



Thèse

2021

Open Access

This version of the publication is provided by the author(s) and made available in accordance with the copyright holder(s).

Mécanisme d'intégration et de décodage de la parole: études chez le sujet sain et dyslexique

Nicolle, Johanna Alexandra

How to cite

NICOLLE, Johanna Alexandra. Mécanisme d'intégration et de décodage de la parole: études chez le sujet sain et dyslexique. Doctoral Thesis, 2021. doi: 10.13097/archive-ouverte/unige:152922

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:152922>

Publication DOI: [10.13097/archive-ouverte/unige:152922](https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:152922)



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE

FACULTÉ DE PSYCHOLOGIE
ET DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION



DOCTORAT EN NEUROSCIENCES
des Universités de Genève
et de Lausanne



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE



UNIVERSITE DE GENEVE

FACULTE DE PSYCHOLOGIE ET
SCIENCE DE L'EDUCATION

Directrice de thèse : Pr Anne-lise Giraud

Jury : Pr Narly Golestani, Pr François Pellegrino, Dr Benjamin Morillon

TITRE :

Mécanismes d'intégration et de décodage de la parole : études chez le sujet sain et dyslexique

THESE

Présentée à la

Faculté de Psychologie et Sciences de l'Education

de l'Université de Genève

pour obtenir le grade de Docteur en Neurosciences

par

Johanna NICOLLE

Thèse N° 306

Genève

Université de Genève

2021



Remerciements

Mes premiers remerciements sincères et chaleureux s'adressent à ma directrice de thèse, le Professeur Anne-lise Giraud qui m'a permis de réaliser ce travail en m'accordant, en tout temps, toute sa confiance, son soutien et sa bonne humeur. M'étant présentée à elle, enceinte de mon deuxième enfant et simple étudiante en master de science du langage, je la remercie grandement pour son enthousiasme face à ma candidature quelle que peu étrange aux vues de ma situation et de mon profil, son aide pour réaliser mon souhait très cher de faire un doctorat et le soutien moral qu'elle m'a apporté durant toutes ses années.

Je remercie également tous mes collègues au sein du département des neurosciences fondamentales, Silvia Marchesotti, Eloïse Déaux, Raphaël Thézé et Timothée Proix qui m'ont aidé tout au long de ma thèse pour réaliser les analyses, me guider dans mon travail, m'enseigner des compétences telles que l'analyse de données EEG et comportementales, les statistiques ou encore l'écriture d'article.

Au même titre, je remercie amplement ma famille, mon conjoint, qui ont cru en moi et se sont réjouis, comme moi, de ma situation de doctorante. Ils ont su m'apporter une grande aide pour gérer emploi, étude et vie de famille et bien que cela n'ait pas été toujours simple, et ils ont su me soutenir lors de chaque épreuve difficile et m'aider à me relever lorsque certains doutes m'emportaient. Je remercie aussi mes trois enfants qui malgré leur très jeune âge ont parfois (pas tout le temps bien sûr) compris qu'il fallait me laisser en paix pour que je puisse travailler, parfois le soir ou le week-end et surtout durant ce confinement qu'ils ont passé avec moi tout en me laissant vivre devant mon ordinateur. Je les remercie pour m'avoir aussi apporté une coupure quotidienne avec la vie de doctorante pour ainsi ne pas me laisser oublier les bonheurs simples de la vie de famille.

J'accorde également des remerciements sans égal à feu mon père qui, avec ma mère m'ont offert la possibilité de faire des études, de choisir la vie que je souhaitais mener et je les remercie de la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long de cette longue vie d'étudiante.

Je finirai en remerciant de tout cœur mes amis et particulièrement mon ancienne colocataire, avec qui je vivais à Lyon lors de mes études en Prépa qui m'a donné goût aux études universitaires et au monde de la recherche. Sans elle, je n'aurais jamais pris confiance pour envisager ses études. C'est grâce à ses paroles rassurantes que j'ai compris que la majeure partie de mes désirs professionnels me serait accessible en travaillant. Elle m'a aussi souvent montré qu'il était facile d'allier plaisir de la vie avec réussite scolaire avec beaucoup d'organisation. Tout comme mon père, je regrette aujourd'hui sa présence mais je n'ai nul doute qu'ils auraient tout deux continué à m'aider et me soutenir dans mon entreprise.

Résumé

L'évolution des technologies d'imagerie cérébrale permettant de visualiser l'activité neuronale a permis de théoriser les mécanismes cérébraux liés au décodage et traitement des inputs sensoriels auditifs. Cependant, les recherches sont encore loin de pouvoir expliquer le rôle précis des oscillations cérébrales dans le décodage des unités minimales de parole, c'est-à-dire les phonèmes et de comprendre le déficit oscillatoire qui existe chez les individus dyslexiques. Tout le but de cette thèse est donc de comprendre comment les mécanismes neuronaux contribuent à analyser les informations temporelles rapides, tels que les phonèmes contenus dans le flux de parole qui permettent de distinguer deux sons entre eux et de comprendre le déficit oscillatoire qui génère les troubles de la dyslexie.

Il a déjà été démontré que l'activité neuronale endogène dans la bande de fréquence gamma (entre 25 et 35 Hz) était capable de se synchroniser aux informations phonémiques pour les encoder et les décoder. Chez les individus atteints de dyslexie cependant, de récentes études ont démontré une activité neuronale déficitaire dans la bande de fréquence gamma basse (~ 30 Hz) (Lallier et al., 2017; Lehongre et al., 2011; Molinaro et al., 2016). Lehongre et al (2011a) proposent de surcroît que l'activité oscillatoire traitant l'information phonémique opère dans une bande de fréquence bien plus haute (~ 60 Hz) suggérant alors un sur-échantillonnage de l'information phonémique et donc altérant le traitement des unités du flux de parole. Or, nous savons que le déficit majeur rencontré par l'individu dyslexique repose sur une difficulté de conscience phonémique affectant leur accès à une lecture fluide, rapide et avec une prosodie correcte (Ramus et al., 2013). Nous émettons donc ici l'hypothèse que le déficit oscillatoire rencontré par les individus dyslexiques altère leurs compétences phonologiques et qu'il est possible grâce à la technique de stimulation transcrânienne par courant alternatif (tACS) de rétablir l'activité oscillatoire dans les aires du langage, au niveau du lobe temporal gauche, et ainsi améliorer leurs compétences de perception phonémique (Baltus et al., 2017; Herrmann et al., 2013). Ensuite, par effet de cascade, la tACS permettrait de modifier leur compétence en lecture que ce soit en précision de lecture, en vitesse ou en prosodie.



Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
Liste des abréviations	7
Cadre contextuel	8
1. Préambule	8
2. Perception de la parole : signal de parole et aspect neurophysiologique du traitement du signal sonore	8
2.1. Caractéristiques physiques du signal de parole	8
2.2. Oscillations cérébrales et perception de la parole	11
2.3. Couplage cortico-acoustique	13
2.4. Théorie du nichage inter-fréquentiel (<i>cross-frequency nesting</i>)	15
2.5. ASSR (réponse auditive à l'état stable)	16
3. Le langage écrit : aspects linguistiques et neurophysiologiques	17
3.1. Le modèle à deux voies	17
3.2. Aspect prosodique de la lecture	18
3.3. Aspects neuroanatomiques de la lecture	19
4. La dyslexie	20
4.1. Définition	20
4.2. Troubles de la perception auditive et trouble phonologique	21
4.3. Troubles de la perception catégorielle	22
4.4. Le trouble de la dyslexie : aspects neurophysiologiques	23
4.4.1. Neuroanatomie de la dyslexie	23
4.4.2. Troubles oscillatoires dans la dyslexie	24
4.5. Dyslexie et trouble de la lecture	28
4.5.1. Trouble du décodage en lecture	28
4.5.2. Trouble de l'identification globale et de la prosodie	29
5. La stimulation électrique cérébrale	29
5.1. Les différentes techniques de stimulation électrique cérébrale	30
5.2. Stimulation transcrânienne et réhabilitation des troubles du langage	31
Problématique	32
Etude 1 : Investigation du déficit oscillatoire chez le sujet dyslexique et de l'effet de la tACS à 30 Hz.	33
1. Introduction	33
2. Matériel et méthodes	33
2.1. Recrutement et participants	33
2.2. Procédure expérimentale	35
2.2.1. Journée d'inclusion	35
2.2.2. Journées expérimentales	35
2.3. Matériels	36
2.3.1. Test d'audiométrie	36
2.3.2. ECLA 16 +, diagnostique de dyslexie et test de dénomination rapide	37
2.3.3. Matrices de Raven	37
2.3.4. Enregistrement EEG et stimuli auditifs	38
2.3.5. Stimulation transcrânienne par courant alternatif (tACS)	39
2.4. Analyse des données	40
2.4.1. Traitement des données EEG	40
3. Résultats	43
3.1. Déficit oscillatoire à 30Hz chez les individus dyslexiques	43
3.2. Analyse de l'effet de la tACS chez les individus sains et dyslexiques	45



4. Résumé des résultats	48
<i>Etude 2 : Investigation des troubles phonologiques et de lecture et de leur réhabilitation chez les individus dyslexique grâce à la stimulation transcrânienne.....</i>	<i>49</i>
1. Introduction.....	49
2. Matériel et méthodes	50
2.1. Tests linguistiques.....	51
2.1.1. Test de répétition de pseudo-mots.....	51
2.1.2. Test de contrepèterie	52
2.1.3. Test de lecture de 3 minutes	52
2.2. Scores des tests linguistiques.....	53
2.3. Analyses statistiques	53
3. Résultats	54
3.1. Analyse des performances des représentations phonémiques.....	54
3.2. Analyse des résultats de conscience phonologique globale.....	56
3.3. Analyse des résultats de lecture	57
3.3.1. Compétence de décodage graphème/phonème.....	58
3.3.2. Effet de la tACS sur la vitesse de lecture.....	58
3.4. Corrélations entre l'amélioration des compétences langagière et la sévérité de dyslexie	59
4. Résumé des résultats.....	62
<i>Etude 3 : Analyse de l'effet de l'augmentation de la puissance spectrale à 30 Hz dans le cortex auditif et le STG sur les compétences de lecture chez l'individu sain et dyslexique.....</i>	<i>63</i>
1. Introduction.....	63
2. Matériels et méthodes	64
2.1. Compétences de lecture et de prosodie et latéralisation hémisphérique	64
2.1.1. Test de lecture de 3 minutes	64
2.1.2. Index de latéralité et de gain de puissance spectrale	65
2.1.3. Analyses statistiques	65
3. Résultats	66
3.1. Compétence de lecture avant la tACS.....	66
3.2. Effet de l'augmentation de la puissance spectrale à 30 Hz sur les compétences de lecture.....	67
4. Résumé des résultats.....	68
<i>Discussion générale.....</i>	<i>70</i>
1. Résumé des résultats	70
2. Représentation phonémique chez le sujet dyslexique et déficit oscillatoire à 30 Hz	72
3. Conscience phonologique globale	73
4. Lecture et conscience phonologique	73
5. Effet de la tACS	75
6. Exploration des mécanismes oscillatoires grâce aux neurosciences computationnelles	76
7. Limites de l'étude.....	77
7.1. Nombre limité de participants	77
7.2. Analyse des données à 60 Hz	78
7.3. Analyse des données une heure après la tACS.....	78
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>79</i>
<i>Bibliographie</i>	<i>80</i>
<i>Annexes</i>	<i>92</i>
1. Adult Reading History Questionnaire-revised	93



2. Questionnaire médical	98
3. Questionnaire sur l'expérience et la compétence en langue	105
4. ECLA 16+ (diagnostique de dyslexie)	106
5. Tests linguistiques	113
5.1. Test de répétition de pseudo-mots	113
5.2. Test de contrepèterie	114
5.3. Test de 3 minutes de lecture	115
5. CV	119
6. Publications	121

Liste des abréviations

ANOVA : analyse of variance (analyse de la variance)

ASSR : Auditory steady state response (réponses évoquées à l'état stable)

AST : Asymmetric sampling in time (théorie de l'échantillonnage temporel)

EEG: électroencéphalogramme

ERP : réponses potentielles évoquées

IRM : Imagerie par résonance magnétique

MEG : Magnetoencéphalographie

RAN : rapid automatized naming (tâche de dénomination rapide)

ROI : Region of interest (région d'intérêt)

STG : Gyrus temporal supérieur

tACS : Stimulation transcrânienne par courant alternatif

tDCS : Stimulation transcrânienne par courant continu

TMS : stimulation transcrânienne magnétique

Cadre contextuel

1. Préambule

« Entre cinq et sept ans, je me revois, dans le couloir mal éclairé du bâtiment où nous habitons, en train de me demander si je distingue entre le -ni de panier et le -gn de gagner, pour finalement conclure que je ne les confonds pas [...]. Vers huit ou neuf ans, [...] marchant sur la route, je prends conscience que le -e de bois-le ne se confond, pour moi, ni avec le -eu de feu, ni avec celui de peur... Voici donc entrevus les problèmes les plus délicats de la phonologie française ».

*Mémoires d'un linguiste
André Martinet, 1993*

Parler ou écrire est une activité à laquelle l'être humain consacre une grande partie de son temps mais il n'est pas si simple de décrire et de comprendre ce processus (Fayol, 1997; Segui & Ferrand, 2000). Si l'on souhaite de nos jours définir ce qu'est le langage, il n'est pas non plus évident de trouver une définition qui fasse l'unanimité et qui inclut tous les processus nécessaires à sa réalisation. Saussure (1931) définit le langage comme étant une « *faculté générale de pouvoir s'exprimer au moyen de signes* ». De grandes questions arrivent donc : que sont les « signes » ? Comment sont-ils générés et compris ? D'où viennent-ils ? Toutes ces questions ont amené très rapidement les recherches scientifiques sur différents terrains, de la linguistique à la neurobiologie, en passant par la psychologie cognitive, par exemple. Cette thèse s'inscrit principalement dans le domaine du traitement de la parole et plus particulièrement dans l'étude des processus neuronaux qui permettent son décodage et notamment la capacité de distinguer deux sons, si proches soient-ils. Le but principal de ce travail est 1) de comprendre comment les neurones se synchronisent avec l'input auditif pour le décoder et le traiter afin d'accéder au sens 2) d'identifier quels sont les mécanismes neuronaux déviants chez les individus atteints de troubles de la dyslexie et 3) de tester une méthode récente de stimulation transcrânienne par courant alternatif (tACS), afin de rétablir l'activité neurale déviante chez une population de participants atteints de dyslexie.

2. Perception de la parole : signal de parole et aspect neurophysiologique du traitement du signal sonore

2.1. Caractéristiques physiques du signal de parole

Le son est un phénomène physique résultant d'une vibration des molécules de l'air, c'est-à-dire une variation de la pression de l'air qui est constituée de trois paramètres : la fréquence, l'amplitude et la phase où, respectivement la fréquence correspond à la vitesse de vibration dans l'air, l'amplitude correspond à la pression acoustique mesurée en dB-SPL (Sound pressure Level) et la phase qui définit le moment du début, de l'attaque d'un son pur. Sur le plan acoustique les sons de parole correspondent à des sons complexes qui varient simultanément en amplitude et en fréquence où la fréquence renvoie à la hauteur du son (grave ou aigu) et l'amplitude renvoie à son intensité (faible ou forte).

L'onde mécanique générée lors de l'articulation possède des caractéristiques spectrales particulières qui reflètent la forme que prennent les organes de la parole ou organes résonateurs ; c'est-à-dire que le tractus vocal, en prenant une forme physique particulière permet de faire varier les fréquences de résonance qui sont à l'origine des formants (fréquence de résonance maximum de l'enveloppe spectrale du signal de la parole à un instant donné). Ce phénomène de résonance génère une voix qui permet de produire des sons complexes avec une fréquence fondamentale (F_0) qui se trouve être en moyenne à 150 Hz chez l'homme, 250 Hz chez la femme et 350 Hz chez l'enfant (Titze, 1989). Sur le plan acoustique, les voyelles, en français, sont caractérisées par les fréquences des trois premiers formants qui diffèrent respectivement en fonction du mouvement du pharynx (F_1), du lieu d'articulation, antérieur ou postérieur, du degré d'ouverture de la cavité buccale, du caractère oral ou nasal (F_2) et de la forme prise par la cavité labiodentale (F_3). Les voyelles sont aisément identifiables par leurs formants mis en évidence sur un spectrogramme (Figure 1). Les consonnes sont plus complexes et leurs différents traits acoustiques concernent tous les formants. La transition de formants (visible sur un spectrogramme, fig. 1) contribue donc à distinguer les sons au sein d'un flux continu de parole. La complexité et la rapidité de transition des sons est telle que le signal sonore est difficile à décomposer, les différents traits articulatoires étant émis simultanément. Or, l'identification des phonèmes de la langue est une condition nécessaire pour une perception adéquate, surtout lors de l'apprentissage du langage. Pour cela, la transition des formants va nous donner les indices nécessaires à leur identification (Delattre et al., 1955). La transition de formants correspond à un changement rapide de résonance du tractus vocal et du passage entre deux états des cavités phonatoires. La trajectoire ainsi que la durée de la transition vont rendre compte de la variation acoustique lors du passage d'une consonne à une voyelle ou inversement. La perception parfaite de cette transition est cruciale. La reconnaissance des consonnes est intimement liée aux transitions phonétiques qui dépendent de l'entourage vocalique (Lefevre, 1985). En effet, si l'identification d'un phonème par rapport à un autre n'est pas correctement assurée, la compréhension peut échouer. Par exemple, il est nécessaire aux auditeurs de bien différencier le phonème /v/ du phonème /f/ dans la mesure où, suivi d'une voyelle ils génèrent deux mots différents (« fût » et « vue »). En outre, l'information spectrale n'est pas l'unique composante à prendre en compte. Les composantes temporelles permettent également de

comprendre comment les unités constituant le flux de parole sont cérébralement découpées, perçues et traitées.

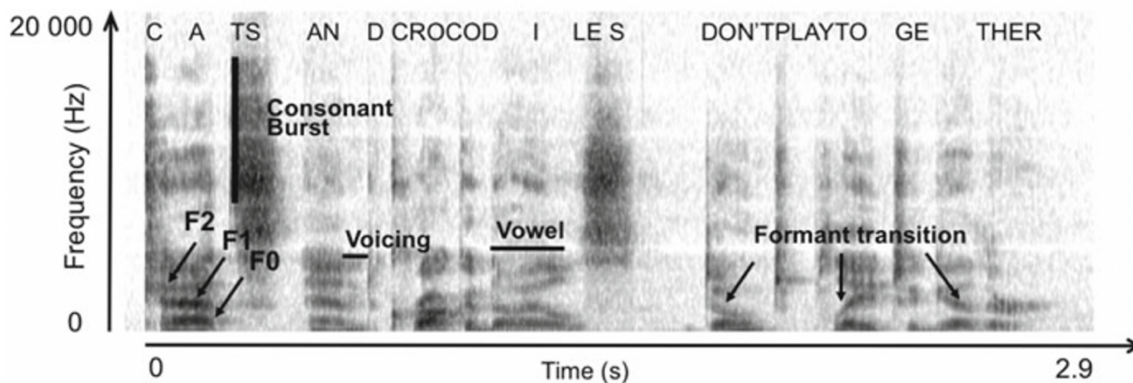


Figure 1. Spectrogram d'une phrase : décomposition temps-fréquence de la forme d'onde où l'on peut voir certaines caractéristiques acoustiques importantes (fréquence fondamentale (F0), formants (F1, F2), voisement). La figure est adaptée de Giraud et Poeppel (2012).

Les caractéristiques temporelles contenues dans le flux de parole sont aussi importantes pour décoder et traiter les composants de la langue ; il s'agit de groupements d'énergie sur différentes échelles de temps qui sont mis en évidence par les modulations en amplitude comprises entre 2 et 50 Hz selon Rosen (1992) au sein de l'enveloppe de la parole (Figure 2A et 2 B.). Ces informations sont cruciales pour le décodage et le traitement du signal de la parole (Shannon et al., 1998). Les syllabes correspondent aux groupements d'énergie, sur l'échelle du temps, les plus proéminents et les plus visibles sur les contours du signal sonore, car tracées par les modulations en amplitude (Mermelstein, 1975). De plus, bien que non clairement visibles dans les contours du signal sonore, car condensés dans la structure fine du signal, des indices phonémiques sont présents et permettent de distinguer les mots entre eux (Fig. 2A à droite). La parole est donc un signal continu caractérisé par la présence d'un rythme prosodique très lent ainsi que d'un rythme syllabique plus rapide. Cette rythmicité est capitale car elle permet la segmentation du signal de parole en différentes unités. Cette rythmicité a d'ailleurs été testée dans 17 langues pour évaluer la quantité d'information encodée dans chacune d'entre elle (Coupé et al., 2019; Pellegrino et al., 2011). Les résultats montrent que le débit peut être parfois différent mais que cela n'affecte pas le débit moyen d'information de ~ 39 bits par seconde. Cette valeur correspond au produit entre le nombre de syllabes prononcées par minute et la quantité d'information par syllabes. Cette quantité d'informations étant liée à la capacité cognitive humaine, c'est-à-dire la capacité de mémorisation en temps réel du signal de parole, cela démontre que les rythmes cérébraux ont la capacité de traiter les contrastes phonémiques les plus rapides (environ 20 ms).

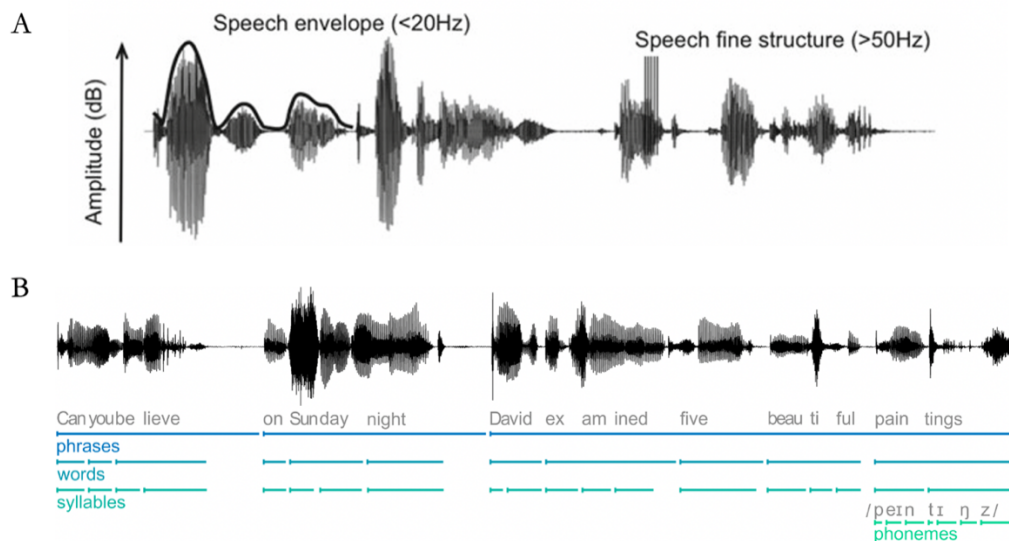


Figure 2A : Onde mécanique d'une phrase. L'enveloppe de la phrase est tracée à gauche et la structure fine à droite. La ligne noir foncé au-dessus de la forme d'onde correspond à l'enveloppe qui représente la lente fluctuation d'amplitude du signal. Ce signal est segmenté en morceaux de parole séparés dont la durée moyenne culmine à 200 ms et correspondent généralement à des syllabes. Des modulations plus rapides (> 50 Hz) codent la structure fine de la parole. La figure est adaptée de Giraud et Poeppel (2012). **Figure 2 B.** Onde mécaniques d'une phrase avec sa décomposition en phrases, mots, syllabes et phonèmes (Keitel et al., 2017)

2.2. Oscillations cérébrales et perception de la parole

L'activité cérébrale consiste en des fluctuations cycliques de l'excitabilité neuronale à différentes fréquences. Lorsque l'activité électrique périodique est cohérente dans une bande de fréquence donnée au sein d'une population de neurones on parle alors d'oscillations cérébrales. Une oscillation peut être décrite par son amplitude, sa phase et sa fréquence tout comme le signal sonore de parole. Les oscillations neuronales ont été rapportées pour la première fois par le neurologue allemand Hans Berger, qui a remarqué la présence dominante de fréquences entre 8 et 13 Hz (bande alpha) lorsque l'électroencéphalogramme (EEG) était enregistré avec les yeux fermés par rapport aux yeux ouverts (Berger, 1931, 1934). Grâce aux techniques non invasives d'exploration du cerveau tel que l'électroencéphalographie et la magnétoencéphalographie, cinq rythmes cérébraux ont depuis été distingués : les rythmes delta ($\sim 0.5-4$ Hz), thêta ($\sim 4-8$ Hz ou $\sim 3-6$ Hz selon les études), alpha ($\sim 8-12$ Hz), bêta ($\sim 13-20$ Hz) et enfin le rythme gamma ($\sim 25-200$ Hz) où parmi cette dernière bande de fréquence on peut distinguer la bande gamma basse ($\sim 25-40$ Hz), la bande gamma haute ($\sim 50-150$ Hz) et la bande gamme très haute (fréquence supérieure à 200Hz).

Les neurones oscillent en se synchronisant entre eux et en rythme avec les entrées sensorielles (Alexandrou et al., 2020; Bauer et al., 2018; Doelling et al., 2014; Kösem & van Wassenhove, 2017; Lakatos

et al., 2005; Zoefel et al., 2018). Cette activité oscillatoire reflète un effet de résonance avec les stimuli extérieurs qui est un phénomène d'absorption physique de l'énergie à une fréquence précise. Les données observées ont notamment suggéré une association entre les oscillations neuronales et l'attention (Fiebelkorn et al., 2018; Vanrullen, 2013; VanRullen, 2018) ou la perception (Fries, 2015; Haegens & Zion Golumbic, 2018; Uhlhaas et al., 2009; VanRullen & Koch, 2003; Von Stein & Sarnthein, 2000) par exemple, ainsi qu'une synergie entre les différentes bandes de fréquences (Doelling et al., 2014; Hyafil et al., 2015; Lisman, 2005; Lisman & Jensen, 2013; Luo et al., 2007). Il a de plus été démontré depuis ces dernières décennies que les oscillations cérébrales avaient un rôle dans chaque opération cognitive et par conséquent un rôle dans l'intégration et le décodage des informations contenues dans le flux de parole.

Dans le domaine de la perception de la parole, un intérêt particulier est porté sur les oscillations car la forme d'onde de la parole elle-même est un signal qui peut être décomposé en des composantes de temps et de fréquences tout comme les oscillations cérébrales. Les propriétés temporelles du signal vocal sont donc potentiellement d'une grande importance pour la compréhension du langage oral et peuvent fournir un aperçu significatif de la manière dont les auditeurs traitent la langue parlée avec si peu d'effort apparent. Pendant le traitement de la parole, notre cerveau suit donc les fluctuations acoustiques de la parole à différentes échelles de temps (Ding et al., 2015; Lakatos et al., 2008; Lallier et al., 2017; Lizarazu et al., 2015; Peelle & Davis, 2012; Zoefel & VanRullen, 2016).

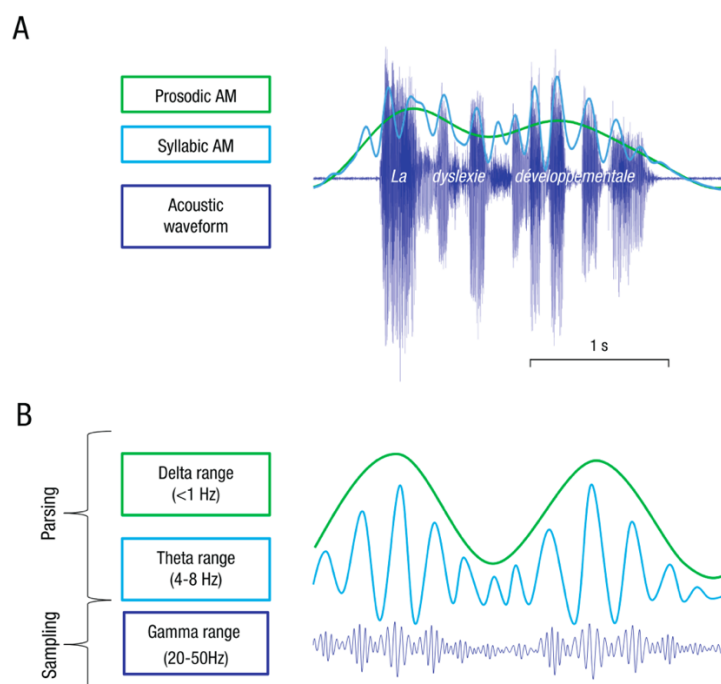


Figure 3. (A) Temps (axe x) - Représentation en amplitude (axe y) du signal acoustique de la phrase «La dyslexie développementale» (bleu foncé). L'enveloppe du signal de parole dans la bande delta (<1 Hz; information prosodique) est représentée en vert. L'enveloppe dans la bande thêta (4–8 Hz; informations syllabiques) est représentée en bleu clair. (B) Représentation possible du couplage hiérarchique (avec des oscillations rapides imbriquées dans des oscillations lentes) se produisant entre les oscillations neuronales synchronisées avec les propriétés temporelles du signal de parole.

2.3. Couplage cortico-acoustique

Sur la base de données acquises en psychophysique et en neurosciences, David Poeppel et Gregory Hickock ont proposé un modèle à deux voies du traitement de la parole suggérant que l'organisation temporelle qui régit le flux de parole étaient retrouvée au sein des cortex auditifs gauche et droit (Hickok & Poeppel, 2007) bien que pour la majorité des individus les aires du langage sont situées dans l'hémisphère gauche (Binder et al., 2000; Peelle & Davis, 2012; Scott et al., 2000).

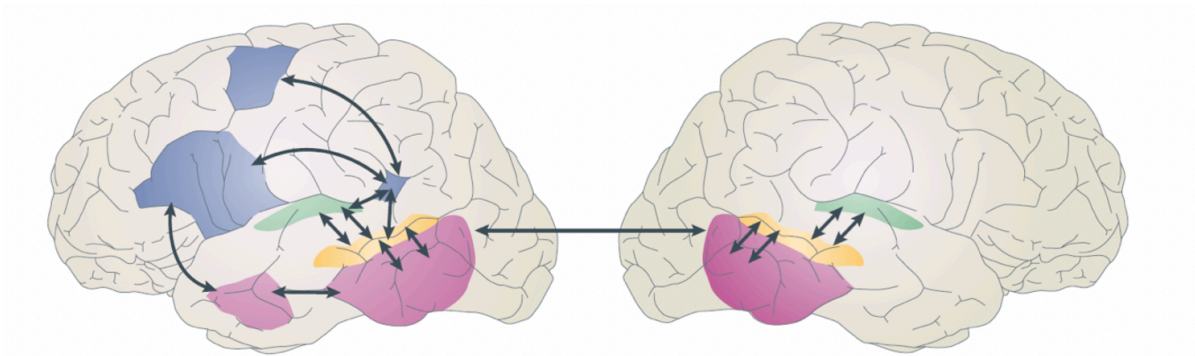


Figure 4. Modèle à deux voies de l'anatomie fonctionnelle de langage. L'analyse spectrale du flux de parole est représentée par les zones en vert bilatéralement, les représentations phonologiques en jaune. La reconnaissance lexicale est montrée par les zones roses et la perception par les zones bleues (d'après Hickok & Poeppel, 2007)

La figure 4 nous propose que les premières étapes de traitement de la parole sont bilatérales avec une analyse spectrotemporelle dans les cortex auditifs bilatéraux, tandis que l'analyse des représentations phonétiques et phonologiques impliqueraient la partie postérieure du sillon temporal supérieur et seraient plus latéralisées à gauche. Poeppel (2003) propose également la théorie de l'AST (théorie de l'échantillonnage asymétrique) selon laquelle les deux échelles temporelles majeures, l'échelle lente correspondant aux syllabes et l'échelle rapide correspondant aux phonèmes seraient traitées séparément, la première au niveau du cortex auditif droit qui oscille préférentiellement à basse fréquence (4-8Hz, bande thêta), la deuxième au niveau du cortex auditif gauche qui lui, oscille plutôt à un rythme rapide (25-40 Hz, bande gamma basse). Cette asymétrie oscillatoire est donc suggérée permettre la segmentation du signal sonore en paquets d'informations après traitement des informations spectrales dans le cortex auditif primaire. En essence, les phases de haute excitabilité neuronale se synchronisent en termes de fréquence aux événements acoustiques et amplifient donc la réponse neuronale. Précisément, c'est grâce à un phénomène de résonance entre les fréquences oscillatoires du signal de parole et les fréquences

intrinsèques présentes au sein des cortex auditifs droit et gauche que les phases des rythmes thêta et gamma peuvent s'aligner sur l'enveloppe temporelle du signal sonore (Hickok & Poeppel, 2007, 2015; Poeppel, 2003).

Des études utilisant de la parole compressée sont venues étayer cette hypothèse. Ghitza et Greenberg en 2009 ont démontré que lorsque la parole était compressée par un facteur de trois, elle était incompréhensible pour les auditeurs car le rythme syllabique était trop rapide pour que les oscillations au rythme thêta puisse le traiter (Ghitza & Greenberg, 2009). De plus, Ghitza (2012) a démontré qu'en découpant un signal de parole compressé par un facteur de 8 en intervalles de 40 millisecondes intercalés de blanc de silence d'environ 100 millisecondes, l'intelligibilité était partiellement restaurée (Fig 5). Cela s'explique par le fait qu'avec les intervalles de silence le rythme syllabique revenait à environ 7Hz, une fréquence aisément traitée par les ondes oscillatoires dans la bande thêta. Ces résultats suggèrent donc que malgré la compression de la parole, le plus important reste la fréquence et donc le temps que l'on laisse au cerveau pour le décodage de l'information (Ghitza, 2012). Un lien peut aussi aisément être fait avec l'étude de Pellegrino et al (2011) ayant suggéré que le débit moyen d'information était de ~ 39 bits par seconde quelle que soit la langue. Cela reflète l'idée qu'il existe donc bien une fréquence idéale de transfert de l'information syllabique et phonémique pour que le signal de parole soit correctement encodé et décodé.

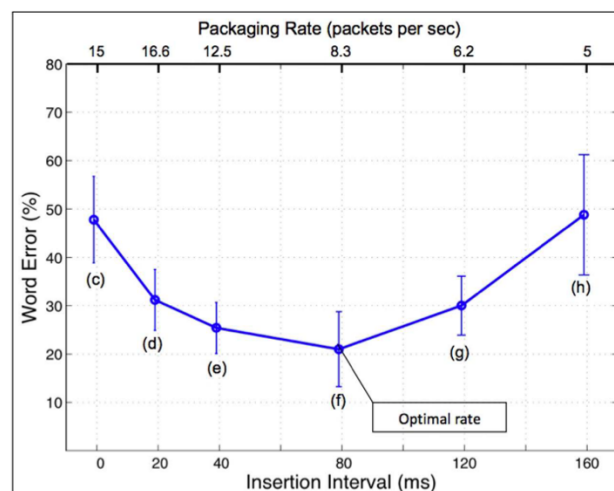


Figure 5. Intelligibilité de la parole compressée dans le temps avec des intervalles de silence insérés (d'après Ghitza et Greenberg, 2009). Le taux d'erreur de mots est tracé en fonction de la durée de l'intervalle inséré entre les paquets de parole compressés dans le temps par un facteur de 3. Sans insertions, les performances sont médiocres (taux d'erreur de mot $> 50\%$). L'insertion d'espaces améliore les performances, résultant en une courbe de performance en forme de U. Le taux d'erreur le plus bas (c'est-à-dire l'intelligibilité la plus élevée) se produit lorsque l'intervalle est de 80 ms (ou, de manière équivalente, au débit de 8,3 paquets / secondes, le taux optimal).

Dans une étude utilisant des enregistrements simultanés EEG et IRMf de sujets humains au repos, Giraud et collègues (2007) ont montré de surcroît que pendant le repos, l'activité neuronale dans la bande

thêta (3 - 6 Hz) mesurée avec l'EEG est principalement corrélée à l'activité synaptique, telle que mesurée avec IRMf, dans le gyrus de Heschl droit, tandis que l'activité neuronale à l'échelle phonémique (bande gamma basse, 28 - 40 Hz) est corrélée avec l'activité synaptique dans le gyrus de Heschl bilatéralement, mais avec une asymétrie gauche (Fig. 6) Ces résultats suggèrent que les propriétés oscillatoires du cortex auditif au repos correspondent à celles du signal de parole et, en outre, il semble y avoir une asymétrie en termes de spécialisation hémisphérique pour le traitement des différentes caractéristiques de la parole. Néanmoins, les deux activités oscillatoires coexistent dans les deux hémisphères (Giraud et al., 2007). Cette observation suggère que la parole a évolué en étant façonnée et contrainte par les mécanismes neuronaux disponibles pour son traitement perceptif, conformément à la théorie de l'AST.

