review. *Aphasiology* 2021 ; 35 : 1623-46.

Multifactorial interplay on language recovery after left-hemispheric stroke. A retrospective study.

Céline Haldin¹, Shenhao Dai², Céline Piscicelli^{1,2}, Valérie Marcon², Hélène Løevenbruck¹,
Dominic Pérennou^{1,2}, Monica Baciu^{1,CA}

¹Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition, UMR CNRS 5105, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

²Neurorehabilitation Department, Institute of Rehabilitation, Grenoble Alpes University Hospital, Grenoble,
France

^{CA}LPNC, UMR CNRS 5105, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, monica.baciu@univ-grenoble-alpes.fr

Abstract

Understanding the factors explaining the initial severity and degree of recovery of post-stroke aphasia is essential to implement more adapted neurorehabilitation programs to speed up and improve the quality of recovery. We explore the most significant factors, among sociodemographic, clinical, stroke-related and rehabilitation-related factors, that explain the variability of the initial severity of aphasia and the degree of language recovery, in participants after left-hemispheric stroke. Regarding the initial severity of aphasia, we considered 96 post-stroke participants and grouped them into severe, mild/moderate, and no aphasia, based on the severity of their language deficits in subacute phase (Aphasia Severity Rating Scale, ASRS). Regarding language recovery, we considered 53/96 participants with aphasia, who underwent two language assessments (at admission and discharge in the rehabilitation ward), and grouped them into high and poor recovery based on the gain score ($ASRS_{\text{discharge}} - ASRS_{\text{admission}} / ASRS_{\text{admission}}$). Subsequently, we performed statistical analyses to identify the determinants of the initial severity of aphasia and the degree of recovery. We showed that more severe aphasia initially was associated with a more severe stroke (OR=0.90, p=0.041), moderate/severe executive dysfunction (OR=0.068, p<0.001), and larger lesion size (OR=0.068, p<0.001). The degree of recovery was associated with the intensity of speech and language therapy (OR=1.47, p=0.043). Our study partially confirms previous findings and provides an original method to analyze the effect of several multimodal variables, based on a retrospective analysis of stroke participants from a local cohort. A better knowledge of these factors may help implementing personalized language rehabilitation programs for better and faster recovery.

Key-words. aphasia, stroke, subacute, recovery, language, multifactorial

Introduction

Aphasia is a common and one of the most devastating stroke sequels. It is a language disorder that interferes with the ability to communicate and function in daily life. Its impact extends beyond the realm of language to social activities and interactions and it can have profound negative effects on quality of life [1–3]. It occurs in 21 to 38% after stroke [4,5] and at three months after the stroke, aphasia persists in 23,7% of patients [6]. The prevalence of post-stroke aphasia is increasing, due to the aging population and to improved clinical interventions leading to a rise in the number of stroke survivors [7].

Although some individuals with aphasia show some degree of spontaneous language recovery, mainly in the first few months after the stroke [8], most patients need structured rehabilitation programs, including speech and language therapy. An important issue is how to promote speech and language (SL) recovery as efficiently and rapidly as possible. Inter-individual variability of recovery is frequently reported (for reviews, see e.g., [9–11]). Determinants of SL recovery still need to be better understood. A variety of factors have been shown to play a role in SL recovery. They include sociodemographic (gender, age, handedness, education level, social isolation, professional status etc.), stroke-related (severity and type of stroke and aphasia, lesion size and location), clinical (cognitive impairment) or rehabilitation-related (type, duration, and intensity of rehabilitation) variables.

The aim of this paper is to describe the interplay of these various factors in language recovery and to gain insight into their relative contribution.

Initial aphasia severity has often been described as one of the most important determinants of SL recovery (for reviews, see [9,11,12]). In this line, it has been shown that mild initial aphasia is associated with better and more rapid SL recovery (see, for example, [13–16]). However, some studies have looked at the gain following rehabilitation, and the authors have shown a greater gain in patients with severe aphasia initially [17–19]. This is explained by the larger space for possible improvement in more severe patients.

Although initial severity of aphasia is an important predictor of SL recovery, a number of other factors have also been shown to be critical. Several studies have reported that the evolution of aphasia is better explained by a combination of factors rather than a single predictor. According to a recent study on aphasia outcome at three months post-stroke, both the initial severity of aphasia and lesion-related factors (lesion size and location) are critical predictors of SL recovery [20]. The important role of lesion-related factors in SL recovery has also been

acknowledged in many studies (see for example, [21–23]). Severity of stroke has also been shown to contribute. Severe stroke is most often positively correlated with severe aphasia and negatively correlated with the degree of SL recovery [15,24]. Furthermore, with regard to clinical factors, it has been argued that impairments in other cognitive domains (such as attention, memory or executive functions) may also play a role in SL recovery, given that language and other cognitive functions are interdependent. Several studies have suggested that cognitive performance may indeed significantly impact SL recovery [25,26]. Rehabilitation-related factors have also been documented. The introduction of SL therapy into patient's rehabilitation program and clinical care has been shown to influence the quality of SL recovery, in terms of functional communication, reading, comprehension, expressive language, and writing improvement, compared with no SL therapy [27]. Furthermore, the same review indicates that high-intensity SL therapy (many hours over a short period of time) may be more beneficial to participants' functional language skills than low-intensity SL therapy. However, this review also reveals that high-intensity approaches to therapy (4 to 15 hours per week) may not be suited to all patients. A more recent report based on the analysis of an international aphasia database further describes the benefits of SL therapy. It reveals that SL therapy works best when it is administered at high-intensity, at an early stage (within 1 month of stroke), and when it is tailored to the patient in terms of frequency and functional relevance, and can be implemented at home [28]. Sociodemographic characteristics appear to play a role [9,29,30], with better recovery for: (i) younger individuals, related to plasticity that is greater in younger individuals than in older [10,31]; (ii) females, related to the difference in hemispheric specialization of language between males and females, with reduced interhemispheric asymmetry and atypical lateralization of language in females [32,33]; (iii) left-handers, due to reduced inter-hemispheric asymmetry for language in left-handers [32]. Indeed, atypical hemispheric specialization for language would present an advantage in terms of reorganization and recovery, with better and faster recovery in females and in left-handers but also all patients with atypical hemispheric dominance [9,29,34]. The education level seems to be correlated with recovery, although its effect is intertwined with other parameters such as cognitive reserve, socio-economic level and lifestyle [29,35]. Moreover, while social isolation appears to impact negatively, a favorable environment and social and family support promote post-stroke recovery [31,36]. However, the role of these sociodemographic factors is still debated (for a review, see [30]).

Despite the substantial number of studies on the determinants of SL recovery, there has yet to be a consensus on their relative contribution. Recovery depends on many variables and on the interaction between these variables. The main focus is currently on the complex relationship between the initial severity of aphasia after stroke and the degree of SL recovery [13,37]. A better understanding of this relationship requires a better insight into the determinants of the initial aphasia severity. Identifying these factors could help to tailor the rehabilitation program and to optimise SL recovery. A few recent studies have examined various predictors of initial aphasia severity, including lesion volume and location, type of stroke, type of aphasia. Greater lesion volume, lesion location (encompassing Broca's area, insula, STG and Heschl's gyrus), hemorrhagic stroke, and non-fluent aphasia, are generally associated with more severe aphasia in the acute stage [13,38].

Based on these findings, our central hypothesis is that SL recovery is directly related to the initial severity of aphasia. However, some indirect factors could also come into play by modulating the initial severity of aphasia. The objective of this study was to assess multiple factors (socio-demographic, stroke-related, rehabilitation-related, clinical) considered not in isolation but rather in combination [39], since such an approach could provide more reliable insights into the determinants of initial aphasia severity and of SL recovery. This could inform rehabilitation program and improve clinical management of aphasia. Only a few studies have taken this multi-factorial approach, and they include limited sample sizes (see [30]). The present study involves an important number of participants and aims to offer a clearer overview of predictors of SL recovery that may be generalizable to a population level.

Based on our hypothesis and considerations, our operational objective was two-fold: (a) first, to identify combinations or associations of factors that are determinants of the initial severity of aphasia, and (b) second, to explore how these factors also affect long-term SL recovery. Practically, we conducted a retrospective study based on data from the clinical records of participants included in a local cohort of the hospital's neurorehabilitation ward. All participants had suffered from a left-hemispheric stroke, without or with various degrees of aphasia, and their data for the first six months after the stroke were used for analyses. As a first step, several multimodal factors were assessed in order to identify the combinations of factors with the most significant impact on the initial severity of aphasia. In a second step, we determined which factors modulate the degree of SL recovery. For the second step, we also considered the onset and intensity of SL rehabilitation among the multimodal factors. Univariate and multivariate (forward stepwise logistic regression with bootstrap) analyses were

conducted to quantify the association between factors and the initial severity of aphasia or SL recovery.

Material and Methods

Study design and reporting

We conducted a monocentric observational study including participants with a left hemispheric stroke, with or without aphasia, consecutively admitted to the neurological rehabilitation ward of the University Hospital (CHU Grenoble Alpes) between January 2012 and October 2019. Participants were assessed twice: initially, within the first two months after the stroke (before D60; “first assessment”, FA) and finally, on discharge from the rehabilitation ward (before D180; “discharge assessment”, DA). We collected sociodemographic, clinical and imaging data from medical records. Trained and multidisciplinary therapists conducted the clinical assessments. Language assessments were conducted by speech therapists at FA and DA, and neuropsychological assessments were conducted by neuropsychologists only at FA. The reporting of the study follows strobe guidelines (see check list in Supplementary Materials, Table A).

Ethical and regulatory consideration

According to French law, observational studies with a retrospective analysis of data do not require the approval of an ethics committee, as long as participants have been informed of the specific research and do not object to the use of their data. All eligible participants were informed (orally and in writing) that their data would be used for research and those who declined to participate signed an objection form.

Participants

Inclusion criteria were: aged above 18 years old and a first left-sided mono-hemispheric stroke confirmed by the MRI, with a first language assessment performed before D60 post-stroke. Non-inclusion criteria were: individuals over 80 years old, recurrent strokes, complications in the acute stage (malignant infarct, cerebral herniation, subarachnoid hemorrhage, and hydrocephalus), dementia, unstable medical condition, severe psychiatric symptoms, inability to speak French, unavailability of MRI data.

Outcome variables: aphasia severity and recovery

The severity of aphasia was assessed, at FA and DA, by the French version of the Goodglass & Kaplan’s Aphasia Severity Rating Scale (ASRS from the Boston Diagnostic Aphasia

Examination, BDAE) [40,41]. This score reflects verbal communication abilities assessed on a 6-point scale. A score of 0 corresponds to “no efficient speech and no speech comprehension”, 1 to “fragmentary expression”, 2 to “conversation on familiar topics possible with assistance”, 3 to “conversation on various topics difficult/impossible”, 4 to “obvious loss of fluency or of comprehension speed” and 5 to “minimal discernible speech impairment”. Based on the presence or absence of language disorders and the ASRS score measured at FA, three groups were constituted: participants with severe aphasia ($ASRS_{FA} \leq 2$), with mild/moderate aphasia ($ASRS_{FA} \geq 3$) or without aphasia.

All participants with aphasia followed a personalized SL therapy program during their hospital stay. The level of language recovery was assessed on the basis of ASRS scores measured at DA and FA, with the calculation of a gain: $(ASRS_{DA} - ASRS_{FA}) / ASRS_{FA}$. Based on this gain, looking at the distribution of this variable (see details in Supplementary Material, Figure A), two groups were constituted: participants with good recovery (gain ≥ 0.5) and with poor recovery (gain < 0.5).

Potential determinants of aphasia severity and recovery

Sociodemographic, clinical, stroke-related and lesion-related parameters collected as potential determinants of aphasia severity and recovery are detailed below. Most of the variable have been binarized as in Dai and collaborators studies [42,43].

- *Sociodemographic factors*

Demographic parameters included age, sex and handedness assessed by the French translation of the Edinburgh inventory [44]. Social parameters included the education level (0 for lower than high-school diploma, 1 for higher), the professional status (0 for retired or unemployed, 1 for employed) and the isolation level which is based on two items: living alone (0 for no, 1 for yes) and family support (0 for absent or lower and 1 for strong family support). All of these parameters were determined at FA.

- *Clinical factors*

For the screening of language abilities in individuals with aphasia, we used a naming test performed at FA and DA during the language assessment. Picture naming tasks were used (subtest from the BDAE [41] or DO80 [45]), giving a naming score (% correct responses). We determined the naming performance at FA (“Naming-FA”), at DA (“Naming-DA”) as well as the evolution of the naming performance between FA and DA (“Naming change”, calculated as the difference between the % correct responses to DA and FA: $\%DA - \%FA$).

Other clinical factors, such as global disability, cognitive abilities (executive dysfunction, upper limb apraxia and spatial neglect), motor weakness, depression, white matter hyperintensities, were assessed at FA.

Global disability was estimated with a modified version of Rankin scale (mRS) [46] ranging from 0 (no symptoms) to 6 (death). Participants were classified (cut-off at 2) as having no or mild (0) and moderate or severe (1) disability.

Executive functioning was estimated with an ad-hoc executive scale designed to classify post-stroke executive dysfunction, based on several tests: Trail Making Test [47], Stroop [48], Wisconsin Card Sorting [49], verbal fluency, digit span and code subtests of the Wechsler Adult Intelligence Scale (WAIS-IV) [50], tower of Hanoi or London [51,52] and Rey figure [53]. Individuals were classified as having no or mild (0) and moderate or severe (1) executive dysfunction.

Upper limb apraxia was assessed with the Apraxia Screen of TULIA (AST) [54] providing scores from 0 to 12 (cut-off at 9). Participants were classified (based on the cut-off) as having no or mild (0) and moderate or severe (1) upper limb apraxia.

Spatial neglect was assessed with a comprehensive battery investigating body and non-body spatial neglect, including several tests (for details see [42]). Participants were classified as having no or mild (0) and moderate or severe (1) spatial neglect.

Upper and lower limb motor weakness was evaluated then classified as no or mild (0) and moderate or severe (1) motor weakness (see details in [42]).

Depression was assessed with Aphasia Depression Rating Scale, ADRS [55]. ADRS scores range from 0 to 32 (depression for score > 9).

Finally, at FA and DA, we calculated two indices to consider the delay between stroke onset and assessments of aphasia severity at FA and DA: “First assessment time (in days post-stroke)” and “Second assessment time (in days post-stroke)”, respectively. We also considered the delay between FA and DA (“Delay FA-DA”).

- *Stroke-related factors*

As regards stroke features, we recorded stroke severity estimated by the National Institutes of Health Stroke Scale, NIHSS [56] (range 0-42, higher scores indicating greater stroke severity) assessed 24 hours after the stroke, but also the type of stroke (ischemic or hemorrhagic).

The type of aphasia was reported by speech therapist, based on language assessment performed at FA, for participants with aphasia. Participants were categorized as having: (i) non-fluent aphasia, *i.e.*, global aphasia, Broca's aphasia or transcortical motor aphasia or (ii) fluent aphasia, *i.e.*, Wernicke's, transcortical sensory, conduction, subcortical or anomic aphasia.

The presence of white matter hyperintensities (WMHs) at FA was sought on MRI T2-FLAIR images. Participants were classified as having no or mild WMHs and moderate or severe WMHs (see details [43]).

Finally, lesions were reconstructed by using MRICron [57] from MRI axial slices (T2-flair, 4mm thickness). Lesions were manually drawn by a trained examiner on a standard anatomical MRI T1-weighted template of the Montreal Neurological Institute (ch2), furnished with the MRICron software. Lesions drawing were controlled by a second trained examiner with blinding to behavioral data and differences were resolved by consensus. Then, we extracted the lesion size (in number of voxels). Note that for multivariate analyses (see following section) lesion size was normalized.

- *Rehabilitation-related factors*

Each participant with aphasia followed a personalized SL therapy program during their hospital stay. Among clinical factors, for individuals with aphasia, we considered: (i) the onset of SL therapy (in days post-stroke) which is defined as the delay between stroke onset and beginning of SL therapy and (ii) the intensity of SL therapy (average number of sessions per week) which was calculated based on the number of sessions and the duration of rehabilitation.

Statistical analyses

Statistical analyses were carried out in two steps, using R software [58].

In the first step, we aimed to assess the determinants of the initial severity of post-stroke aphasia. We compared three groups of participants (severe, mild/moderate and no aphasia) using omnibus tests (Kruskal-Wallis or chi-square tests), with $p < 0.05$ as significant threshold. To assess significant inter-group differences, when omnibus test was significant, we used Mann-Whitney and chi-square tests with adjusted p-value using Bonferonni correction. The corrected p-value was calculated as $p \times \text{number of statistical tests for the independent variable of interest}$ and $p_{\text{corrected}} < 0.05$ was considered as significant. Statistically significant parameters were included stepwise in a multivariate ordinal logistic regression analysis coupled with bootstrap resampling with 1000 replications, to further explore their association with aphasia's severity, in the three groups mentioned above. A bootstrap was used to reduce the bias or error

in the estimation of the regression coefficients (risk of false positives or false negatives), due to the multiple comparisons made in the stepwise logistic regression. The bootstrap reduces these errors and guarantees a better reliability of our interpretations.