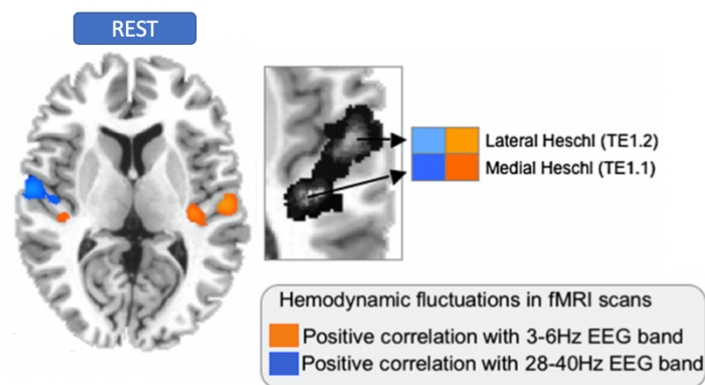


Figure 6. Représentation de l'activité oscillatoire spontanée dans les bandes de fréquences gamma (en bleu 28-40Hz) et thêta (en orange, 3-6Hz) dans le gyrus de Heschl bilatéralement (adapté de Giraud et al. 2007).

2.4. Théorie du nichage inter-fréquentiel (*cross-frequency nesting*)

En plus du couplage cortico-acoustique, des études additionnelles ont montré que les activités oscillatoires évolueraient en cascade sous-tendant le traitement de la parole (Ghitza et al., 2013; Giraud & Poeppel, 2012; Lakatos et al., 2005). On peut donc désormais proposer que les informations temporelles saillantes, le début d'une syllabe par exemple, génèrerait une décharge des neurones ainsi qu'un recalage de la phase des oscillations dans les bandes thêta et gamma. En effet, les deux fenêtres d'intégration à deux échelles temporelles, l'échelle syllabique et l'échelle phonémique, semblent fonctionner de manière dépendante. On nomme cela le phénomène de «*nesting*», où grâce aux mécanismes de modulation en amplitude des phénomènes oscillatoires, la phase de l'activité thêta, qui signale la frontière syllabique, contrôle l'activité et l'amplitude de la bande de fréquence gamma (Giraud & Poeppel, 2012; Jensen & Colgin, 2007). On peut alors parler d'imbrication de l'activité gamma au sein de l'activité thêta où cette activité gamma est réinitialisée en phase et peut donc se rythmer sur la fréquence phonémique (fig. 7).

Ainsi, l'activité oscillatoire au sein des bandes de fréquences thêta et gamma alterne entre des périodes de haute excitabilité et de basse excitabilité sur deux échelles temporelles, permettant ainsi l'échantillonnage sensoriel de la parole. En d'autres mots, l'activité thêta grâce aux trains de potentiels d'action générés à l'entrée du cortex auditif délimite des fenêtres d'intégration temporelle de l'ordre de la durée des syllabes, et permet une segmentation du signal de parole à l'échelle syllabique. Elle contraint ensuite l'activité gamma, ce qui se traduit par une réorganisation temporelle des potentiels d'action et par la délimitation des fenêtres d'intégration temporelle à l'échelle phonémique permettant une analyse plus fine des détails acoustiques. Ce phénomène de « *nesting* » implique que l'intelligibilité de la parole est majoritairement dépendante du bon encodage syllabique car si le suivi de l'enveloppe syllabique est partiellement dégradé, l'encodage des informations phonémiques le sera aussi (Ahissar et al., 2001; Peelle & Davis, 2012)

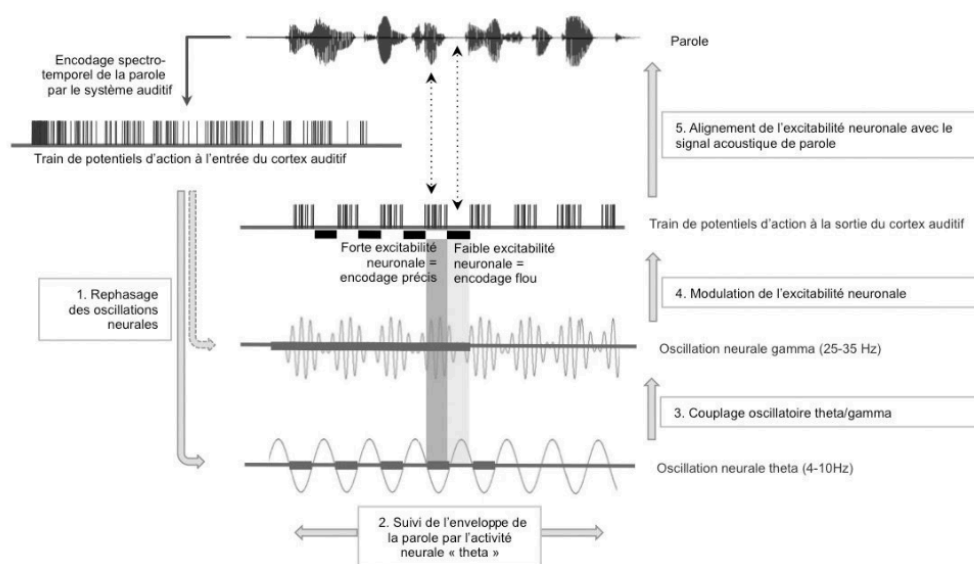


Figure 7. Représentation schématisée des processus imbriqués lors de la perception de la parole (Giraud 2019).

2.5. ASSR (réponse auditive à l'état stable)

Quand l'on s'intéresse aux ASSR (auditory steady state response en anglais ou réponse auditive à l'état stable en français) on voit que lorsque le stimulus correspond à un son modulé en amplitude et en fréquence qui dure dans le temps, il apparaît une réponse appelée ASSR. On peut alors y voir que les réponses fréquentielles du son sont en phase avec l'ASSR (Miyazaki et al., 2013). Autrement dit, les composantes fréquentielles du son et de la réponse sont constantes et liées. L'étude de Lehongre et al (2011) a pu, grâce à cette méthode, montrer que pour une bande de fréquence entre 25 et 35 Hz, l'ASSR

était dominante dans le cortex auditif gauche suggérant alors que la bande de fréquence gamma basse traite de façon synchrone le rythme phonémique (Fig 8.).

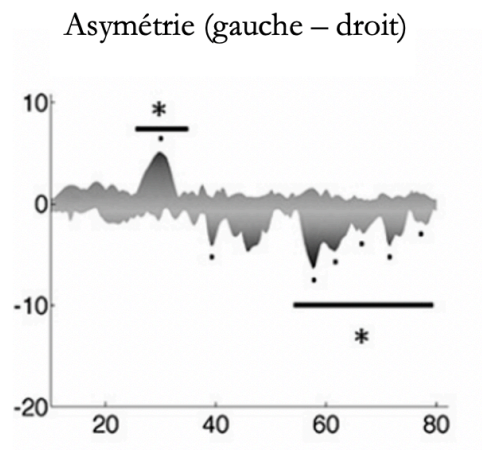


Figure 8. Les ASSR (gauche - droite) chez des participants contrôles montrent une dominance gauche pour les fréquences de 25 à 35 (son modulés en amplitude) et une dominance droite pour les fréquences modulées en amplitude supérieures à 55 Hz (adapté de Lehongre et al., 2011).

3. Le langage écrit : aspects linguistiques et neurophysiologiques

3.1. Le modèle à deux voies

L'acte de lecture est particulièrement complexe car chaque lettre ne correspond pas toujours au même son et un même son ne s'écrit pas toujours nécessairement de la même façon. Plusieurs systèmes doivent donc interagir ensemble pour qu'un mot soit reconnu. Des modèles principalement issus de la psycholinguistique, neurolinguistique ou psychologie cognitive se sont concentrés à décrire l'architecture fonctionnelle qui régit le système de traitement des mots écrits. Ils ont spécifié les différents processus en incluant les composantes visuelles, mnésiques et procédurale de transformation de l'information (Afflerbach et al., 2008; Manoli & Papadopoulou, 2012; Urquhart & Weir, 1998). Ces modèles postulent qu'il existe deux voies principales de lecture (« *dual-route model* »). Il s'agit de la voie périlexicale ou phonologique et de la voie translexicale ou globale. La première permet au lecteur de traiter chaque unité sous-lexicale (unités graphiques qui composent les mots) séparément et de les apparenter à une unité sonore. Il s'agit là de la prise de conscience de la relation entre les graphèmes et les phonèmes. La méthode translexicale consiste, elle, à reconnaître le mot ou parfois les morphèmes (unité minimale dotée de sens) et d'accéder directement à leur forme sonore et sémantique, il s'agit donc d'une reconnaissance globale du mot qui ne nécessite plus un décodage phonologique. Les mots familiers, connus par les individus sont lus de manière globale et les mots peu connus, irréguliers, les néologismes ou les noms propres sont lus

de façon phonologique car les mots n'étant pas reconnus il est nécessaire de les décomposer en unités plus petites pour accéder à leur correspondance sonore. Les processus cognitifs impliqués dans le système de reconnaissance des mots écrits s'avèrent essentiels pour comprendre les processus engagés lorsqu'un individu présente des troubles du langage.

Concernant l'apprentissage de la lecture, avant de commencer à apprendre à lire, l'enfant visualise un mot comme un tout ne concevant pas nécessairement que le mot est constitué de lettres qui ont chacune une correspondance sonore. Cependant, parce qu'il possède un système visuel organisé et connecté aux aires du langage, il va parvenir à transférer sa conscience phonologique du flux sonore aux mots écrits en portant son attention au niveau phonémique et ainsi générer la correspondance entre les graphèmes et les phonèmes (Rayner et al., 2001). Cette façon de lire demande beaucoup d'attention et génère une lecture très lente. L'automatisation de la lecture est donc un objectif à atteindre rapidement pour libérer de l'attention qui va pouvoir être consacrée à la compréhension et l'expressivité. Ce processus d'automatisation est progressif et relativement lent. C'est grâce à une exposition répétée et toujours agrandie que la reconnaissance automatique des mots se développe (Sadoski et al., 2012). Les débuts de l'automatisation vont être repérable lorsque l'enfant va commencer à reconnaître les mots les plus fréquents plus vite. Chaque trait, chaque lettre est alors analysée plus rapidement par des millions de neurones qui, avec le temps, apprennent à se consacrer uniquement à cette analyse. La mémoire se forge et le cerveau parvient à reconnaître des ensembles de symboles de façon quasi-instantanée. Normalement, l'enfant entre ainsi dans la seconde voie de la lecture, la voie globale qui libère ainsi de l'attention et de la mémoire de travail.

3.2. Aspect prosodique de la lecture

Techniquement, la prosodie est un aspect physique de la parole qui correspond à l'énergie avec laquelle nous parlons, qu'elle soit forte ou limitée. Tout comme la durée d'une syllabe, la durée des pauses entre les mots ou groupes de mots fait également partie des aspects prosodiques de la langue. La prosodie est constituée d'unités discrètes (tout comme les phonèmes) et elle est strictement nécessaires pour l'accès au sens. Sur un tracé de l'enveloppe d'une phrase, la prosodie est visible par une montée et une descente des contours nommée hauteur mélodique (Lacheret-Dujour & Beaugendre, 1999). C'est grâce à ces pauses au sein du discours et aux intonations de voix que l'enfant va pouvoir créer ses premières frontières entre les syllabes, les mots ou groupes de mots (Nazzi et al., 2000; Seidl, 2007). La prosodie contenue dans la parole joue un rôle fondamental dans l'identification des mots et l'acquisition de la conscience phonologique à l'oral (Dehaene-Lambertz et al., 2002; Floccia et al., 2000; Nazzi et al., 1998). Elle constitue la première structure linguistique perçue par les enfants.

Le développement prosodique lors de la lecture pendant la petite enfance est souvent considéré comme l'étape qui succède au développement de la conscience phonologique des mots écrits, des compétences de décodage et du développement de l'accès lexical automatique (Godde et al., 2020; Gutiérrez-Palma et al., 2019). Le rythme de lecture et l'intonation, souvent inclus au sein des compétences de fluence sont également fortement représentatifs de la compréhension aussi bien pour le lecteur que pour celui qui écoute. La prosodie est le discours mélodique qui transmet le sens d'un énoncé (Celeste et al., 2018; Godde et al., 2020; Grosjean & Collins, 1979; Martin, 2011).

Il a été démontré que la fluence prosodique devient automatique lorsque la méthode de lecture globale est activée. L'automatisme réduit en effet la charge cognitive globale, permettant de consacrer plus d'attention et de ressources cognitives à l'expressivité. Cela s'explique par le fait que moins les opérations d'identification des mots (décodage) sont coûteuses en termes de ressources attentionnelles, plus l'attention peut être portée sur le sens (Edwards & Turner, 2011; Hudson et al., 2009; Rasinski, 2012). Par conséquent, les marqueurs acoustiques de la prosodie appropriée sont systématiquement plus faibles pour les lecteurs moins fluides que pour les lecteurs fluides (Lopes et al., 2015; Miller & Schwanenflugel, 2008; Paige et al., 2014, 2017).

3.3. Aspects neuroanatomiques de la lecture

Les compétences de lecture sont organisées selon une hiérarchie de processus où deux systèmes distincts sont engagés : la voie phonologique et la voie globale (Pugh et al., 1997). En ce qui concerne les bases neurales de la lecture, une méta-analyse d'études sur la lecture de mots dans différentes langues a soutenu l'existence d'un réseau de lecture universel composé du gyrus temporal supérieur gauche, du gyrus frontal inférieur gauche, de la région occipito-temporale gauche et la partie médiane du gyrus fusiforme (Bolger et al., 2005). Les recherches proposent également que les lecteurs de langues où l'orthographe est transparente (comme l'Italien, l'Espagnol ou l'Allemand) s'appuient plus exclusivement sur une méthode de lecture basée sur le décodage (étant donné la stabilité de ce processus pour la prononciation) et montrent une activation accrue du gyrus temporal supérieur gauche dans la voie dorsale (Meschyan & Hernandez, 2006; Paulesu et al., 2000). Au contraire les langues dont l'orthographe est opaque (par exemple l'Anglais) activent préférentiellement le gyrus frontal inférieur gauche lors de la lecture de mots.

Au niveau cortical, l'apprentissage de la lecture génère des changements majeurs dans l'hémisphère gauche et surtout dans la région du cortex visuel que Dehaene (2011) nomme la « boîte aux lettres du cerveau » (fig. 9). A l'origine, cette aire traite premièrement les visages, les objets et les formes géométriques puis elle se forme ensuite à reconnaître les lettres. Cette région s'active de plus en plus au cours de l'apprentissage de l'écriture indiquant alors qu'un grand nombre de neurones se spécialisent petit

à petit pour les lettres, les suites de lettres et les morphèmes les plus fréquents (Dehaene et al., 2005). Recoder les graphèmes en unités sonores, fait aussi appel à une région appelée le *planum temporale*, une aire située juste à l'arrière de l'aire auditive primaire.

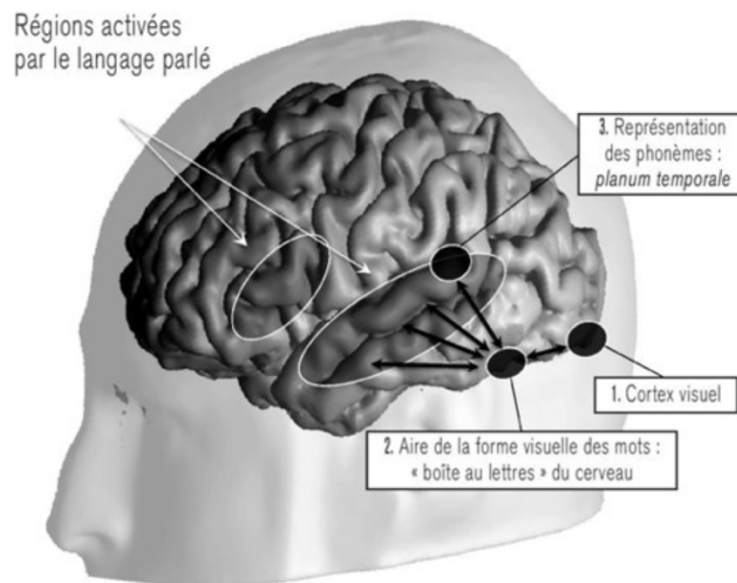


Figure 9. Représentation des régions activées lors de la lecture d'un individu normo-lecteur. Le cortex visuel (1) est actif, l'aire de la forme visuelle des mots (2) se spécialise dans la reconnaissance des mots et les renvoie vers les aires du langage parlé. Le *planum temporale* (3) se spécialise dans les représentations phonémiques (Dehaene, 2011).

4. La dyslexie

4.1. Définition

Les troubles du langage sont très présents et touchent une proportion non négligeable de la population. Ils regroupent l'ensemble des désordres des capacités linguistiques et des compétences de communication aussi bien à l'oral qu'à l'écrit que peut présenter un groupe de patients. La dyslexie a été classifiée selon le DSM 5 sous le terme générique de « trouble spécifique de l'apprentissage ». Les troubles de l'apprentissage englobent tous les troubles dans lesquels une seule fonction cognitive est altérée, les autres capacités intellectuelles étant intactes. Le trouble de la dyslexie est un trouble développemental spécifique qui, dès les années 1970, s'est classiquement défini en termes de catégories d'exclusion. Par exemple, lors de la fédération mondiale de neurologie, Critchley (1970), a énoncé que la dyslexie développementale spécifique était un trouble se manifestant par une difficulté à apprendre à lire en dépit

d'un enseignement classique, d'une intelligence normale et de conditions socioculturelles adéquates. Ce trouble atteint environ 5 à 10 % des individus et est également connu pour durer tout au long de la vie malgré un travail intensif sur les compétences de lecture (P J Bailey & Snowling, 2002; Démonet et al., 2004; Lyon et al., 2003; Ramus, 2001; Snowling & Melby-Lervåg, 2016). La dyslexie relève d'une inaptitude cognitive fondamentale sous-entendant que les personnes dyslexiques doivent avoir un déficit en lecture suffisamment spécifique à l'écrit et à l'oral sans avoir de déficience au niveau du fonctionnement cognitif général.

4.2. Troubles de la perception auditive et trouble phonologique

Il est actuellement admis que la principale cause sous-jacente de la dyslexie réside dans un déficit phonologique qui en constitue le déficit noyau. On retrouve fréquemment dans la littérature que ce déficit entrave la mémoire phonologique à court terme, c'est-à-dire la capacité de maintenir et de se rappeler la représentation phonologique des mots (Mann & Liberman, 1984) ainsi que la mémoire lexicale (Snowling et al., 1996; Vellutino et al., 2004; Zorman & Touzin, 1999), des compétences essentielles pour parvenir à maîtriser le langage écrit. Toutefois, malgré le consensus sur ce déficit phonologique, la question de la cause de ce trouble est encore sujet à débat. Le déficit phonologique nous indique premièrement que les troubles cognitifs responsables de la dyslexie sont probablement plus en lien avec un déficit de la perception auditive du langage oral qu'avec un déficit visuel (Bailey & Snowling, 2002; Frith, 1999; Ramus et al., 2003; Snowling & Melby-Lervåg, 2016).

Chez les enfants dyslexiques, quelques déficits verbaux ont été répertoriés ainsi que des difficultés d'acquisition du langage (Rutter et al., 1976). En effet, bien que ce ne soit pas le trouble majeur chez ces enfants et qu'il soit parfois difficile de s'en rendre compte, le langage oral n'est pas toujours parfait. Les sons étant parfois mal perçus, la répétition de certains mots comportant beaucoup d'informations phonémiques sont mal répétés ou mal prononcés. À partir de cette constatation, Bailey et Snowling se sont intéressés à la conscience phonologique chez ces personnes et ont constaté que la conscience des sons, autrement dit la discrimination et manipulation des phonèmes était dégradée (Bailey & Snowling, 2002). Ils ont pu démontrer la présence d'un déficit phonologique et ont suggéré qu'il entravait de surcroît les capacités d'apprentissage de la lecture en appauvrissant la capacité d'associer un phonème à un son et vice-versa.

En proposant des tâches auditives telles que des tâches de jugement de similarité phonologique, de détection d'unités phonologiques communes ou encore de segmentation syllabique et phonémique plusieurs chercheurs ont exploré le déficit de la conscience phonologique et ont pu ainsi répliquer les

résultats de Bailey et Snowling (Sprenger-Charolles et al., 2000, 2003; Wagner & Torgesen, 1987). Temple et al.(2000) ont, quant à eux, démontré que les enfants dyslexiques avaient également des difficultés dans des tâches de jugement de rime ce qui confirme que la conscience phonologique dans sa globalité est affaiblie et constitue le déficit principal de la dyslexie.

4.3. Troubles de la perception catégorielle

Comme nous l'avons expliqué, les capacités de segmentation et de représentation phonémique sont nécessaires pour une bonne conscience phonologique et donc pour la mise en correspondance des graphèmes et des phonèmes lors de la lecture. On nomme cela aussi la perception catégorielle, la capacité à catégoriser progressivement les unités sonores produites, de déterminer graduellement les frontières entre elles permettant ainsi leur discrimination, quelles que soient les variations dans la prononciation, par exemple quel que soit le locuteur.

Les études entreprises par Paula Tallal démontrant un déficit des traitements auditifs des signaux sonores ont permis aussi de démontrer par la suite un déficit de perception catégorielle. Les temps de réaction pour déterminer la frontière entre deux phonèmes ont en effet été démontrés comme étant plus long chez les dyslexiques (Reed, 1989; Tallal, 1980). Cela signifie en d'autres termes que les individus dyslexiques pourraient avoir une perception inter-catégorielle moins bien clairement définie (Manis et al., 1997). Cela pourrait alors aussi suggérer qu'au contraire, les individus dyslexiques ont une perception intra-catégorielle plus développée que les individus normo-lecteurs car ils perçoivent plus de variances acoustiques d'un son appartenant à la même catégorie. Par exemple, entre le /p/ et le /b/ des syllabes /pa/ et /ba/ proposées dans un continuum de parole synthétique, un individu dyslexique tendra à hésiter plus précocement qu'un individu sans trouble de perception catégorielle signifiant que l'individu dyslexique entend plus tôt la différence acoustique (Serniclaes et al., 2012).

La manière dont les individus dyslexiques perçoivent la parole pourrait être motivée par ce mode allophonique de perception de la parole, c'est-à-dire un mode de perception intra-catégorielle mieux développé (Serniclaes et al., 2012; Sprenger-Charolles et al., 2003). Les dyslexiques semblent plus sensibles aux contrastes de parole qui ne sont pas pertinents pour sa compréhension, et qui ne sont pas perçus par la population non-dyslexique. Ce mode de perception a pour conséquence d'altérer la précision dans la distinction des phonèmes, empêchant la cartographie phonème en graphème et finalement rendant la combinaison de lettres en mots difficile (Brandt & Rosen, 1980).

En résumé, le déficit de traitement phonologique pourrait être expliqué par une extraction, une catégorisation et une discrimination plus médiocre des informations phonétiques significatives à partir du signal acoustique qui est l'un des composants majeurs de la perception de la parole. Une compétence de

traitement auditif déviant ayant un impact sur l'ordre temporel et la perception des stimuli auditifs rapides, ceci expliquerait que les phonèmes soient perçus avec difficultés. Ce phénomène conduit ainsi à une analyse temporelle instable de la parole et à un retard de développement phonologique (Tallal et al., 1993).

4.4. Le trouble de la dyslexie : aspects neurophysiologiques

4.4.1. *Neuroanatomie de la dyslexie*

Plusieurs études ont tenté d'expliquer d'un point de vue cérébral les troubles de la dyslexie. La première étude remonte à 1979 lorsqu'Albert Galaburda, neurologue, a examiné le cerveau post-mortem d'individus dyslexiques. Ses données anatomiques acquises ont montré la présence d'ectopies, des amas de neurones dans le lobe pariétal gauche et présentant de surcroît une dysplasie, c'est-à-dire une désorganisation des couches cellulaires (Galaburda & Kemper, 1979). En 1983 Galaburda a de plus montré une symétrie entre le *planum temporale* gauche et droit chez le sujet dyslexique alors qu'il existe une asymétrie latérale chez le sujet sain dans 65% des cas avec une aire temporale gauche plus développée (Galaburda, 1983). Dehaene (2011) évoque de surcroît que les circuits neuronaux se mettent en place très précocement, lors de la seconde moitié de la grossesse, au moment où les neurones migrent pour former des couches successives de matière grise du cortex cérébral. En revanche, chez les personnes dyslexiques, certains paquets de neurones ne parviennent pas à leur destination formant alors des îlots d'anomalies qui sont susceptibles de perturber les connexions cérébrales.

Selon Giraud & Ramus (2013), si les gènes liés à la dyslexie sont inactivés, ils conduiraient à une migration anormale et à une distribution asymétrique des neurones dans le cortex et, par conséquent, à une interruption de la connectivité et des microcircuits locaux. Des irrégularités neuroanatomiques dans la micro-architecture du lobe temporal peuvent entraîner un syndrome de déconnexion (voies neuronales dysfonctionnelles) impliquant la matière blanche et grise dans le réseau fronto-temporo-pariétal responsable du processus de lecture.

Bien qu'il existe des divergences de données vis-à-vis de cette anomalie structurale, ces premiers résultats ont ouvert un vaste champ de recherche sur les anomalies cérébrales chez les personnes atteintes de dyslexie. Dans les années 2000, des travaux en imagerie cérébrale fonctionnelle ont établi de nouvelles bases concernant le fonctionnement cérébral des individus dyslexiques. Il a alors été démontré que trois régions principales dysfonctionnent chez le cerveau dyslexique : l'aire de Broca ou cortex préfrontal inférieur, le carrefour temporopariétal (aire de Geschwind) et l'aire de la forme visuelle des mots située dans le gyrus fusiforme gauche, à mi-distance entre le pôle temporal et le pôle occipital. Cette dernière

zone est considérée comme une zone profondément responsable de l'attribution « *d'un statut linguistique aux stimuli visuels que représentent les suites de lettres lors de la lecture* » (Habib, 2018). Cette dernière aire semble être l'aire qui se spécialise en tout premier lors de l'apprentissage de la lecture et semble aussi être celle la plus significativement sous-activée chez les individus atteints de dyslexie (Fig. 10).

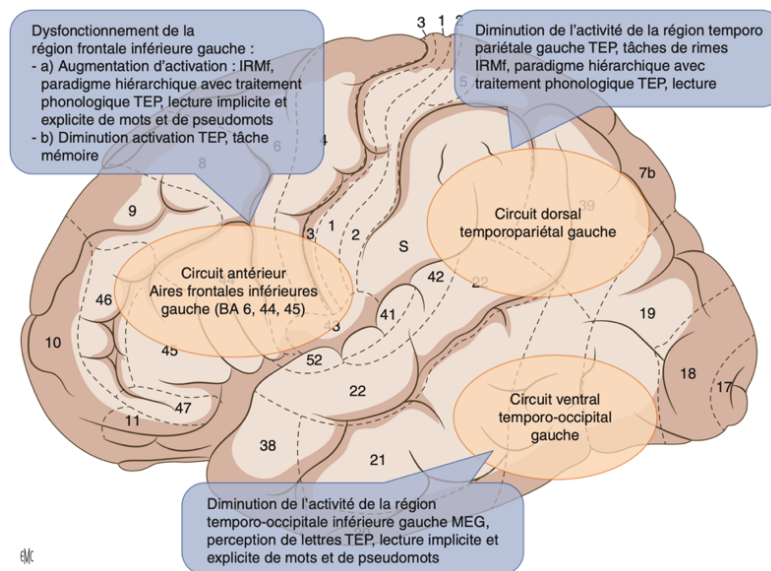


Figure 10. Représentation synthétique selon Habib (2018) des trois régions émergentes de la méta-analyse des études en imagerie fonctionnelle de la dyslexie de développement.

Utilisant l'IRM fonctionnelle, Temple et al. (2000) ont testé des sujets dyslexiques ou sains avec une tâche de discrimination de stimuli acoustique en fonction de leur fréquence (haute ou basse) et en modifiant l'intervalle séparant les deux stimuli. Ils ont démontré que les individus dyslexiques ne montraient aucune différence d'activation entre la région préfrontale gauche et la région préfrontale droite alors que les sujets contrôles montraient, eux, une activation plus importante de la région gauche (Temple et al., 2000). Concernant les troubles phonologiques, les études de Shaywitz et al. (1998) et Pugh et al. (2000) ont montré notamment une hypo-activation du cortex temporal gauche en corrélation avec les difficultés phonologiques d'individus dyslexiques ayant entre 16 et 54 ans. Les aires principalement touchées par cette hypo-activation étaient plus précisément l'aire de Wernicke, le gyrus angulaire et le cortex strié. Ces études ont aussi démontré une hyper-activation du gyrus frontal inférieur, c'est-à-dire l'aire de Broca.

4.4.2. Troubles oscillatoires dans la dyslexie

Les troubles de la dyslexie sont intimement liés aux troubles de la conscience phonologique et de la perception générale de la parole (Bakos et al., 2017; Boets et al., 2006; Ramus et al., 2003, 2013). L'intérêt est maintenant de comprendre comment sont décodées et traitées les informations temporelles contenues dans le discours chez les individus atteints de dyslexie. Pour rappel, les informations temporelles contenues dans le discours les plus représentées comme modulations d'amplitude dans l'enveloppe de la parole sont entre 2 et 50 Hz (Rosen, 1992). Ces modulations en amplitude sont cruciales pour une perception précise de la parole (Shannon et al., 1998). Les modulations de l'enveloppe de parole entre 2 et 12 Hz fournissent, elles, des informations sur le rythme prosodique et syllabique (E. Edwards & Chang, 2013; Greenberg et al., 2003), tandis que les modulations entre 12 et 50 Hz fournissent des informations sur les schémas phonémiques (Chait et al., 2015; Leong & Goswami, 2014). Étant donné l'importance des informations temporelles pour la perception de la parole, il est particulièrement intéressant de comprendre comment ces niveaux de modulation syllabique et phonémique sont traités dans le cortex auditif des individus dyslexiques. Dans ce contexte, des études récentes ont attribué des patterns oscillatoires atypiques aux troubles de perception auditive de bas niveau qui sont désormais capables d'expliquer une partie des déficits associés à la dyslexie (Schulte-Körne et al., 1999; Schulte-Körne et al., 1999).

À cet égard, Goswami (2011) propose un modèle d'échantillonnage temporel, reliant l'échantillonnage déficient des stimuli de la parole à une mauvaise synchronisation de l'activité oscillatoire à différentes fréquences. Selon ce modèle, le déficit central, c'est-à-dire le déficit phonologique lié à la dyslexie, pourrait être la conséquence d'un entraînement rythmique inefficace dans les fréquences delta/thêta et d'une analyse syllabique atypique dans l'hémisphère droit affectant le développement phonologique. On peut dire dans ces conditions que ce modèle est conforme aux conclusions des études neurogénétiques suggérant une asymétrie cérébrale inversée chez les personnes dyslexiques (Altarelli et al., 2014; Giraud & Ramus, 2013).

Ce phénomène de déficit oscillatoire a été démontré par d'autres études suggérant que les individus atteints de dyslexie présentaient des réponses diminuées à des sons modulés en amplitude à 20 Hz, comparativement aux sujets sains. Elles ont cependant de plus montré que les personnes souffrant de dyslexie ne montraient pas de réponses diminuées par rapport aux normo-lecteurs lors de la présentation de sons modulés en amplitude à 4 Hz, le rythme syllabique (Poelmans et al., 2011).

Une autre étude a utilisé un continuum de bruit blancs modulés en amplitude variant entre 10 et 80 Hz et a enregistré les réponses corticales auditives à l'état stable (ASSR) par la technique de la magnétoencéphalographie (MEG) afin de mettre en évidence un éventuel trouble oscillatoire chez la population dyslexique (Lehongre, 2011). Cette étude a montré que l'activité oscillatoire au sein du cortex auditif gauche, en particulier dans le *planum temporale* et le sillon temporal supérieur était bien présente à la fréquence phonémique (25-35 Hz) chez les normo-lecteurs lors de l'écoute de sons modulés en amplitude

à 30 Hz. Cependant, cette activité n'était pas présente chez les sujets souffrant de dyslexie, qui montraient plutôt une réponse augmentée aux sons entre 60 et 80 Hz dans le cortex auditif gauche (Lehongre et al., 2011). Cela démontre que les fréquences nécessaires pour décoder l'information phonémique contenue dans le discours sont déficitaires chez l'individu dyslexique et suppose alors un sur-échantillonnage, compatible avec l'hypothèse d'une perception allophonique, c'est-à-dire intra-catégorielle au niveau des phonèmes. De plus, dans l'hémisphère droit, les réponses des participants dyslexiques à 40 Hz étaient plus prononcées que chez les sujets contrôles (fig 11.). Ce déficit signifie donc que les sujets dyslexiques détectent et codent de manière inefficace l'information phonémique.

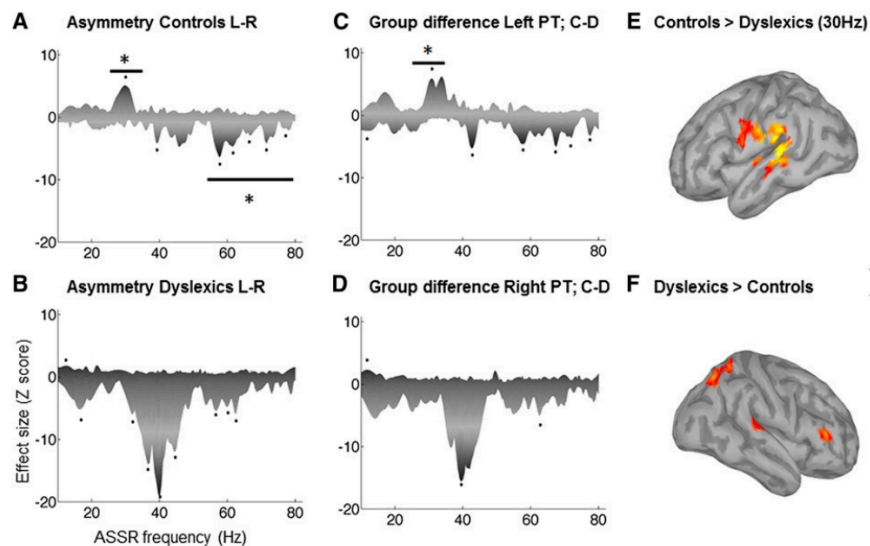


Figure 11. ASSRs obtenues en réponse à des bruits de 5,4 s modulés en amplitude entre 10 et 80 Hz dans le *planum temporel*. (A) Les ASSRs (gauche - droite) chez des participants contrôles montrent une dominance gauche pour les fréquences de 25 à 35 (sons modulés en amplitude) et une dominance droite pour les fréquences modulées en amplitude supérieures à 55 Hz (B) La dominance gauche autour de 30 Hz est absente chez les dyslexiques. (C) Dans le *planum temporel* gauche, les participants contrôles montrent un entraînement à 30 Hz significativement plus fort que les dyslexiques, et les dyslexiques affichent des réponses significativement plus fortes au-dessus de 40 Hz. (D) Dans le PT droit, les dyslexiques affichent des réponses plus fortes à 40 et 60 Hz. Les lignes délimitent les fréquences significatives ($p < 0,05$). Les points indiquent des valeurs locales significatives (test t bilatéral, $p < 0,05$ non corrigé). (E et F) Projection de surface de la différence de groupe à 30 Hz.