In the second step, we assessed the determinants of language recovery. We conducted analyses only for the participants with aphasia who completed two language assessments, at FA and DA, and for whom it is possible to calculate a gain¹. We compared two groups of participants (poor and good recovery) using Mann-Whitney and chi-square tests with $p < 0.05$ as significant threshold. Statistically significant parameters were included stepwise in a multivariate binary logistic regression analysis coupled with bootstrap resampling with 1000 replications, to further explore their association with language recovery, according to the two groups (poor and good recovery).

Effect sizes were also calculated using R software: η^2 for Kruskal-Wallis, r for Mann-Whitney, and v for chi-square tests.

Results

Participants

One hundred and thirty-six participants, aged over 18 years with a first left mono-hemispheric stroke confirmed by the MRI, were admitted to neurorehabilitation ward between January 2012 and October 2019 and accepted that their data be used for research (see flow chart diagram in Figure 1). Ninety-six participants were included in this study as they met the inclusion criteria.

The determinants of aphasia severity were thus analyzed in 96 participants, whose sociodemographic, clinical and stroke-related characteristics are presented in Table 1. Among these 96 participants, 24 were non-aphasic (N-Aph) and 72 participants were aphasic with 31 with mild/moderate aphasia (M-Aph) and 41 with severe aphasia (S-Aph).

The median age for all participants was 65.59 (Q1-Q3=55.22-71.37), 61 (63.54%) were males, 90 were right-handed (93.75%), 30 had an education level higher than high-school diploma (32.61%) and 31 were employed (33.33%). Twenty-seven participants lived alone (29.35%) and 72 had strong family support (78.26%). The majority had an ischemic stroke (78.13%) and stroke severity was moderate (median NIHSS of 11 [7-17.5]). The median score for mood disorders was 8.5 (6-12), suggesting no depression disorders. Among all participants, 66 (68.75%) had moderate or severe general disability, 38 (39.58%) had moderate or severe

¹ As division by 0 is mathematically impossible, we excluded participants with an initial severity of aphasia at 0.

weakness of upper and lower limbs, 38 (39.58%) had moderate or severe WMHs, 53 (55.21%) had moderate or severe executive dysfunction, 26 (28.57%) had moderate or severe upper limb apraxia and 28 (29.47%) had spatial neglect. The median lesion size for all participants was 13364 voxels (2674-37824). Among the 72 participants with aphasia, 47 (65.28%) had fluent aphasia, their median percentage of correct responses in the naming task was 70% (18.75-85) and the median aphasia severity at FA was 2 (1; 3).

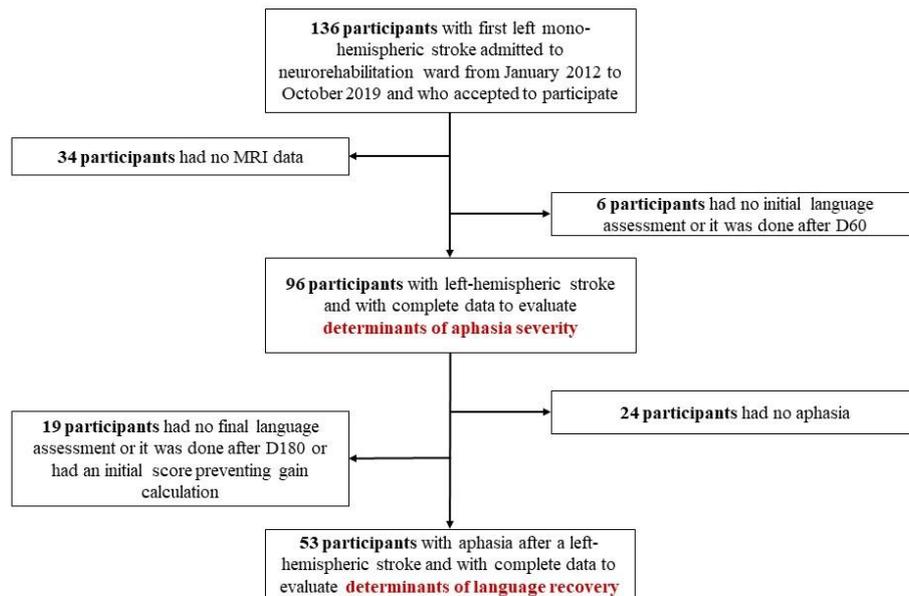


Figure 1. Flowchart of participants inclusion in the study.

Aphasia recovery was evaluated in 53 out of the 96 participants initially screened. The 53 participants presented aphasia and were divided into two groups: 22 participants with poor recovery and 31 participants with good recovery.

Overall, there were some missing data (n=40, 2.16%) for all 96 participants: education level (n=4), professional status (n=3), living alone (n=4), family support (n=4), NIHSS (n=1), naming at FA (n=11), upper limb apraxia (n=5), spatial neglect (n=1) and ADRS (n=7).

Determinants of initial severity of aphasia

All sociodemographic, clinical and stroke-related parameters as well as the results of univariate analyses are presented in Table 1, for all participants and for each group (N-Aph, M-Aph, S-Aph).

Table 1: Sociodemographic, clinical and stroke-related data for participants without aphasia (N-Aph, N=24), with mild or moderate aphasia (M-Aph, N=31) and with severe aphasia (S-Aph, N=41). Statistical results for the comparison between groups are also presented. A value of $p_{\text{corrected}} < 0.05$ (with Bonferroni correction) for intergroup comparison and $p < 0.05$ (without correction) for omnibus tests and when we considered only aphasic participants (for type of aphasia, first assessment time and naming), were considered statistically significant. Significant results are presented in bold.

	All participants (N=96)				Group comparisons		
	S-Aph (N=41)	M-Aph (N=31)	N-Aph (N=24)	Omnibus test	N-Aph vs. M-Aph	N-Aph vs. Sev-Aph	M-Aph vs. Sev-Aph
Sociodemographic factors							
Age (years)	65.59 (55.22-71.37)	59.02 (49.72-69.47)	67.55 (58.23-72.65)	$\chi^2=6.99, p=0.03, \eta^2=0.054$	$Z=-2.29, p=0.065$	$Z=-0.49, p=1$	$Z=2.25, p=0.073$
Sex, male (%)	61 (63.54)	17 (54.84)	14 (58.33)	$\chi^2=2.94, p=0.23$			
Handedness, RH (%)	90 (93.75)	30 (96.77)	22 (91.67)	$\chi^2=0.74, p=0.69$			
Education level, > high-school diploma (%)	30 (32.61)	12 (38.71)	6 (27.27)	$\chi^2=0.87, p=0.65$			
Professional status, employed (%)	31 (33.33)	15 (37.5)	3 (13.64)	$\chi^2=5.19, p=0.075$			
Isolation level							
Living alone (%)	27 (29.35)	6 (20)	8 (36.36)	$\chi^2=1.97, p=0.37$			
Family support, strong (%)	72 (78.26)	29 (72.5)	17 (77.27)	$\chi^2=2.04, p=0.36$			
First assessment time (days post-stroke) *	21 (15-25)	16 (8.5-27)					$Z=2.19, p=0.14$
General disability, moderate or severe (%)	66 (68.75)	34 (82.93)	12 (50)	$\chi^2=8.02, p=0.018, \eta^2=0.29$	$\chi^2=1.17, p=0.84$	$\chi^2=7.93, p=0.015, \eta^2=0.29$	$\chi^2=3.19, p=0.22$
Weakness of UL and LL, moderate or severe (%)	38 (39.58)	22 (53.66)	7 (29.17)	$\chi^2=5.93, p=0.052$			
Clinical factors							
Naming-FA (0-100%) *	30.24 (7.5-74.3)	81.25 (68.75-96.25)					$Z=-3.89, p < 0.001, r=0.50$
Executive dysfunction, moderate or severe (%)	53 (55.21)	34 (82.93)	3 (12.5)	$\chi^2=30.60, p < 0.001, \eta^2=0.56$	$\chi^2=9.15, p=0.007, \eta^2=0.31$	$\chi^2=30.62, p < 0.001, \eta^2=0.56$	$\chi^2=8.16, p=0.013, \eta^2=0.29$
UL Apraxia, moderate or severe (%)	26 (28.57)	19 (48.72)	1 (4.35)	$\chi^2=15.25, p < 0.001, \eta^2=0.41$	$\chi^2=2.94, p=0.26$	$\chi^2=13.03, p < 0.001, \eta^2=0.38$	$\chi^2=5.62, p=0.053$
Spatial neglect, moderate or severe (%)	28 (29.47)	17 (41.46)	3 (13.04)	$\chi^2=6.02, p=0.049, \eta^2=0.25$	$\chi^2=1.33, p=0.75$	$\chi^2=5.54, p=0.056$	$\chi^2=1.91, p=0.50$
Mood disorders, ADRS (0-32)	8.5 (6-12)	8 (5.75-12)	10 (4-12)	$\chi^2=0.19, p=0.91$			
Type of stroke, infarct (%)	75 (78.13)	36 (87.80)	21 (67.74)	$\chi^2=4.34, p=0.11$			
Stroke severity, NIHSS (0-42)	11 (7-17.5)	16 (12-21)	10.5 (7-15.75)	$\chi^2=22.02, p < 0.001, \eta^2=0.22$	$Z=2.66, p=0.024, r=0.36$	$Z=4.47, p < 0.001, r=0.56$	$Z=2.40, p=0.049, r=0.29$
Lesion size (voxels)	13364 (2674-37824)	41127 (19224-82276)	16565 (9415-30505)	$\chi^2=41.71, p < 0.001, \eta^2=0.43$	$Z=3.82, p < 0.001, r=0.52$	$Z=6.71, p < 0.001, r=0.71$	$Z=4.00, p < 0.001, r=0.47$
Type of aphasia, fluent (%) *	20 (48.78)	27 (87.10)					$\chi^2=11.43, p < 0.001, \eta^2=0.40$
Moderate or severe WMMs (%)	38 (39.58)	14 (34.15)	13 (54.17)	$\chi^2=2.86, p=0.24$			

*Data and statistical analyses are presented only for participants with aphasia (N=73).

Data are presented as median with interquartile ranges (Q1-Q3) or as number with a percentage (%).

N-Aph, Non-Aphasic; M-Aph, mild/Moderate Aphasia; S-Aph, Severe Aphasia; RH, Right handers; NIHSS, National Institutes of Health Stroke Scale; F4, First Assessment; UL, upper limb; LL, lower limb; WMMs, white matter hyperintensities; ADRS, Aphasia Depression Rating Scale.

There were no inter-group differences for the sociodemographic characteristics. Concerning clinical and stroke-related data, aphasic participants differed from those without aphasia in: higher stroke severity, with a large effect size for S-Aph ($Z=4.47$, $p<0.001$, $r=0.56$) and a moderate effect size for M-Aph ($Z=2.66$, $p=0.024$, $r=0.36$); a larger lesion size, with a large effect size for M-Aph ($Z=3.82$, $p<0.001$, $r=0.52$) and S-Aph ($Z=5.71$, $p<0.001$, $r=0.71$); more participants with moderate or severe global disability among S-Aph ($\chi^2=7.93$, $p=0.015$, $v=0.29$, moderate effect size); more participants with moderate or severe executive dysfunction, among S-Aph ($\chi^2=30.62$, $p<0.001$, $v=0.56$, moderate effect size) and M-Aph ($\chi^2=9.15$, $p=0.007$, $v=0.31$, moderate effect size); more participants with moderate or severe upper limb apraxia among S-Aph ($\chi^2=13.03$, $p<0.001$, $v=0.38$, moderate effect size).

On the other hand, participants with severe aphasia differed from those with mild/moderate aphasia, with a small or moderate effect size, by more severe stroke severity ($Z=2.40$, $p=0.049$, $r=0.29$), larger lesion size ($Z=4.00$, $p<0.001$, $r=0.47$) and more severe naming deficits ($Z=-3.89$, $p<0.001$, $r=0.50$). We also showed that there were significantly more mild/moderate aphasic participants with fluent aphasia, compared to those with severe aphasia ($\chi^2=11.43$, $p<0.001$, $v=0.40$, moderate effect size). Finally, there were significantly more severe aphasic participants with moderate or severe executive dysfunction compared to those with mild/moderate aphasia ($\chi^2=8.16$, $p=0.013$, $v=0.29$, moderate effect size).

All significant factors were kept for the multivariate analysis, except for naming and aphasia type, since these data are not presented for non-aphasic participants due to too much missing data in N-Aph for naming and because aphasia type is not relevant for N-Aph. There was no evidence of collinearity, with the variance inflation factor not exceeding 10 for variables selected by the univariate analyses and used in the multivariate analysis (see Supplementary Material Table B).

For the multivariate analysis, we performed a forward stepwise logistic regression analysis with bootstrapping (1000 bootstrap samples), testing significant variables from univariate analyses (in omnibus tests): age, stroke severity, lesion size, general disability, executive dysfunction, upper limb apraxia and spatial neglect. Note that participants with missing data for any of the independent variable were removed from the sample before performing multivariate analyses ($N_{\text{final}} = 89$).

We showed that the most commonly occurring significant factors (selected more than 60% of times [59]) were lesion size (99.9% times), executive dysfunction (99.6% times) and stroke

severity (67.2%). The signs of regression coefficients for the three most frequently selected variables were all negative, suggesting stability of our model. Finally, these factors (lesion size, executive dysfunction and NIHSS) were statistically significant predictors in the model (at $\alpha = 0.05$) more than 50% of times: respectively 99.60%, 99.30% and 76.19% (see Table 2).

Moreover, in the final model, forward stepwise regression selected stroke severity, executive dysfunction, lesion size but also general disability. However, this factor was a noise predictor since it was selected less than 60% of times [59] (see Table 2). Thus, we showed that stroke severity, executive dysfunction and lesion size were determinants of the initial severity of aphasia. More specifically, we showed that: (i) a 1-point increase in NIHSS, corresponding to an increase in stroke severity, decreases the odds of having mild/moderate or no aphasia by 10% (OR=0.90, 95%CI=0.82-0.99, $p=0.041$); (ii) the presence of moderate/severe executive dysfunction decreases the odds of having mild/moderate or no aphasia by 93.2% (OR=0.068, 95%CI=0.018-0.22, $p<0.001$); and (iii) an increase of 1 standard deviation in lesion size is associated with a 93.2% decrease in the odds of having mild/moderate or no aphasia (OR=0.068, 95%CI=0.013-0.24, $p<0.001$).

Table 2: Results of stepwise logistic regression analysis with bootstrap (1000 bootstrap samples), testing all significant variables from the univariate analyses, in order to find determinants of initial severity of aphasia. For each variable, we present the percentage of times that the variable was selected as an independent predictor, the sign of the regression coefficient was positive or negative, and the variable was significant in the model.

	Covariates selected (%)	Coefficients sign		Statistical significance (%)
		+ (%)	- (%)	
Lesion size (normalized)	99.9	0.00	100.00	99.60
Executive dysfunction	99.6	0.00	100.00	99.30
Stroke severity, NIHSS	67.2	0.00	100.00	76.19
General disability	48.4	99.38	0.62	66.12
Age	26.5	87.17	12.83	41.89
Spatial neglect	24.2	18.60	81.40	58.26
UL Apraxia	21.9	41.10	58.90	52.51

Determinants of language recovery

Sociodemographic, clinical, stroke-related and rehabilitation-related factors are presented in Table 3 for all 53 participants and for each group (poor and good recovery). Among these 53 participants, 33 (62.3%) presented severe aphasia initially with 30 (96.8%) participants in the group “good recovery”².

² The gain calculation takes into account the initial severity of aphasia. Thus, the gain is higher in patients with severe aphasia initially.

Table 3: Sociodemographic, clinical, stroke-related and rehabilitation-related data for aphasic participants with severe aphasia initially who had poor (N=22) and good (N=31) language recovery. Statistical results for the comparison between groups are also presented. A value of $p < 0.05$ was considered statistically significant and significant results are presented in bold.