Par la suite, l'exploration de la relation entre ces écarts de latéralisation et des mesures comportementales a montré que pour le groupe contrôle, l'activité gauche dans la bande gamma basse est positivement corrélée avec la vitesse de lecture et les mesures phonologiques. Contrairement au groupe contrôle, pour le groupe dyslexique aucune corrélation n'a été trouvée entre l'hémisphère gauche et les compétences phonologiques. Cependant, ce groupe a démontré que les erreurs dans les tâches de dénomination rapide (RAN) étaient plus nombreuses chez les participants dont l'activité neuronale à droite était la plus prononcée à 30 Hz, contrairement à la variable composite des compétences phonologique qui s'est avérée bénéficier d'une plus forte dominance hémisphérique droite (Lehongre et al., 2011). Ces résultats suggèrent des mécanismes compensatoires de l'hémisphère droit à 30 Hz en raison

de l'hypo-activation de l'hémisphère gauche chez les dyslexiques. Cependant, bien que cette adaptation puisse être bénéfique pour l'analyse phonologique, elle est insuffisante pour une récupération complète du comportement comme le reflètent les tâches de production phonologique. Dans ce cas, l'activation compensatoire de l'hémisphère droit dans le groupe dyslexique conduit à une latéralisation atypique encore plus prononcée qui pourrait aggraver les capacités phonologiques ultérieures chez certains participants dyslexiques. Dans l'ensemble, cette étude démontre une extraction réduite des informations et du codage par l'hémisphère gauche, et soutient l'hypothèse que les capacités phonologiques reposent sur une activité oscillatoire gamma dans l'hémisphère gauche, et que cette dernière est cruciale pour de bonnes performances de lecture.

En complément de l'étude précédemment présentée, plusieurs groupes de chercheurs ont également observé un déficit de synchronisation dans d'autres bandes de fréquence comme les fréquences delta (0,5-2 Hz) et thêta (3-6 Hz) (Di Liberto et al., 2018; Lallier et al., 2017; Lizarazu et al., 2015; Molinaro et al., 2016, Power et al, 2016). Un déficit au niveau des fréquence delta reflète une qualité de décodage de l'enveloppe temporelle de basse fréquence moins précise chez les sujets atteints de dyslexie au niveau du cortex auditif droit et du gyrus frontal inférieur gauche et se traduit par un trouble de perception du rythme global d'une phrase. Molinaro et al (2016) sont parvenus aux mêmes résultats que ceux précédemment exposés en suggérant notamment une absence de déficit au niveau de la bande de fréquence thêta. Ils ont démontré un couplage entre activité cérébrale et signal de parole déficient principalement au niveau de l'hémisphère droit dans la bande de fréquence delta. Ils ont finalement conclu que pour les normo-lecteurs contrairement aux individus dyslexiques, un entraînement à basse fréquence dans le cortex auditif piloté par l'enveloppe temporelle à un rythme lent (rythme prosodique) fournirait des signaux de segmentation du signal de parole, puis faciliteraient l'échantillonnage efficace des informations de parole oscillatoire à haute fréquence. Cela peut de nouveau nous donner des indices sur l'impact d'une réduction de la capacité de traitement des informations auditives de basses fréquences (delta) sur le traitement des informations de plus hautes fréquences comme le décodage des phonèmes.

Ces études démontrent donc qu'un déficit oscillatoire est présent chez les individus atteints de dyslexie aussi bien au niveau des fréquences basses (delta et parfois thêta) que haute (gamma) qui altèrent la segmentation du flux auditif pouvant expliquer les troubles de perception phonémiques et les troubles de mise en place de la lecture. Dans ces conditions donc, l'enfant ayant des troubles prosodiques et des troubles de découpage de l'information en unités phonémiques sera atteint de troubles de l'apprentissage de la lecture/écriture bien que sa capacité à distinguer les syllabes pour apprendre sa langue ne soit pas atteinte.

4.5. Dyslexie et trouble de la lecture

4.5.1. *Trouble du décodage en lecture*

L'acquisition de la lecture/écriture, implique premièrement d'être en mesure de réaliser des associations précises entre une lettre et un son, puis une association entre une combinaison de lettres et une syllabe ou un mot. L'automatisme de la lecture intervient par la suite permettant une lecture fluide et rapide, ce à quoi les sujets dyslexiques ne parviennent pas faute de rééducation. Les individus dyslexiques, selon le DSM-5 ont un défaut d'acquisition de lecture pouvant entraîner un décalage par rapport aux performances réalisées par la moyenne des individus sur des tests standardisés de lecture. La figure 12, qui représente des critères résumés du DSM-5 permet de visualiser quelles sont les difficultés auxquels les individus dyslexiques sont confrontés lors de l'apprentissage et l'acte de lecture.

A. Difficulté à apprendre et à utiliser les aptitudes académiques, comme indiqué par la présence depuis au moins 6 mois de l'un des symptômes suivants au moins
1. lecture de mots inexacte, lente ou laborieuse
2. difficulté à comprendre la signification de ce qui est lu (même si lu correctement)
3. difficultés d'orthographe (<i>spelling</i>)
4. difficultés dans l'expression écrite (ex : erreurs de ponctuation ou grammaticales, manque de clarté de l'expression des idées)
5. difficulté à maîtriser le sens des nombres, les faits numériques, ou le calcul
6. difficulté dans le raisonnement mathématique
B. Significativement en dessous de ceux attendus pour l'âge et interfère significativement avec les performances académiques ou les occupations
C. Commence durant les années d'école mais peut n'être manifeste que dès lors que les demandes excèdent les capacités limitées de l'individu
D. Pas mieux expliquées par déficience intellectuelle, acuité auditive ou visuelle non corrigée, autres troubles neurologiques ou mentaux, adversité psychosociale, etc.

Figure 12. Critères résumés du DSM-5 selon M. Habib (2018) du « trouble spécifique des apprentissages et leur spécification pour les troubles de la lecture »

Nous nous intéressons ici à la dyslexie phonologique qui se caractérise majoritairement, à l'écrit, par un trouble du décodage ou en d'autres termes de la capacité à faire correspondre un graphème à un phonème. Lorsqu'il lit, l'enfant dyslexique peut donc omettre des sons, inverser les séquences de sons au sein d'un mot ou changer un son pour un autre son. Dans ces conditions, l'enfant aura plus tendance à tenter de lire le mot dans sa globalité en faisant appel à sa mémoire lexicale et en se fiant à des repères graphiques ou sémantique (sens donné par le contexte). Souvent, donc, l'enfant devine les mots. Cette

méthode génère bien souvent une lecture impulsive, imprécise et dans une grande majorité des cas une lecture lente.

4.5.2. *Trouble de l'identification globale et de la prosodie*

Malgré les mécanismes de compensation qui peuvent se mettre en place pour permettre à l'individu dyslexique d'acquérir la lecture avec une plus ou moins bonne fluence à l'âge adulte, une lecture lente et moins fluide persiste par rapport à l'individu normo-lecteur (Wolf, 1991). En effet, la dyslexie affecte les capacités d'automatisation de la lecture : elle affecte la vitesse et la précision donc la fluence et la prosodie. Cette condition peut être comparée aux troubles de la dénomination rapide par exemple car la lecture et la dénomination ont des processus communs d'intégration de l'information et de processus d'automatisation. En effet, dans les deux cas, l'individu doit traiter des informations visuelles et les verbaliser. Donc, conformément au caractère prédictif du niveau de lecture par la tâche de dénomination rapide, les personnes atteintes de dyslexie ont de plus mauvaises performances comparées au normo-lecteur, rejoignant sans doute leur difficulté à automatiser les processus de lecture (Paula Tallal, 1980; Wolf, 1991).

Il a aussi récemment été suggéré que les individus atteints de dyslexie démontraient des troubles prosodiques aussi bien d'un point de vue réceptif que productif. Des études ont montré que les enfants dyslexiques ont des difficultés à détecter la modulation en amplitude et la modulation de fréquence à des fréquences (2 à 10 Hz) similaires à celles observées au niveau de la syllabe dans la parole (Talcott et al., 2000; Witton et al., 1998). Le rythme de la parole est l'un des premiers indices utilisés par les nourrissons pour discriminer les syllabes et est principalement déterminé par la structure acoustique de la modulation d'amplitude à des taux relativement bas dans le signal. Cette structure acoustique est supposée être mal perçue par les individus atteints de dyslexie laissant alors penser que la conscience des modulations lentes d'amplitude se développe mal, altérant alors la conscience phonologique et donc la conscience prosodique (Goswami et al., 2002). L'expérience de Suarez-Coalla et al (2016) a montré que les personnes dyslexiques lisaient plus lentement que les normo-lecteurs et faisaient également des pauses en cours de lecture plus inappropriées et plus longues. Les individus dyslexiques diffèrent également des lecteurs expérimentés dans leur utilisation de certaines caractéristiques prosodiques, en particulier les changements de hauteur à la fin des phrases. Il a donc été proposé au sein de cette étude que la cause était une difficulté à anticiper certaines caractéristiques structurelles de la prose, comme la fin des phrases.

5. La stimulation électrique cérébrale

5.1. Les différentes techniques de stimulation électrique cérébrale

C'est dès le XVIIIème siècle que la méthode de la stimulation électrique devient un espoir dans la mesure où elle pouvait permettre la réhabilitation de certaines compétences chez des patients ayant eu un arrêt vasculaire cérébral (AVC) bien que cela ne soit pas très bien documenté. Les recherches menées sur la stimulation électrique au XIXème siècle n'ont apporté que peu de nouveauté mais on sait maintenant que l'avènement de deux principales techniques de stimulation (TMS, stimulation transcrânienne magnétique et tDCS, stimulation transcrânienne par courant continu) provient d'une première étude réalisée en 1965 par Penfield, qui a reporté que délivrer une stimulation électrique dans l'aire de Wernicke en intracrânien pouvait altérer la production du langage au point de rendre le sujet aphasique (privé de production verbale) lors des temps de stimulation. Ces premiers résultats bien que parfois néfastes pour les patients ont permis d'acquérir une vision des mécanismes cérébraux, des fonctions cognitives majeures du langage pour ensuite parvenir à proposer des méthodes moins invasives telles que nous l'avons cité, la TMS ou tDCS.

Les deux méthodes de stimulation non invasive du cerveau humain qui ont premièrement dominé les dernières décennies sont la TMS, qui active les axones par de petite impulsions courtes et conduit à de nouveaux potentiels d'action et la tDCS, qui peut être utilisée pour manipuler le potentiel membranaire des neurones et moduler les taux de décharge spontanés, mais qui est cependant insuffisante à elle seule pour décharger les neurones ou axones au repos (Nitsche et al., 2003). On suppose que la tDCS anodal a un effet excitateur alors que la tDCS cathodal a un effet inhibiteur sur le cortex cérébral local sous l'électrode. Le courant passe de l'anode à la cathode à travers les tissus.

Au cours de la dernière décennie, la tACS, stimulation transcrânienne par courant alternatif, est ensuite apparue comme une nouvelle méthode prometteuse pour la stimulation cérébrale non invasive; plusieurs découvertes ont fourni des preuves de sa capacité à entraîner des oscillations cérébrales intrinsèques via l'application de courants sinusoïdaux sur le cuir chevelu à l'aide d'électrodes délivrant un courant entre 1 et 2 mA. La tACS se distingue de la tDCS dans la mesure où elle a un effet d'entraînement continu sur les oscillations neuronales et non pas un effet excitateur et inhibiteur (Helfrich et al., 2014; Neuling et al., 2013; Van Bree et al., 2021; Vossen et al., 2015; Wilsch et al., 2018; Zaehle et al., 2010). Par exemple, une des premières études réalisées utilisant la tACS a démontré qu'une stimulation à 10 Hz appliquée 7 minutes sur le cortex moteur peut améliorer l'apprentissage moteur implicite (Andrea Antal et al., 2008). En l'essence donc, la tACS a démontré pouvoir moduler l'activité cérébrale engendrant ainsi des changements moteurs, cognitifs ou perceptuels ce qui peut donc donner un aperçu de l'importance des fréquences oscillatoires qui entrent en résonance avec l'input sensoriel.

5.2. Stimulation transcrânienne et réhabilitation des troubles du langage

De nombreux résultats suggèrent que l'utilisation de la tDCS peut modifier la perception auditive ou les capacités de lecture chez les sujets atteints de troubles du langage. Les premières études réalisées ont d'abord testé la méthode de la tDCS qui offre une possibilité de stimuler le cortex de façon non-invasive. C'est notamment le cas d'une étude visant à modifier les capacités de lecture en proposant l'utilisation de la tDCS au niveau du cortex temporal postérieur gauche chez des sujets normaux-lecteurs (Turkeltaub et al., 2012). Les auteurs ont ainsi pu améliorer les compétences de lecture parmi les sujets ayant des performances de lecture inférieures à la moyenne. Ainsi, ils ont boosté l'activité cérébrale au sein du cortex temporal postérieur gauche tout en réduisant cette même activité à droite. De même, il a été démontré que l'utilisation de la tDCS appliquée au niveau du cortex frontal gauche a permis d'améliorer la dénomination rapide chez des sujets atteints d'aphasie suite à un accident vasculaire cérébral (Baker et al., 2010). Il a également été montré que la stimulation cérébrale ou la TMS répétitive modulait donc l'activité du cerveau. En effet, l'étude de Sang You et al (2011) ayant stimulé l'aire de Wernicke gauche (le gyrus temporel supérieure gauche) a suggéré que des sujets atteints d'aphasie ayant une parole spontanée réduite ainsi qu'une compréhension verbale déficitaire montraient une amélioration de leur compétence verbale (You et al., 2011). Toutefois, il faut bien comprendre qu'avec les différentes méthodes de stimulation que nous venons de voir (tDCS ou TMS) on ne peut pas déterminer comment elles agissent sur l'activité oscillatoire car le courant appliqué n'a pas de fréquence définie. En utilisant la tACS qui permet l'application d'un courant alternatif, nous pouvons cependant perturber sélectivement les oscillations neuronales (Herrmann et al., 2013) et observer les conséquences sur la perception et la compréhension du signal de parole. Une étude a utilisé la tACS pour étudier un rôle causal possible de l'entraînement neuronal pour le traitement de la parole. Rufener et al., (2016) a exploré l'influence de la tACS à 40 Hz sur la catégorisation de phonème chez de jeunes adultes et des personnes âgées. Elle a cependant démontré que la tACS à 40 Hz avait eu un effet de diminution de la précision de catégorisation de phonème chez les jeunes adultes. Malgré ces résultats les auteurs concluent que les oscillations ont un rôle causal pour la catégorisation de phonème. Les limites de cette première étude où la tACS est utilisée dans le but de modifier la perception phonémique sont donc importantes et les résultats ne permettent pas de conclure à un réel lien de causalité entre les oscillations cérébrales et la perception phonémique. Les oscillations sont un marqueur ou indice de l'activité rythmique sous-jacente des groupes de neurones. Ainsi, ce ne sont pas des oscillations en soi qui donnent lieu à la perception.

Ces limites nous ont donc conduit à réaliser un protocole de tACS à la fréquence de 30 Hz, la fréquence phonémique au sein de la structure fine du signal de parole pour tenter de renforcer la

perception phonémique au sein d'une populations d'individus, les individus dyslexiques qui souffrent justement de troubles de la perception phonémique.

Problématique

A partir de ces connaissances que nous venons de détailler nous avons tenu dans ce travail à corroborer les résultats démontrant d'une part l'importance de l'activité neurale dans la bande gamma basse (25-35 Hz) dans le découpage de l'information phonémique contenue dans le flux de parole et d'autre part à étayer les résultats suggérant un déficit des oscillations au rythme gamma dans le cortex auditif gauche chez les individus dyslexique. Pour cela, nous avons travaillé sur la possibilité d'amplifier les oscillations neuronales dans la bande gamma en appliquant une session de stimulation transcrânienne par courant alternatif (tACS) à la fréquence de 30Hz au niveau du lobe temporal gauche, là où se trouve le cortex auditif et le gyrus temporal supérieur dans le but d'améliorer les compétences langagières chez des sujets dyslexiques. Nos hypothèses principales au sein de ce travail, sont donc ici les suivantes : 1) les ondes oscillatoires dans la bande gamma basse (entre 25 et 35 Hz) seraient moins présente chez les individus dyslexiques que chez les individus sains et l'application d'une session de tACS à 30 Hz pourrait rétablir le fonctionnement normal des ondes gamma dans le cortex auditif gauche chez les sujets dyslexiques par effet de relatérialisation, 2) en boostant l'activité neurale responsable du décodage phonémique et en relatérialisant l'activité oscillatoire à 30Hz au sein des aires du langage (cortex auditif et gyrus temporal supérieur) les compétences phonémiques des sujets dyslexiques devraient s'améliorer, et ainsi que leur compétence phonologiques globales, par effet de cascade et 3) l'effet de la tACS à 30 Hz en rétablissant la conscience phonémique, devrait modifier les compétences de lecture en favorisant un mode de lecture phonologique.

Afin de confirmer ces hypothèses, nous avons dans ce travail de thèse réalisé une expérience combinant des sessions de stimulation par tACS (30 Hz, 60 Hz et stimulation fictive (SHAM)) à des enregistrement EEG (lors de l'écoute de sons purs modulés en amplitude à différentes fréquences) et des tests langagiers. Les résultats seront présentés au sein de trois études distinctes traitant respectivement des résultats neurophysiologiques, des résultats de conscience phonologique et des résultats de lecture.

Etude 1 : Investigation du déficit oscillatoire chez le sujet dyslexique et de l'effet de la tACS à 30 Hz.

Etude publiée : Marchesotti, S., Nicolle, J., Merlet, I., Arnal, L. H., Donoghue, J., & Giraud, A.L. (2020). Selective enhancement of low-gamma activity by tACS improves phonemic processing and reading accuracy in dyslexia. *PLoS Biology* 18(9).

1. Introduction

L'objectif principale de cette première partie est de corroborer l'existence d'un déficit oscillatoire dans la bande gamma (entre 25 et 35 Hz) chez les participants dyslexiques par rapport aux participants contrôles comme proposé dans l'étude de Lehongre et al (2011) et d'identifier des changements induits par la tACS à 30 Hz d'un point de vue neurophysiologique. La plupart des études de stimulation se contentent généralement d'observer les effets comportementaux. L'originalité de notre approche consiste à vérifier que les modifications comportementales attendues sont bien associées à des effets spécifiques sur l'activité du cortex auditif et les régions avoisinantes. En effet, nos objectifs principaux dans ce travail sont d'identifier les troubles oscillatoires qui causent les troubles de conscience phonémique et phonologique chez les individus dyslexiques et de tester une méthode de stimulation transcrânienne par courant alternatif (tACS), afin de rétablir l'activité neurale déviante chez une population de participants atteints de dyslexie. Nous allons donc ici étudier les réponses neuronales induites par des sons purs modulés en amplitude à diverse fréquence (entre 28 et 62 Hz) chez des sujets dyslexiques par rapport à des sujets contrôles et explorer dans quelle mesure des changements sont opérés sur ces réponses neuronales après l'application d'une session de 20 minutes de tACS à 30 Hz par rapport à deux conditions contrôles, une condition de stimulation à 60 Hz et une condition placebo, que nous nommerons Sham où les sujets pensent être stimulés mais ne le sont pas.

2. Matériel et méthodes

2.1. Recrutement et participants

Le recrutement pour cette étude a été réalisé via des affiches placées au Centre Médical Universitaire, au campus Unimail et au campus Biotech à Genève. Nous avons aussi posté une annonce sur les réseaux sociaux dédiés aux expériences réalisées au sein de l'université de Genève. L'association

Dyslexique de Suisse Romande a également participé à l'envoi d'e-mails à leurs adhérents qui nous ont par la suite contacté par e-mail.

Quinze adultes atteints de dyslexie, et quinze normo-lecteurs, tous de langue maternelle française, sans troubles neurologiques, sans maladie cardiaque et ayant un niveau d'audition normal ont participé à l'étude. Tous les sujets ont fourni un consentement écrit de participation à cette étude approuvée par le comité d'éthique (*Commission cantonale d'éthique de la recherche*, project #15-264) et réalisée conformément à la Déclaration d'Helsinki. L'étude a été enregistrée rétrospectivement dans un registre d'essais cliniques accessible au public et approuvé par l'OMS sur www.clinicaltrials.gov (NCT04277351).

Nos critères d'inclusion pour le groupe des dyslexiques étaient : 1) avoir une audition normale, 2) une intelligence non verbale adéquate définie par un score standard au-dessus du 25^{ème} centile inférieur sur les matrices progressives standard de Raven Serie II (APM, Raven et al, 1998) qui correspondent à un QI autour de 90 (Raven et al, 1998), et 3) avoir des antécédents documentés de difficultés de lecture tout au long de l'enfance et de symptômes persistants. Pour les participants normo-lecteurs, les critères d'inclusion étaient les suivants : 1) avoir un score standard au-dessus du 25^{ème} centile inférieur sur les matrices progressives standard Raven de série II et 2) avoir une absence de déficit phonologique. Pour les deux groupes, les critères d'exclusion étaient d'avoir des antécédents de lésions cérébrales ou cardiaques, des troubles neurologiques ou psychiatriques ou d'avoir un implant métallique cérébral. Les femmes enceintes étaient aussi exclues de l'étude. Les données démographiques des sujets ainsi que leur score de quotient intellectuel de performances sont répertoriées dans le tableau 1.

SUJETS DYSLEXIQUES					SUJET CONTROLS				
SUJETS	AGE	SEXE	APM	Niveau scolaire	SUJETS	AGE	SEXE	APM	Niveau scolaire
8	30	F	108	BAC +2	20	22	F	94	BTS
9	22	F	81	BAC	24	24	M	103	BAC +3
10	19	F	100	BAC	28	23	M	119	BAC PRO
11	22	F	102	BAC +2	30	47	F	85	MASTER
12	19	F	122	BAC + 1	31	22	F	133	BAC +2
13	20	F	80	BAC + 1	33	40	F	120	BAC
14	22	F	115	BAC+ 1	34	24	F	124	LICENCE
15	46	F	102	BAC	35	24	M	114	LICENCE
16	30	M	142	BAC	36	18	F	128	BAC
17	30	F	81	BAC PRO	37	23	F	121	Bac+2
18	34	F	104	LICENCE	38	30	F	97	LICENCE
22	24	F	81	BAC	39	20	F	104	BAC PRO
23	46	F	142	LICENCE	41	23	M	125	BAC PRO
25	22	F	82	BAC+2	42	21	F	111	BAC
26	24	F	84	BAC	43	22	F	87	BAC
Moyenne	27,33333333		101,73333		Moyenne	25,53333333		111	
Déviati	8,829064557		21,285363		Déviati	7,845532547		15,217471	

Tableau 1. Données démographiques des participants inclus dans l'étude.

2.2. Procédure expérimentale

2.2.1. *Journée d'inclusion*

Les participants ont dû, lors de la première journée d'expérience remplir trois courts questionnaires (annexes 1, 2 et 3) pour, premièrement vérifier qu'ils ne répondaient pas aux critères d'exclusion, deuxièmement vérifier que leur langue maternelle était bien uniquement le français et troisièmement avoir un aperçu de leur parcours scolaire. Ils ont ensuite réalisé une première session de tests linguistiques (répétition de pseudo-mots, contrepèterie et lecture de texte pendant 3 minutes) suivi d'un test d'audiométrie pour vérifier leur audition. A la suite de cela ils ont été soumis à un diagnostic de dyslexie, l'ECLA 16+ (annexe 4), destiné à tester la dyslexie chez une population d'adulte, ainsi qu'à un audiogramme afin de vérifier qu'ils présentaient une audition normale. L'ECLA 16 + est un test comportant de multiples exercices pouvant tester les performances et la vitesse de lecture à la fois de mots réguliers, de mots irréguliers ou de pseudo-mots, la conscience phonologique et phonémique. Les participants ont ensuite réalisé un test de dénomination rapide (RAN) en utilisant la batterie de tests de Frederickson (Frederickson et al., 1997) suivi d'une deuxième session de tests linguistiques. Ils ont dû également réaliser les tests des matrices de Raven pour tester leur quotient intellectuel (QI) de performance. A la suite de cela, les participants ont reçu une dernière batterie de tests linguistiques.

Les tests linguistiques proposés seront décrits dans l'étude 2 traitant des résultats comportementaux. Ils ont ici été réalisés lors de la journée d'inclusion afin que les participants en prennent connaissance et afin d'éviter un effet de surprise ou d'amélioration soudaine lors des journées expérimentales. Les items étaient différents entre chaque test, permettant de veiller à une absence d'effet d'apprentissage.

2.2.2. *Journées expérimentales*

Nous avons exploré l'effet de la tACS sur trois journées expérimentales non consécutives (espacées au minimum de 10 jours), pour la raison suivante : trois conditions de stimulation étaient imposées aux sujets, une condition avec une stimulation à 30 Hz, une autre à 60 Hz correspondant à une première condition contrôle et une stimulation fictive que nous nommons ici condition Sham. Concernant cette dernière, elle correspond notamment à une condition où le sujet pense être stimulé mais ne l'est pas. Les sessions de stimulation étaient appliquées de façon randomisée entre chaque participant afin de contrôler les effets d'apprentissage des tests linguistiques.

Au cours de ces trois journées, il était également demandé aux sujets d'écouter au repos des séries de sons modulés en amplitude de diverses fréquences ([28 30 32 40 58 60 62] Hz) sous EEG pour mesurer pendant 25 à 40 min les réponses neuronales (ASSR) induites par les sons. Les temps d'enregistrement variaient en fonction des demandes de pause entre chaque session de sons : nous avons en effet découpé les sessions de sons en 5 sessions de 5 minutes et une pause pouvait être accordée aux participants entre les sessions s'ils le souhaitaient.

L'application de la stimulation a ensuite été réalisée. Les détails de la stimulation seront décrits dans une section ultérieure. Les participants ont ensuite reçu une seconde session d'enregistrement EEG en utilisant comme stimuli auditifs les mêmes sons modulés en amplitude de diverses fréquences que lors de la première session, l'objectif étant de visualiser les changements de l'activité neuronale après la stimulation. Cet enregistrement a été immédiatement suivi d'une troisième session d'enregistrement EEG après une pause d'environ une heure où un déjeuner était proposé.

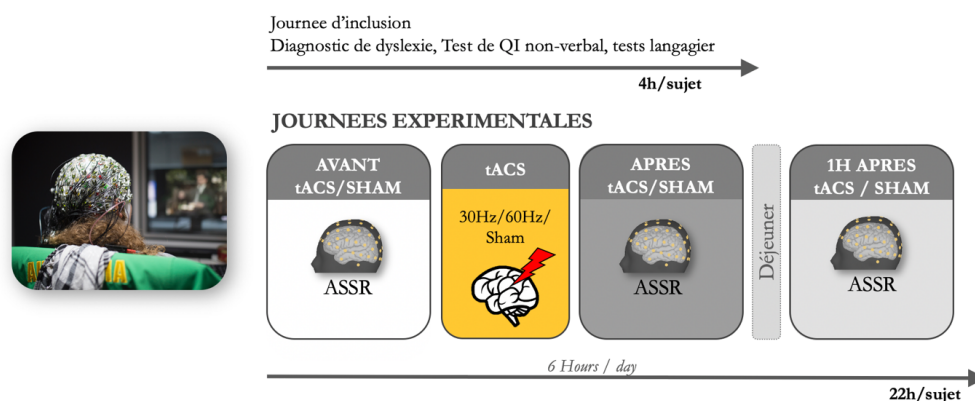


Figure 1. Représentation schématisée de la journée d'inclusion et des journées expérimentales.

2.3. Matériels

2.3.1. Test d'audiométrie

Lors de la journée d'inclusion les sujets ont été soumis à un test d'audiométrie pour nous assurer que le signal sonore était perçu correctement par le sujet. D'une part cela nous assurait qu'il avait une audition correcte et d'autre part que les mousses des écouteurs utilisés étaient correctement insérées dans l'oreille. Malgré la subjectivité de ce test qui nécessite la coopération de l'auditeur, il a tout de même pu montrer que chaque sujet entendait correctement plus de 75% des sons proposés. Ce test avait une durée approximative de 15 min et faisait référence aux normes spécifiques de l'American Nation Institute (2004).

2.3.2. *ECLA 16 +, diagnostique de dyslexie et test de dénomination rapide*

Afin d'évaluer le niveau de dyslexie de chaque participant et également de vérifier l'absence de dyslexie chez les participants contrôles nous avons réalisé un test officiel de dyslexie. Nous avons ici choisi l'ECLA 16 + ; il s'agit d'un test qui s'adresse à des professionnels cliniciens formés à la neuropsychologie cognitive. Il a été spécialement créé par le CeFoCOP (Université de Provence Aix-Marseille I - Cognisciences LSE Université Pierre Mendès France Grenoble) pour examiner le niveau de dyslexie chez des personnes adultes. La batterie de test comprend 10 épreuves au total qui prennent en comptes les différentes capacités cognitives souvent affectées par le trouble de la dyslexie. Les épreuves recouvraient la lecture, l'orthographe, la mémoire verbale, les capacités métaphonologiques et les processus de traitement visuel.

Ici, l'exactitude et la vitesse de lecture donnant une mesure moyennée de la fluidité de lecture ont été estimés via le test de l'alouette inclus dans l'ECLA 16+. Il s'agit d'une tâche de lecture d'un texte n'ayant aucun sens, comportant des mots rares et irréguliers avec des distracteurs visuels. Un second test de lecture fut réalisé avec un texte ayant un sens, la consigne étant de lire ce test le plus rapidement possible. Le niveau de conscience phonologique fût estimé d'une part avec un exercice de suppression du premier phonème d'un mot prononcé oralement par l'expérimentateur (ex : « betterave » doit donner la réponse « terave) et par un test de contrepèterie où le but est d'échanger le premier phonème de deux mots oralement proposés (exemple : panier – tableau doit donner la réponse tanier – pablo).

Une analyse statistique (t-test bilatéral non apparié entre les groupes) a confirmé que le groupe de dyslexique avait des résultats inférieurs à ceux des lecteurs fluides pour toutes les compétences individuelles testées (conscience phonologique : $T_{28} = 7,6$, $p < 0,0001$, mémoire verbale à court terme : $T_{28} = 4,2$ $p < 0,001$, compétences en lecture : $T_{28} = 4,9$, $p < 0,0001$, tableau 2). Les sujets ont également effectué un test de dénomination automatisée rapide (RAN), qui a confirmé que le groupe dyslexie avait un accès lexical réduit (t-test bilatéral non apparié entre les groupes, $T_{28} = 5,62$, $p < 0,0001$, tableau 2).

2.3.3. *Matrices de Raven*

Les Matrices de Raven, ou matrices progressives de Raven sont un test de quotient intellectuel de performance. Dans ce test, il faut trouver la loi de progression d'une série de figures graphiques d'une matrice 3x3 et trouver parmi plusieurs proposition l'élément manquant en faisant preuve de logique. Les réponses des sujets furent obtenues grâce à une feuille de réponse sous format papier donnant ainsi

directement à l'examineur le nombre de bonne réponse. C'est ensuite grâce à une grille de cotation qui compare le nombre de bonne réponse en fonction de l'âge du sujet qui permet d'obtenir une valeur de QI.

	DYSLEXIQUES (n=15)		CONTRÔLES (n=15)	
	moyenne	SD	moyenne	SD
Age moyen	27.3	8.82	25.5	7.85
QI non-verbal (Matrice de Raven)	101.7	21.3	111	15.2
ECLA 16+ (Z-Scores)				
Conscience phonologique***	-0.60	0.59	0.44	0.53
Compétence de lecture***	-0.65	0.9	0.28	0.52
Mémoire à court terme***	-0.31	0.49	0.70	0.24
RAN (Z-Scores)				
Dénomination rapide (RAN)***	-0.72	0.90	0.72	0.38

Tableau 2. Données du diagnostic de dyslexie réalisé le jour de l'inclusion pour le groupe d'individus dyslexique et le groupe contrôle. Les valeurs négatives représentent des performances inférieures à la moyenne, les valeurs positives des performances supérieures à la moyenne ; toutes les valeurs sont des z-scores. Les étoiles indiquent les différences significatives entre le groupe dyslexie et sans dyslexie (***) pour $p < 0,001$.

2.3.4. Enregistrement EEG et stimuli auditifs

Les signaux EEG ont été enregistrés au moyen d'un système EEG doté de 64 électrodes (Brain Products GmbH, Gilching, Allemagne) qui était installé sur le scalp du sujet dès le début de l'expérience et retiré après les 3 sessions de tests (avant, immédiatement après et 1h après la tACS) pour chacune des conditions expérimentales (30 Hz, 60 Hz et Sham). Comme le bonnet EEG n'a pas été retiré entre les sessions, nous avons utilisé un système avec des électrodes passives plutôt qu'actives pour assurer des impédances stables pendant toute la durée de la journée expérimentale (~ 6h). L'électrode AFz a été utilisée comme masse et FCz comme référence. Les signaux bruts ont été échantillonnés à 1 kHz à l'aide d'un logiciel (Recorder, BrainProducts). Au cours des enregistrements EEG, nous avons présenté des sons purs de 1,5 secondes modulés en amplitude à des fréquences spécifiques ([28 30 32 40 58 60 62] Hz) et

40 répétitions par condition de son pour entraîner les oscillations cérébrales d'une manière spécifique à la fréquence proposée et mesuré l'ASSR suivant la réponse évoquée auditive. Les ASSR reflètent la capacité des régions corticales auditives à se synchroniser avec un stimulus auditif d'amplitude constante (Miyazaki et al., 2013; B Ross et al., 2005). Chaque essai durait 5 secondes, comprenant la présentation du stimulus et 3,5 secondes d'intervalle inter-stimulus. Chaque bloc EEG-ASSR durait environ 25 minutes, pendant lesquelles les participants étaient invités à rester assis devant un écran placé à 1 mètre d'eux, affichant une vidéo en sourdine de leur choix. Afin de minimiser les artefacts sur les traces EEG, les participants étaient également invités à éviter les mouvements des yeux et du corps.

2.3.5. *Stimulation transcrânienne par courant alternatif (tACS)*

La tACS provenant de Starstim, Neuroelectrics, basé en Espagne était délivrée via cinq électrodes de 1,2 cm de diamètre fournies par Pistim, Neuroelectrics, placées au niveau du cortex auditif gauche et intégrées dans le bonnet EEG pour assurer une position invariante entre les participants. Un gel électroconducteur était utilisé pour assurer une conduction optimale entre les électrodes et le cuir chevelu. Les électrodes ont été disposées dans une configuration en anneau 4x1, aux emplacements TTP7h, FTT9h, FCC5h, CPP5h, TPP9h, avec l'anode centrale délivrant un courant alternatif inférieur à 2 mA et les quatre cathodes environnantes délivrant $\frac{1}{4}$ du courant de l'anode dans la polarité opposée (Fig 2). La configuration des électrodes 4x1 est une procédure expérimentale bien établie qui délivre la stimulation électrique de manière focale à une région cérébrale spécifique (Datta et al., 2009).

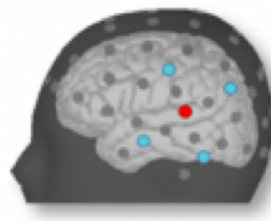


Figure 2. Représentation schématisée du positionnement des électrodes de stimulation.

L'intensité de la stimulation tACS était réglée séparément pour chaque participant, à partir de 0,8 mA et en augmentant par étapes de 100 μ A jusqu'au seuil de perception, avec une intensité maximale de 2 mA. Le courant était ensuite réduit en dessous de ce seuil et cette valeur était maintenue constante pendant toute la durée de l'expérience, avec 20 secondes de montée et 20 secondes de descente de stimulation. La stimulation tACS durait 20 minutes, une durée courante dans la recherche en neurosciences

cognitives (Antal et al., 2017). Pour la condition Sham, la tACS était délivré uniquement pendant les périodes de montée et de descente (20 secondes) pour faire croire à un ressenti de stimulation mais aucun courant n'était délivré pendant l'intervention de 20 minutes. Dans l'ensemble, les rapports des participants ont indiqué qu'ils ne pouvaient pas dire s'ils avaient reçu une stimulation réelle ou fictive : sur 30 participants, seuls 7 ont correctement déclaré avoir reçu une stimulation placebo pendant la condition SHAM, tandis que 18 participants n'ont pas repéré la condition SHAM et ont estimé que les trois jours expérimentaux comportaient une stimulation électrique active. À la fin de la stimulation, les sujets ont été soumis à un débriefing sur les effets secondaires (douleur, picotements et toute sensation cutanée, échauffement, fatigue ou difficultés d'attention), associés à la tACS en notant le niveau d'inconfort sur une échelle de 0 à 10 (Fig. 3). Une ANOVA à mesures répétées avec les deux groupes comme facteur inter-sujets et les conditions de tACS (sham / 30 Hz / 60 Hz) comme facteur intra-sujets a révélé un effet principal de la condition de stimulation ($F_{2,28} = 9,1$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,23$). Les analyses post-hoc ont montré des effets secondaires rapportés plus faibles pour la condition SHAM que pour les conditions 30 Hz ($T_{29} = 3$, $p < 0,01$, $d = 0,54$) et 60 Hz ($T_{29} = 4,3$, $p < 0,001$, $d = 0,78$).

**Effet secondaire des sessions de tACS
(sensation physique, anxiété, fatigue, attention)**

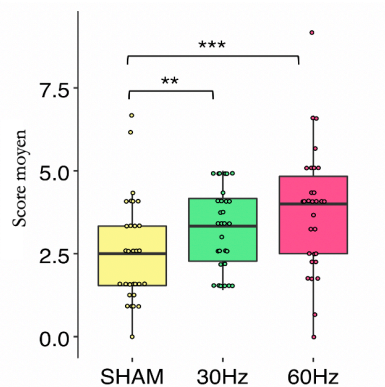


Figure 3. Représentation par boxplot des effets secondaires ressentis par les participants concernant les trois conditions de tACS (30 Hz, 60 Hz et sham)

2.4. Analyse des données

2.4.1. Traitement des données EEG

2.4.1.1. Prétraitement des données EEG

Le prétraitement des données EEG a été réalisé à l'aide d'EEGlab v14.1.2 (Delorme & Makeig, 2004) et SASICA (Chaumon et al., 2015) deux interfaces utilisées dans l'environnement Matlab. Les signaux ont d'abord été sous-échantillonnés à 500 Hz et filtrés avec un filtre passe-bande entre 1 et 70 Hz. 112 périodes EEG ont été définies pour chaque session d'enregistrement en laissant 1 seconde avant le stimulus et 1 seconde après le stimulus, les stimuli étant les différents sons modulés en amplitude à des fréquences différentes allant de 28 à 62 Hz comme décrit précédemment. Les époques où plusieurs canaux étaient affectés par de puissants artefacts musculaires (c'est-à-dire des composants à haute fréquence) ont été exclus par inspection visuelle. Lorsqu'un seul canal présentait un artefact spécifique, il était interpolé pour cette époque uniquement. Les époques bruitées ont ensuite été traitées de la façon suivante : les valeurs extrêmes en amplitude et en fréquence pour chaque canal et époque étaient détectées et automatiquement retirées, les valeurs déviantes extrêmes étant estimées par des algorithmes qui appliquent systématiquement des seuils basés sur le z-score. Ceci est réalisé en estimant d'abord la moyenne du signal qui est ensuite utilisée pour la comparaison afin de trouver des canaux défectueux par rapport à cette moyenne et de les interpoler ultérieurement. Cela a été réalisé manuellement avec l'aide de l'interface EEGlab.

Les données ont ensuite été re-référencées avec l'interface EEGlab par rapport à la référence moyenne commune à toutes les électrodes. L'analyse en composantes indépendantes (ICA) a ensuite été appliquée à l'ensemble de données découpées en périodes, avec le nombre de composantes réduit à 32. Les composantes artéfactuelles ont été identifiées à l'aide d'une approche semi-automatique via l'interface SASICA. Les canaux contaminés par des artefacts initialement supprimés ont été réobtenus par interpolation spatiale avec les autres canaux avoisinants, et toutes les époques ont à nouveau été inspectées visuellement pour les artefacts restants, qui, s'ils étaient présents, ont été rejetés. Les données d'un participant du groupe sans dyslexie ont dû être rejetées en raison de la présence massive d'une activité artéfactuelle non-physiologique.

2.4.1.2. *Analyse des données EEG*

Après le prétraitement, les analyses de données ont été effectuées à l'aide des boîtes à outils EEGlab, Fieldtrip (Oostenveld et al. 2011) et Brainstorm (Tadel et al. 2011), ainsi que des scripts personnalisés. Nous avons dans un premier temps analysé les données EEG seules en explorant l'activité neurale dans le cerveau entier au niveau individuel. Les données avant et immédiatement après chaque session tACS ont été choisies. Les données EEG acquises après la pause d'une heure n'ont pas pu être analysées car elles étaient trop bruitées à cause d'une augmentation des impédances au cours de la journée.

L'étape suivante a été l'analyse des potentiels évoqués cérébraux (ERP) de tous les canaux des données EEG de chaque participant. Une inspection visuelle des ERP a été réalisée par une représentation

graphique de tous les canaux « ERP moyennés ». Nous avons donc calculé le signal moyen pour le groupe d'individu dyslexique pour identifier le potentiel évoqué auditif. La transformée temps-fréquence a ensuite été réalisée à l'aide d'une transformée de Fourier discrète (cône de Hanning; 1 à 70 Hz; pas de 1 Hz), et la ligne de base a été corrigée en considérant les 500 ms post-stimulus. Pour mesurer la réponse ASSR au niveau du cuir chevelu, nous avons considéré, pour chaque condition, le spectre de puissance moyen entre 500 ms et 1500 ms post-stimulus de tous les essais à la fréquence de stimulation. Nous avons comparé les réponses ASSR aux réponses temps-fréquences grâce à des t-test bilatéraux non-appariés entre les groupes. Lorsqu'une différence statistiquement significative entre la puissance obtenue entre deux séances était présente, nous avons effectué une analyse de corrélation avec la variable indépendante sévérité de la dyslexie.

Pour reconstruire les sources donnant lieu aux signaux électroencéphalographiques de surface au sein des mesures individuelles, une modélisation physiologique réaliste est nécessaire et un problème inverse doit être résolu. Au préalable, nous avons modélisé la relation qui va des sources aux capteurs en résolvant le problème direct dans un modèle de tête réaliste à trois interfaces (cerveau, crâne et scalp) de conductivités différentes (0.33 ; 0.00825 ; 0.33 Sm^{-1}). Les maillages sont obtenus à partir de la segmentation d'un modèle IRM (Colin27) dans Brainstorm (Tadel et al., 2011) et la matrice de gain qui en découle est calculée ici en utilisant OpenMEEG et permet de modéliser la propagation des potentiels issus de chaque source de la surface corticale vers chaque électrode de surface.

A partir des signaux EEG de surface et connaissant cette matrice de gain (leadfield) nous avons ensuite estimé l'activité de 15000 sources (considéré ici comme des dipôles) distribués à la surface du cortex du cerveau modèle Colin27. L'activité de ces sources a été estimée par une approche distribuée de type norme minimale (MNE) et l'option dSPM (dynamical Statistical Parametric Mapping [Dale, 2000]) (ordre de pondération en profondeur: 0,5, quantité maximale: 10; rapport signal sur bruit: 3; régularisation de la covariance du bruit: 0,1). Un lissage spatial (FWHM 3 mm) a été appliqué pour afficher l'activité moyenne de la source. A partir de cette solution, nous avons extrait l'activité moyenne dans deux régions d'intérêt (ROI), le cortex auditif et le gyrus temporal supérieur bilatéralement, sélectionnées conformément aux résultats de Lehongre et al. 2011. Le spectre temps-fréquence moyen sur chaque région d'intérêt a été calculé avec les mêmes méthodes que celles utilisées pour l'analyse de surface. Les analyses dans l'espace source ont été effectuées pour tester les différences entre les sessions avant et après l'application de la tACS à 30 Hz.

2.4.1.3. *Analyses statistiques*

Concernant les analyses de puissance spectrale à 30 Hz au niveau de l'électrode FCz, nous avons mesuré la différence entre les deux groupes de participants à l'aide de tests t non-appariés, en corrigeant les comparaisons multiples avec la méthode du taux de fausses découvertes (FDR, (Benjamini, 1995)).

Les différences dans la latéralité de la réponse en puissance ont été étudiées séparément pour chacune des deux régions d'intérêt (cortex auditif et gyrus temporal supérieur (STG)) avec une ANOVA 2x2 avec session (avant / après) et hémisphère (gauche / droit) comme facteurs. De plus, nous avons effectué une analyse de corrélation entre la gravité de l'indice de dyslexie et la différence de puissance entre les deux sessions dans chacune des régions d'intérêt.

3. Résultats

3.1. Déficit oscillatoire à 30Hz chez les individus dyslexiques

Avant d'évaluer l'effet de 20 min de tACS à 30Hz au niveau du lobe temporal gauche, nous avons vérifié s'il était possible de répliquer les données de Lehongre et al (2011). Cette étude suggérait en effet que l'activité oscillatoire au sein du cortex auditif gauche était bien présente à la fréquence phonémique (entre 25 et 35 Hz) parmi les normo-lecteurs mais qu'elle était moindre chez les sujets atteints de dyslexie, qui montraient plutôt une réponse augmentée aux sons entre 60 et 80 Hz dans le cortex auditif gauche et une réponse supérieure aux sujets contrôles à 40Hz dans le cortex auditif droit. Confirmer ces résultats est donc une condition nécessaire avant de pouvoir examiner les effets de compensation de la tACS, son but étant de renforcer les oscillations cérébrales à 30Hz, puisque celles-ci correspondent aussi à un rythme permettant d'encoder les indices phonémiques (transitions formantiques, bursts consonatiques etc.). Les réponses évoquées de chaque période de stimulus acquis avant l'application de la tACS ont été analysées séparément. Premièrement nous avons confirmé que les stimuli auditifs évoquaient des formes d'onde typiques avec des composants auditifs N100 et P200 et des topographies, avec la plus forte amplitude de réponse au niveau de l'électrode FCz (Fig. 4).

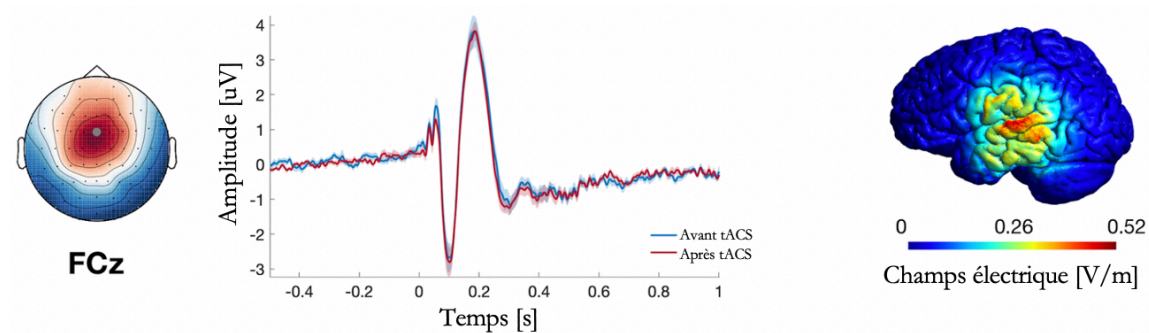


Figure 4. Réponse évoquée auditive au niveau des électrodes du cuir chevelu et reconstruction du champ électrique induit par la tACS à 30 Hz.

Nous avons donc limité l'analyse EEG à cette électrode conformément à un grand nombre de publications (Korczak et al., 2012; Ross et al., 2000). La transformation temps-fréquence du signal EEG pendant les ASSR a atteint un pic pour les stimuli auditifs délivrés avec une fréquence de modulation d'amplitude de 40 Hz ce qui correspond bien aux résultats que nous attendions si l'on tient compte de la littérature (Korczak et al., 2012; Ross et al., 2000, Fig 5). Cependant, les réponses générées au niveau de l'électrode FCz lors de l'écoute de sons modulés en amplitude à 30 Hz n'ont pas montré de résultats statistiquement différents entre les participants contrôles et dyslexiques ($T_{27} = -0.91$, $p = 0.18$, $d = 0.77$) bien que l'on puisse voir tout de même, visuellement, une tendance émerger : les individus dyslexiques ont une puissance spectrale inférieure aux dyslexiques pour les stimuli à 30Hz.

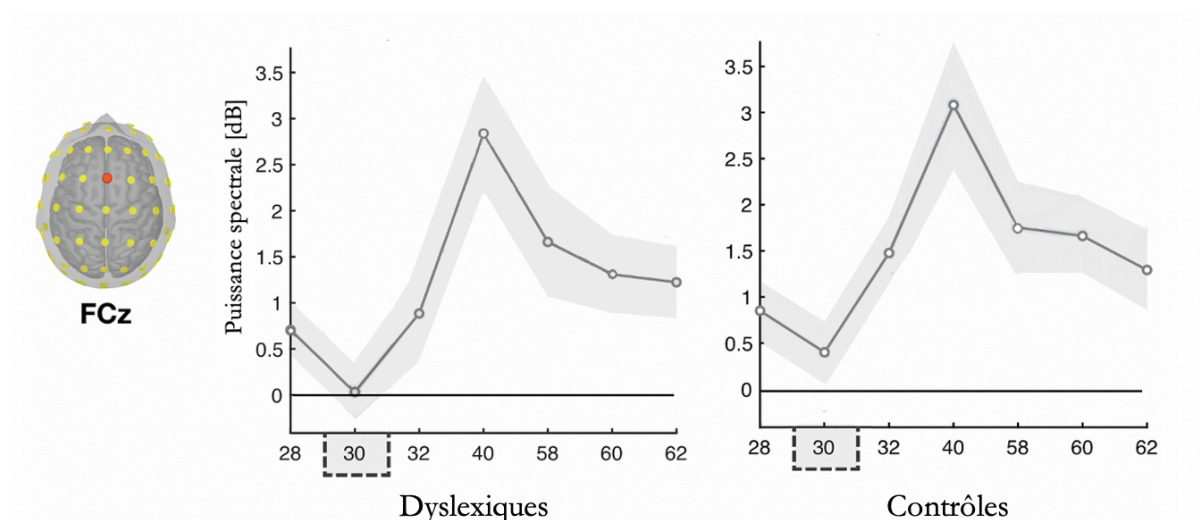


Figure 5. Représentation de la puissance spectrale (en dB) extrait à partie de l'électrode FCz chez les individus dyslexiques (à gauche) et chez les individus contrôles (à droite).

Comme le déficit de réponse à 30 Hz chez les personnes atteintes de dyslexie est censé prédominer dans le cortex auditif gauche, nous avons donc reconstruit l'activité des générateurs neuronaux responsables du signal enregistré sur le cuir chevelu. Sur la base des résultats précédents, nous avons effectué une reconstruction de sources sur deux régions d'intérêt (ROI) dans chaque hémisphère cérébral, correspondant au cortex auditif et au gyrus temporal supérieur (STG). La reconstruction de sources obtenues à partir de l'enregistrement du cuir chevelu a identifié les réponses les plus fortes à ces endroits (Fig.6). Nous avons confirmé un déficit statistiquement significatif de l'activité à 30 Hz dans le cortex auditif gauche chez les sujets dyslexiques par rapport aux participants contrôles à l'aide d'un t-test bilatéral non apparié entre les groupes ($T_{27} = 2,1$, $p < 0,05$, $d = 0,77$, Fig. 6 à gauche). Nous avons également confirmé que l'effet n'était pas présent dans le cortex auditif droit ($T_{27} = 0,068$, $p > 0,05$, $d = 0,02$, Fig. 6 à droite), indiquant que le déficit était bien latéralisé à gauche. De plus, il n'y avait pas de déficit à 30 Hz dans la région temporale supérieure entourant le cortex auditif dans les deux hémisphères, confirmant les observations précédentes.

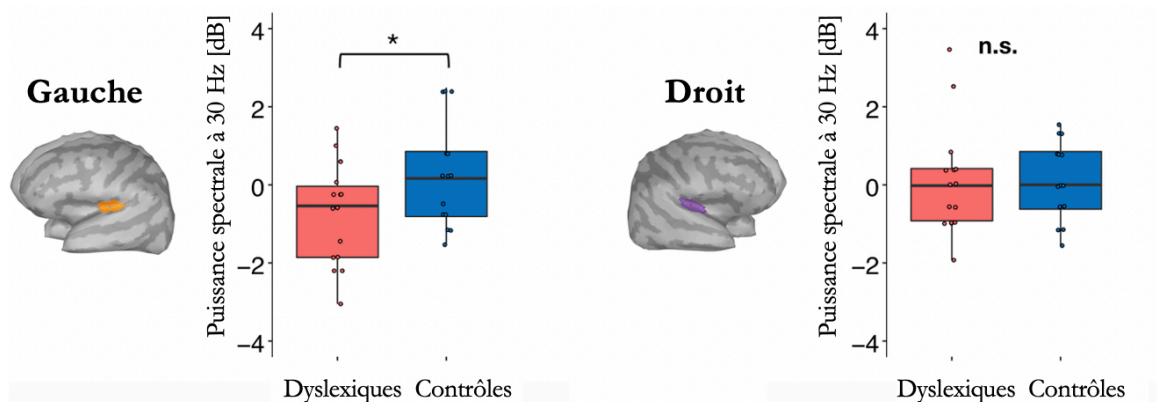


Figure 6. Représentation par boxplot de la puissance spectrale à 30 Hz (en dB) dans le cortex auditif gauche et droit chez les individus dyslexiques et contrôles.

A partir de ces premiers résultats qui suggèrent que les individus dyslexiques ont bien une puissance spectrale significativement inférieure à 30 Hz au niveau du cortex auditif par rapport aux individus normo-lecteur, nous avons pu dans un premier temps confirmer et répliquer les résultats proposés par Lehongre et al (2011).

3.2. Analyse de l'effet de la tACS chez les individus sains et dyslexiques

Nous avons ensuite exploré, grâce à l'analyse de la puissance spectrale au niveau de l'électrode FCz, l'électrode affichant la réponse évoquée la plus forte, si l'on pouvait retrouver une différence entre

l'activité oscillatoire à 30 Hz après la tACS à 30 Hz comparé à l'activité avant la tACS pour évaluer les effets de la stimulation sur la réponse auditive à 30 Hz séparément dans les deux groupes. Les résultats indiquent que la tACS a provoqué une augmentation significative de la puissance spectrale de l'ASSR à 30 Hz chez les individus dyslexiques ($T_{14} = 3,7$, $p < 0,01$, $d = 0,97$, figure 7, à gauche) alors qu'aucun effet n'a été trouvé dans le groupe contrôle ($T_{13} = 0,8$, $p = 0,43$, $d = 0,21$, figure 7, à droite).

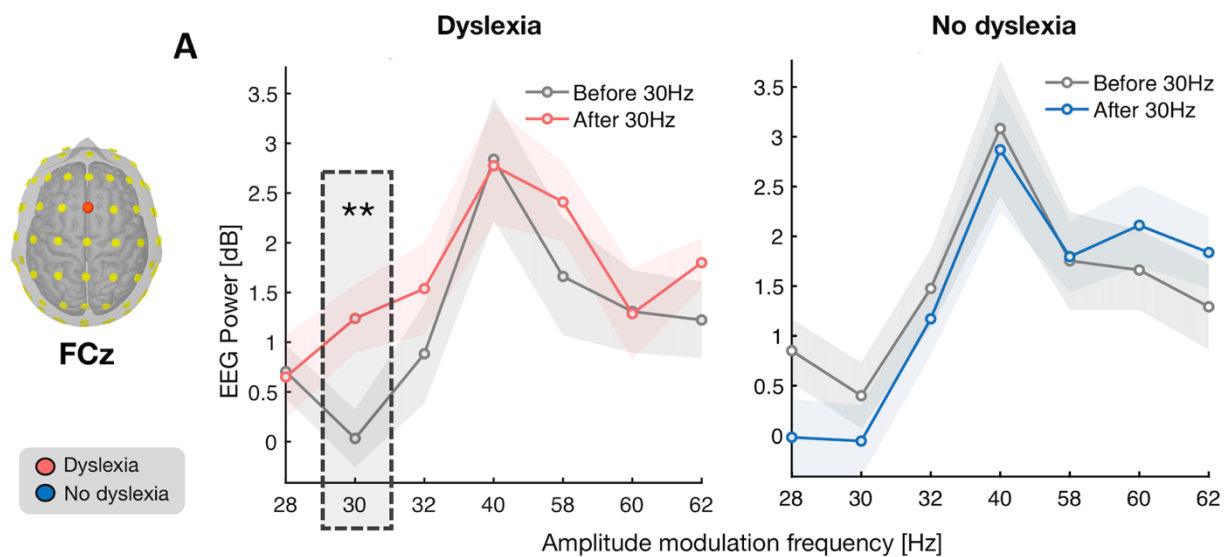


Figure 7. Modulation de puissance spectrale générée par la tACS à 30Hz pour les ASSR induites par les sons purs modulés en amplitude au niveau du cuir chevelu (électrode FCz).

Concernant la condition de stimulation à 60 Hz, nous n'avons trouvé aucune amélioration de la puissance spectrale de l'ASSR dans l'un ou l'autre groupe après 60 Hz ($T_{14} = -0,991$, $p > 0,05$, $d = 0,256$, Fig 8, boxplot de droite). Dans l'ensemble, ces résultats indiquent que la tACS à 30 Hz est sélectivement efficace pour la fréquence qui est perturbée dans le groupe dyslexique, et l'absence d'un tel effet chez le groupe contrôle montre que cette condition de stimulation est inefficace si l'activité oscillatoire est déjà présente.

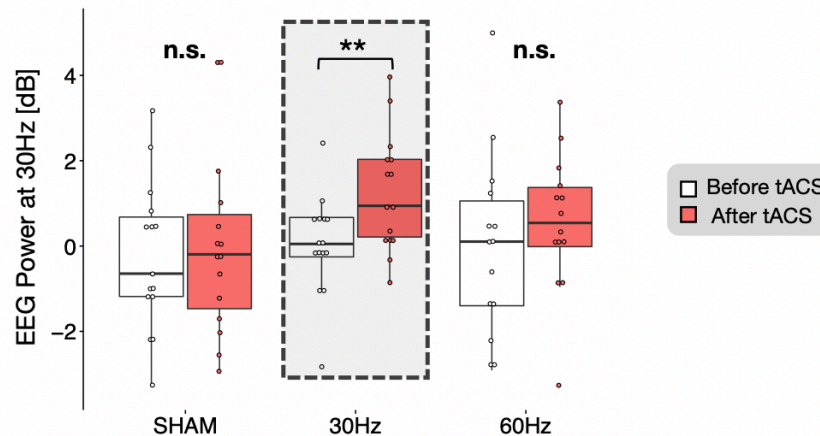


Figure 8. Représentation par boxplot (boîte à moustache) des différences de puissance spectrale entre les sessions avant la tACS et après la tACS pour les trois conditions de stimulation (SHAM à gauche, 30Hz au milieu en encadré et 60Hz à droite).

Nous avons de plus évalué l'effet de la tACS à 30 Hz sur les ASSR à 30 Hz dans le groupe dyslexique uniquement dans chacune des deux régions d'intérêt susmentionnées (c'est-à-dire le cortex auditif et le gyrus temporal supérieur) en effectuant une ANOVA à mesures répétées 2x2 avec les sessions (avant / après) et l'hémisphère (gauche / droite) comme facteurs. Dans le cortex auditif, nous avons trouvé une augmentation de la puissance spectrale significative après la session de stimulation à 30 Hz ($F_{1,14} = 13,71$, $p < 0,01$, $\eta^2p = 0,49$, Fig. 9A). Cet effet était dû à une augmentation significative de la réponse du cortex auditif gauche ($T_{14} = 3,4$, $p < 0,05$, $d = 0,88$, FDR corrigé, Fig. 9A), tandis que dans l'hémisphère droit, la différence avant / après tACS n'était pas significative ($T_{14} = 1,6$, $p > 0,05$, $d = 0,42$, FDR corrigé, figure 9A). Dans le gyrus temporal supérieur (STG), la même analyse a montré une interaction significative entre la session et l'hémisphère ($F_{1,14} = 10,6$, $p < 0,01$, $\eta^2p = 0,43$, Fig. 9B) : comme dans le cortex auditif, la tACS à 30 Hz a augmenté la réponse dans l'hémisphère gauche ($T_{14} = 2,8$, $p < 0,05$, $d = 0,72$, FDR corrigé), tandis que le STG droit a affiché une tendance dans la direction opposée ($T_{14} = -1,5$, $p = 0,1$, $d = 0,4$, FDR corrigé). Après la tACS à 30 Hz, donc, les ASSR étaient significativement plus forts dans le STG gauche que droit ($T_{14} = -3,1$, $p < 0,05$, $d = 0,8$, FDR corrigé), inversant le schéma que nous avons observé avant la stimulation ($T_{14} = 1,8$, $p = 0,12$, $d = 0,45$, FDR corrigé, Fig. 9B). Ces résultats indiquent que la tACS n'a pas seulement stimulé l'activité neuronale à 30 Hz dans les régions auditives gauches, mais a également rétabli sa dominance hémisphérique gauche. Dans le groupe contrôle, les mêmes analyses effectuées dans les deux mêmes régions d'intérêt n'ont pas révélé de différence significative entre l'hémisphère et la session.

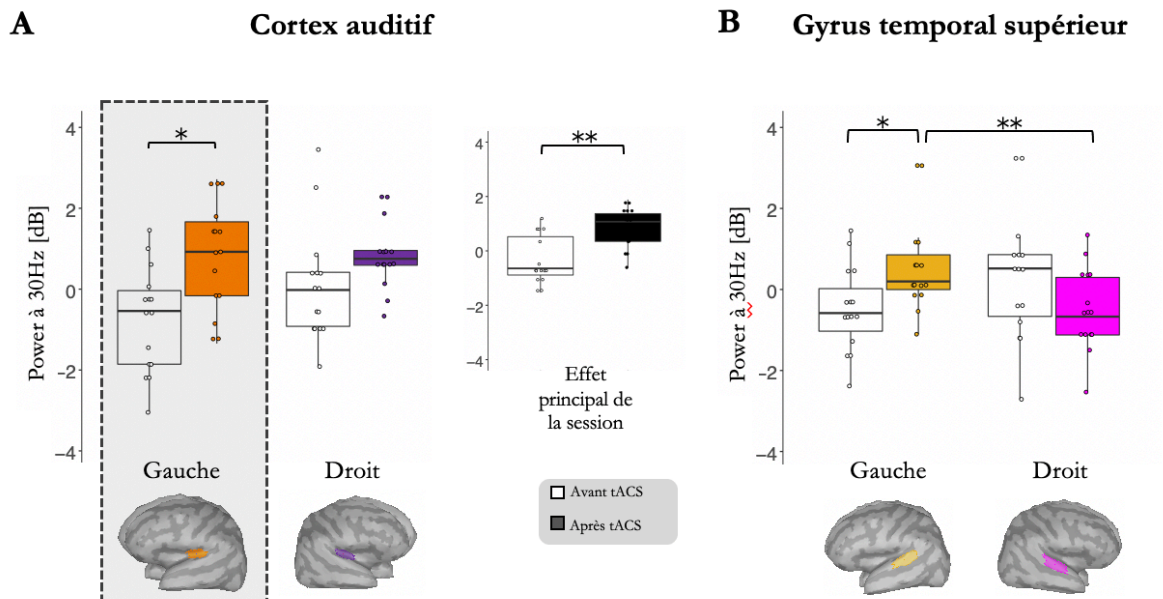


Figure 9. Représentation de l'augmentation de la puissance spectrale après la tACS à 30 Hz dans le cortex auditif (A) et le STG (B).

Nous avons ensuite cherché une relation entre la sévérité de la dyslexie et le gain dans le cortex auditif et avons trouvé une corrélation négative ($r = -0,46$, $p = 0,013$, Fig. 10).

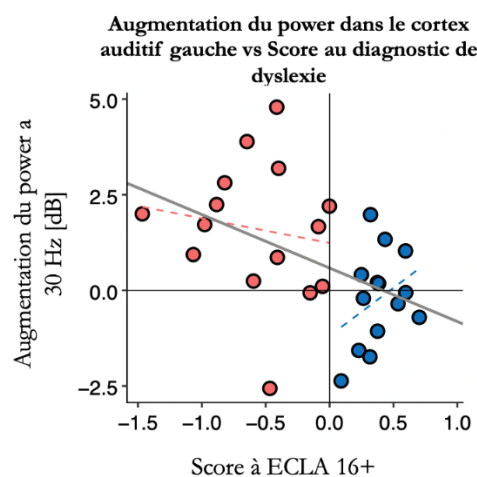


Figure 10. Représentation en nuage de point de la relation entre la sévérité de la dyslexie calculé à l'aide du test de l'Ecla 16+ et l'augmentation de la puissance spectrale à 30 Hz dans le cortex auditif gauche.

4. Résumé des résultats

Les premiers résultats démontrent que les individus atteints de dyslexie ont effectivement bien un trouble oscillatoire dans la bande fréquence gamma à 30 Hz, la fréquence de transition de formants permettant de distinguer deux sons minimaux entre eux. Pour conclure à cela, nous avons utilisé des sons modulés en amplitude entre 28 et 62 Hz pour analyser les ASSR et nous avons pu montrer que seule la fréquence de 30 Hz montrait une différence de réponse entre les sujets dyslexiques et les sujets contrôles. On peut donc maintenant comprendre que cette fréquence est fondamentale pour la l'encodage et le traitement des indices phonémiques (les transitions formantiques, les bursts consonantiques, etc.) dans la mesure où les individus dyslexiques ayant participé à cette étude démontrent d'important troubles phonémiques (calculés grâce à l'ECLA 16 +) ainsi qu'une puissance spectrale à 30 Hz au niveau du cortex auditif gauche moins important voir quasi-absente par rapport aux participants normo-lecteurs qui eux ne montrent pas de troubles de la conscience phonologique (ou du traitement phonémique).

Ces résultats ont une grande importance dans la mesure où peu d'études se sont pour l'instant penchées sur le sujet ; on n'en compte en effet que trois (Lallier et al., 2017; Lehongre et al., 2011; Molinaro et al., 2016) pour l'instant traitant des ondes gamma basses, les autres étant plutôt orientées sur un trouble des bandes de fréquence encore plus basses telles que la bande thêta ou bêta (Goswami, 2011b; Power et al., 2016).

Nous avons ici aussi mis en avant qu'uniquement les individus dyslexiques répondaient à la stimulation électrique transcrânienne à 30 Hz. De façon intéressante nous pouvons conclure que plus les personnes avaient des troubles dyslexiques sévères plus la puissance spectrale des oscillations à 30 Hz augmentait. Ces résultats impliquent donc que la tACS est une méthode ayant un impact positif sur les oscillations neuronales si l'on cible bien la fréquence déficitaire. Dans le chapitre suivant, nous allons aborder la question des effets que la tACS à 30 Hz a eu sur le comportement langagier des individus.

Etude 2 : Investigation des troubles phonologiques et de lecture et de leur réhabilitation chez les individus dyslexique grâce à la stimulation transcrânienne

1. Introduction

Comment l'être humain perçoit-il les sons et précisément les sons de parole humaine ? Comment parvient-il aussi rapidement à percevoir toutes les subtilités sonores de la parole, les extraire, les apparier

et les comprendre ? Pourquoi certaines personnes ne parviennent-elles pas à acquérir le langage, oral ou écrit de la même façon que les autres et comment agir pour traiter leurs troubles ? Ces questions concernant la perception et les troubles du langage constituent aujourd'hui encore un champ d'une très grande ampleur aussi bien en science du langage et de l'éducation, ou en psycholinguistique. Cette pluridisciplinarité révèle la richesse, l'importance mais également l'extrême complexité de cet outil, le langage, dont seul l'être humain dispose.

La problématique majeure est donc désormais de pouvoir lier les connaissances que nous possédons sur le fonctionnement cérébral qui est capable d'analyser chaque unité minimale contenue dans le discours par un effet de couplage entre le rythme des unités sonores contenues dans le flux de parole et les oscillations cérébrales lorsque le fonctionnement neuronal est correct, aux connaissances acquises concernant les lois qui régissent la structure hiérarchique de notre langue. Le but sera également de comprendre d'une part ce qui se passe d'un point de vue langagier lorsque l'activité oscillatoire est déviante comme chez les personnes atteintes de dyslexie et de comprendre les effets de la tACS à 30 Hz que nous avons vu permettre l'amplification de l'activité oscillatoire à 30 Hz dans le cortex auditif gauche ainsi que dans le STG gauche.

2. Matériel et méthodes

Afin de tester les effets de la tACS sur les compétences langagières de nos sujets (dyslexiques et contrôles) nous avons intégré lors de nos journées d'expérience des tests linguistiques réalisés avant l'enregistrement des ASSR, c'est-à-dire avant, juste après et une heure après l'application de la session de stimulation cérébrale (Fig. 1). L'expérience étant la même que celle décrite dans la première partie de ce travail, nous n'allons pas revenir sur la procédure en détail mais nous allons tout de même ici décrire les différents tests linguistiques proposés aux participants.

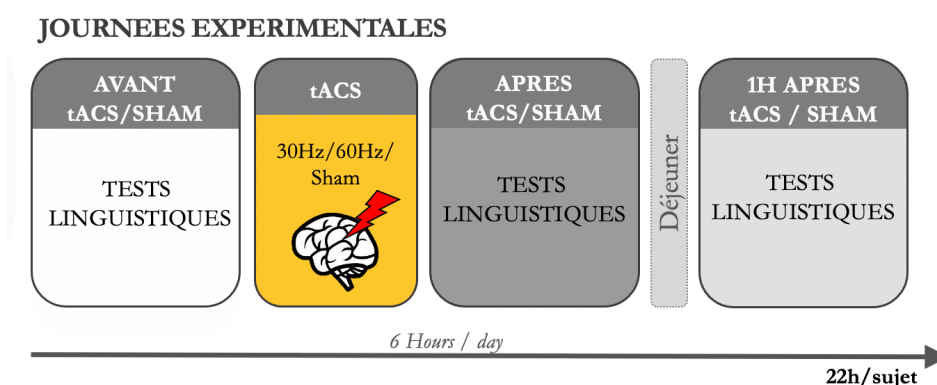


Figure 1. Représentation schématisée des journées expérimentales prenant en compte la passation des tests linguistiques.

2.1. Tests linguistiques

Trois batteries internes de tests linguistiques ont été conçues pour évaluer l'efficacité de la stimulation (tACS, annexe 5). Comme nous n'avions pas trouvé de batteries publiées de tests comportementaux qui nous auraient permis d'évaluer à plusieurs reprises (3 fois / jour pendant trois jours) les compétences linguistiques des participants tout en évitant l'effet d'apprentissage et la différence de niveau de difficulté, nous avons mis au point des tests personnalisés. Chaque batterie contenait trois tests différents, une tâche de répétition de pseudo-mots, un test de contrepèteries et un test de lecture de 3 minutes, où les éléments et les textes différaient entre ces trois batteries. Les niveaux de difficulté entre les trois batteries ont été soigneusement vérifiés en concevant des tests avec la même structure de syllabes et la même fréquence pour les trois tests de pseudo-mots, la même fréquence lexicale, et la même structure de texte pour le test de lecture de 3 minutes. Nous nous sommes attachés à vérifier si les tests linguistiques créés étaient bien à même de tester une amélioration ou chute des performances après la tACS. Pour cela, avant de commencer l'expérience nous avons validé ces tests sur vingt-cinq sujets normo-lecteur volontaires ; volontaires dans la mesure où ils n'ont pas été rémunérés pour cela et n'ont également pas participé à l'étude finale. Une analyse de variance unidirectionnelle à mesures répétées (ANOVA) n'a révélé aucun effet de session statistiquement significatif pour aucun des tests (répétition de pseudo-mots: $F_{1,24} = 0.56$, $p = 0.59$; contrepèterie: $F_{1,24} = 1.75$, $p = 0.38$; lecture: $F_{1,24} = 0.37$ $p = 0.64$).

Les stimuli auditifs utilisés dans les tests de langage ont été délivrés de manière binaurale à l'aide d'écouteurs à insertion (ER-2, Etymotic® Research Inc., Elk Grove Village, IL) à 70–75 dB SPL via une interface utilisateur graphique développée dans Matlab (version 2015). Les textes utilisés pour le test de lecture de 3 minutes ont été présentés sous format papier. Les réponses des participants ont été enregistrées via un microphone et ensuite analysées après transcription. Les données brutes (scores en termes de nombre d'erreurs, temps et erreurs de lecture) ont ensuite été contrôlées par un ingénieur certifié pour vérifier les erreurs potentielles.