	All participants (N=53)	Poor recovery (N=22)	Good recovery (N=31)	Poor vs. Good recovery
Sociodemographic factors	Age (years)	62.5 (54-70.6)	57.15 (49.10-70.45)	64.30 (59.20-70.50) $Z=-1.60, p=0.11$
	Sex, male (%)	36 (67.92)	12 (54.55)	24 (77.42) $\chi^2=3.09, p=0.079$
	Handedness, RH (%)	50 (94.34)	21 (95.45)	29 (93.54) $\chi^2=0.088, p=0.77$
	Education level, > high-school diploma (%)	15 (28.85)	7 (31.82)	8 (26.67) $\chi^2=0.16, p=0.69$
	Professional status, employed (%)	23 (44.23)	10 (45.45)	13 (43.33) $\chi^2=0.023, p=0.88$
	Isolation level			
	<i>Living alone (%)</i>	15 (29.41)	5 (23.81)	10 (33.33) $\chi^2=0.54, p=0.46$
<i>Family support, strong (%)</i>	40 (78.43)	18 (85.71)	22 (73.33) $\chi^2=1.12, p=0.29$	
Clinical factors	Second assessment time (days post-stroke)	82 (62-123)	81 (64.75-105)	82 (61.5-135.50) $Z=-0.43, p=0.67$
	Delay FA-DA	59 (44-101)	60 (45.25-92.25)	59 (43-106.50) $Z=-0.53, p=0.59$
	General disability, moderate or severe (%)	39 (73.58)	14 (63.64)	25 (80.65) $\chi^2=1.92, p=0.17$
	Weakness of UL and LL, moderate or severe (%)	21 (39.62)	6 (27.27)	15 (48.39) $\chi^2=2.40, p=0.12$
	Naming change (0-100%)	17.5 (3.75-40)	17.08 (1.88-26.46)	21.25 (7.19-49.07) $Z=-0.99, p=0.33$
	Executive dysfunction, moderate or severe (%)	37 (69.81)	12 (54.55)	25 (80.65) $\chi^2=4.16, p=0.041, v=0.28$
	UL Apraxia, moderate or severe (%)	16 (32.65)	6 (30.00)	10 (34.48) $\chi^2=0.11, p=0.74$
	Spatial neglect, moderate or severe (%)	16 (30.19)	6 (27.27)	10 (32.36) $\chi^2=0.15, p=0.70$
	Mood disorders, ADRS (0-32)	8 (5.25-11)	7.5 (5.75-9.25)	8 (5.25-11.75) $Z=-0.43, p=0.67$
	Type of stroke, infarct (%)	45 (84.91)	17 (77.27)	28 (90.32) $\chi^2=1.71, p=0.19$
Stroke-related factors	Stroke severity, NIHSS (0-42)	13 (8.75-18)	11 (8-20)	13 (9-17.5) $Z=-0.13, p=0.90$
	Lesion size (voxels)	23300 (7833-45637)	17646 (5012-31529)	33484 (13530-75011) $Z=-2.31, p=0.020, r=0.32$
	Type of aphasia, fluent (%)	36 (67.92)	18 (81.82)	18 (58.06) $\chi^2=3.33, p=0.068$
	Moderate or severe WMHs (%)	15 (28.30)	6 (27.27)	9 (29.03) $\chi^2=0.020, p=0.89$
Rehabilitation-related factors	SLT onset (days post-stroke)	17 (13-24)	14.5 (1.25-22.25)	21 (15-24) $Z=-1.91, p=0.058$
	SLT intensity (sessions/week)	4.4 (2.4-5)	3.5 (1.53-4.63)	5 (4-5) $Z=-3.05, p=0.0023, r=0.43$

Data are presented as median with interquartile range (Q1–Q3) or as number with a percentage (%).

RH, Right handers; NIHSS, National Institutes of Health Stroke Scale; SLT, speech and language therapy; UL, upper limb; LL, lower limb; WMHs, white matter hyperintensities; ADRS, Aphasia Depression Rating Scale.

Missing data concerned: Education level (n=1), Professional status (n=1), Living alone (n=2), Family support (n=2), NIHSS (n=1), SLT onset (n=2), SLT intensity (n=2), Naming change (n=12), UL Apraxia (n=4), ADRS (n=3).

In terms of sociodemographic data, based on the univariate analyses, there was no between-group difference. Concerning other factors, individuals with good recovery presented

significantly larger lesion size ($Z=-2.31$, $p=0.020$, $r=0.32$) and more intensive SL therapy ($Z=-3.05$, $p=0.0023$, $r=0.43$), with moderate effect size, than individuals with poor recovery (see Table 3). Moreover, significantly fewer participants with poor recovery had moderate/severe executive dysfunction ($\chi^2=4.16$, $p=0.041$, $v=0.28$; moderate effect size) compared to those with good recovery.

All significant factors were kept for the multivariate analysis. There was no evidence of collinearity, with the variance inflation factor not exceeding 10 for variables selected by the univariate analyses (see Supplementary Material Table C).

For the multivariate analysis, we performed a forward stepwise logistic regression analysis with bootstrapping (1000 bootstrap samples), testing significant variables from univariate analyses: lesion size, SL therapy intensity and executive dysfunction. Note that participants with missing data for any of the independent variable were removed from the sample before performing multivariate analyses ($N_{\text{final}} = 51$).

We showed that all variables were selected more than 60% of times: SL therapy intensity 83.5% of times, executive dysfunction 72.1% of times and lesion size 67.5% of times (see Table 4). We showed that for these most frequently selected variables, the bootstrap regression coefficients were mostly positive (between 99.72 and 100% of times), suggesting stability of our model. Two of these factors were significant more than 50% of times: SL therapy intensity (68.26%) and executive dysfunction (67.55).

Table 4: Results of stepwise logistic regression analysis with bootstrap (1000 bootstrap samples), testing all significant variables from the univariate analyses, in order to find determinants of language recovery. For each variable, we present the percentage of times that the variable was selected as an independent predictor, the sign of the regression coefficient was positive or negative, and the variable was significant in the model.

	Covariates selected (%)	Coefficients sign		Statistical significance (%)
		+ (%)	- (%)	
SLT intensity	83.5	100.00	0.00	68.26
Executive dysfunction	72.1	99.72	0.28	67.55
Lesion size (normalized)	67.5	99.85	0.15	45.04

Moreover, based on statistical results from forward stepwise regression, only SL therapy intensity was significant in the final model (p-value observed for executive dysfunction is tendential with $p = 0.052$). Thus, this result suggests that a 1-point increase in the SL therapy

intensity, corresponding to an increase of 1 session/week for SL therapy, increased the odds of having good recovery by 47% (OR=1.47, 95%CI=1.04-2.21, p = 0.043).

Discussion

In this study, we assessed multiple factors (sociodemographic, stroke-related, clinical and rehabilitation-related), considered in combination, to determine which most affect the initial severity of aphasia and the degree of language recovery in participants with left-hemispheric stroke. Thus, we identified that: (i) the most robust determinants of the initial severity of aphasia were lesion volume, stroke severity, and executive dysfunction; and (ii) the most robust determinant of language recovery was the intensity of SL therapy.

First, based on univariate analyses, we found that a severe stroke, a large lesion, non-fluent aphasia, moderate/severe general disability, moderate/severe executive dysfunction, greater naming deficit and moderate/severe upper limb apraxia, were associated with more severe aphasia initially. Secondly, we showed that a larger lesion, greater SLT intensity and moderate/severe executive dysfunction were associated with good language recovery³. As determined by ordinal logistic regression combined with bootstrap, the most robust determinants of the initial severity of aphasia were the size of the lesion, stroke severity, and executive dysfunction. In addition, the most robust determinant of language recovery, based on binary logistic regression combined with bootstrap, was the intensity of SLT.

Among the few studies that have looked at predictors of initial severity of poststroke aphasia, Lahiri and collaborators [13] showed that type of stroke, lesion size, and type of aphasia were determinants of initial severity of aphasia: hemorrhagic stroke, non-fluent aphasia, and a larger lesion were associated with greater severity of aphasia initially. In an earlier study [60], the authors showed that aphasia severity was related to the side and size of the lesion and stroke severity. Indeed, left hemispheric stroke, higher stroke severity, and larger lesion size were initially associated with more severe aphasia in the initial stage.

In line with these results, our analyses showed that stroke-related factors, such as lesion size and neurological severity, were associated with the initial severity of aphasia. More severe stroke is related to more severe aphasia. In previous studies, some authors found that stroke severity is associated with the presence of aphasia [24,61], and in addition to the initial severity

³ Note that patients in the "good recovery" group have a high gain and the gain calculation takes into account the initial severity: the gain is higher in patients with severe aphasia initially. The patients with a good recovery (high gain) presented therefore more severe aphasia initially, and the severity is associated with the size of the lesion and executive dysfunction.

of aphasia, stroke severity on admission improves the accuracy of the prognosis of aphasia [15]. Regarding the lesion size, most studies have evaluated its effect on the outcome of aphasia: larger lesions predict poorer outcomes and slow language recovery (for example, see [12,20]). However, our study also showed that lesion size, in addition to stroke severity, was a determinant of the initial severity of aphasia. Døli and collaborators [37] showed that lesion size was associated with the initial severity of aphasia in the subacute phase (see also [38]).

We also showed that executive dysfunction is associated with the severity of aphasia. Our univariate analyses revealed that executive functions were more severely impaired in individuals with aphasia than without, as well as in individuals with severe aphasia compared to those with mild or moderate aphasia. This result, in line with previous reports [25,62], highlights that executive functions are the most affected cognitive skills associated with aphasia. Furthermore, it can explain differences in cognitive performance between aphasic and non-aphasic individuals. For example, Olsson and colleagues [63] reported that the impairment of executive functions might be due to an extension of the lesion responsible for aphasia to other regions, mainly prefrontal cortices underlying executive processes and cognitive functions control. Thus, executive functions and linguistic abilities are closely linked, and, more generally, executive functioning can be considered an appropriate indicator for communication abilities [64]. In our opinion, the link between stroke severity, executive dysfunction, and aphasia severity may be related to the size of the lesion but maybe also to its localization. Indeed, a large lesion with damage to regions and networks crucial for language and other domain-general processes is associated with more severe aphasia [10]. Therefore, the role of lesion location will be addressed in a future study.