2.1.1. *Test de répétition de pseudo-mots.*

Afin d'évaluer la conscience phonologique et plus précisément la représentation phonémique que nous nommerons ici conscience phonémique, nous avons créé 90 pseudo-mots comprenant entre 4 et 8 syllabes, ce qui donne trois exemplaires de test de 30 pseudo-mots chacun. Les participants devaient répéter le pseudo-mot immédiatement après l'avoir entendu. Ils ont effectué le test de répétition de

pseudo-mots sans limite de temps. Nous avons tout d'abord calculé le nombre d'erreurs phonémiques réalisées lors de la répétition des pseudo-mots chez chaque sujet et nous n'avons considéré que les erreurs correspondant à une erreur de perception et non à une erreur correspondant à un défaut de mémoire. En d'autres termes nous n'avons compté comme erreurs que les phonèmes qui étaient remplacé par un autre phonème n'ayant qu'un seul trait distinctif pouvant les distinguer (lieu d'articulation ou VOT (délai de voisement)). Ensuite, nous avons calculé un score de compétence de répétition syllabique qui correspond également à un score de mémoire à court terme. Nous avons donc ici calculé le nombre d'erreurs syllabiques qui étaient dues à un défaut de maintien en mémoire à court terme des combinaisons de syllabes générant les pseudo-mots proposés et qui n'étaient pas dues à un défaut de perception des phonèmes contenus dans les syllabes.

2.1.2. *Test de contrepèterie*

Le test de contrepèterie évalue la capacité des participants à transposer le premier phonème de deux mots. Les participants ont été invités à écouter deux mots réguliers et à les répéter après avoir effectué la transposition. Après 5 minutes, les participants ont dû arrêter le test pour éviter l'effet de fatigue. Nous avons extrait à partir de ce test un indice de conscience phonologique (qui prend en compte la conscience des phonèmes, des syllabes et des mots ainsi que la capacité à manipuler les unités minimales) en calculant le score combiné du nombre total de mots inversés terminés pendant la limite de temps de cinq minutes et le pourcentage de transpositions correctes par rapport au nombre total de mots inversés. Nous avons également évalué la conscience phonologique globale en considérant la moyenne de la vitesse de réponse et le nombre de bonne réponse.

2.1.3. *Test de lecture de 3 minutes*

Nous avons demandé aux participants de lire un extrait d'une publication de vulgarisation scientifique sur un sujet psychologique (la prise de décision) pendant 3 minutes afin d'évaluer leurs compétences en lecture et d'obtenir un indice de précision de décodage en lecture. Pour obtenir un indice de précision de lecture, qui visait à évaluer les compétences de décodage de mots, nous avons calculé chaque erreur de lecture due à des difficultés de décodage, c'est-à-dire en tenant compte des difficultés d'appariement (mapping) du graphème au phonème dans des mots à basse fréquence (rares) ou des mots nouveaux pour les participants. Nous avons compté comme erreur tout arrêt, hésitation trop longue ou bégaiement (dépassant la moyenne d'une pause normale entre les mots) sur les mots ayant nécessité un

décodage graphème/phonème, toute erreur de décodage (omission ou remplacement d'un phonème ou d'une syllabe par un autre).

Nous avons également tenu à établir un indice de rapidité de lecture en calculant le nombre total de mots lus durant la durée totale du test (trois minutes).

TESTS LINGUISTIQUES				
TESTS	EXEMPLES	NOMBRE D'ITEMS / TEMPS	COMPÉTENCES TESTÉES	SCORES INDEXES
Répétition de pseudo-mots	Drodonlintierpabacho	30	Conscience phonémique et phonologique mémoire à court terme	Conscience phonémique & mémoire à court terme
Contrepèserie	mots présentés: "patère" - "boudin" réponse attendue : "batère"-"poudin"	30 ou 5 minutes de test	Conscience phonologique conscience lexicale	Conscience phonologique & rapidité de réponse
Test de lecture	"certaines études ont mis l'accent sur le lien étroit entre l'émotion et la prise de décision. Il y a donc au moins trois processus distincts de prise de décision..."	3 minutes	Compétence de décodage graphème/phonème & Vitesse de lecture	Précision de lecture & Vitesse de lecture

Tableau 1. Présentation des tests linguistiques proposés aux participants dans le but de tester leurs compétences phonologiques.

2.2. Scores des tests linguistiques

Les scores de chaque participant pour chacun des index extraits ont été rééchelonnés entre 0 et 1 en prenant en compte l'ensemble des 30 participants, à savoir les participants dyslexiques et les participants normo-lecteur. Nous avons soustrait le score le plus bas à chaque score individuel puis divisé par le score le plus élevé moins le score le plus bas. Nous avons ensuite inversé, si nécessaire, le score pour obtenir une échelle entre 0 et 1 où 0 correspond à une faible performance et 1 à une haute performance. Le rééchelonnement était dans ce cas la solution appropriée pour présenter tous les scores et index avec 0 comme faible performance et 1 comme haute performance. À partir des scores rééchelonnés, nous avons calculé le changement (gain) entre la session avant tACS et la session après en soustrayant les scores après tACS à ceux avant tACS pour chaque condition de stimulation.

2.3. Analyses statistiques

Pour évaluer les différences de scores entre les deux groupes de sujets (contrôles et dyslexiques) nous avons réalisé une ANOVA avec le groupe comme facteur pour chaque condition de stimulation (Sham, 30 Hz et 60Hz).

Dans un premier temps, afin d'étudier l'impact de la tACS sur la représentation phonémique, nous avons analysé le score de conscience phonémique séparément pour chaque condition de tACS en

appliquant une ANOVA 2x3 avec mesures répétées avec les groupes (dyslexiques /contrôle) comme facteur inter-sujets et les sessions (avant / après / 1h après tACS) comme facteur intra-sujets. En cas d'effet significatif, nous avons décidé d'évaluer si les changements de conscience phonémique étaient également accompagnés de variations dans le traitement des syllabes, et avons analysé la mémoire à court terme syllabiques pour la session de tACS d'intérêt (30Hz). Nous avons ensuite analysé les indices extrait du test de contrepèterie et du test de lecture de texte séparément pour chaque groupe en appliquant là aussi une ANOVA 2x3 avec mesures répétées avec les groupes (dyslexiques /contrôle) comme facteur inter-sujets et les sessions (avant / après / 1h après tACS) comme facteur intra-sujets. Nous avons effectué des comparaisons post-hoc par paires à l'aide de tests t appariés, en corrigeant les comparaisons multiples avec la méthode du taux de fausses découvertes (FDR, Benjamini (1995)). Conformément à notre hypothèse, nous avons limité les comparaisons aux différences de performances entre les sessions au sein de la même condition tACS. Pour déterminer si les changements de comportement potentiels entre les sessions avant et après la stimulation tACS étaient liés au niveau de dyslexie, nous avons ensuite effectué des analyses de corrélation de Pearson entre le score ECLA 16+ et la différence de performance entre les deux sessions d'intérêt.

3. Résultats

Nous avons étudié dans la première grande partie de ce travail de recherche les données EEG acquises avant et après l'application d'une session de 20 minutes de tACS à 30Hz au niveau du lobe temporal gauche. Nous avons premièrement conclu que la tACS était bénéfique d'un point de vue neurophysiologique. Dans cette deuxième partie, nous allons examiner les résultats comportementaux et tenter de comprendre les effets de la réhabilitation oscillatoire chez nos sujets.

3.1. Analyse des performances des représentations phonémiques

Nous avons commencé par vérifier que les individus contrôles avaient de meilleures compétences phonémiques (test de répétition de pseudo-mots) que les sujets dyslexiques dans toutes les conditions de tACS. Nous avons réalisé une ANOVA avec le groupe comme facteur pour chaque condition de stimulation (SHAM, 30 Hz et 60Hz) qui a démontré que les individus dyslexiques avaient bien des performance moins élevées que les individus contrôles (**sham**: $F_{1,28} = 24,42$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,46$; **30 Hz**: $F_{1,28} = 17,9$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,39$; **60 Hz**: $F_{1,28} = 18,97$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,4$).

Concernant les effets de la tACS, nous avons constaté que, contrairement à l'une ou l'autre des conditions contrôles (60 Hz et Sham), la tACS à 30 Hz a statistiquement suscité une interaction significative entre le groupe (dyslexiques et contrôles) et la session (avant / après / une heure après, $F_{2,56} = 10,56$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,27$). Suite à ce résultat, nous avons analysé les performances séparément dans les deux groupes et avons trouvé un effet de la session uniquement dans le groupe de sujets dyslexiques (dyslexiques : $F_{2,28} = 7,51$, $p < 0,01$, $\eta^2p = 0,35$; contrôles : $F_{2,28} = 3,31$, $p > 0,05$, $\eta^2p = 0,19$). Les t-tests post-hoc ont révélé que la conscience phonémique s'est améliorée de manière significative après une session de 20 minutes de stimulation à 30 Hz ($T_{14} = 3,78$, $p < 0,01$, FDR corrigé, $d = 0,98$, Fig. 2), mais a diminué de nouveau à hauteur des performances principales une heure après la stimulation ($T_{14} = -2,56$, $p < 0,05$, FDR corrigé, $d = 0,66$, Fig 2).

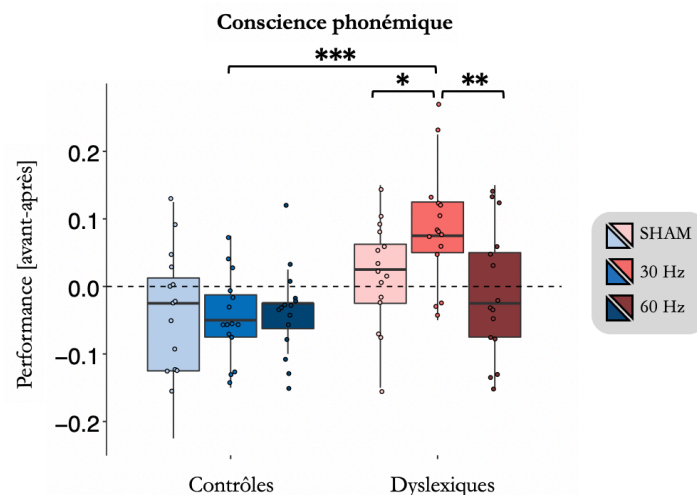


Figure 2. Représentation par boxplot des scores phonémiques chez les sujets contrôles et sujets dyslexiques pour les trois conditions de stimulation (SHAM, 30 Hz, 60 Hz)

Bien que plusieurs modèles s'accordent sur un déficit phonologique dans la dyslexie, il est encore discuté si le déficit fondamental sous-jacent survient au niveau phonémique ou syllabique. Pour aborder la spécificité de l'amélioration phonémique après une stimulation à 30 Hz, nous avons également évalué les erreurs syllabiques indiquant possiblement un déficit de la mémoire verbale à court-terme à partir du test de pseudo-mots. Nous avons donc comparé le nombre de syllabes omises ou mal répétées, avant et immédiatement après la tACS à 30 Hz uniquement chez les individus dyslexiques et avons constaté que la tACS n'améliorait pas le traitement de la mémoire à court terme nécessaire à la répétition de la syllabe ($T_{14} = 0,43$, $p > 0,05$, $d = 0,11$, Fig. 3). Notons cependant que puisque nous n'avons sondé que l'effet de tACS à 30 Hz, ce résultat ne contredit pas l'hypothèse selon laquelle des rythmes cérébraux plus lents jouent également un rôle dans la dyslexie en interférant au niveau syllabique.

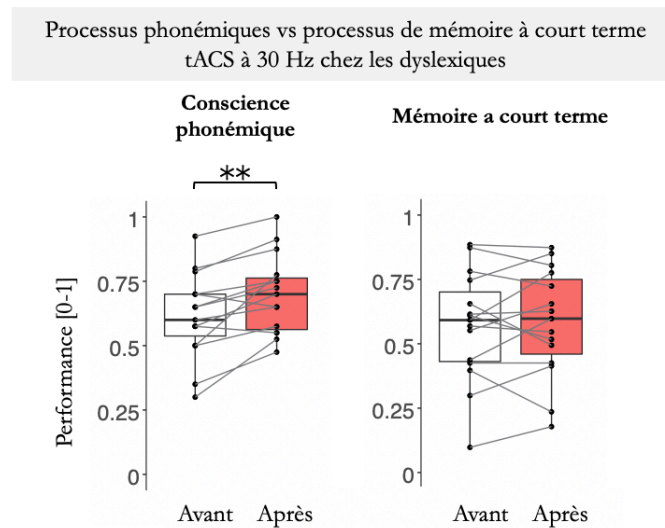


Figure 3. Représentation par boxplot des scores de conscience phonémique (à gauche) et de mémoire à court terme (à droite) avant et après la tACS à 30 Hz.

3.2. Analyse des résultats de conscience phonologique globale

Le test de contrepèterie a été analysé à la suite de ces premiers résultats. Nous avons testé s'il présentait une amélioration significative après chaque condition de stimulation (Sham, 30 Hz, 60 Hz) en prenant les conditions de stimulation et les deux groupes de sujets comme facteurs mais cela ne fut pas concluant ($F_{2,56} = 1.09$ $p > 0,3$, $\eta^2p = 0,14$, Fig. 5) bien que la tendance montre une légère amélioration immédiatement après la tACS chez le groupe d'individus dyslexiques. Nous avons également regardé si il y avait un effet principal de la session de stimulation mais nous n'avons pas obtenu de résultats statistiquement significatifs ($F_{2,56} = 1.57$, $p > 0,2$, $\eta^2p = 0,16$, Fig. 5).

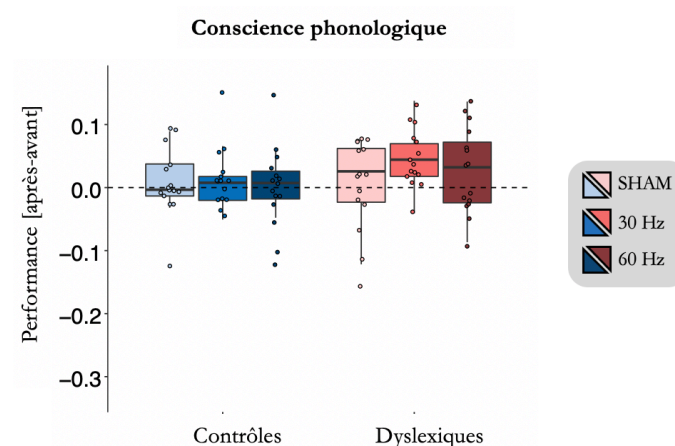


Figure 5. Représentation par boxplot des changements induits par les trois conditions de stimulation sur les scores de conscience phonologique obtenus grâce au test de contrepèterie

Afin de mieux comprendre le phénomène nous avons analysé séparément pour chaque groupe, les résultats avant, après et une heure après la tACS pour les trois conditions de stimulation comme montré sur la figure 6. Nous avons évalué la conscience phonologique globale en considérant la moyenne de la vitesse de réponse et le nombre de bonne réponse. L'ANOVA 3x3 avec condition tACS (SHAM / 30 Hz / 60 Hz) et session (avant, après et une heure après) n'a révélé aucun effet statistiquement significatif ni pour le groupe dyslexique (fig. 6 A), ni pour le groupe sans dyslexie (Fig. 6 B) Cependant, l'analyse exploratoire post-hoc a révélé une augmentation des performances immédiatement après la stimulation ($T14 = 3,86$, $p < 0,05$, FDR corrigé, $d = 0,99$, Fig. 6 A) pour le groupe de sujets dyslexiques.

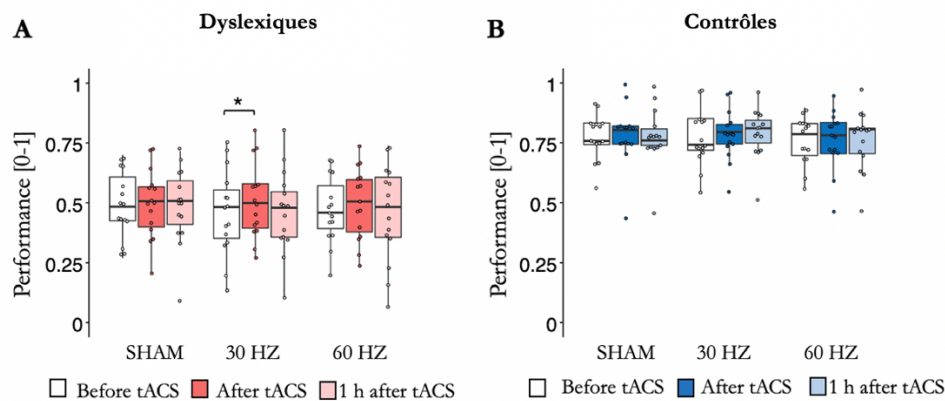


Figure 6. Représentation par boxplot des trois sessions de tests de contrepèterie pour les trois conditions de stimulation pour le groupe de participants dyslexiques (à gauche) et pour le groupe contrôle (à droite).

Bien que ces résultats n'aient pas été pas aussi probants que les résultats précédents portant sur la perception phonémique nous pouvons tout de même admettre qu'un renforcement des ondes oscillatoires dans la bande gamma au sein du cortex auditif gauche peut partiellement améliorer la conscience phonologique globale et dans ces conditions les performances au test de contrepèterie. Nous pouvons relativiser cette moindre augmentation par le fait que l'action d'échanger le premier son de deux mots ne demande pas uniquement une bonne conscience phonémique mais demande également un bonne conscience lexicale globale ainsi qu'une très bonne mémoire à court terme, des domaines de compétence qui ne sont pas supposés être impactés par la tACS à 30 Hz focalisée sur le cortex auditif, comme nous l'avons vu précédemment pour les résultats de mémoire à court terme dans la répétition syllabique.

3.3. Analyse des résultats de lecture

3.3.1. Compétence de décodage graphème/phonème

En ce qui concerne la précision de la lecture, les compétences de décodage graphème/phonème, nous avons trouvé un effet principal de la session dans le groupe de sujets dyslexiques pour la condition de tACS à 30 Hz ($F_{2,28} = 4,35$, $p < 0,02$, $\eta^2p = 0,23$, Fig. 7), indiquant une amélioration significative des performances après l'application de la tACS par rapport à la session précédant la stimulation ($T_{14} = 3,08$, $p < 0,05$, $d = 0,8$, FDR corrigé, Fig. 7). Cet effet correspond, en essence, à une diminution du nombre d'erreurs de décodage graphème/phonème lors de la lecture de mots peu connus ou de noms propres. Cet effet n'était pas présent chez les normo-lecteurs ($F_{2,28} = 1,63$, $p > 0,05$, $\eta^2p = 0,1$, Fig 7).

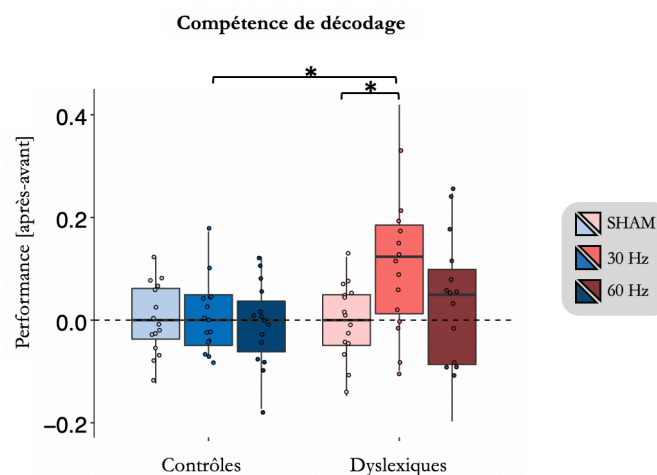


Figure 7. Représentation par boxplot des résultats de précision de lecture obtenus grâce au test de trois minutes de lecture pour le groupe de participants contrôle (à gauche) et le groupe de participants dyslexiques (à droite).

3.3.2. Effet de la tACS sur la vitesse de lecture

Concernant la vitesse de lecture, nous avons trouvé un effet de la session au sein des deux groupes (dyslexiques : $F_{2,28} = 5,96$, $p < 0,01$, $\eta^2p = 0,3$, contrôles : $F_{2,28} = 7,6$, $p < 0,01$, $\eta^2p = 0,35$, Fig. 8) indiquant que la vitesse de lecture a été ralentie immédiatement après toutes les conditions de stimulation, quelle que soit la sévérité de la dyslexie.

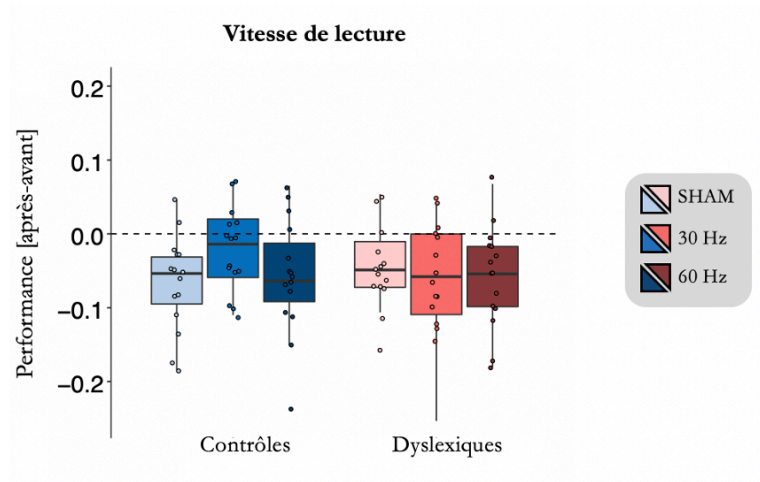


Figure 8. Représentation par boxplot des résultats de vitesse de lecture obtenus grâce au test de trois minutes de lecture pour le groupe de participants contrôles (à gauche) et le groupe de participants dyslexiques (à droite).

3.4. Corrélations entre l'amélioration des compétences langagière et la sévérité de dyslexie

Pour comprendre et caractériser davantage l'amélioration des compétences langagières après la tACS à 30 Hz calculées grâce aux différents tests linguistiques, nous avons effectué des analyses de corrélation de Pearson entre le score ECLA 16+ et la différence de performance entre les deux sessions d'intérêt (session avant la tACS et session après la tACS à 30 Hz).

Concernant l'amélioration des représentations phonémiques, nous avons corrélé le gain de conscience phonémique induit par la tACS à 30 Hz avec les compétences linguistiques mesurées par l'ECLA 16+. Nous avons trouvé une relation nettement négative ($r = -0,48$, $p < 0,01$, Fig. 9), indiquant que l'intervention était plus efficace chez les participants atteints de dyslexie sévère, même s'il y avait un certain degré de variabilité, y compris des effets significatifs chez certains les personnes diagnostiquées avec une dyslexie relativement légère.

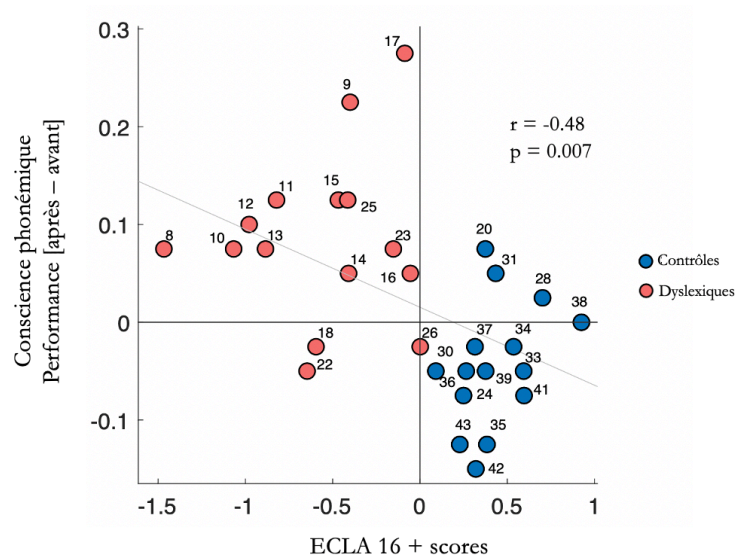


Figure 9. Représentation par nuage de points des relations entre les changements de performance de conscience phonémique induits par la tACS à 30 Hz (axe des Y) et les scores du diagnostic de dyslexie, l'ECLA 16 + (axe des X) chez les participants contrôles et dyslexiques.

Dans les mêmes conditions, nous avons calculé la corrélation entre le gain de conscience phonologique globale obtenu grâce au test de contrepèterie avec les compétences linguistiques mesurées par l'ECLA 16 +. Nous avons trouvé une relation là aussi nettement négative ($r = -0.39$, $p < 0,01$, Fig. 10) démontrant que plus l'individu est dyslexique plus ses compétences phonologiques globales sont améliorées par la tACS à 30 Hz.

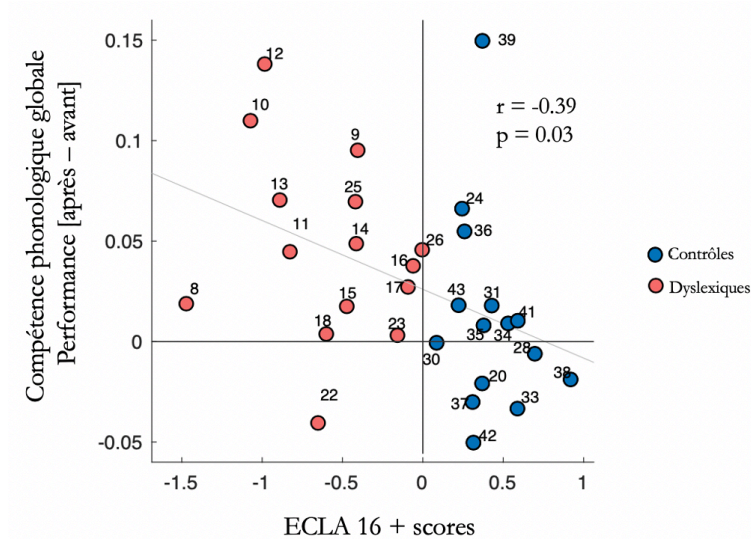


Figure 10. Représentation par nuage de points des relations entre les changements de performance de conscience phonologique globale induits par la tACS à 30 Hz (axe des Y) et les scores du diagnostic de dyslexie, l'ECLA 16 + (axe des X) chez les participants contrôles et dyslexiques.

En ce qui concerne l'amélioration des compétences de décodage nous avons décelé que le gain de précision de lecture est lui aussi corrélé au score ECLA 16 + entre les groupes (précision de lecture : $r = -0,50$, $p < 0,01$, Fig.11 à gauche) démontrant encore une fois que plus les compétences langagières des individus sont faibles plus leurs compétences de précision de lecture (compétences de décodage) s'améliorent après l'application d'une session de tACS à 30 Hz.

De plus, bien que les résultats en vitesse de lecture n'aient pas montré d'amélioration nous avons tout de même souhaité effectuer une analyse de corrélation de Pearson entre le score ECLA 16+ et la différence de performance entre les deux sessions d'intérêt (avant et après la stimulation) afin de tenter de comprendre cette diminution de vitesse de lecture. Les résultats démontrent une tendance inverse aux résultats précédemment exposés. En effet nous avons trouvé une tendance à une relation positive indiquant ici que plus les individus sont dyslexiques plus leur vitesse de lecture diminue après la tACS à 30 Hz ($r = 0,32$, $p = 0,09$, Fig.11 à droite). Cette observation fera l'objet d'une discussion critique.

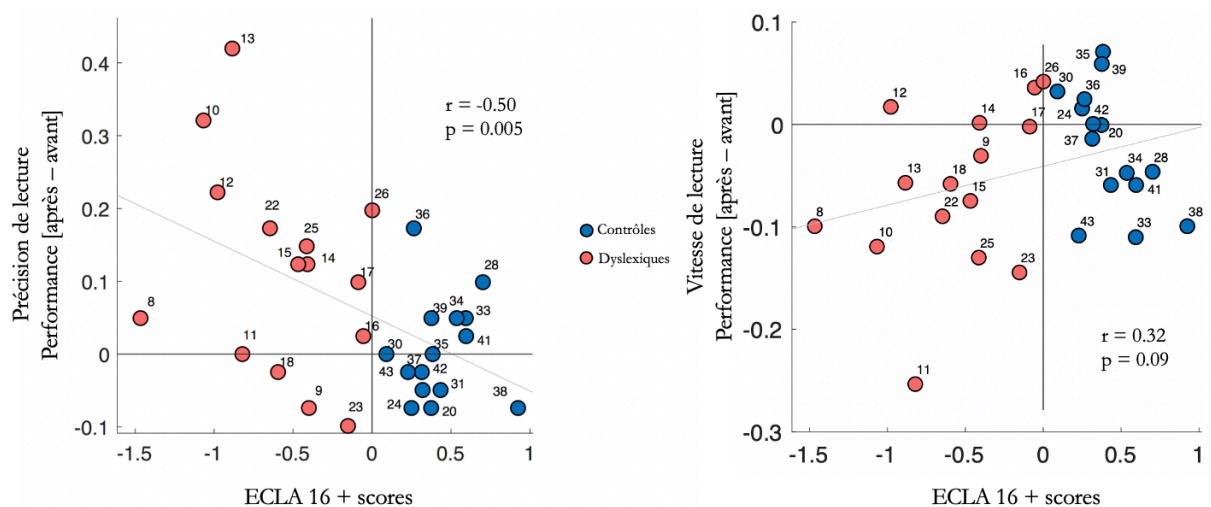


Figure 11. Représentation par nuage de points des relations entre les changements de performance de précision de lecture (à gauche) et de vitesse de lecture (à droite) induits par la tACS à 30 Hz (axe des Y) et les scores du diagnostic de dyslexie, l'ECLA 16 + (axe des X) chez les participants contrôles et dyslexiques.

Suite à ces résultats nous avons exploré la possibilité que l'effet de ralentissement soit corrélé à l'effet d'amélioration de précision de lecture. Cependant les analyses de corrélations n'ont pas montré de compromis entre vitesse et précision ($r = 0,01$, $p > 0,05$, Fig. 12). Ces résultats suggèrent que l'amélioration de la conscience phonologique se traduit directement sur la précision de lecture, tandis que la vitesse de lecture a été modifiée par un effet non spécifique de la stimulation.

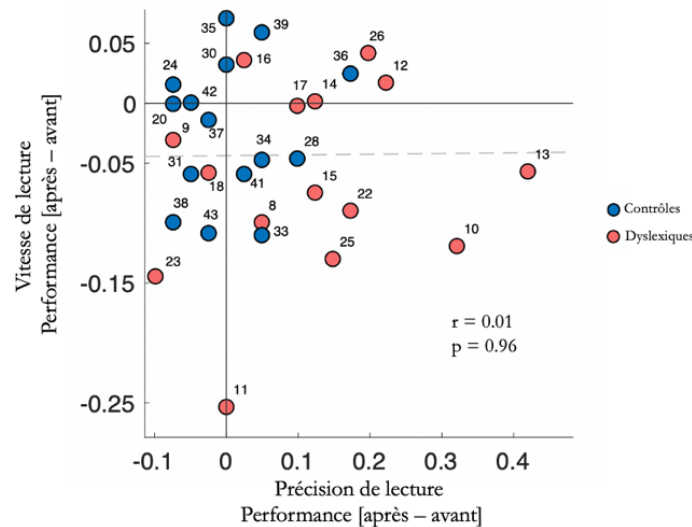


Figure 12. Représentation par nuage de point de la relation entre les changements induits par la tACS à 30 Hz sur les compétences de précision de lecture (axe des X) et les compétences de vitesse de lecture (axe des Y) chez les participants contrôles et dyslexiques.

4. Résumé des résultats

Les résultats obtenus dans ce chapitre indiquent clairement que la tACS à 30 Hz appliquée au niveau du lobe temporal gauche a un effet positif dans la mesure où elle permet une amélioration significative des compétences phonémiques, des compétences phonologiques globales ainsi que des compétence de décodage graphème/phonème.

Concernant le test de répétition de pseudo-mots, nous avons bien mis en évidence que l'amélioration était uniquement orientée sur les capacités phonémiques ; en effet, nous n'avons pas d'amélioration significative de la mémoire à court terme que nous avons mesuré en extrayant les erreurs de répétition syllabique qui n'avaient pas de lien avec un déficit de la perception phonémique. Cette amélioration de conscience phonémique peut aussi être mis en relation avec l'amélioration de la conscience phonologique globale. Nous avons en effet vu une forte tendance à l'amélioration de la conscience phonologique mesurée à l'aide du test de contrepèterie mais les résultats n'étaient pas aussi forts que l'amélioration de la conscience phonémique. Nous pouvons alors penser que les changements de perception phonémique permettent, par effet de cascade, une amélioration relative de la conscience phonologique c'est-à-dire la capacité à se représenter et à manipuler les unités minimales qui composent les mots. Fait intéressant, nous avons pu également mettre en lien le taux d'amélioration aux tests linguistiques avec le niveau de compétence langagière des participants. Succinctement, nous avons bien vu que plus les individus avaient des scores au test de l'ECLA 16+ faibles, plus leurs compétences phonémiques, phonologiques et de de décodage lors du test de lecture augmentaient pouvant aller jusqu'à 15% d'amélioration.

Les résultats sur les compétences de lecture que nous venons d'obtenir se sont cependant montrés mitigés. En effet, d'une part les compétences de décodage (précision de lecture) ont significativement augmenté chez le groupe d'individus dyslexiques après la stimulation à 30Hz mais la vitesse de lecture a plutôt montré une tendance à diminuer sans que cela puisse être expliqué par un compromis entre précision de lecture et vitesse. Nous allons donc tenter maintenant de comprendre ces résultats en étudiant les relations entre les compétences de lecture et les effets de la tACS à 30 Hz sur le cortex auditif et le STG gauche.

Etude 3 : Analyse de l'effet de l'augmentation de la puissance spectrale à 30 Hz dans le cortex auditif et le STG sur les compétences de lecture chez l'individu sain et dyslexique.

Article en préparation: Nicolle, J., Marchesotti, S., Déaux, E., Merlet, I., & Giraud, A.L (2021) Antagonist effects of auditory cortex tACS on phonemic and prosodic processing (in prep for Neurobiology of language).

1. Introduction

Nous avons vu dans les deux premières études de ce travail que la tACS à 30 Hz avait un effet à la fois sur la puissance spectrale des oscillations cérébrales à 30 Hz dans le cortex auditif gauche et le STG gauche et à la fois sur les compétences phonémiques, phonologiques et les compétences de décodage graphème/phonème (précision de lecture) dans la mesure où celles-ci augmentaient immédiatement après la tACS à 30 Hz chez les sujets atteints de dyslexie. Nous souhaitons dans le cadre de cette dernière partie étudier avec plus de précision les relations entre les changements opérés sur l'activité cérébrale et les changements comportementaux. Notre intérêt sera majoritairement focalisé sur les compétences de lecture dans la mesure où celles-ci requièrent aussi bien le bon fonctionnement des aires auditives gauches pour les compétences de décodage (précision de lecture) car celles-ci reposent sur une bonne conscience phonémique, latéralisée à gauche, mais requièrent aussi, pour les compétences prosodiques le bon fonctionnement des aires du langage à droite. Notre intérêt est également de comprendre avec plus de précision les résultats au test de lecture qui se sont montrés mitigés. En effet, bien que nous ayons pu montrer une amélioration des compétences de décodage graphème-phonème, les données effectuées jusque-là n'ont pas permis d'expliquer précisément les raisons de la diminution de vitesse de lecture dans les deux groupes de participants. Pour cette raison, nous allons explorer une nouvelle dimension des

compétences de lecture qui est la prosodie, une compétence qui est, selon la littérature, essentiellement latéralisée dans l'hémisphère droit.

Nous émettons donc ici l'hypothèse que les compétences de lecture avant la stimulation ainsi que les changements induits par la tACS sont à la fois dépendant du bon encodage phonémique et de la sévérité de la dyslexie mais aussi dépendant de la latéralisation de l'activité neuronale dans la bande gamma (30 Hz). Notre hypothèse concernant la prosodie est donc que celle-ci serait altérée par la tACS dans la mesure où la stimulation par tACS à 30 Hz provoque une relatéralisation du traitement phonémique à gauche, au détriment d'un traitement plus global basé sur les indices prosodiques localisé à droite.

2. Matériels et méthodes

2.1. Compétences de lecture et de prosodie et latéralisation hémisphérique

2.1.1. Test de lecture de 3 minutes

Comme nous l'avons vu dans l'étude précédente nous avons extrait différents index représentant les compétences linguistiques des participants à l'étude. Nous avons, pour rappel, extrait un index de conscience phonémique, de mémoire verbale à court terme, de conscience phonologique globale et deux indices de compétences de lecture qui ont été extraits grâce au test de lecture de 3 minutes, un indice de précision de lecture qui correspond aux compétences de décodage graphème/phonème obtenu par un calcul d'erreur de décodage et un indice de rapidité de lecture qui correspond au nombre total de mots lus durant toute la durée du test.

Nous avons tenu à établir un indice supplémentaire à partir du test de lecture afin de comprendre les résultats que nous avons obtenus dans la deuxième étude de ce travail. Il s'agit d'un score de compétences prosodiques qui correspondent à la capacité à lire à haute voix un texte avec une vitesse et une fluence correcte qui correspond à une compétence de fluidité multidimensionnelle comprenant un phrasé correct, de l'intonation et du rythme ; ces capacités sont couplées à l'utilisation correcte d'informations supplémentaires telles que la ponctuation et la structure syntaxique du texte. Pour cela nous avons utilisé le test de trois minutes de lecture où nous avons extrait un ratio entre chaque pause et intonation correcte et les coupures et intonations inappropriées produites pendant le temps total de lecture. Cet index reflète les capacités de phrasé et de rythme ainsi que l'intégration de la ponctuation et la compréhension du texte. Pour ce nouvel indice, nous avons calculé un Z-score où les scores négatifs représentent un faible niveau de prosodie naturelle et les scores positifs un niveau de prosodie élevé.

2.1.2. *Index de latéralité et de gain de puissance spectrale*

Afin de réaliser nos analyses sur les relations entre les changements opérés sur l'activité cérébrale et les changements comportementaux nous avons extrait, grâce aux analyses de puissance spectrale à 30 Hz dans le cortex auditif et dans le STG, un index de latéralité avant la tACS et après la tACS. Pour cela, nous avons soustrait l'indice de puissance spectrale obtenu dans le cortex auditif et le STG gauche par l'indice de puissance spectrale dans le cortex auditif et le STG droit. Un index positif indique donc une latéralisation de la puissance spectrale dans le cortex auditif ou le STG plus forte à gauche alors qu'un index négatif indique plutôt une latéralisation à droite. Nous avons également calculé un gain de puissance spectrale à 30 Hz entre les sessions de tACS après et avant dans le cortex auditif gauche et dans le STG gauche. De plus, nous avons calculé un indice de relatéralisation prenant en compte l'indice de latéralisation après la tACS moins la session avant la tACS.

2.1.3. *Analyses statistiques*

Concernant ces nouvelles analyses sur les compétences de lecture, nous nous sommes uniquement concentrées sur la condition de stimulation à 30 Hz (car elle était la seule à montrer des effets significatifs) et sur les sessions avant et immédiatement après la tACS dans la mesure où les précédents résultats neurophysiologiques et comportementaux n'ont pas démontré d'effets une heure après la tACS. Afin de comprendre les liens existants entre les compétences de lecture avant la tACS de chaque sujet et les variables précédemment analysées (niveau de dyslexie et latéralisation cérébrale) nous avons utilisé la méthode statistique du modèle linéaire mixte prenant en compte comme variable dépendante les scores de lecture et comme variable indépendante l'état individuel avant tACS, à savoir la latéralité dans le cortex auditif (gyrus de Heschl) et dans le gyrus temporal supérieur (STG), le score au test de l'ECLA 16+ et le score de conscience phonémique avant tACS.

Ensuite, nous avons analysé l'effet de la tACS à 30Hz sur les scores de lecture en comparant plusieurs modèles intégrant différentes variables indépendantes. Pour comparer les modèles et déterminer quelle combinaison de paramètres expliquait le mieux la variation, nous avons utilisé l'approche d'inférence multimodèles, qui compare les modèles à l'aide d'une technique de classement pondéré (par exemple, AIC), pour quantifier le rapport relatif pour chacun des modèles. Pour l'inférence, nous avons utilisé les poids des modèles, qui représentent des rapports normalisés de la différence de l'AIC entre le modèle cible et le meilleur modèle de l'ensemble candidat. Ces poids de modèle peuvent être interprétés comme des probabilités qu'un modèle donné soit le meilleur modèle de notre ensemble de modèles (Anderson, 2007).

3. Résultats

3.1. Compétence de lecture avant la tACS

Comme nous l'avons vu dans l'introduction de ce chapitre, les sujets dyslexiques souffrent d'un déficit de décodage du graphème au phonème dès leur plus jeune âge ce qui impacte leur accès à la lecture automatisée et à une bonne prosodie et cela toujours à l'âge adulte. On comprend donc alors qu'à l'âge adulte, l'accès à une bonne conscience phonémique et phonologique est toujours nécessaire et représente le pilier principal d'une lecture fluide. Afin de comprendre pourquoi la tACS a permis d'améliorer les compétences de décodage graphème/phonème mais pas la vitesse de lecture, nous allons dans un premier temps explorer les relations entre les compétences de lecture (précision et vitesse de lecture ainsi que compétence prosodique) et latéralisation hémisphérique avant la tACS.

Nous avons donc utilisé la méthode statistique du model linéaire mixte prenant en compte comme variable dépendante les scores de précision de lecture (nombre d'erreur de décodage graphème/phonème) et comme variable indépendante l'état individuel avant la tACS, c'est-à-dire la latéralité dans le cortex auditif (gyrus de Heschl) et dans le STG, le score au test de l'ECLA 16+ et le score de conscience phonémique avant tACS. Les résultats montrent que seul le score à l'ECLA 16 + est significatif et peut donc expliquer le niveau de performance aux scores de précision de lecture ($\beta = -7.74$, $t_{24} = -4.18$ $p < 0,01$). Les données de latéralisation au sein du cortex auditif et du STG ne semblent pas pouvoir expliquer, pour tous les sujets (dyslexiques et contrôles) les compétences de base (cortex auditif : $\beta = 0.21$, $t_{24} = 0.39$ $p = 0.70$; STG : $\beta = -0.30$, $t_{24} = -0.44$ $p = 0.66$).

Nous avons ensuite utilisé le même modèle avec comme variable dépendante les scores de vitesse de lecture (nombre total de mots lus). Là encore, les résultats indiquent que seul le score à l'ECLA 16 + peut expliquer les compétences de vitesse de lecture avant l'application de la tACS à 30 Hz ($\beta = 95.31$, $t_{24} = 5.16$ $p < 0,001$). Les données de latéralisation au sein du cortex auditif et du STG ne sont, là non plus, pas significatives (cortex auditif : $\beta = 1.11$, $t_{24} = 0.20$ $p = 0.84$; STG : $\beta = -2.00$, $t_{24} = -0.30$ $p = 0.76$).

En relation avec la littérature qui décrit la prosodie comme fortement latéralisée dans l'hémisphère droit, nous avons tenté d'expliquer ce qui pourrait expliquer les capacités prosodiques avant l'application de la tACS. Nous avons constaté que les compétences en lecture prosodique étaient plus faibles chez les dyslexiques ($\beta = 0.88$, $t_{24} = 2.39$ $p < 0,01$, figure 1 à gauche) et chez les individus présentant une latéralisation gauche dans le STG ($\beta = -0,30$, $t_{24} = -2.32$ $p < 0.05$, figure 1 à droite). De plus, nous n'avons pas trouvé d'interaction significative entre le groupe et la latéralité dans le STG ($\beta = -0,09$, $t_{24} = 0,51$ $p = 0,60$).

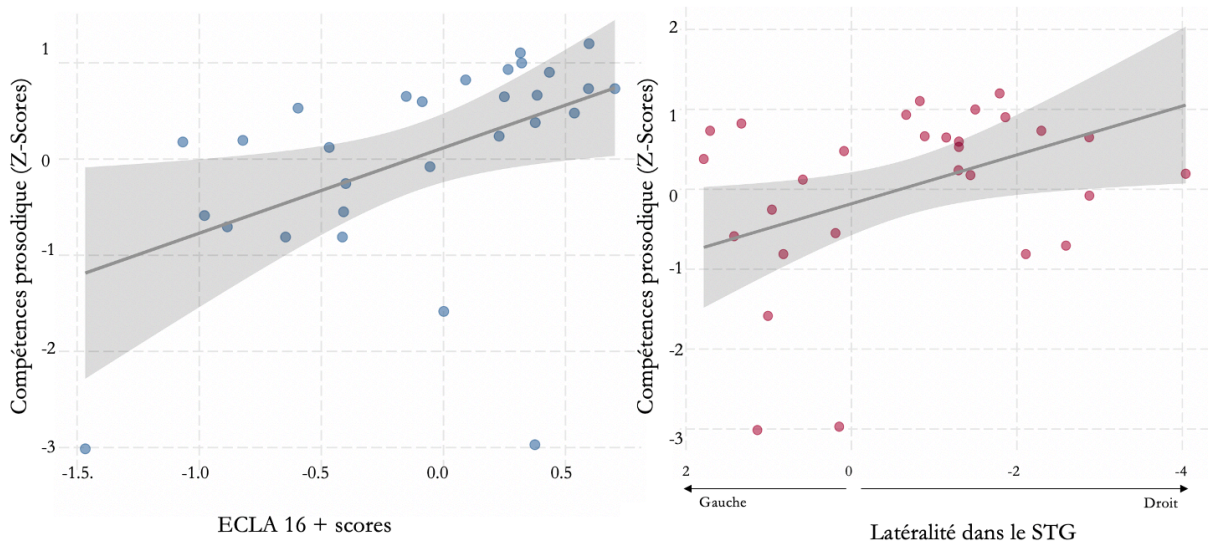


Figure 1. Représentation des modèles linéaires impliquant les scores à l'ECLA 16 + (à droite) et la latéralité dans le STG (à gauche) en relation avec les compétences prosodiques (Z-scores) avant la tACS.

3.2. Effet de l'augmentation de la puissance spectrale à 30 Hz sur les compétences de lecture

Nous avons ici étudié quel aspect des changements d'état du cerveau dans le cortex auditif et dans le STG induit par la tACS à 30 Hz a influencé le changement des scores de lecture en utilisant l'inférence multi-modèle, en sélectionnant le meilleur modèle de notre ensemble de modèles en utilisant le classement par AIC.

Concernant les scores de précision de lecture qui sont ici représenté sous le format du nombre d'erreur de décodage commises, le meilleur modèle est le modèle incluant le niveau de sévérité de dyslexie calculé grâce à l'ECLA 16+. Le modèle mixte linéaire intégrant la sévérité de la dyslexie montre que l'amélioration du décodage de lecture est fortement liée à l'état de dyslexie dans le sens d'une diminution du nombre d'erreurs de décodage pour les sujets les plus dyslexiques ($\beta = -4,24$, $t = -2,48$, $p = 0,02$) comme déjà démontré dans les résultats de la deuxième étude. Les changements opérés par la tACS sur la *précision* de la lecture ne sont donc pas corrélés à un changement de l'activité oscillatoire dans le cortex auditif ou le STG bilatéralement.

Nous avons également effectué les mêmes analyses statistiques pour l'indice de *vitesse* de lecture. Le modèle qui a été le plus capable d'expliquer le changement de vitesse de lecture est celui qui inclut la dyslexie et la relatéralisation dans le STG et le gyrus de Heschl avec un poids de 0,77. Pour comprendre laquelle des trois variables indépendantes incluses dans notre modèle explique de changement de vitesse de lecture, nous avons réalisé un modèle linéaire qui n'a cependant pas montré d'effet principal pour aucune des variables. Ce résultat peut dans ce cas indiquer que le changement de vitesse de lecture n'est

modifié ni par la sévérité de la dyslexie ni par le changement de latéralité individuelle, mais est altéré en raison du changement de la manière de lire.

Concernant l'index de compétence prosodique, le modèle qui s'est montré le plus fort était le modèle qui incluait le gain de puissance spectrale à 30 Hz après la tACS à 30 Hz dans le cortex auditif gauche et dans le STG gauche et les scores à l'ECLA 16+. Nous avons ensuite calculé un modèle linéaire du modèle avec le poids le plus important et nous n'avons trouvé qu'un effet principal du gain de puissance dans le STG gauche après la tACS à 30 Hz montrant que plus le gain de puissance spectrale dans le STG gauche est important, plus les compétences de prosodie diminuent. Cet effet reflète également que la population dyslexique ou contrôle qui a perdu de la puissance spectrale à 30 Hz dans le STG gauche a augmenté ses compétences prosodiques ($\beta = -0,4$, $t = -2,30$, $p = 0,03$). Les autres variables, les scores ECLA 16+ et le gain de puissance dans le cortex auditif gauche n'ont pas montré d'effet statistique principal (ECLA 16+ = $\beta = -0,4$, $t = -1,06$, $p = 0,26$, gain de puissance dans le cortex auditif gauche = $\beta = 0,02$, $t = 1,32$, $p = 0,20$).

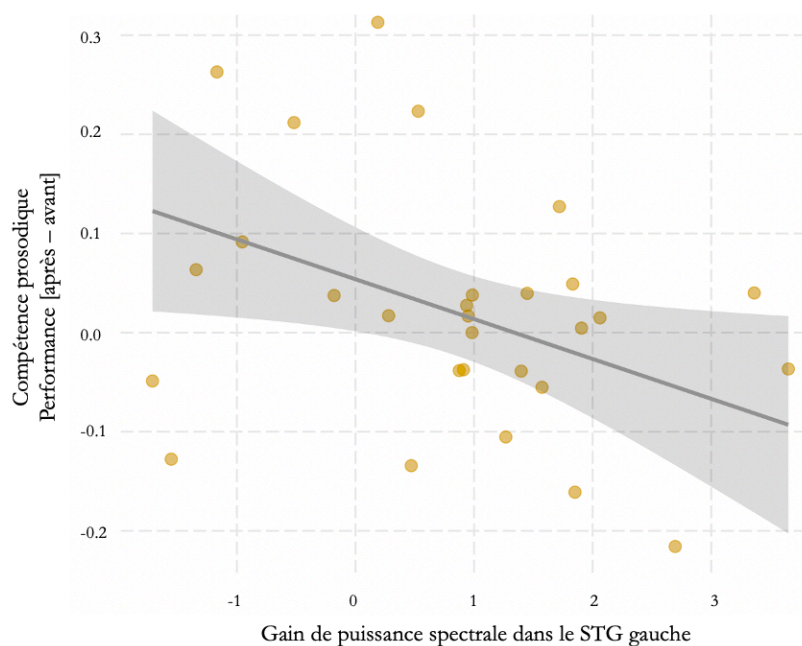


Figure 2. Représentation par nuage de point du modèle linéaire impliquant le gain de puissance spectrale dans le STG gauche (axe des X) et le gain de performance de compétence prosodique après la tACS à 30 Hz (axe des Y).

4. Résumé des résultats

Comme nous l'avons vu dans la seconde étude de ce travail, les compétences de précision de lecture et donc de décodage graphème/phonème sont fortement dépendantes de la sévérité de la dyslexie. En effet, plus les individus sont atteints par les troubles de la dyslexie plus leurs compétences de décodage graphème/phonème sont altérées. De plus nous avons confirmé grâce à l'approche d'inférence

multimodèle que l'amélioration de précision de lecture est aussi uniquement dépendante de leurs compétences langagières avant la tACS dans la mesure où plus l'individu est dyslexique plus ses compétences s'améliore après la tACS.

Nos résultats ont de plus démontré que plus la dyslexie est élevée, plus le niveau de prosodie avant la tACS est faible et également que les sujets qui ont une puissance spectrale plus forte dans le cortex auditif droit à 30 Hz lorsqu'ils écoutent un son modulé en amplitude de 30 Hz ont de meilleures capacités prosodique. Ces premiers résultats sont en ligne avec la littérature suggérant que les dyslexiques sont moins performants en compétences prosodiques que les normo-lecteurs et que les capacités prosodiques sont également plus latéralisées dans l'hémisphère droit (Seydell-Greenwald et al., 2020; Zatorre & Belin, 2001).

D'après nos résultats, nous avons compris que la tACS à 30 Hz sur les zones auditives gauches perturbait les capacités prosodiques et les capacités de lecture globale. Nous avons en effet montré ici spécifiquement que les sujets qui utilisaient le plus les oscillations neuronales à 30 Hz dans le STG droit avant la tACS et qui gagnaient le plus de puissance de 30 Hz après le tACS dans le STG gauche diminuaient leurs capacités de lecture prosodie. Nous proposons ici, qu'en augmentant l'activité neuronale à 30 Hz dans l'hémisphère gauche et donc les oscillations neuronales spécifiques capables de suivre le rythme phonémique nous renforçons un mode de lecture phonologique qui dans ce cas impacte négativement la méthode de lecture globale, la méthode spécifique permettant de bons processus de prosodie et de vitesse. On sait en effet qu'à l'âge adulte le processus de lecture est profondément enraciné dans des voies cérébrales spécifiques où l'hémisphère droit joue un rôle crucial pour la stratégie globale de lecture et pour adapter correctement l'expression, l'intonation et le timing en fonction de la ponctuation et de la structure syntaxique des phrases. Une telle indication peut, dans ce cas, expliquer pourquoi les sujets ont diminué leurs capacités de vitesse de lecture : avec plus de ressources neuronales accordées à un mode de lecture phonologique, la vitesse et l'automatisme diminuent mais sans compromis entre vitesse et précision.

Discussion générale

L'objectif de ce travail de thèse était 1) de comprendre avec précision comment les neurones se synchronisent avec l'entrée auditive pour le décoder et le traiter afin d'accéder au sens du langage oral et par effet de cascade à accéder à l'acquisition et à la maîtrise du langage écrit, 2) d'identifier avec précision quels sont les mécanismes neuronaux déviants chez les individus atteints de troubles de la dyslexie et 3) de tester une méthode de stimulation transcrânienne par courant alternatif (tACS), afin de rétablir l'activité neurale déviante chez une population de participants atteints de dyslexie. Nous avons émis l'hypothèse principale que l'application d'une session de tACS à 30 Hz pourrait rétablir le fonctionnement normal des ondes gamma dans le cortex auditif gauche chez les sujets dyslexiques par effet de relatérialisation. Nous avons aussi émis l'hypothèse que le rétablissement des ondes corticales dans la bande gamma à 30 Hz au niveau du cortex auditif gauche pouvait réduire les déficits linguistiques chez les personnes dyslexiques, c'est-à-dire améliorer leurs compétences phonémiques et par effet de cascade leurs compétences phonologiques globales ainsi que leur capacité de décodage lors de la lecture de texte à haute voix. L'étude que nous avons menée nous a permis d'avoir un aperçu précis du rôle des oscillations cérébrales à 30 Hz et de comprendre le déficit oscillatoire chez l'individu dyslexique et ses conséquences sur ses compétences langagières. Nous avons aussi pu corroborer l'idée que la tACS a un effet d'entraînement des oscillations neuronales qui permet l'amélioration des compétences liées à la fréquence oscillatoire dans une zone précise du cortex cérébral.

1. Résumé des résultats

Conformément à nos hypothèses nous avons montré que les sujets dyslexiques montrent une activité oscillatoire dans la bande gamma à 30 Hz moins marquée que les individus normo-lecteur dans le cortex auditif gauche. Ces résultats rejoignent les résultats proposés par Lehongre et al (2011) qui ont démontré que l'activité oscillatoire au sein du cortex temporal gauche, en particulier dans le *planum temporale* et le sillon temporal supérieur est bien présente à la fréquence phonémique (25-35 Hz) chez les normo-lecteurs lors de l'écoute de sons modulés en amplitude à 30 Hz mais pas chez les individus dyslexiques qui montrent plutôt une réponse augmentée aux sons au-dessus de 40 Hz dans le cortex temporal (auditif) droit. Nous pouvons donc, grâce à ces résultats comprendre que les oscillations cérébrales à 30 Hz sont fondamentales pour parvenir à un bon encodage des transitions formantiques. En effet, une relation forte peut être établie entre le déficit de conscience phonémique des individus dyslexiques qui a été démontré par les tests de l'ECLA 16 + et la première batterie de test de répétition de pseudo-mots et le déficit

oscillatoire à 30 Hz qui a été démontré lors de l'analyse de la puissance spectrale à 30 Hz dans le cortex auditif gauche.

Concernant l'effet des différentes conditions de tACS (30 Hz, 60 Hz et Sham), nous avons vu que seule la condition de stimulation à 30 Hz avait un effet sur les oscillations cérébrales. Nous avons en effet remarqué que la tACS à 30 Hz était capable d'amplifier les oscillations cérébrales à 30 Hz dans le cortex auditif gauche lorsque les participants écoutaient des sons modulés en amplitude à une fréquence de 30 Hz. De plus, fait intéressant, l'effet de cette condition de tACS était plus fort chez les participants plus sévèrement dyslexiques, les participants ayant démontré justement une quasi-absence d'activité neuronale dans cette bande de fréquence. Chez les participants contrôles aucune augmentation de la puissance spectrale à 30 Hz n'a été retrouvée indiquant alors que si les oscillations sont bien présentes la tACS n'a pas d'effet. Bien que nous n'ayons pas pu faire de lien entre l'augmentation de la puissance spectrale à 30 Hz calculée au niveau de l'électrode FCz où au niveau du cortex auditif gauche et du STG gauche et l'amélioration des compétences comportementales nous avons tout de même pu démontrer une relation significative entre l'augmentation de la puissance spectrale à 30 Hz au niveau de l'électrode FCz et la sévérité de la dyslexie. En essence, plus les individus présentent des troubles de la dyslexie plus leur puissance spectrale à 30 Hz augmente avec la tACS à 30 Hz.

Ce travail nous a également permis de démontrer que la tACS à 30 Hz avait d'importants effets sur les compétences langagières des sujets dyslexiques. Nous avons en effet montré que l'application d'une session de 20 minutes de tACS à 30 Hz pouvait permettre l'amélioration de la conscience phonémique et dans une moindre mesure l'amélioration de la conscience phonologique globale. Cette amélioration de la conscience phonémique s'est également fait ressentir sur les compétences de lecture où les capacités de décodage graphème/phonème lors du test de lecture se sont significativement améliorés. Nous avons en outre montré une forte corrélation entre l'augmentation des performances et le niveau linguistique naturel des participants. En effet, aussi bien pour les compétences phonémiques, phonologiques où les compétences de précision de lecture nous avons démontré que plus l'individu avaient une sévérité de dyslexie importante plus ses compétences augmentaient après l'application de la tACS à 30 Hz.

En ce qui concerne les compétences de vitesse de lecture et de prosodie, les effets de la tACS se sont révélés plus mitigés. Nous avons vu d'une part que la vitesse de lecture avait diminué pour chaque condition de stimulation dans les deux groupes de participants (dyslexiques et contrôles) et que cette diminution n'avait pas de lien avec le niveau de dyslexie et n'était pas non plus liée à un changement d'état cérébral (relatéralisation des oscillations cérébrales à 30 Hz dans le cortex auditif et le STG gauche). Au contraire, les compétences prosodiques se sont révélées fortement dépendante de l'augmentation de la puissance spectrale dans le STG gauche dans la mesure où plus les participants (contrôles et dyslexiques)

répondaient à la stimulation en augmentant leur puissance spectrale dans le STG gauche plus leurs compétences prosodiques diminuaient.

2. Représentation phonémique chez le sujet dyslexique et déficit oscillatoire à 30 Hz

Les sujets dyslexiques présentent des compétences de catégorisation de phonème qui diffèrent des individus normo-lecteurs dans la mesure où ils sont capables de mieux percevoir les subtiles distinctions au sein d'une même catégorie de phonèmes et ont des difficultés à percevoir les limites inter-catégorielle entre deux phonèmes suggérant une perception « allophonique » des phonèmes. En effet, pour rappel, il a été démontré que les temps de réaction pour catégoriser deux phonèmes n'appartenant pas à la même catégorie est plus long que chez les individus normo-lecteurs alors qu'ils ont une perception améliorée des variations acoustiques d'un son appartenant à la même catégorie (Reed, 1989). Cette perception « allophonique » mène à un trouble de la perception phonémique ce qui induit donc des troubles de la conscience phonologique de manière globale. En effet, si la perception du phonème est, au niveau de la perception auditive de bas niveau, altéré, il va par conséquent altérer la conscience que chaque mot ou groupe de mots est constitué d'unités minimales distinctes qui sont interchangeables et manipulables.

Nous avons vu au cours de cette étude que la perception phonémique chez nos participants dyslexiques était bien inférieure aux compétences des participants normo-lecteurs et cela peut être expliqué par leur déficit au niveau oscillatoire dans la bande de fréquence à-même de traiter l'information phonémique. Le fait que la perception phonémique s'améliore en même temps que les oscillations cérébrales à 30 Hz ont été rétablies confirme alors que l'activité neuronale dans la bande de fréquence gamma à 30 Hz est bien la fréquence qui permet de traiter l'information phonémique. Nous pouvons aussi alors ici supposer que les individus dyslexiques, en ayant une activité neuronale accrue par rapport aux sujets normo-lecteurs aux fréquences au-dessus de 40 Hz sur-échantillonnent l'information phonémique ce qui peut alors expliquer le mode « allophonique » de perception du phonème. L'intérêt d'appliquer une session de 20 minutes de tACS au niveau du cortex auditif gauche est donc justifié car elle permet l'amplification des ondes cérébrales à 30 Hz dans le cortex auditif gauche et par conséquent cela permet le bon échantillonnage de l'information phonémique.

Dans ce travail nous avons également remarqué que l'effet de la tACS à 30 Hz était circonscrit aux représentations phonémiques. En effet, nous avons testé dans quelle mesure la tACS pouvait avoir un effet sur la mémoire à court terme en évaluant les compétences des sujets à se rappeler les syllabes proposées au sein du test de répétition de pseudo-mot et nous n'avons pas trouvé d'amélioration significative ce qui nous permet de proposer que la tACS à 30 Hz a eu un effet bien ciblé sur les

compétences phonémiques et non sur les compétences de mémoire syllabique. Notons cependant que puisque nous n'avons sondé que l'effet de la tACS à 30 Hz, ce résultat ne contredit pas l'hypothèse selon laquelle des rythmes cérébraux plus lents jouent également un rôle dans la dyslexie en interférant au niveau syllabique. Bien que certaines études ne soient pas parvenues à établir un déficit oscillatoire dans la bande de fréquence thêta (Lallier et al., 2017; Lizarazu et al., 2015; Molinaro et al., 2016; Poelmans et al., 2011), Goswami (2011) propose dans son modèle d'échantillonnage temporel, que le déficit central, c'est-à-dire le déficit phonologique lié à la dyslexie, pourrait être la conséquence d'un entraînement rythmique inefficace dans les fréquences delta/thêta et d'une analyse syllabique atypique dans l'hémisphère droit affectant le développement phonologique. Il serait donc alors intéressant de prendre en considération cette hypothèse et d'envisager une méthode de stimulation qui pourrait également stimuler les aires auditives droit à la fréquence du rythme phonémique (entre 4 et 8 Hz). D'autres études seront nécessaires pour établir si de telles interactions existent, et si elles jouent un rôle dans la lecture.

3. Conscience phonologique globale

Bien que les résultats de conscience phonologique globale n'aient pas été pas aussi forts que les résultats précédents portant sur la perception phonémique nous pouvons tout de même admettre qu'un renforcement des ondes oscillatoires dans la bande gamma dans le cortex auditif gauche peut partiellement améliorer la conscience phonologique globale et dans ces conditions les performances au test de contrepèterie. Pour rappel, le test de contrepèterie proposé consiste à échanger le premier phonème de deux mots existants. Cette tâche requiert donc une bonne conscience phonémique pour extraire les premiers phonèmes et les transposer mais requiert également une bonne conscience lexicale (représentation orthographique), une bonne mémoire à court terme lexicale ainsi qu'une bonne représentation motrice afin de répéter les mots après avoir effectué la transposition mentale. Nous pouvons donc relativiser cette moindre augmentation par le fait que l'action d'échanger le premier son de deux mots ne demande pas uniquement une bonne conscience phonémique mais demande également d'autres compétences qui ne semble pas être impacté par la tACS à 30 Hz comme nous l'avons vu précédemment sur les résultats de mémoire à court terme sur la répétition syllabique. Encore une fois, ce test nous permet de supposer que l'application de la tACS à 30 Hz dans le cortex auditif gauche a eu un effet fortement ciblé sur la conscience et la représentation phonémique et n'a pas eu d'effet sur les autres compétences qui ne sont pas nécessairement traitées par ces oscillations cérébrales dans les zones stimulées.

4. Lecture et conscience phonologique

La mise en correspondance des graphèmes et des phonèmes, l'une des premières étapes nécessaires pour l'acquisition de la lecture nécessite une bonne conscience phonologique, impliquant des capacités de segmentation phonémique mais également des capacités de spécification des représentations phonémiques. L'individu doit être capable, donc, de catégoriser chaque phonème, les séparer les uns des autres et de les apparier à un graphème (représentation écrite). Il doit aussi être capable de combiner plusieurs phonèmes entre eux pour obtenir des morphèmes puis des mots. Une fois que cette étape est acquise chez l'enfant la reconnaissance automatique des mots va ensuite se mettre en place mais il sera toujours nécessaire pour le lecteur d'avoir recours à la méthode de décodage phonème/graphème pour lire les mots peu connus, les nouveaux mots ou les noms propres.

Nous avons vu grâce à notre étude que les compétences de décodage graphème/phonème se sont améliorées après la tACS à 30 Hz. Cette compétence étant fortement liée aux compétences de conscience phonémique, nous pouvons confirmer que la tACS a eu un effet majeur sur la perception et la représentation phonémique. Les données que nous avons obtenues sur les compétences de vitesse de lecture et de prosodie nous ont également apporté des informations majeures sur la neuroanatomie fonctionnelle de la lecture. Nous avons en effet vu que les compétences prosodiques étaient d'une part fortement dépendante de la latéralisation individuelle de l'activité gamma à 30Hz avant tACS ; précisément, plus les individus avaient une forte puissance spectrale à 30 Hz dans le STG droit, plus leurs compétences prosodiques étaient développées. Cette observation pourrait rejoindre les théories actuelles proposant que la prosodie est fortement latéralisée dans l'hémisphère droit (Seydell-Greenwald et al., 2020). Cependant l'activité gamma n'est pas associée au traitement prosodique de la parole. L'effet pourrait donc plutôt être une conséquence du fait que les personnes ayant une activité à 30 Hz latéralisée à droite étaient moins performantes pour le traitement phonologique des mots écrits et donc compensaient par une lecture plus globale, prosodique. Nous avons vu qu'en amplifiant la puissance spectrale dans le STG gauche cela avait un effet négatif sur les compétences prosodiques. En effet, nous pouvons proposer ici qu'en relatéralisant les oscillations cérébrales dans le STG gauche les participants perdent leur capacité prosodique. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'avec cette relatéralisation les participants adoptent une manière de lecture plus phonologique que globale ce qui altère leur méthode de lecture normale et donc leur prosodie : en effet à l'âge adulte, les individus, qu'ils soient dyslexiques ou non, grâce à leur instruction, ont développé une voie de lecture globale et n'utilise la voie phonologique que pour les mots rares, inconnus ou les noms propres. Ces résultats que nous avons obtenus sur les compétences prosodiques sont donc un bon indice pour comprendre les raisons d'une diminution de la vitesse de lecture que nous n'avons pas réussi à expliquer clairement dans la première étude qui ne prenait pas en compte toutes les variables de la lecture. Nous pouvons donc désormais émettre l'hypothèse qu'en dérégulant les processus

individuels de lecture, déterminés au moment de l'acquisition de la lecture et renforcés par la suite, nous déréglons significativement leur méthode de lecture en forçant un mode de lecture phonologique. A noter que le rythme delta est probablement impliqué dans les aspects prosodiques. Malheureusement, l'étude EEG en ASSR ne couvre pas les fréquences basses (delta/theta) et nous ne pouvons donc confirmer l'existence d'interactions entre les rythmes à haute et basse fréquence dans les processus de lecture.

5. Effet de la tACS

Comme nous avons pu le voir en introduction, la tACS a un effet, au contraire des autres stimulation transcrânienne par courant électrique, d'entraînement continu sur les oscillations neuronales et non pas un effet excitateur et inhibiteur comme la tDCS par exemple. Plusieurs études après l'étude de Turkeltaub et al. (2012) et Rufener et al (2016) ont démontré des effets positifs de la tACS sur la perception du signal sonore. En modulant le rythme gamma maximum de chaque sujet par la tACS au niveau du cortex auditif gauche, lors d'une tâche de détection d'un intervalle de silence au sein d'un stimulus audio, Baltus et al. (2017) ont montré que l'augmentation de 4 Hz du rythme gamma individuel améliorait l'acuité auditive des participants. Similairement, Rufener et al., (2019) ont testé l'effet de la tACS à 40Hz appliqué au niveau du cortex auditif bilatéralement chez des enfants et adolescents dyslexiques. Les adolescents ont montré une amélioration de leurs capacités ainsi qu'une augmentation de l'amplitude de l'ERP (réponses potentielles évoquées) lors de la catégorisation des phonèmes, confirmant ainsi que les ondes dans la bande gamma sont nécessaires pour la segmentation du flux de parole à l'échelle phonémique. Cependant la tACS à 40 Hz ne semble pas avoir d'effet sur la catégorisation de phonème chez les participants dyslexiques adultes. Zoefel et al (2018) ont reproduit les résultats précédents selon lesquels la tACS, synchronisée avec l'enveloppe d'amplitude des phrases parlées, peut modifier le traitement de la parole (Riecke et al., 2018; Wilsch et al., 2018; Zoefel, Archer-Boyd, et al., 2018). Ils ont démontré que la relation de phase entre la tACS et la parole rythmique affecte la précision de répétition de mots, même pour des séquences de mots dégradés présentés en silence. La tACS permet aussi d'entraîner des fluctuations rythmiques de la perception de la parole après la fin de la stimulation électrique (Van Bree et al., 2021).

Ces études réalisées après la conception et la mise en place du design de notre expérience démontrent également, tout comme notre étude, que la tACS a un impact non négligeable sur le comportement humain et sur l'activité neuronale et représente donc une méthode prometteuse pour traiter les troubles du langage où un dysfonctionnement neuronal a été détecté.

Bien que ces études aient testé la tACS pour modifier la perception du signal sonore, une seule (Rufener et al., 2019) inclut des sujets dyslexiques et bien que les résultats aient pu être concluant chez les adolescents, la perception phonémique chez les participants adultes ne s'est pas améliorée. De plus, cette

étude ne permet pas de comprendre comment la tACS a agi sur les oscillations cérébrales chez les adolescents car les analyses neurophysiologiques n'ont porté que sur l'ERP et non sur une analyse temps/fréquence. Notre étude s'est donc montrée novatrice dans ce domaine étant donné que nous sommes parvenus à mettre en relation un rétablissement de l'activité cérébrale à la fréquence souhaitée (30 Hz) à une amélioration des compétences phonémiques chez des participants souffrant profondément de troubles phonémiques.

Maintenant, la question majeure qui se pose concernant la tACS est de savoir dans quelle mesure elle peut cibler une zone cérébrale précise. En effet, l'application de la tACS se fait grâce à des électrodes bien souvent placées dans une configuration en anneau 4X1 avec l'anode centrale délivrant un courant alternatif inférieur à 2 mA et les quatre cathodes environnantes délivrant $\frac{1}{4}$ du courant de l'anode dans la polarité opposée. Dans notre cas d'étude les électrodes étaient placées aux emplacements TTP7h, FTT9h, FCC5h, CPP5h, TPP9h. Nous pouvons alors nous demander dans quelle mesure le courant est délivré dans la direction souhaitée et sur quelle zone elle agit. Nous pouvons en effet imaginer qu'à cause de la taille de l'électrode (1,2 cm) et de la zone relativement large qu'elle couvre au niveau de scalp, la stimulation pourrait atteindre d'autres aires du cortex cérébral et non pas uniquement la zone définie dans l'étude. Bien que nous ne puissions pas affirmer avec certitude que d'autres zones hormis les aires du langage dans le lobe temporel gauche n'aient été atteintes par la tACS nous pouvons tout de même affirmer que nous sommes parvenus à cibler les zones souhaitées. En démontrant que les compétences de conscience syllabique, de mémoire à court terme n'aient pas été impactées nous pouvons donc émettre l'hypothèse que la stimulation n'a eu un effet uniquement sur les zones ciblées et n'a pas dégradé les performances de représentation syllabique ou la mémoire à court terme.

6. Exploration des mécanismes oscillatoires grâce aux neurosciences computationnelles

L'exploration des mécanismes oscillatoires grâce aux techniques d'électrophysiologie a permis de grandes avancées dans la recherche sur le langage. Cependant, la possibilité de créer des modèles computationnels ou d'intervenir directement sur ces oscillations lorsqu'un trouble du langage est présent se révèle indispensable pour établir le rôle causal des mécanismes oscillatoires dans la perception de la parole.