Thus, we proposed that the relationship between stroke severity, executive dysfunction, and aphasia severity may be related the lesion volume but maybe also to its location. Indeed, more severe stroke and greater dysfunction are associated with a larger lesion with a high probability of involving crucial regions for language and other domain-general processes, which is associated with more severe aphasia [10,13,24]. Therefore, the role of lesion location will be addressed in a future study.

Many studies have evaluated the impact of sociodemographic and clinical factors on language recovery and aphasia outcomes. Several literature reviews reported determinants, some more consensual (severity of aphasia, lesion-related factors) and others more debated (gender, age, manual preference, etc.) [9,30]. In our study, because of the use of initial aphasia severity in the calculation of gain, we cannot directly assess the role of initial severity of aphasia on language

recovery. However, in this study, we quantified recovery with the gain value and the group with good recovery was composed of 96.8% of patients with severe aphasia initially, suggesting a higher gain in patients with severe aphasia initially. This may be explained by the larger space available for possible improvement in patients with severe aphasia initially, whereas those with mild/moderate aphasia have less space for improvement [17,18]. Indeed, for patients with severe aphasia initially, the ASRS is low (between 0 and 2) and can increase by 1 to 5 points between DA and FA; whereas for patients with mild/moderate aphasia the ASRS is higher (between 3 and 5) and they can thus improve only by 1 or 2 points. Thus, in this study, we have shown that more intensive rehabilitation is associated with greater recovery (high gain) in the subacute phase.

The role of SLT (dosage, intensity, frequency, type etc.) was often studied in the literature (see [27,28]). In a meta-analysis, the authors showed that SLT allows for improvements in language production, comprehension, and functional communication in individuals with aphasia compared to those without access to therapy [27]. They also showed that high-intensity SLT (many hours over a short period of time) improved communication abilities and reduced aphasia severity compared to low-intensity SLT. Moreover, as showed in a recent study [28], a greatest language recovery was associated with frequent, adapted to patient and receptive-expressive SLT, with home practice. More specifically, they showed that greatest gain in overall language, auditory comprehension and functional communication were associated with a frequency of 3-5 days/week and an intensity of 2-4 hours/week. For auditory comprehension and overall language, greatest gains were also showed for intensity greater than 9 hours/week, with a total of 20-50 hours of SLT. Thus, SLT is an effective method for improving language abilities and its intensity plays an important role: more intensive SLT is associated with better outcome for individuals with post-stroke aphasia.

The results obtained in this study could offer interesting perspectives for a better understanding of long-term outcomes and speech therapy issues [65]. Given the link between the initial severity of aphasia and language recovery, evaluating determinants of aphasia severity may be interesting for a better knowledge of the modulatory factors that influence recovery. For example, having more information on the initial severity of aphasia might help better choose the rehabilitation method (type, intensity, duration) to guarantee the best long-term outcome. Glize and collaborators [66] suggest that individuals with severe aphasia initially may not be included in some intensive therapies due to the severity of aphasia or their fatigue. However, knowledge of the prognosis for recovery may encourage the inclusion of some individuals in

such intensive therapies. Moreover, in our study we showed that participants with more intensive SLT had a higher gain in the subacute phase post-stroke. It should be remembered that, according to the formula for calculating gain, individuals with more severe aphasia initially had higher gain. Thus, the intensity of SLT has a strong influence on language recovery, and even more so for individuals with initially severe aphasia, for whom it seems to be necessary to offer intensive rehabilitation in order to ensure better language recovery.

As mentioned in a previous review [28], in order to choose the most appropriate rehabilitation program, which guarantee the best long-term outcome, SLT must be frequent (intensive rehabilitation) and personalized (adapting rehabilitation to the patients' skills and difficulties and to the targeted function). Finally, as mentioned by Doogan and colleagues [65], knowledge of the factors determining aphasia severity and language recovery contribute for the development of a personalized rehabilitation program for each individual. Thus, considering the demographic, cognitive, and neural profiles of individual will contribute to this goal and may serve as a platform to predict the effect of rehabilitation on spontaneous recovery.

Several limitations of this study should be mentioned. For instance, the groups are not perfectly balanced in terms of the number of participants, and missing values in the data lead to the need to validate these results in a larger cohort. Another limitation of this study is that it only assesses individuals admitted to the hospital ward. It has been suggested that some individuals with lower socioeconomic status may be less likely to seek hospital care [67]. Therefore, the influence of socioeconomic status may be more important than the present data reveal, particularly concerning language recovery. Moreover, the use of the gain and the way it is calculated allows us to reason only in terms of recovery in relation to the initial severity of the aphasia. Finally, lesion location should be considered in future works, as it may have an impact on the initial severity of aphasia and language recovery.

Conclusions

In this observational study, we evaluated many modulatory factors together to determine which factor(s) had the most significant impact on the initial severity of aphasia and on language recovery in a cohort of participants with left-hemispheric stroke with or without aphasia. Our main results indicate that (a) stroke severity, executive dysfunction, and lesion size are the best determinants of the initial severity of aphasia, and (b) intensity of SLT is the best determinant of language recovery. Our preliminary results may open interesting avenues for describing the mechanisms involved in recovery. They also suggest additional elements for a more structured

and personalized choice of rehabilitation methods (such as intensive rehabilitation) favoring optimal recovery from a clinical standpoint.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Bibliography

- [1] Darrigrand B, Dutheil S, Michelet V, Rereau S, Rousseaux M, mazaux J-M. Communication impairment and activity limitation in stroke patients with severe aphasia. *Disability and Rehabilitation* 2011;33:1169–78. <https://doi.org/10.3109/09638288.2010.524271>.
- [2] Davis GA. *Aphasiology: Disorders and Clinical Practice*. Boston: Allyn and Bacon; 2007.
- [3] Koleck M, Gana K, Lucot C, Darrigrand B, Mazaux J-M, Glize B. Quality of life in aphasic patients 1 year after a first stroke. *Qual Life Res* 2017;26:45–54. <https://doi.org/10.1007/s11136-016-1361-z>.
- [4] Berthier ML. Poststroke aphasia : epidemiology, pathophysiology and treatment. *Drugs Aging* 2005;22:163–82. <https://doi.org/10.2165/00002512-200522020-00006>.
- [5] Engelter ST, Gostynski M, Papa S, Frei M, Born C, Ajdacic-Gross V, et al. Epidemiology of Aphasia Attributable to First Ischemic Stroke. *Stroke* 2006;37:1379–84. <https://doi.org/10.1161/01.STR.0000221815.64093.8c>.
- [6] Ali M, Lyden P, Brady M. Aphasia and Dysarthria in Acute Stroke: Recovery and Functional Outcome. *International Journal of Stroke* 2015;10:400–6. <https://doi.org/10.1111/ijvs.12067>.
- [7] Kuriakose D, Xiao Z. Pathophysiology and Treatment of Stroke: Present Status and Future Perspectives. *IJMS* 2020;21:7609. <https://doi.org/10.3390/ijms21207609>.
- [8] Hamilton RH, Chrysikou EG, Coslett B. Mechanisms of Aphasia Recovery After Stroke and the Role of Noninvasive Brain Stimulation. *Brain Lang* 2011;118:40–50. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.02.005>.
- [9] Gerstenecker A, Lazar RM. Language recovery following stroke. *Clin Neuropsychol* 2019;33:928–47. <https://doi.org/10.1080/13854046.2018.1562093>.
- [10] Kiran S, Thompson CK. Neuroplasticity of Language Networks in Aphasia: Advances, Updates, and Future Challenges. *Front Neurol* 2019;10:295. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00295>.
- [11] Wabila MM, Balarabe SA. Factors predicting post-stroke aphasia recovery. *Journal of the Neurological Sciences* 2015;352:12–8. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2015.03.020>.
- [12] Plowman E, Hentz B, Ellis C. Post-stroke aphasia prognosis: a review of patient-related and stroke-related factors. *Journal of Evaluation in Clinical Practice* 2012;18:689–94. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2753.2011.01650.x>.
- [13] Lahiri D, Dubey S, Ardila A, Ray BK. Factors affecting vascular aphasia severity. *Aphasiology* 2021;35:633–41. <https://doi.org/10.1080/02687038.2020.1712587>.
- [14] Lazar RM, Minzer B, Antonello D, Festa JR, Krakauer JW, Marshall RS. Improvement in aphasia scores after stroke is well predicted by initial severity. *Stroke* 2010;41:1485–8. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.109.577338>.
- [15] Pedersen PM, Vinter K, Olsen TS. Aphasia after Stroke: Type, Severity and Prognosis. *Cerebrovascular Diseases* 2004;17:35–43. <https://doi.org/10.1159/000073896>.
- [16] Ramsey LE, Siegel JS, Lang CE, Strube M, Shulman GL, Corbetta M. Behavioural clusters and predictors of performance during recovery from stroke. *Nat Hum Behav* 2017;1:0038. <https://doi.org/10.1038/s41562-016-0038>.
- [17] Lee JB, Kaye RC, Cherney LR. Conversational script performance in adults with non-fluent aphasia: Treatment intensity and aphasia severity. *Aphasiology* 2009;23:885–97. <https://doi.org/10.1080/02687030802669534>.