Relativement récemment, des modèles computationnels ont été développés pour tenter de valider les hypothèses émergeant des données psychophysiques et neurophysiologiques. Les neurosciences computationnelles nous offrent en effet des outils mathématiques et informatiques qui permettent de formaliser les concepts ou théories sous-jacentes et d'en analyser leurs propriétés. L'idée est de simuler le

fonctionnement du système auditif à partir des données connues et de les comparer ensuite à la réalité biologique. Les modèles computationnels interviennent donc pour permettre de reproduire les phénomènes oscillatoires précédemment exposés tout en contrôlant précisément les facteurs qui les influencent. En essence, un modèle computationnel de l'activité neurale est un ensemble d'équations qui peuvent reproduire les données obtenues par des capteurs de l'activité cérébrale. Par exemple, un modèle neuronal va être capable de reproduire les potentiels d'actions émis par les neurones, que l'on peut enregistrer par exemple chez la souris ou plus rarement chez l'homme. Ainsi, Hyafil et al. (2015), ont développé un modèle qui permet de reproduire un rythme thêta qui s'adapte au rythme syllabique entendu, tout en étant coordonné à un rythme gamma servant à encoder le contenu des différentes syllabes. Hovsepyan et al. (2020), ont approfondi ce concept avec un autre modèle computationnel reproduisant le potentiel de champ moyen (c'est-à-dire l'activité combinée de milliers de neurones), pour démontrer que l'information entre les rythmes thêta et gamma doit circuler de manière bidirectionnelle afin de permettre au rythme thêta de transmettre efficacement l'instant exact du début de chaque syllabe. Ainsi, en testant l'influence des différents paramètres influençant les modèles, comme par exemple l'importance des connexions entre les neurones, ces modèles permettent de valider ou d'invalidier des hypothèses spécifiques sur le rôle et la nature des oscillations neurales dans le traitement de la parole.

7. Limites de l'étude

Nos résultats pointent vers un dysfonctionnement de l'activité oscillatoire dans la bande gamma basse (à 30 Hz) chez les individus dyslexiques entraînant un déficit du suivi rythmique du signal de parole au niveau phonémique. Notre étude présente néanmoins des limites qu'il sera nécessaire de dépasser dans de futurs protocoles.

7.1. Nombre limité de participants

Notre expérience représente une réelle avancée en termes de technique utilisée (EEG et tACS) sur une population de sujets dyslexiques. En effet, notre étude utilisant la tACS à la fréquence de 30 Hz sur une population de participants dyslexiques tout en enregistrant leur réponse neuronale suite à la stimulation est unique, les autres études ayant utilisé une fréquence de stimulation à 40 Hz et n'ayant pas proposé une analyse poussée des effets neurophysiologiques. Cette condition d'expérimentation est pourtant essentielle pour la compréhension des troubles du langage et du fonctionnement de la tACS. Cependant, notre échantillon de participants reste faible. Nous avons en effet limité le nombre de sujets à 15 participants pour chaque groupe (dyslexiques et contrôles) pour la faisabilité dans le temps de notre étude. En effet, chaque participant a réalisé plus de 22 heures d'expérience sur 4 journées ce qui a

représenté 120 journées de 6 h d'expérience. Pour une question de durée, nous n'avons donc pas pu intégrer d'autres participants. Cependant il serait nécessaire de pouvoir réaliser une expérience ne comportant que deux conditions de stimulation (30 Hz et Sham), la condition à 60 Hz n'ayant montré aucun changement ni neurophysiologique ni comportemental et de limiter les enregistrements EEG et langagier à une session avant tACS et après tACS. En effet la dernière session enregistrée (une heure après la tACS) n'a pas montré d'effet significatif par rapport à la session avant la tACS. En limitant l'expérience à ce protocole il serait donc envisageable d'augmenter le nombre de participants.

7.2. Analyse des données à 60 Hz

En ce qui concerne les analyses des données EEG, nous avons limité nos analyses de source aux conditions de stimulation à 30 Hz et Sham. Nous n'avons pas réalisé les analyses neurophysiologiques pour la condition de stimulation à 60 Hz car aucune différence comportementale ni neurophysiologique au niveau de l'électrode FCz n'a été détectée. Cependant, si l'on considère l'hypothèse de Lehongre et al (2011) indiquant que les individus dyslexiques montrent des réponses augmentées dans le cortex auditif droit entre 60 et 80 Hz, il serait intéressant d'envisager une analyse de source dans le cortex auditif, le STG et le *planum temporal* bilatéralement pour explorer si la tACS à 60 Hz peut avoir un effet similaire de relatéralisation des oscillations dans les aires du langage du lobe temporal gauche. De plus, les rapports de participants concernant les effets secondaires négatifs de la tACS ont démontré dans de nombreux cas des troubles de l'attention après la stimulation à 60 Hz. En analysant les changements neurophysiologiques avec une analyse de source cela pourrait nous apporter des informations supplémentaires concernant ces effets secondaires.

7.3. Analyse des données une heure après la tACS

Concernant la condition de stimulation une heure après la tACS nous n'avons effectué les analyses uniquement d'un point de vue comportemental. Les données EEG obtenues après la pause déjeuner, soit plus d'une heure après la seconde session de tests linguistiques et d'enregistrement EEG se sont montrés très bruitées à cause d'une augmentation des impédances. En effet, après plus de 4 heures de port du bonnet EEG, les électrodes n'étaient plus suffisamment bien connectées au scalp à cause du séchage du gel. Idéalement, afin d'explorer si l'augmentation de la puissance spectrale des oscillations cérébrales à 30 Hz peut perdurer dans le temps il serait envisageable de réinstaller le bonnet EEG après son nettoyage pour obtenir des données non bruitées et stables.

Conclusion générale

Les personnes atteintes de dyslexie montrent des difficultés langagières. La façon dont ces troubles langagiers sont liés à des anomalies neurophysiologiques du traitement cortical de la parole reste une question ouverte. Grâce à un protocole d'enregistrement EEG lorsque des participants dyslexiques écoutent des sons modulés en amplitude à diverse fréquence nous avons pu mettre en avant un déficit oscillatoire dans la bande gamma basse (à 30 Hz) chez ces participants par rapport aux participants contrôles. En effet nous avons démontré que l'activité oscillatoire à 30 Hz chez les individus dyslexiques étaient moins importante dans le cortex auditif gauche que chez des participants normo-lecteur ce qui est fortement susceptible de générer des troubles de la perception phonémique.

De plus, en utilisant la méthode de la tACS à 30 Hz dont le but premier est d'entraîner les oscillations neuronales à cette fréquence précise nous avons montré que les participants dyslexiques pouvaient améliorer leurs compétences langagières et précisément leurs compétences phonémiques et montrer en même temps une amplification de la puissance spectrale des oscillations à la fréquence de 30 Hz. L'activité corticale gamma à 30 Hz dans le cortex auditif et le STG gauche est donc cruciales pour l'encodage des transitions formantiques et des burst consonantiques qui permet le découpage du signal de parole en unité minimale.

Nos résultats sont également susceptibles de représenter une entrée possible vers un traitement clinique des individus atteints de dyslexie phonologique et qui présentent de fort trouble de la conscience phonémique, notamment si nous envisagions une stimulation plus prolongée et répétée dans le temps. Une telle stimulation effectuée chez les enfants dyslexiques pourrait même s'avérer thérapeutique dans le sens où les circuits pourraient être normalisés à long terme. Des problèmes éthiques se posent cependant pour la stimulation cérébrale chez des enfants, ce qui nous conduit à envisager d'autres méthodes moins invasives pour aboutir à un résultat équivalent comme par exemple une stimulation acoustique à 30 Hz.

Bibliographie

- Afflerbach, P., Pearson, P. D., & Paris, S. G. (2008). Clarifying Differences Between Reading Skills and Reading Strategies. *The Reading Teacher*, 61(5), 364–373. <https://doi.org/10.1598/rt.61.5.1>
- Ahissar, E., Nagarajan, S., Ahissar, M., Protopapas, a, Mahncke, H., & Merzenich, M. M. (2001). Speech comprehension is correlated with temporal response patterns recorded from auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(23), 13367–13372. <https://doi.org/10.1073/pnas.201400998>
- Alexandrou, A. M., Saarinen, T., Kujala, J., & Salmelin, R. (2020). Cortical entrainment: what we can learn from studying naturalistic speech perception. *Language, Cognition and Neuroscience*, 35(6), 681–693. <https://doi.org/10.1080/23273798.2018.1518534>
- Altarelli, I., Leroy, F., Monzalvo, K., Fluss, J., Billard, C., Dehaene-Lambertz, G., Galaburda, A. M., & Ramus, F. (2014). Planum temporale asymmetry in developmental dyslexia: Revisiting an old question. *Human Brain Mapping*, 35(12), 5717–5735. <https://doi.org/10.1002/hbm.22579>
- Antal, A., Alekseichuk, I., Bikson, M., Brockmüller, J., Brunoni, A. R., Chen, R., Cohen, L. G., Dowthwaite, G., Ellrich, J., Flöel, A., Fregni, F., George, M. S., Hamilton, R., Haueisen, J., Herrmann, C. S., Hummel, F. C., Lefaucheur, J. P., Liebetanz, D., Loo, C. K., ... Paulus, W. (2017). Low intensity transcranial electric stimulation: Safety, ethical, legal regulatory and application guidelines. *Clinical Neurophysiology*, 128(9), 1774–1809. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.06.001>
- Antal, Andrea, Boros, K., Poreisz, C., Chaieb, L., Terney, D., & Paulus, W. (2008). Comparatively weak after-effects of transcranial alternating current stimulation (tACS) on cortical excitability in humans. *Brain Stimulation*, 1(2), 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2007.10.001>
- Bailey, P J, & Snowling, M. J. (2002). Auditory processing and the development of language and literacy. *British Medical Bulletin*, 63(0007–1420), 135–146. <https://doi.org/10.1093/bmb/63.1.135>
- Bailey, Peter J, & Snowling, M. J. (2002). Auditory processing and the development of language and literacy. In *British Medical Bulletin* (Vol. 63, Issue September, pp. 135–146). <https://doi.org/10.1093/bmb/63.1.135>
- Baker, J., Rorden, C., & Fridriksson, J. (2010). Using transcranial direct current stimulation (tDCS) to treat stroke patients with aphasia. *Stroke*, 41(6), 1229–1236. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.109.576785>
- Bakos, S., Landerl, K., Bartling, J., Schulte-Körne, G., & Moll, K. (2017). Deficits in Letter-Speech Sound Associations but Intact Visual Conflict Processing in Dyslexia: Results from a Novel ERP-Paradigm. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11(March), 1–16.

<https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00116>

- Baltus, A., Wagner, S., Wolters, C. H., & Herrmann, C. S. (2017). Optimized auditory transcranial alternating current stimulation improves individual auditory temporal resolution. *Brain Stimulation*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2017.10.008>
- Bauer, A. K. R., Bleichner, M. G., Jaeger, M., Thorne, J. D., & Debener, S. (2018). Dynamic phase alignment of ongoing auditory cortex oscillations. *NeuroImage*, 167(November 2017), 396–407. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.11.037>
- Benjamini, Y. (1995). Controlling The False Discovery Rate - A Practical And Powerful Approach To Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Methodological*, 57(June), 289–300. <https://doi.org/10.2307/2346101>
- Berger, H. (1931). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen - Dritte Mitteilung. *Archiv Für Psychiatrie Und Nervenkrankheiten*, 94(1), 16–60. <https://doi.org/10.1007/BF01835097>
- Berger, H. (1934). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Dtsch Medizinische Wochenschrift*, 60, 1947–1949.
- Binder, J., Frost, J. A., Hammeke, T. A., Bellgowan, P. S. F., Springer, J. A., Kaufman, J. N., & Possing, E. T. (2000). Human temporal lobe activation by speech and nonspeech sounds. *Cerebral Cortex*, 10(5), 512–528. <https://doi.org/10.1093/cercor/10.5.512>
- Boets, B., Wouters, J., Van Wieringen, A., & Ghesquière, P. (2006). Auditory temporal information processing in preschool children at family risk for dyslexia: Relations with phonological abilities and developing literacy skills. *Brain and Language*, 97(1), 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2005.07.026>
- Bolger, D. J., Perfetti, C. A., & Schneider, W. (2005). Cross-cultural effect on the brain revisited: Universal structures plus writing system variation. *Human Brain Mapping*, 25(1), 92–104. <https://doi.org/10.1002/hbm.20124>
- Brandt, J., & Rosen, J. J. (1980). *Auditory Phonemic Perception in Dyslexia : Categorical Identification and Discrimination of Stop Consonants*. 337, 324–337.
- Celeste, L. C., Pereira, E. S., Pereira, N. R. R., & Alves, L. M. (2018). Prosodic parameters of reading in 2nd to 5th grade students. *Codas*, 30(1), 2013–2016. <https://doi.org/10.1590/2317-1782/20182017034>
- Chait, M., Greenberg, S., Arai, T., Simon, J. Z., & Poeppel, D. (2015). Multi-time resolution analysis of speech: Evidence from psychophysics. *Frontiers in Neuroscience*, 9(MAY), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnins.2015.00214>
- Chaumon, M., Bishop, D. V. M., & Busch, N. A. (2015). A practical guide to the selection of independent components of the electroencephalogram for artifact correction. *Journal of Neuroscience*

- Methods*, 250, 47–63. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2015.02.025>
- Coupé, C., Oh, Y., Dediu, D., & Pellegrino, F. (2019). Different languages, similar encoding efficiency: Comparable information rates across the human communicative niche. *Science Advances*, 5(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2594>
- Critchley, M. (1970). *The dyslexic child* (London : H). <https://doi.org/10.1126/science.342.6163.1158>
- Datta, A., Bansal, V., Diaz, J., Patel, J., Reato, D., & Bikson, M. (2009). Gyri-precise head model of transcranial direct current stimulation: Improved spatial focality using a ring electrode versus conventional rectangular pad. *Brain Stimulation*, 2(4), 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2009.03.005>
- Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S., & Hertz-Pannier, L. (2002). Functional neuroimaging of speech perception in infants. *Science*, 298(5600), 2013–2015. <https://doi.org/10.1126/science.1077066>
- Dehaene, S. (2011). *Apprendre à lire: Des sciences cognitives à la salle de classe*.
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: A proposal. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(7), 335–341. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.004>
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134(1), 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009>
- Démonet, J. F., Taylor, M. J., & Chaix, Y. (2004). Developmental dyslexia. *The Lancet*, 363:1451(60). [https://doi.org/10.1016/S0031-3955\(16\)32168-X](https://doi.org/10.1016/S0031-3955(16)32168-X)
- Di Liberto, G. M., Peter, V., Kalashnikova, M., Goswami, U., Burnham, D., & Lalor, E. C. (2018). Atypical cortical entrainment to speech in the right hemisphere underpins phonemic deficits in dyslexia. *NeuroImage*, 175(November 2017), 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.03.072>
- Ding, N., Melloni, L., Zhang, H., Tian, X., & Poeppel, D. (2015). Cortical tracking of hierarchical linguistic structures in connected speech. *Nature Neuroscience*, 19(1), 158–164. <https://doi.org/10.1038/nn.4186>
- Doelling, K. B., Arnal, L. H., Ghitz, O., & Poeppel, D. (2014). Acoustic landmarks drive delta-theta oscillations to enable speech comprehension by facilitating perceptual parsing. *NeuroImage*, 85, 761–768. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.06.035>
- Edwards, E., & Chang, E. F. (2013). Syllabic (w 2 e 5 Hz) and fluctuation (w 1 e 10 Hz) ranges in speech and auditory processing. *Hearing Research*, 305, 113–134. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.08.017>
- Edwards, P. A., & Turner, J. D. (2011). Family literacy and reading comprehension. In *Handbook of research on reading comprehension*.

- Fayol, M. (1997). Modèles de la production verbale. In *Des idées au texte* (pp. 59–80).
<https://doi.org/10.1038/nbt.3121.ChIP-nexus>
- Fiebelkorn, I. C., Pinsk, M. A., & Kastner, S. (2018). A Dynamic Interplay within the Frontoparietal Network Underlies Rhythmic Spatial Attention. *Neuron*, 99(4), 842–853.e8.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.07.038>
- Floccia, C., Nazzi, T., & Bertoncini, J. (2000). Unfamiliar voice discrimination for short stimuli in newborns. *Developmental Science*, 3(3), 333–343. <https://doi.org/10.1111/1467-7687.00128>
- Frederickson, N., Frith, U., & Reason, R. (1997). Phonological assessment battery. *Windsor, UK: NFER*.
<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2011.02.012.Investigations>
- Fries, P. (2015). Communication Through Coherence (CTC 2.0). *Neuron*, 88(1), 220–235.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.034.Rhythms>
- Frith, U. (1999). Paradoxes in the definition of dyslexia. *Dyslexia*, 5(4), 192–214.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0909\(199912\)5:4<192::AID-DYS144>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0909(199912)5:4<192::AID-DYS144>3.0.CO;2-N)
- Galaburda, A. (1983). Developmental dyslexia: Current anatomical research. *Annals of Dyslexia*, 33(1), 41–53. <https://doi.org/10.1007/BF02647995>
- Galaburda, A. M., & Kemper, T. L. (1979). Cytoarchitectonic abnormalities in developmental dyslexia: A case study. *Annals of Neurology*, August. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ana.410060203>
- Ghitza, O. (2012). On the role of theta-driven syllabic parsing in decoding speech: Intelligibility of speech with a manipulated modulation spectrum. *Frontiers in Psychology*, 3(JUL), 1–12.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00238>
- Ghitza, O., Giraud, A.-L., & Poeppel, D. (2013). Neuronal oscillations and speech perception: critical-band temporal envelopes are the essence. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(January), 340.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00340>
- Ghitza, O., & Greenberg, S. (2009). On the possible role of brain rhythms in speech perception: Intelligibility of time-compressed speech with periodic and aperiodic insertions of silence. *Phonetica*, 66(1–2), 113–126. <https://doi.org/10.1159/000208934>
- Giraud, A., Kleinschmidt, A., Poeppel, D., Lund, T. E., Frackowiak, R. S. J., & Laufs, H. (2007). Endogenous Cortical Rhythms Determine Cerebral Specialization for Speech Perception and Production. *Neuron*, 56(6), 1127–1134. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.09.038>
- Giraud, A. L., & Poeppel, D. (2012). Cortical oscillations and speech processing: Emerging computational principles and operations. *Nature Neuroscience*, 15(4), 511–517.
<https://doi.org/10.1038/nn.3063>
- Giraud, A., & Ramus, F. (2013). Neurogenetics and auditory processing in developmental dyslexia. *Current Opinion in Neurobiology*, 23(1), 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.09.003>

- Godde, E., Bosse, M. L., & Bailly, G. (2020). A review of reading prosody acquisition and development. *Reading and Writing*, 33(2), 399–426. <https://doi.org/10.1007/s11145-019-09968-1>
- Goswami, U. (2011a). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(1), 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.10.001>
- Goswami, U. (2011b). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. In *Trends in Cognitive Sciences* (Vol. 15, Issue 1, pp. 3–10). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.10.001>
- Goswami, U., Thomson, J., Richardson, U., Stainthorp, R., Hughes, D., Rosen, S., & Scott, S. K. (2002). *Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia: A new hypothesis*. 99(16), 10911–10916.
- Greenberg, S., Carvey, H., Hitchcock, L., & Chang, S. (2003). Temporal Properties of Spontaneous Speech. *Journal of Phonetics*, October. <https://doi.org/10.1016/j.wocn.2003.09.005>
- Grosjean, F., & Collins, M. (1979). Breathing, Pausing and reading. *Phonetica*, 98–114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1159/000259950>
- Gutiérrez-Palma, N., Valencia Naranjo, N., Justicia-Galiano, M. J., & Carpio Fernández, M. de la V. (2019). Beyond phonological awareness: Stress awareness and learning word spelling. *Learning and Individual Differences*, 74(July), 101755. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2019.101755>
- Habib, M. (2018). *Dyslexie de développement*. 0(18), 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0246-1072\(18\)81436-5](https://doi.org/10.1016/S0246-1072(18)81436-5)
- Haegens, S., & Zion Golumbic, E. (2018). Rhythmic facilitation of sensory processing: A critical review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 86(November 2017), 150–165. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.12.002>
- Helfrich, R. F., Schneider, T. R., Rach, S., Trautmann-Lengsfeld, S. A., Engel, A. K., & Herrmann, C. S. (2014). Entrainment of brain oscillations by transcranial alternating current stimulation. *Current Biology*, 24(3), 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.12.041>
- Herrmann, C. S., Rach, S., Neuling, T., & Strüber, D. (2013). Transcranial alternating current stimulation: a review of the underlying mechanisms and modulation of cognitive processes. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(June), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00279>
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech understanding. *Nature*, 8(May), 393–402. www.nature.com/reviews/neuro%0Ahttps://www-nature-com.ezp-prod1.hul.harvard.edu/articles/nrn2113.pdf
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2015). Neural Basis of Speech Perception. In *Neurobiology of Language*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407794-2.00025-0>
- Hovsepyan, S., Olasagasti, I., & Giraud, A. L. (2020). Combining predictive coding and neural oscillations enables online syllable recognition in natural speech. *Nature Communications*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16956-5>
- Hudson, R. F., Pullen, P. C., Lane, H. B., & Torgesen, J. K. (2009). The complex nature of reading

- fluency: A multidimensional view. *Reading and Writing Quarterly*, 25(1), 4–32.
<https://doi.org/10.1080/10573560802491208>
- Hyafil, A., Fontolan, L., Kabdebon, C., Gutkin, B., & Giraud, A. L. (2015). Speech encoding by coupled cortical theta and gamma oscillations. *eLife*, 4(MAY), 1–45. <https://doi.org/10.7554/eLife.06213>
- Hyafil, A., Giraud, A. L., Fontolan, L., & Gutkin, B. (2015). Neural Cross-Frequency Coupling: Connecting Architectures, Mechanisms, and Functions. *Trends in Neurosciences*, 38(11), 725–740.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2015.09.001>
- Jensen, O., & Colgin, L. L. (2007). Cross-frequency coupling between neuronal oscillations. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(7), 267–269. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.05.003>
- Keitel, A., Gross, J., & Kayser, C. (2017). Speech tracking in auditory and motor regions reflects distinct linguistic features. *PLoS Biology*, 1–19. <https://doi.org/10.1101/195941>
- Korczak, P., Jennyfer, S., Delgado, R., Trobel, T. M., & Bradford, C. (2012). Auditory steady-state responses. *J Am Acad Audiol*, 23(3), 146.
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195301069.001.0001>
- Kösem, A., & van Wassenhove, V. (2017). Distinct contributions of low- and high-frequency neural oscillations to speech comprehension. *Language, Cognition and Neuroscience*, 32(5), 536–544.
<https://doi.org/10.1080/23273798.2016.1238495>
- Lacheret-Dujour, A., & Beaugendre, F. (1999). *La prosodie du français* (Paris: Edi).
- Lakatos, P., Karmos, G., Mehta, A. D., Ulbert, I., & Schroeder, C. E. (2008). Entrainment of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection. *Science*, 320(5872), 110–113.
<https://doi.org/10.1126/science.1154735>
- Lakatos, P., Shah, A. S., Knuth, K. H., Ulbert, I., Karmos, G., & Schroeder, C. E. (2005). An oscillatory hierarchy controlling neuronal excitability and stimulus processing in the auditory cortex. *Journal of Neurophysiology*, 94(3), 1904–1911. <https://doi.org/10.1152/jn.00263.2005>
- Lallier, M., Molinaro, N., Lizarazu, M., Bourguignon, M., & Carreiras, M. (2017). Amodal Atypical Neural Oscillatory Activity in Dyslexia. *Clinical Psychological Science*, 5(2), 379–401.
<https://doi.org/10.1177/2167702616670119>
- Lehongre, K., Ramus, F., Villiermet, N., Schwartz, D., & Giraud, A. L. (2011). Altered low-gamma sampling in auditory cortex accounts for the three main facets of dyslexia. *Neuron*, 72(6), 1080–1090. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.11.002>
- Leong, V., & Goswami, U. (2014). Impaired extraction of speech rhythm from temporal modulation patterns in speech in developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(1 FEB), 1–14.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00096>
- Lisman, J. (2005). The theta/gamma discrete phase code occurring during the hippocampal phase

- precession may be a more general brain coding scheme. *Hippocampus*, 15(7), 913–922.
<https://doi.org/10.1002/hipo.20121>
- Lisman, J. E., & Jensen, O. (2013). The θ - γ neural code. In *Neuron* (Vol. 77, Issue 6).
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.03.007>
- Lizarazu, M., Lallier, M., Molinaro, N., Bourguignon, M., Paz-Alonso, P. M., Lerma-Usabiaga, G., & Carreiras, M. (2015). Developmental evaluation of atypical auditory sampling in dyslexia: Functional and structural evidence. *Human Brain Mapping*, 36(12), 4986–5002.
<https://doi.org/10.1002/hbm.22986>
- Lopes, J., Silva, M. M., Moniz, A., Spear-Swerling, L., & Zibulsky, J. (2015). Evolução da prosódia e compreensão da leitura: Um estudo longitudinal do 2º ano ao final do 3º ano de escolaridade. *Revista de Psicodidactica*, 20(1), 5–23. <https://doi.org/10.1387/RevPsicodidact.11196>
- Luo, H., Wang, Y., Poeppel, D., & Simon, J. Z. (2007). Concurrent encoding of frequency and amplitude modulation in human auditory cortex: Encoding transition. *Journal of Neurophysiology*, 98(6), 3473–3485. <https://doi.org/10.1152/jn.00342.2007>
- Lyon, G. R., Sl, B. a, Catts, H., Dickman, E., Eden, G., Fletcher, J., Gilger, J., Morris, R., Tomey, H., & Viall, T. (2003). Defining Dyslexia , Comorbidity , Teachers ' Knowledge of Language and Reading A Definition of Dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 53(1), 1–14.
<http://www.hku.hk/linguist/cou/adv/ling6022/articles/lyon2003.pdf>
- Manis, F. R., McBride-Chang, C., Seidenberg, M. S., Keating, P., Doi, L. M., Munson, B., & Petersen, A. (1997). Are speech perception deficits associated with developmental dyslexia? *Journal of Experimental Child Psychology*, 66(2), 211–235. <https://doi.org/10.1006/jecp.1997.2383>
- Mann, V. A., & Liberman, I. Y. (n.d.). *Phonological awareness and very short-term memory: can they presage early reading problems?*
- Manoli, P., & Papadopoulou, M. (2012). Reading Strategies Versus Reading Skills: Two Faces of the Same Coin. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 46, 817–821.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.05.205>
- Martin, P. (2011). Punctuation and prosodic structure. *Langue Francaise*, 172(January), 99–114.
<https://doi.org/10.3917/lf.172.0099>
- Mermelstein, P. (1975). Automatic segmentation of speech into syllabic units. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58(4), 880–883. <https://doi.org/10.1121/1.380738>
- Meschyan, G., & Hernandez, A. E. (2006). Impact of language proficiency and orthographic transparency on bilingual word reading: An fMRI investigation. *NeuroImage*, 29(4), 1135–1140.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.08.055>
- Miller, J., & Schwanenflugel, P. J. (2008). A Longitudinal Study of the Development of Reading

- Prosody as a Dimension of Oral Reading Fluency in Early Elementary School Children. *Read Res Q*, 43 (4), 336–354.
- Miyazaki, T., Thompson, J., Fujioka, T., & Ross, B. (2013). Sound envelope encoding in the auditory cortex revealed by neuromagnetic responses in the theta to gamma frequency bands. *Brain Research*, 1506, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2013.01.047>
- Molinaro, N., Lizarazu, M., Lallier, M., Bourguignon, M., & Carreiras, M. (2016). Out-of-synchrony speech entrainment in developmental dyslexia. *Human Brain Mapping*, 37(8), 2767–2783. <https://doi.org/10.1002/hbm.23206>
- Nazzi, T., Floccia, C., & Bertoncini, J. (1998). Discrimination of pitch contours by neonates. *Infant Behavior and Development*, 21(4), 779–784. [https://doi.org/10.1016/S0163-6383\(98\)90044-3](https://doi.org/10.1016/S0163-6383(98)90044-3)
- Nazzi, T., Jusczyk, P. W., & Johnson, E. K. (2000). Language discrimination by english-learning 5-month-olds: Effects of rhythm and familiarity. *Journal of Memory and Language*, 43(1), 1–19. <https://doi.org/10.1006/jmla.2000.2698>
- Neuling, T., Rach, S., & Herrmann, C. S. (2013). Orchestrating neuronal networks: sustained after-effects of transcranial alternating current stimulation depend upon brain states. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(April), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00161>
- Nitsche, M. A., Fricke, K., Henschke, U., Schlitterlau, A., Liebetanz, D., Lang, N., Henning, S., Tergau, F., & Paulus, W. (2003). Pharmacological modulation of cortical excitability shifts induced by transcranial direct current stimulation in humans. *Journal of Physiology*, 553(1), 293–301. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.049916>
- Paige, D. D., Rasinski, T., Magpuri-Lavell, T., & Smith, G. S. (2014). Interpreting the relationships among prosody, automaticity, accuracy, and silent reading comprehension in secondary students. *Journal of Literacy Research*, 46(2), 123–156. <https://doi.org/10.1177/1086296X14535170>
- Paige, D. D., Rupley, W. H., Smith, G. S., Rasinski, T. V, Nichols, W., & Magpuri-Lavell, T. (2017). Is prosodic reading a strategy for comprehension? *Journal for Educational Research Online*, 9(2), 245–275. https://www.pedocs.de/frontdoor.php?source_opus=14951
- Paulesu, E., McCrory, E., Fazio, F., Menoncello, L., Brunswick, N., Cappa, S. F., Cotelli, M., Cossu, G., Corte, F., Lorusso, M., Pesenti, S., Gallagher, A., Perani, D., Price, C., Frith, C. D., & Frith, U. (2000). A cultural effect on brain function. *Nature Neuroscience*, 3(1), 91–96. <https://doi.org/10.1038/71163>
- Peelle, J. E., & Davis, M. H. (2012). Neural oscillations carry speech rhythm through to comprehension. *Frontiers in Psychology*, 3(SEP), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00320>
- Pellegrino, F., Coupé, C., & Marisco, E. (2011). A Cross-Language Perspective on Speech Information Rate. *Language*, 87(3), 539–558. <https://doi.org/10.1353/lan.2011.0057>

- Poelmans, H., Luts, H., Vandermosten, M., Boets, B., Ghesquière, P., & Wouters, J. (2011). Reduced sensitivity to slow-rate dynamic auditory information in children with dyslexia. *Research in Developmental Disabilities*, 32(6), 2810–2819. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.05.025>
- Poeppel, D. (2003). The analysis of speech in different temporal integration windows: Cerebral lateralization as “asymmetric sampling in time.” *Speech Communication*, 41(1), 245–255. [https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(02\)00107-3](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(02)00107-3)
- Power, A. J., Colling, L. J., Mead, N., Barnes, L., & Goswami, U. (2016). Neural encoding of the speech envelope by children with developmental dyslexia. *Brain and Language*, 160, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.06.006>
- Pugh, K. R., Mencl, W. E., Jenner, A. R., Katz, L., Frost, S. J., Lee, J. R., Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. a. (2000). Functional Neuroimaging Studies of Reading and Reading Disability (Developmental Dyslexia). *Mental Retardation and Developmental Disabilities*, 6(2000), 207–213. [https://doi.org/10.1002/1098-2779\(2000\)6:3<207::AID-MRDD8>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/1098-2779(2000)6:3<207::AID-MRDD8>3.0.CO;2-P)
- Pugh, K. R., Shankweiler, D. P., Katz, L., Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Fletcher, J. M., Skudlarski, P., Fulbright, R. K., Constable, R. T., Bronen, R. A., Lacadie, C., & Gore, J. C. (1997). Predicting Reading Performance from Neuroimaging Profiles: The Cerebral Basis of Phonological Effects in Printed Word Identification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(2), 299–318. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.23.2.299>
- Ramus, F. (2001). Outstanding Questions about Phonological Processing in Dyslexia. *Dyslexia*, 7(4), 197–216. <https://doi.org/10.1002/dys.205>
- Ramus, F., Marshall, C. R., Rosen, S., & Van Der Lely, H. K. J. (2013). Phonological deficits in specific language impairment and developmental dyslexia: Towards a multidimensional model. *Brain*, 136(2), 630–645. <https://doi.org/10.1093/brain/aws356>
- Ramus, F., Rosen, S., Dakin, S. C., Day, B. L., Castellote, J. M., White, S., & Frith, U. (2003). Theories of developmental dyslexia: Insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain*, 126(4), 841–865. <https://doi.org/10.1093/brain/awg076>
- Rasinski, T. V. (2012). Why reading fluency should be hot! *Reading Teacher*, 65(8), 516–522. <https://doi.org/10.1002/TRTR.01077>
- Rayner, K., Foorman, B. R., Perfetti, C. A., Pesetsky, D., & Seidenberg, M. S. (2001). How Psychological Science Informs the Teaching of Reading. *Psychological Science in the Public Interest*, 2(2), 31–74. <https://doi.org/10.1111/1529-1006.00004>
- Reed, M. A. (1989). Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading disabled children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 48(2), 270–292. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(89\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0022-0965(89)90006-4)

- Rosen, S. (1992a). Temporal information in speech: acoustic, auditory and linguistic aspects. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 336, 367–373. <https://doi.org/10.1121/1.1907782>
- Rosen, S. (1992b). Temporal information in speech: acoustic, auditory and linguistic aspects. *Philosophical Transaction of the Royal Society B*, 336, 367–373. <https://doi.org/10.1016/B978-012554465-8/50011-9>
- Ross, B., Herdman, A. T., & Pantev, C. (2005). *Stimulus Induced Desynchronization of Human Auditory 40-Hz Steady-State Responses*. 4082–4093. <https://doi.org/10.1152/jn.00469.2005>.
- Ross, Bernhard, Borgmann, C., Draganova, R., Roberts, L. E., & Pantev, C. (2000). A high-precision magnetoencephalographic study of human auditory steady-state responses to amplitude-modulated tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(2), 679–691. <https://doi.org/10.1121/1.429600>
- Rufener, K. S., Krauel, K., Meyer, M., Heinze, H. J., & Zaehle, T. (2019). Transcranial electrical stimulation improves phoneme processing in developmental dyslexia. *Brain Stimulation*, in Press. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.02.007>
- Rufener, K. S., Zaehle, T., Oechslin, M. S., & Meyer, M. (2016). 40 Hz-Transcranial alternating current stimulation (tACS) selectively modulates speech perception. *International Journal of Psychophysiology*, 101, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.01.002>
- Rutter, M., Tizard, J., Yule, W., Graham, P., & Whitmore, K. (1976). Research report: Isle of Wight Studies, 1964–1974. *Psychological Medicine*, 6(2), 313–332.
- Sadoski, M., McTigue, E. M., & Paivio, A. (2012). A Dual Coding Theoretical Model of Decoding in Reading: Subsuming the Laberge and Samuels Model. *Reading Psychology*, 33(5), 465–496. <https://doi.org/10.1080/02702711.2011.557330>
- Saussure, F. de. (1931). *Cours de linguistique générale*. Payot Paris.
- Schulte-Körne, G., Deimel, W., Bartling, J., & Remschmidt, H. (1999). The role of phonological awareness, speech perception, and auditory temporal processing for dyslexia. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 8 Suppl 3, 28–34. <https://doi.org/10.1007/PL00010690>
- Schulte-Körne, Gerd, Deimel, W., Bartling, J., & Remschmidt, H. (1999). Pre-attentive processing of auditory patterns in dyslexic human subjects. *Neuroscience Letters*, 276(1), 41–44. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(99\)00785-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(99)00785-5)
- Scott, S. K., Catrin Blank, C., Rosen, S., & Wise, R. J. S. (2000). Identification of a pathway for intelligible speech in the left temporal lobe. *Brain*, 123(12), 2400–2406. <https://doi.org/10.1093/brain/123.12.2400>
- Segui, J., & Ferrand, L. (2000). *Leçons de parole*.
- Seidl, A. (2007). Infants' use and weighting of prosodic cues in clause segmentation. *Journal of Memory and*