- [18] Osa García A, Brambati SM, Brisebois A, Désilets-Barnabé M, Houzé B, Bedetti C, et al. Predicting Early Post-stroke Aphasia Outcome From Initial Aphasia Severity. *Front Neurol* 2020;11:120. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00120>.
- [19] Robey RR. A meta-analysis of clinical outcomes in the treatment of aphasia. *J Speech Lang Hear Res* 1998;41:172–87.
- [20] Benganem S, Rosso C, Arbizu C, Moulton E, Dormont D, Leger A, et al. Aphasia outcome: the interactions between initial severity, lesion size and location. *J Neurol* 2019;266:1303–9. <https://doi.org/10.1007/s00415-019-09259-3>.
- [21] Harvey DY, Parchure S, Hamilton RH. Factors predicting long-term recovery from post-stroke aphasia. *Aphasiology* 2021:1–22. <https://doi.org/10.1080/02687038.2021.1966374>.
- [22] Maas MB, Lev MH, Ay H, Singhal AB, Greer DM, Smith WS, et al. The Prognosis for Aphasia in Stroke. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases* 2012;21:350–7. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2010.09.009>.
- [23] Sul B, Lee KB, Hong BY, Kim JS, Kim J, Hwang WS, et al. Association of Lesion Location With Long-Term Recovery in Post-stroke Aphasia and Language Deficits. *Front Neurol* 2019;10:776. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00776>.
- [24] Inatomi Y, Yonehara T, Omiya S, Hashimoto Y, Hirano T, Uchino M. Aphasia during the acute phase in ischemic stroke. *Cerebrovasc Dis* 2008;25:316–23. <https://doi.org/10.1159/000118376>.
- [25] Bonini MV, Radanovic M, Bonini MV, Radanovic M. Cognitive deficits in post-stroke aphasia. *Arq Neuropsiquiatr* 2015;73:840–7. <https://doi.org/10.1590/0004-282X20150133>.
- [26] Dignam J, Copland D, O'Brien K, Burfein P, Khan A, Rodriguez AD. Influence of Cognitive Ability on Therapy Outcomes for Anomia in Adults With Chronic Poststroke Aphasia. *J Speech Lang Hear Res* 2017;60:406–21. https://doi.org/10.1044/2016_JSLHR-L-15-0384.
- [27] Brady MC, Kelly H, Godwin J, Enderby P, Campbell P. Speech and language therapy for aphasia following stroke. *Cochrane Database Syst Rev* 2016. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD000425.pub4>.
- [28] Brady MC, Ali M, VandenBerg K, Williams LJ, Williams LR, Abo M, et al. Dosage, Intensity, and Frequency of Language Therapy for Aphasia: A Systematic Review–Based, Individual Participant Data Network Meta-Analysis. *Stroke* 2022;53:956–67. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.121.035216>.
- [29] Cappa SF. Spontaneous Recovery of Aphasia. In: Stemmer B, Whitaker HA, editors. *Handbook of the Neuroscience of Language*, San Diego: Elsevier; 2008, p. 389–95.
- [30] Kristinsson S, den Ouden DB, Rorden C, Newman-Norlund R, Neils-Strunjas J, Fridriksson J. Predictors of Therapy Response in Chronic Aphasia: Building a Foundation for Personalized Aphasia Therapy. *J Stroke* 2022;24:189–206. <https://doi.org/10.5853/jos.2022.01102>.
- [31] Boden-Albala B, Litwak E, Elkind MSV, Rundek T, Sacco RL. Social isolation and outcomes post stroke. *Neurology* 2005;64:1888–92. <https://doi.org/10.1212/01.WNL.0000163510.79351.AF>.
- [32] Labache L, Mazoyer B, Joliot M, Crivello F, Hesling I, Tzourio-Mazoyer N. Typical and atypical language brain organization based on intrinsic connectivity and multitask functional asymmetries. *ELife* 2020;9:e58722. <https://doi.org/10.7554/eLife.58722>.
- [33] Tzourio-Mazoyer N, Perrone-Bertolotti M, Jobard G, Mazoyer B, Baciou M. Multi-factorial modulation of hemispheric specialization and plasticity for language in healthy and pathological conditions: A review. *Cortex* 2017;86:314–39. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.05.013>.
- [34] Viader F, Lambert J, de la Sayette V, Eustache F, Morin P, Morin I, et al. Aphasia. *EMC Neurologie* 2010;7:1–35. [https://doi.org/10.1016/S0246-0378\(09\)51369-3](https://doi.org/10.1016/S0246-0378(09)51369-3).
- [35] Hillis AE, Tippett DC. Stroke Recovery: Surprising Influences and Residual Consequences. *Adv Med* 2014;2014. <https://doi.org/10.1155/2014/378263>.
- [36] Koenig-Bruhin M, Kolonko B, At A, Annoni J-M, Hunziker E. Aphasia following a stroke : recovery and recommendations for rehabilitation. *Swiss Arch Neurol Psychiatry* 2013;164:292–8. <https://doi.org/10.4414/sanp.2013.00209>.
- [37] Døli H, Andersen Helland W, Helland T, Næss H, Hofstad H, Specht K. Associations between stroke severity, aphasia severity, lesion location, and lesion size in acute stroke, and aphasia severity one year post stroke. *Aphasiology* 2021:1–23. <https://doi.org/10.1080/02687038.2021.2013430>.

- [38] Døli H, Andersen Helland W, Helland T, Specht K. Associations between lesion size, lesion location and aphasia in acute stroke. *Aphasiology* 2021;35:745–63. <https://doi.org/10.1080/02687038.2020.1727838>.
- [39] Pustina D, Coslett HB, Ungar L, Faseyitan OK, Medaglia JD, Avants B, et al. Enhanced estimations of post-stroke aphasia severity using stacked multimodal predictions. *Hum Brain Mapp* 2017;38:5603–15. <https://doi.org/10.1002/hbm.23752>.
- [40] Goodglass H, Kaplan E. The assessment of aphasia and related disorders. Philadelphia: Lea & Febiger; 1983.
- [41] Mazaux J-M, Orgogozo J-M. Echelle d'évaluation de l'aphasie adaptée du Boston Diagnostic Aphasia examination. Issy Les Moulineaux: Editions scientifiques et psychotechniques; 1981.
- [42] Dai S, Piscicelli C, Clarac E, Baciú M, Hommel M, Pérennou D. Balance, Lateropulsion, and Gait Disorders in Subacute Stroke. *Neurology* 2021;96:e2147–59. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000011152>.
- [43] Dai S, Piscicelli C, Lemaire C, Christiaens A, Schotten MT de, Hommel M, et al. Recovery of balance and gait after stroke is deteriorated by confluent white matter hyperintensities: Cohort study. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* 2022;65:101488. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2021.101488>.
- [44] Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 1971;9:97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4).
- [45] Deloche G, Hannequin D. DO 80: Test de dénomination orale d'images. Paris, France: Editions du Centre de Psychologie Appliquée; 1997.
- [46] van Swieten JC, Koudstaal PJ, Visser MC, Schouten HJ, van Gijn J. Interobserver agreement for the assessment of handicap in stroke patients. *Stroke* 1988;19:604–7. <https://doi.org/10.1161/01.STR.19.5.604>.
- [47] Reitan RM, Wolfson D. The Halstead-Reitan neuropsychological test battery : theory and clinical interpretation. Tucson, AZ: Neuropsychological Press; 1985.
- [48] Stroop JR. Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology* 1935;18:643–62. <https://doi.org/10.1037/h0054651>.
- [49] Grant DA, Berg E. A behavioral analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem. *Journal of Experimental Psychology* 1948;38:404–11. <https://doi.org/10.1037/h0059831>.
- [50] Wechsler D. Wechsler Intelligence Scale–Fourth Edition (WAIS-IV): Technical and interpretive manual 2008. <https://doi.org/10.1037/t15169-000>.
- [51] Shallice T. Specific impairments of planning. *Phil Trans R Soc Lond B* 1982;298:199–209. <https://doi.org/10.1098/rstb.1982.0082>.
- [52] Simon HA. The functional equivalence of problem solving skills. *Cognitive Psychology* 1975;7:268–88. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(75\)90012-2](https://doi.org/10.1016/0010-0285(75)90012-2).
- [53] Rey A, Osterrieth PA. Translations of excerpts from Andre Rey's "Psychological examination of traumatic encephalopathy" and P. A. Osterrieth's "The complex figure copy test." *Clinical Neuropsychologist* 1993;7:4–21.
- [54] Vanbellingen T, Kersten B, Van de Winckel A, Bellion M, Baronti F, Müri R, et al. A new bedside test of gestures in stroke: the apraxia screen of TULIA (AST). *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2011;82:389–92. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2010.213371>.
- [55] Benaim C, Cailly B, Perennou D, Pelissier J. Validation of the aphasic depression rating scale. *Stroke* 2004;35:1692–6. <https://doi.org/10.1161/01.STR.0000130591.95710.20>.
- [56] Brott T, Adams HP, Olinger CP, Marler JR, Barsan WG, Biller J, et al. Measurements of acute cerebral infarction: a clinical examination scale. *Stroke* 1989;20:864–70. <https://doi.org/10.1161/01.STR.20.7.864>.
- [57] Rorden C, Brett M. Stereotaxic Display of Brain Lesions. *Behavioural Neurology* 2000;12:191–200. <https://doi.org/10.1155/2000/421719>.
- [58] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2020.
- [59] Austin PC, Tu JV. Bootstrap Methods for Developing Predictive Models. *The American Statistician* 2004;58:131–7. <https://doi.org/10.1198/0003130043277>.

- [60] Pedersen PM, Stig Jørgensen H, Nakayama H, Raaschou HO, Olsen TS. Aphasia in acute stroke: Incidence, determinants, and recovery. *Ann Neurol* 1995;38:659–66. <https://doi.org/10.1002/ana.410380416>.
- [61] Wilson SM, Eriksson DK, Brandt TH, Schneck SM, Lucanie JM, Burchfield AS, et al. Patterns of Recovery From Aphasia in the First 2 Weeks After Stroke. *J Speech Lang Hear Res* 2019;62:723–32. https://doi.org/10.1044/2018_JSLHR-L-18-0254.
- [62] Fonseca J, Raposo A, Martins IP. Cognitive functioning in chronic post-stroke aphasia. *Appl Neuropsychol Adult* 2019;26:355–64. <https://doi.org/10.1080/23279095.2018.1429442>.
- [63] Olsson C, Arvidsson P, Blom Johansson M. Relations between executive function, language, and functional communication in severe aphasia. *Aphasiology* 2019;33:821–45. <https://doi.org/10.1080/02687038.2019.1602813>.
- [64] Gonçalves APB, Mello C, Pereira AH, Ferré P, Fonseca RP, Joannette Y. Executive functions assessment in patients with language impairment. A systematic review. *Dement Neuropsychol* 2018;12:272–83. <https://doi.org/10.1590/1980-57642018dn12-030008>.
- [65] Doogan C, Dignam J, Copland D, Leff A. Aphasia Recovery: When, How and Who to Treat? *Current Neurology and Neuroscience Reports* 2018;18. <https://doi.org/10.1007/s11910-018-0891-x>.
- [66] Glize B, Villain M, Richert L, Vellay M, de Gabory I, Mazaux J-M, et al. Language features in the acute phase of poststroke severe aphasia could predict the outcome. *Eur J Phys Rehabil Med* 2017;53:249–55. <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.16.04255-6>.
- [67] Allain S, Naouri D, de Peretti C. En France, les AVC sont plus fréquents, plus graves et moins souvent pris en charge en unité spécialisée pour les personnes les plus modestes. *DREES, Études et Résultats* 2022.

Table A: STROBE Statement. Checklist of items that should be included in reports of *cohort studies*

	Item No	Recommendation	Page No
Title and abstract	1	(a) Indicate the study's design with a commonly used term in the title or the abstract	1
		(b) Provide in the abstract an informative and balanced summary of what was done and what was found	1
Introduction			
Background/rationale	2	Explain the scientific background and rationale for the investigation being reported	2-3
Objectives	3	State specific objectives, including any prespecified hypotheses	3
Methods			
Study design	4	Present key elements of study design early in the paper	4
Setting	5	Describe the setting, locations, and relevant dates, including periods of recruitment, exposure, follow-up, and data collection	4
Participants	6	(a) Give the eligibility criteria, and the sources and methods of selection of participants. Describe methods of follow-up (b) For matched studies, give matching criteria and number of exposed and unexposed	4-5
Variables	7	Clearly define all outcomes, exposures, predictors, potential confounders, and effect modifiers. Give diagnostic criteria, if applicable	5-8
Data sources/measurement	8*	For each variable of interest, give sources of data and details of methods of assessment (measurement). Describe comparability of assessment methods if there is more than one group	5-8
Bias	9	Describe any efforts to address potential sources of bias	8-9, 19
Study size	10	Explain how the study size was arrived at	9-10
Quantitative variables	11	Explain how quantitative variables were handled in the analyses. If applicable, describe which groupings were chosen and why	9-10
Statistical methods	12	(a) Describe all statistical methods, including those used to control for confounding (b) Describe any methods used to examine subgroups and interactions (c) Explain how missing data were addressed (d) If applicable, explain how loss to follow-up was addressed (e) Describe any sensitivity analyses	8-9 8-9 10 8-10
Results			
Participants	13*	(a) Report numbers of individuals at each stage of study—eg numbers potentially eligible, examined for eligibility, confirmed eligible, included in the study, completing follow-up, and analysed (b) Give reasons for non-participation at each stage (c) Consider use of a flow diagram	9-10 9-10 9
Descriptive data	14*	(a) Give characteristics of study participants (eg demographic, clinical, social) and information on exposures and potential confounders (b) Indicate number of participants with missing data for each variable of interest (c) Summarise follow-up time (eg, average and total amount)	9-10 10 Table 3
Outcome data	15*	Report numbers of outcome events or summary measures over time	10-14
Main results	16	(a) Give unadjusted estimates and, if applicable, confounder-adjusted estimates and their precision (eg, 95% confidence interval). Make clear which confounders were adjusted for and why they were included (b) Report category boundaries when continuous variables were categorized (c) If relevant, consider translating estimates of relative risk into absolute risk for a meaningful time period	10-14 10-14
Other analyses	17	Report other analyses done—eg analyses of subgroups and interactions, and sensitivity analyses	
Discussion			
Key results	18	Summarise key results with reference to study objectives	14
Limitations	19	Discuss limitations of the study, taking into account sources of potential bias or imprecision. Discuss both direction and magnitude of any potential bias	19
Interpretation	20	Give a cautious overall interpretation of results considering objectives, limitations, multiplicity of analyses, results from similar studies, and other relevant evidence	14-19

Generalisability	21	Discuss the generalisability (external validity) of the study results	18-19
Other information			
Funding	22	Give the source of funding and the role of the funders for the present study and, if applicable, for the original study on which the present article is based	20

*Give information separately for exposed and unexposed groups.

Table B: Variance inflation factor (VIF) of the significant factors selected in univariate analyses and used in multivariate analyses in order to find determinants of initial severity of aphasia.

	VIF
Age	1.16
Stroke severity, NIHSS	1.20
Lesion size, normalized	1.16
General disability	1.49
Executive dysfunction	1.19
Spatial neglect	1.44
UL Apraxia	1.47

Table C: Variance inflation factor (VIF) of the significant factors selected in univariate analyses and used in multivariate analyses in order to find determinants of language recovery.

	VIF
Lesion size, normalized	1.04
Executive dysfunction	1.01
SLT intensity	1.04

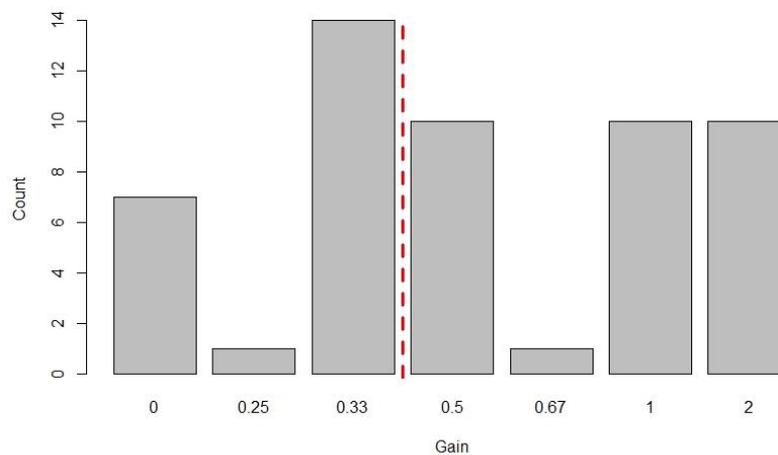


Figure A: Distribution of the gain variable across participants (n=53). The gain is calculated as: $(ASRS_{DA} - ASRS_{FA}) / ASRS_{FA}$. Two groups can be distinguished: participants with good recovery (gain ≥ 0.5) and participants with poor recovery (gain < 0.5).