- Language*, 57(1), 24–48. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2006.10.004>
- Serniclaes, W., Heghe, S. Van, Mousty, P., Carré, R., Serniclaes, W., Heghe, S. Van, Mousty, P., Carré, R., & Allo-, L. S. (2012). *Allophonic mode of speech perception in dyslexia*. To cite this version : HAL Id : hal-00733550.
- Seydell-Greenwald, A., Chambers, C. E., Ferrara, K., & Newport, E. L. (2020). What you say versus how you say it: Comparing sentence comprehension and emotional prosody processing using fMRI. *NeuroImage*, 209(December 2019), 116509. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116509>
- Shannon, R. V., Zeng, F.-G., & Wygonski, J. (1998). Speech recognition with altered spectral distribution of envelope cues. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(4), 2467–2476. <https://doi.org/10.1121/1.423774>
- Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Constable, R. T., Mencl, W. E., Shankweiler, D. P., Liberman, A. M., Skudlarski, P., Fletcher, J. M., Katz, L., Marchione, K. E., Lacadie, C., Gatenby, C., & Gore, J. C. (1998). Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(5), 2636–2641. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.5.2636>
- Snowling, M. J., Goulandris, N., & Defty, N. (1996). A Longitudinal Study of Reading Development in Dyslexic Children. In *Journal of Educational Psychology* (Vol. 88, Issue 4, pp. 653–669). <https://doi.org/10.1037/0022-0663.88.4.653>
- Snowling, M. J., & Melby-Lervåg, M. (2016). Oral language deficits in familial dyslexia: A meta-analysis and review. *Psychological Bulletin*, 142(5), 498–545. <https://doi.org/10.1037/bul0000037>
- Sprenger-Charolles, L., Cole, P., Lacert, P., & Serniclaes, W. (2000). On subtypes of developmental dyslexia: Evidence from processing time and accuracy scores. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 54(2), 87–103. <https://doi.org/10.1037/h0087332>
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L. S., Béchenne, D., & Serniclaes, W. (2003). Development of phonological and orthographic processing in reading aloud, in silent reading, and in spelling: A four-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 84(3), 194–217. [https://doi.org/10.1016/S0022-0965\(03\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0022-0965(03)00024-9)
- Tadel, F., Baillet, S., Mosher, J. C., Pantazis, D., & Leahy, R. M. (2011). Brainstorm: A user-friendly application for MEG/EEG analysis. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/879716>
- Talcott, J. B., Witton, C., McLean, M. F., Hansen, P. C., Rees, A., Green, G. G. R., & Stein, J. F. (2000). Dynamic sensory sensitivity and children's word decoding skills. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(6), 2952–2957. <https://doi.org/10.1073/pnas.040546597>
- Tallal, P., Miller, S., & Fitch, R. H. (1993). Neurobiological Basis of Speech: A Case for the Preeminence

- of Temporal Processing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 682(1), 27–47.
<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1993.tb22957.x>
- Tallal, Paula. (1980). *Auditory Temporal Perception , Phonics , Reading Disabilities in Children*. 198, 182–198.
- Temple, E., Poldrack, R. A., Protopapas, A., Nagarajan, S., Salz, T., Tallal, P., Merzenich, M. M., & Gabrieli, J. D. E. (2000). Disruption of the neural response to rapid acoustic stimuli in dyslexia: Evidence from functional MRI. *Neurobiology*, 97(25), 13907–13912.
<https://doi.org/10.1073/pnas.240461697>
- Titze, I. R. (1989). Physiologic And Acoustic Differences Between Male And Female Voices. *Journal of the Acoustical Society of America*, 85(4), 1699–1707. <https://doi.org/10.1121/1.397959>
- Turkeltaub, P. E., Benson, J., Hamilton, R. H., Datta, A., Bikson, M., & Coslett, H. B. (2012). Left lateralizing transcranial direct current stimulation improves reading efficiency. *Brain Stimulation*, 5(3), 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.04.002>
- Uhlhaas, P. J., Pipa, G., Lima, B., Melloni, L., Neuenschwander, S., Nikolić, D., & Singer, W. (2009). Neural synchrony in cortical networks: History, concept and current status. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 3(JUL), 1–19. <https://doi.org/10.3389/neuro.07.017.2009>
- Urquhart, A. H., & Weir, C. J. (1998). *Reading in a second language : process, product, and practice* (London ; N).
- Van Bree, S., Sohoglu, E., Davis, M. H., & Zoefel, B. (2021). Sustained neural rhythms reveal endogenous oscillations supporting speech perception. *PLoS Biology*, 12–14.
<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001142>
- Vanrullen, R. (2013). Visual attention: A rhythmic process? *Current Biology*, 23(24), R1110–R1112.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.11.006>
- VanRullen, R. (2018). Attention Cycles. *Neuron*, 99(4), 632–634.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.08.006>
- VanRullen, R., & Koch, C. (2003). Is perception discrete or continuous? *Trends in Cognitive Sciences*, 7(5), 207–213. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00095-0)
- Vellutino, F. R., Fletcher, J. M., Snowling, M. J., & Scanlon, D. M. (2004). Specific reading disability (dyslexia): What have we learned in the past four decades? *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 45(1), 2–40. <https://doi.org/10.1046/j.0021-9630.2003.00305.x>
- Von Stein, A., & Sarnthein, J. (2000). Different frequencies for different scales of cortical integration: From local gamma to long range alpha/theta synchronization. *International Journal of Psychophysiology*, 38(3), 301–313. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(00\)00172-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00172-0)
- Vossen, A., Gross, J., & Thut, G. (2015). Alpha power increase after transcranial alternating current stimulation at alpha frequency (a-tACS) reflects plastic changes rather than entrainment. *Brain Stimulation*, 8(3), 499–508. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2014.12.004d>

- vee the Acquisition of Reading Skills. *Psychological Bulletin*, 101, 192–212.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1037/0033-2909.101.2.192>
- Wilsch, A., Neuling, T., Obleser, J., & Herrmann, C. S. (2018). Transcranial alternating current stimulation with speech envelopes modulates speech comprehension. *NeuroImage*, 172(December 2017), 766–774. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.01.038>
- Witton, C., Talcott, J. B., Hansen, P. C., Richardson, A. J., Griffiths, T. D., Rees, A., Stein, J. F., & Green, G. G. R. (1998). Sensitivity to dynamic auditory and visual stimuli predicts nonword reading ability in both dyslexic and normal readers. *Current Biology*, 791–797.
- Wolf, M. (1991). *The word-retrieval deficit hypothesis and developmental dyslexia*. 3(3), 205–223.
- You, D. S., Kim, D. Y., Chun, M. H., Jung, S. E., & Park, S. J. (2011). Cathodal transcranial direct current stimulation of the right Wernicke's area improves comprehension in subacute stroke patients. *Brain and Language*, 119(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.05.002>
- Zachle, T., Rach, S., & Herrmann, C. S. (2010). Transcranial Alternating Current Stimulation Enhances Individual Alpha Activity in Human EEG. *PLoS ONE*, 5(11), 1–7.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013766>
- Zatorre, R. J., & Belin, P. (2001). Spectral and temporal processing in human auditory cortex. *Cerebral Cortex*, Oct; 11(10), 140–149. <https://doi.org/doi:10.1093/cercor/11.10.946>.
- Zoefel, B., Archer-Boyd, A., & Davis, M. H. (2018). Phase Entrainment of Brain Oscillations Causally Modulates Neural Responses to Intelligible Speech. *Current Biology*, 28(3), 401-408.e5.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.11.071>
- Zoefel, B., & VanRullen, R. (2016). EEG oscillations entrain their phase to high-level features of speech sound. *NeuroImage*, 124, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.08.054>
- Zorman, M., & Touzin, M. (1999). Evaluation de la conscience phonologique et entraînement des capacités phonologiques en Grande Section de maternelle. *Rééducation Orthophonique*, 36, 139–157.

Annexes



1. Adult Reading History Questionnaire-revised

LANGAGE ECRIT :

1. Avez-vous reçu un diagnostic officiel de trouble du langage écrit ? (souligner la réponse)

NON OUI

Si vous avez répondu oui à cette question, merci de répondre aux questions suivantes, sinon vous pouvez directement aller à la partie SCOLARITE.

2. A quel âge avez-vous reçu ce diagnostic ?

3. Pouvez-vous indiquer ce diagnostic ? Vous n'êtes pas obligé(e) de répondre mais les informations communiquées resteront confidentielles.

4. Suite à ce diagnostic, avez-vous bénéficié d'une prise en charge orthophonique/logopédique ?

OUI NON

Si oui, pouvez-vous décrire à quelle fréquence et pendant combien de temps ?

5. Pensez-vous que cette prise en charge vous ait fait progresser ? OUI NON

6. Avez-vous des commentaires concernant cette prise en charge ? Si oui lesquels ?

7. Enfant avez-vous reçu un diagnostic formel de trouble du langage oral ? OUI NON

8. De trouble de l'attention et/ou d'hyperactivité ? OUI NON

SCOLARITE



1. a. Quel est le diplôme le plus élevé que vous ayez obtenu ? _____

b. Quel est le diplôme le plus élevé de votre mère? _____

c. Quel est le diplôme le plus élevé de votre père? _____

2. a. Quel est votre profession ? _____

b. Quel est la profession de votre mère? _____

c. Quel est la profession de votre père? _____

3. A votre connaissance, vos parents ont-ils eu ou ont-ils des difficultés de lecture?

OUI NON PAS SUR

Si oui, pouvez-vous donner des détails? _____

4. A votre connaissance, votre (vos) frère(s) et/ sœur(s) ont-ils eu ou ont-ils des difficultés de lecture?

OUI NON PAS SUR

Si oui, pouvez-vous donner des détails ? Par exemple redoublement de la 1ère année d'apprentissage de la lecture _____

5. A votre connaissance, d'autres membres de votre famille (oncle, tante, grands-parents...) ont-ils eu ou ont-ils des difficultés de lecture?

OUI NON PAS SUR

Si oui, pouvez-vous donner des détails? _____

ECOLE ELEMENTAIRE



Merci d'entourer le numéro qui correspond le mieux à votre réponse pour chacune des questions ou affirmations suivantes. Si vous estimez que votre réponse se situe entre deux chiffres, merci de placer un « X » à l'endroit opportun

1. Lorsque vous étiez à l'école primaire, quelle était l'opinion de vos parents vis-à-vis de l'éducation?

L'éducation était
très importante

L'éducation n'était
pas importante

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

2. Lorsque vous étiez à l'école primaire, quelle était votre attitude vis-à-vis de l'école?

Vous aimiez l'école
(activité favorite)

Vous détestiez
l'école

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

3. Avez-vous eu des difficultés pour apprendre à lire à l'école primaire ?

Aucune

Beaucoup

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

3. Avez-vous eu besoin d'une aide extérieure pour apprendre à lire à l'école primaire?

Aucune
aide

Aide d'un
ami

Professeurs/
Parents

Tuteurs ou
classe
spécialisée

Orthophoniste
Logopédiste

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

4. Quand vous étiez enfant, avez-vous déjà inversé l'ordre des lettres ou des chiffres ?

Non

Beaucoup

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

5. Quand vous étiez enfant, avez-vous eu des difficultés à apprendre les noms des lettres et/ou des couleurs ?

Non

Beaucoup

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

6. Comment compareriez-vous vos habiletés de lecture à celles de vos camarades de classe de l'école primaire ?

Supérieures à

Moyennes

Inférieures à



la moyenne
0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ la moyenne
4

7. Tous les enfants ont des difficultés de temps en temps à l'école primaire. Par rapport à vos camarades de classe, aviez-vous des difficultés pour terminer votre travail ?

Pas du tout	Moins que la plupart	A peu près identique	Plus que la plupart	Beaucoup plus que la plupart
0 _____	1 _____	2 _____	3 _____	4 _____

5. Quand vous étiez à l'école primaire, aimiez-vous lire ?

Beaucoup					Pas du tout
0 _____	1 _____	2 _____	3 _____	4 _____	

8. Comment compareriez-vous votre vitesse de lecture par rapport à vos camarades de classe de l'école primaire ?

Supérieure à la moyenne		Moyenne		Inférieure à la moyenne
0 _____	1 _____	2 _____	3 _____	4 _____

7. Quand vous étiez à l'école primaire, combien de livres lisiez-vous par plaisir chaque année ?

Plus de 10	6 à 10	2 à 5	1 à 2	Aucun
0 _____	1 _____	2 _____	3 _____	4 _____

8. Combien de bandes dessinées lisiez-vous par plaisir chaque année ?

Plus de 10	6 à 10	2 à 5	1 à 2	Aucune
0 _____	1 _____	2 _____	3 _____	4 _____

ACTUELLEMENT

1. Quel est actuellement votre niveau de difficulté pour lire ?



Aucune

Beaucoup

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

2. Avez-vous besoin d'une aide extérieure pour lire?

Aucune
aide

Aide d'un
ami

Professeurs/
Parents

Tuteurs ou
classe
spécialisée

Orthophoniste
Logopédiste

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

3. Comment considérez-vous vos habiletés de lecture par rapport à celle de vos collègues ?

Supérieure à
la moyenne

Moyenne

Inférieure à
la moyenne

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

4. Par rapport à vos collègues, avez-vous des difficultés pour terminer un travail écrit ?

Pas du tout

Moins que
la plupart

A peu près
identique

Plus que
la plupart

Beaucoup plus
que la plupart

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

5. Quelle est votre attitude face à la lecture ?

Très positive

Très négative

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

6. Lorsque vous comparez votre vitesse de lecture à celle de personnes ayant le même âge et niveau d'étude que vous, où vous situez vous ?

Supérieure à
la moyenne

Moyenne

Inférieure à
la moyenne

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

7. Combien de temps de lecture faites-vous en lien avec vos études/ votre formation ou votre profession?

Sup à 40h

30-40h/sem

20-30h/sem

10-20h/sem

Inf à 10h/sem

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

8. Avez-vous des difficultés à vous remémorer des instructions verbales complexes?

Aucune

Beaucoup



0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

9. Est-ce qu'il vous arrive régulièrement d'inverser l'ordre des lettres ou des chiffres lorsque vous lisez?
Jamais _____ Souvent _____

0 _____ 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____

10. Combien de livres lisez-vous par plaisir chaque année?

Plus de 10	6 à 10	2 à 5	1 à 2	Aucun
0 _____	1 _____	2 _____	3 _____	4 _____

11. Combien de magazines lisez-vous par plaisir chaque mois ?

5 ou plus	3 à 4	1 à 2	1 à 2	Aucun
	régulièrement	régulièrement	irrégulièrement	
0 _____	1 _____	2 _____	3 _____	4 _____

13. Lisez-vous quotidiennement un journal?

Tous les jours	1fois	De temps	Rarement	Jamais
	par semaine	en temps		
0 _____	1 _____	2 _____	3 _____	4 _____

MERCI POUR VOTRE COLLABORATION !

2. Questionnaire médical

Questionnaire confidentiel : Données personnelles

CODE :

--	--	--	--

NOM:.....



PRENOM:.....

SEXE: *Masculin/Féminin*

DATE DE NAISSANCE:...../...../..... (*Jour/ Mois / Année*)

LATERALITE MANUELLE: *Droit/ Gauche/ Ambidextre*

PROFESSION (*si étudiant, faculté et année*):.....

ADRESSE:.....

.....

TELEPHONE / MOBILE:.....

Seriez-vous disposé à participer à une nouvelle expérience (oui/non) ? :.....

Informations concernant l'utilisation et la protection des données personnelles dans la recherche à l'Hôpital Cantonal Universitaire de Genève (HCUG)

Nous vous remercions d'avoir accepté librement et de votre plein gré de participer à cette recherche. Nous voudrions vous indiquer nos lignes de conduites pour la protection des données et des enregistrements obtenus lors des sessions expérimentales.

- Les données issues du questionnaire et des enregistrements seront traitées en toute confidentialité et anonymement.
- L'accès à celles-ci est placé sous la responsabilité du directeur de recherche.
- A la fin du travail (après publication des résultats), les données personnelles seront détruites.
- Les données personnelles ne seront pas divulguées à l'extérieur du laboratoire.
- Le sujet peut consulter ses données après la fin de l'expérience.
- Avant l'expérience, le sujet peut, s'il le désire, obtenir des informations concernant la procédure et la méthode.

Signature du Chercheur

Signature sur Sujet (mention lu et approuvé)



Questionnaire confidentiel et anonyme (1/2)

CODE :

--	--	--	--

TEST DE LATERALITE *(Edinburgh Handedness Inventory)*

Prière d'indiquer votre préférence manuelle pour chacune des activités ci-dessous en inscrivant un signe "+" dans la colonne appropriée.

Si la préférence est si forte que vous n'utilisez l'autre main que si vous y êtes absolument forcé, inscrivez "++".

Si vous utilisez l'une ou l'autre main indifféremment, inscrivez un "+" dans chaque colonne.

Essayez S.V.P. de répondre à toutes les questions

No°	Activités	Main gauche	Main droite
1	Ecrire		
2	Dessiner		
3	Coudre (main tenant l'aiguille)		
4	Tenir une paire de ciseaux		
5	Se brosser les dents		
6	Tenir un couteau		
7	Tenir une cuillère		
8	Tenir un balai (main supérieure)		
9	Allumer une allumette (main tenant l'allumette)		
10	Ouvrir une boîte (main tenant le couvercle)		

Total gauche =

QL =

Total droite =

Décile =



Questionnaire confidentiel et anonyme

CODE :

--	--	--	--



Les questions ci-dessous doivent nous aider à établir que vous remplissez les critères pour passer les examens requis pour cette expérience : IRM et stimulation transcrânienne.

1. Êtes-vous porteur d'objets métalliques dans le corps ,
oui/non
 - Piercing
 - Matériel médical (stérilet, clips chirurgicaux, stimulateur cardiaque ou
oui/non
neural, implants ou objets métalliques, implants cochléaires...)
 - Matériel dentaire
oui/non
 - Autres objets (éclat lié à par exemple à ferronnerie, accident, balle, corps
oui/non
étranger intraoculaire ou dans le système nerveux)
2. Avez-vous des tatouages ou du maquillage permanent ?
3. Êtes-vous claustrophobe ?
4. Êtes-vous enceinte ou susceptible de l'être le jour de l'examen ?
5. Souffrez-vous actuellement d'un problème de santé ? OUI / NON
Si oui, lequel ?
.....
.....
.....
.....
6. Avez-vous souffert de problèmes médicaux ?
Si oui, lequel ?
.....
.....
.....
.....
7. Avez-vous souffert de l'un de problèmes médicaux suivant ? Si oui, précisez :
 - Traumatisme crânien
 - Épilepsie/convulsions
 - Trouble de l'apprentissage/hyperactivité
 - Migraines
 - Problèmes thyroïdiens ou autres problèmes hormonaux
 - Problèmes neurologiques (méningites, encéphalite...)



8. Votre mère a-t-elle eu un problème de santé quel qu'il soit pendant qu'elle vous attendait ou lors de votre naissance, comme : un accouchement prématuré ou des complications pendant l'accouchement ?

.....
.....
.....

9. Avez-vous commencé à marcher et à parler plus tard que les autres enfants ?

oui/non

Si oui précisez :

.....
.....
.....

10. Prenez-vous actuellement un traitement ? (y compris contraception orale)

.....
.....
.....

11. Avez-vous déjà eu un des examens suivants :

- EEG

oui/non

- IRM cérébral

oui/non

12. Buvez-vous de l'alcool ?

quotidiennement/fréquemment./rarement/jamais

13. Consommez-vous du cannabis ?

quotidiennement/fréquemment./rarement/jamais

14. Avez-vous consommé d'autres drogues que le cannabis ?

oui/non

15. Votre acuité visuelle est-elle bonne ? OUI / NON

Si corrigée, précisez

16. Avez-vous un trouble auditif ?

oui/non

.....
.....

17. Indiquez ci-dessous les éventuels autres facteurs qui auraient pu influencer votre performance.

.....
.....
.....



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

**FACULTÉ DE PSYCHOLOGIE
ET DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION**

.....

.....





3. Questionnaire sur l'expérience et la compétence en langue

Northwestern Bilingualism & Psycholinguistics Research Laboratory

Marian, Blumenfeld, & Kaushanskaya (2007). The Language Experience and Proficiency Questionnaire (LEAP-Q): Assessing language profiles in bilinguals and multilinguals. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 50 (4), 940-967.

Traduction par Bhatara, Michaud, et Gervain (2011), Adapted by Marilyn Hall

Questionnaire sur l'Expérience et la Compétence en Langue, Version pour la France

Nom de Famille		Prénom		Date	
Age		Date de naissance		Homme <input type="checkbox"/>	Femme <input type="checkbox"/>

(1) Veuillez énumérer toutes les langues que vous connaissez **par ordre de dominance**:

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

(2) Veuillez énumérer toutes les langues que vous connaissez **par ordre d'acquisition** (votre langue maternelle en premier):

1		2		3		4		5	
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

(3) Veuillez inscrire, en pourcentage, la quantité de temps d'exposition *actuellement* à chacune de vos langues en moyenne.

(*Vos pourcentages devraient s'additionner à 100%*):

Langue:					
Pourcentage:					

(4) Lorsque vous avez la possibilité de lire un texte disponible dans toutes les langues qui vous sont familières, dans quelle mesure (en pourcentage) choisiriez-vous de le lire dans chacune de vos langues (en imaginant que l'original a été écrit dans une langue qui vous est inconnue)? (*Vos pourcentages devraient s'additionner à 100%*):

Langue:					
Pourcentage:					

(5) Lorsque vous choisissez une langue pour engager une conversation avec un individu qui peut s'exprimer dans chacune de vos langues dans quelle mesure (en pourcentage) choisiriez-vous d'employer chacune de vos langues? Inscrivez le pourcentage total.

(*Vos pourcentages devraient s'additionner à 100%*):

Langue:					
Pourcentage:					

(6) Énumérez les cultures auxquelles vous vous identifiez. Sur une échelle de zéro à dix, évaluez à quel point vous vous identifiez à chaque culture. (Des exemples de cultures possibles incluent: Français, Arabe, Chinois, Allemand, Russe, etc.):

Culture:					
	(cliquez ici pour l')	(cliquez ici pour l')	(cliquez ici pour l')	(cliquez ici pour l')	(cliquez ici pour l')

(7) Combien d'années d'éducation avez-vous? _____

Cochez votre niveau d'éducation le plus élevé (ou l'équivalent Français d'un diplôme obtenu dans un autre pays):

- | | | |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> niveau Brevet | <input type="checkbox"/> BTS, Bac+2 | <input type="checkbox"/> Master |
| <input type="checkbox"/> lycée (niveau Bac) | <input type="checkbox"/> DUT, Licence | <input type="checkbox"/> Doctorat |
| <input type="checkbox"/> Formation professionnelle (CAP, BEP) | <input type="checkbox"/> Grandes Écoles | <input type="checkbox"/> Autre: _____ |

(8) Date d'immigration en France, si applicable _____


Si vous avez déjà immigré dans un autre pays, identifiez le pays et mentionnez la date d'immigration ici: _____

(9) Avez-vous déjà eu des problèmes de vision ☐, problèmes d'audition ☐, troubles du langage ☐, ou troubles d'apprentissage ☐ ? (Cochez toutes les cases applicables). Si oui, expliquez (en incluant des corrections si nécessaires). _____




4. ECLA 16+ (diagnostique de dyslexie)


ECLA-16+



Centre de formation
SY



Centre de Formation de Conseillers d'Orientations-Psychologues
Université de Provence
Aix-Marseille I



LSE
LABORATOIRE
DES SCIENCES
DE L'ÉDUCATION

ECLA-16⁺

Cahier de consignes

Juin 2011

Centre de Formation de Conseillers
d'Orientation-Psychologues
UFR de Psychologie, Sciences de l'Éducation
29, av R Schuman
13621 Aix en Provence Cedex 1

ECLA-16⁺**Les consignes**

1. Fluence verbale catégorielle

Donnez le plus de noms d'animaux que vous connaissez en une minute. Je vais déclencher le chronomètre et vous arrêterai au bout d'une minute.

Dire : « Commencez » en déclenchant le chronomètre et noter un tiret pour chaque nom énoncé. Arrêter l'épreuve au bout d'une minute.

Noter le score : nombre de mots d'animaux.

2. L'alouette

Expliquer au sujet :

- qu'il doit lire le texte à voix haute, le mieux possible,
- que celui-ci n'a pas vraiment de sens et qu'il n'y a rien à comprendre.
- qu'on le chronomètre et qu'on l'arrêtera au bout de 3 minutes s'il n'a pas fini.

Donner le texte et suivre sur la fiche comportant le décompte des mots.

Déclencher le chronomètre lorsqu'il commence sa lecture (le titre n'est pas à lire), l'arrêter quand il a fini la page ou au bout de 3 minutes de lecture s'il n'a pas fini, en notant sur la fiche le dernier mot lu.

Quand il bute sur un mot, attendre 5 secondes et lui dire de passer au mot suivant.

Barrer les mots sautés ou mal lus. Un mot mal lu initialement puis corrigé n'est pas décompté comme une erreur.

Rayer toutes les lignes sautées.

Noter :

Le texte contient 265 mots

T = le temps de lecture en secondes s'il est inférieur à trois minutes.

Ou N = le nombre de mots lus en 3 minutes, en s'aidant des chiffres situés en bout de ligne si vous avez arrêté la lecture au bout de 3 minutes.

E = le nombre d'erreurs : tous les mots mal lus, sautés ou composant les lignes sautées.

Pour calculer le nombre de Mots Correctement Lu par Minute (MCLM):

1^{er} cas la personne lit le texte en moins de 3 minutes : le calcul du MCLM se fait comme suit : $MCLM = (265 - E/T \text{ en seconde}) \times 60$

Exemple : Il a lu le texte en 2 minutes 25 secondes (soit 145 secondes) il a fait 14 erreurs

$MCLM = (265 - 14/145) \times 60 = 104$ il se situe au 15^e centile et à -1,06 e.t. de la moyenne de la

« population totale ».

2^e cas la personne ne finit pas le texte en 3 minutes le MCLM se calcule comme suit.

$MCLM = N - E/3$

Exemple il a lu 188 mots en 3 minutes il a fait 5 erreurs

$MCLM = 188 - 5/3 = 61$

Il est inférieur au 5^e percentile et à -2,26 e.t. de la « population totale ».



ECLA-16+

3. Suppression des phonèmes initiaux

« Maintenant vous allez supprimer le premier son du mot que je vous dis et donner ce qui reste.

Donner un exemple : « si je dis *fleuve*, j'enlève le premier son, c'est /f/, il reste /leuve/ ». Lui faire faire un essai avec *outil* qui donne /til/.

Donner deux autres exemples : « ombrage » et « tracteur ». Donner un retour et corriger si nécessaire. Reprendre comme précédemment en explicitant :

- Le premier son de « ombrage » est /om/, si on l'enlève il reste /brage/.
- Le premier son de « tracteur » est /t/, si on l'enlève il reste /racteur/.

Lui donner les mots de la liste un à un. **Chronométrer** dès que vous donnez le premier mot. Noter sans commentaire la réponse du jeune si elle est fautive ; mettre une croix si elle est juste.

Noter :

le score de réussite sur 10

le temps en secondes

4. Contrepèteries

« Savez-vous ce qu'est une contrepèterie ? »

- Si la réponse est « non » :

« C'est lorsqu'on intervertit les sons initiaux de deux mots en créant deux autres mots (qui n'existent pas). Par exemple : (faire des gestes avec les mains) les mots ROBE et PIPE deviennent POBE et RIPE. Vous avez entendu ce que je viens de faire ? J'ai pris le son / P / de PIPE et le son / R / de ROBE et je les ai inversés pour produire RIPE et POBE ».

« Essayons avec des exemples » → ex. 2 et ex. 3.

- Si la réponse est « oui »

Ex. 1 « Que deviennent les mots PIPE / ROBE ? » (réponse : RIPE / POBE)

Ex. 2 « Que deviennent les mots SUCRE / TIGRE ? » (réponse : TUCRE / SIGRE)

Ex. 3 « Que deviennent les mots VASE / LION ? » (réponse : LASE / VION)

Donner du Feedback

Chronométrer l'épreuve à partir des 2 premiers mots donnés (banane – ficelle)

Une répétition de ces 2 mots est autorisée et n'est pas exclue du temps chronométré. On ne tient pas compte de l'ordre des 2 mots donnés en réponse (Pour le premier exemple les réponses RIPE/POBE ou POBE/RIPE sont toutes les 2 correctes)

Noter :

le temps de passation de l'épreuve totale en secondes

le score 0, 1 ou 2 pour chaque réponse. (0 = aucune réponse correcte, 1 = 1 mot correct, 2 = 2 mots corrects) et **le score total** sur 20

5. Dénomination rapide d'images

Ce test est composé d'une planche de 25 images de 5 dessins différents disposés de manière aléatoire que le sujet doit dénommer le plus rapidement possible.

Placer devant lui la feuille comportant les images et lui demander de nommer les images se trouvant dans la première colonne (dans laquelle les 5 images différentes sont présentes) pour



ECLA-16*

s'assurer qu'elles sont bien connues. Préciser qu'il ne doit pas utiliser de déterminant, il doit dire :
RAISIN – CHAPEAU – COUTEAU – LAPIN - CISEAUX

Lui expliquer ensuite qu'il doit nommer l'image de chaque case en suivant les lignes horizontalement dans le sens de la lecture et que l'on va noter le temps qu'il met.

Déclencher le chronomètre au premier son de la dénomination. Arrêter le chronomètre à la fin de la dénomination de la dernière image.

Si le sujet s'arrête sur une case, attendre 5 secondes et lui demander de passer à la suivante.

Noter le temps en secondes

6. Dénomination de lettres

« Maintenant vous devez lire les lettres une à une le plus vite possible sans erreurs »
Chronométré.

Noter le temps et le score de réussite sur 50

7. Dictée de texte (donner le cahier de passation p.VII ainsi qu'un crayon)

Pour dicter, lire la première phrase en entier, puis la dicter en la segmentant. Poursuivre de la même manière jusqu'à la fin du texte. Il n'y a pas de temps imparti, mais ne pas laisser un temps de correction, car il ne doit pas y avoir de relecture.

« Voici maintenant une dictée d'un texte. »

« Les arbres s'enfoncent dans la terre par leurs racines comme leurs branches s'élèvent vers le ciel. Leurs racines les défendent contre les vents et vont chercher, comme par de petits tuyaux souterrains, tous les suc destinés à la nourriture de leur tige. La tige elle-même se revêt d'une dure écorce qui met le bois tendre à l'abri des injures de l'air. Les branches distribuent en divers canaux la sève que les racines avaient réunie dans le tronc. »

On ne prendra en compte que les erreurs faites sur 10 mots d'usage et 10 accords.

Pour les mots d'usage, on ne compte que les fautes d'usage et sans tenir compte des marques du pluriel et pour les accords on ne tiendra compte que de l'accord même s'il existe des erreurs sur l'usage. Le score sera celui du nombre de mots correctement écrits.

Usage :

s'enfonce

écorce

tuyaux

abri

souterrain

injure

suc

divers

nourriture

tronc



ECLA -16⁺

Accord :	leur S (racines)	revê t
	cherch er	dur e
	petit S	à (l')abri
	tou S	distribu ent
	destiné S	réuni e

8. Barrage de symboles

Donner la feuille au format A3 (si cela n'est pas possible coller ensemble les 2 feuilles A4) comportant des symboles. « Vous voyez ces 2 signes. Vous allez les rechercher et les barrer le plus rapidement possible en 1 minute ½.



- Présenter la feuille verticalement mais laisser le la tourner s'il préfère.
- Chronométrer dès le début de l'épreuve et arrêter au bout de 1 minute ½. (90 secondes)

Noter le score : nombre de symboles corrects barrés

9. Lecture de texte

« Vous allez lire un texte pendant une minute. Je vous arrêterai. Il va falloir que vous alliez le plus vite possible, en essayant de ne pas faire d'erreur. Vous êtes prêt ? »

- chronométrer
- suivre sur la fiche de cotation et barrer les mots mal lus
- lorsque le sujet butte sur un mot plus de 5 secondes, lui dire de continuer
- l'arrêter au bout d'une minute

Noter le nombre de mots lus et le nombre d'erreurs. On pourra alors déterminer le nombre de mots correctement lus en 1 minute : $MCLM = \text{Nombre de mots lus} - \text{nombre d'erreurs}$

10. Lecture de mots isolés

Donner la fiche avec les listes de mots à lire (cachées par une feuille blanche). « Je vais vous présenter 3 listes de mots, il va falloir que vous les lisiez le plus rapidement possible sans faire d'erreur. La dernière liste est composée de mots qui n'existent pas. »

- Avec une feuille blanche découvrir les listes une à une pour les faire lire
- chronométrer chaque liste
- noter sur la fiche de cotation toutes les productions erronées

Noter le temps et le score de réussite sur 20 pour chaque liste

11. Barrage des « n » (donner le cahier de passation p.VIII)

Donner la fiche avec les lettres. « Vous allez barrer le plus vite possible toutes les lettres « n » que vous trouvez dans ces lignes. Je vous arrêterai au bout de 1 minute 30. (90 secondes) ».

Noter le score de « n » trouvés

ECLA-16⁺**12. Dictée de mots réguliers et irréguliers et de pseudo-mots** (cahier de passation p.VII)

« Maintenant, je vais vous dicter des mots plus ou moins difficiles, je voudrais que vous les écriviez le plus correctement possible. Je ne dicterai chaque mot qu'une seule fois. La dernière liste est constituée de mots qui n'existent pas comme ceux que vous venez de lire. Ecrivez ce que vous entendez. »

- chronométrer séparément le temps mis pour chaque liste
- corriger les erreurs, pour les non mots on attend une écriture phonologiquement correcte.

Noter le temps et le score de réussite pour chaque liste

Mots réguliers	Mots inconsistants	Pseudo-mots
tonneau	nerf	ribule
face	comtesse	plandar
anorak	solennel	trimbeur
berceau	essaim	criboise
wagon	accroc	ganile
canicule	étang	janifle
vigne	accès	jandasseur
candidat	harnais	bartille
crépuscule	galop	gliret
orgueil	addition	péguide

13. Répétition de non-mots

« Dans cette épreuve, je vais vous dire des mots qui n'existent pas, que l'on a inventés. Il va falloir que vous les répétiez après moi. Faites bien attention, car je ne les répéterai pas. Essayez donc de les prononcer exactement comme moi. Vous êtes prêts ? »

Précautions à prendre : Cacher sa bouche lorsqu'on produit les mots, afin que le jeune ne puisse pas être aidé sur le plan visuel par la lecture sur les lèvres.

Barrer les mots qui ne sont pas correctement répétés.

Noter le score de mots correctement répétés : score sur 20

14. Mémoire à court terme et de travail (empan endroit et envers)

Chiffres à l'endroit :

« Je vais vous dire des listes de quelques chiffres, écoutez attentivement et quand j'aurai fini, vous les répéterez exactement comme je vous les ai données. »

Arrêter après un échec à 2 essais d'une liste comportant le même nombre de chiffres.

Noter en score le nombre de la plus longue série de chiffres répétés



ECLA-16⁺

CAHIER DE PASSATION

Évaluation des Compétences de Lecture chez l'Adulte de plus de 16 ans – ECLA 16+

Nom : _____

Date d'administration

Prénom : _____

Date de naissance

Age

Anné	Mois	Jour

Sexe : ☐ F ☐ M

Latéralité : ☐ D ☐ G

Situation :

☐ Scolarisé(e) Classe : Etablissement

☐ activité professionnelle : _____

☐ niveau de formation ou diplôme : _____

Examen effectué par : _____

Fonction : _____

Eléments d'anamnèse :

Langue maternelle :

Problèmes auditif, visuels, moteurs :

Observations au cours de la passation :



5. Tests linguistiques

5.1. Test de répétition de pseudo-mots

REPÉTITION DE PSEUDO-MOTS	TEST 1	TEST 2	TEST 3
	pofandujesse	fugonjalis	bajingomusse
	irflaviérer	orsjussoifer	okfivoïna
	vapotrilchur	rigavrolmur	nujigrolchère
	ardmolbulier	urflanidier	ersjurbopier
	gopadomène	fikodasène	dijokavène
	grinpaloutier	brondolinvier	groubanondier
	kabilonufer	zépuvotaji	kybéfolani
	lirafinéro	novugosséra	lufodussati
	gorchazudéri	bolfujiréra	berzorativu
	famirugoudel	nonbazokutic	vuninchogamol
	pafutonzikal	bovoudéjogal	mutivouchigor
	torudralménil	mivotralburel	gavrolnéuliss
	arslovudinier	algbuditodier	olgkufadoïner
	elfacograber	urtapucroder	aspimogréco
	fagonierdovène	dogugiervoral	vierdomalovul
	pabamopokéguérik	tidinatabupumobo	bupulachadatanédé
	fébujékomintulisse	vatolareboulénoss	gozamo témondulasse
	poividon zéochping	doujakoïpualvong	donpaforoïurfing
	patukiburdalgo	budagofarsilcho	nimanopalturki
	nokrulsèmratrèlvire	buvrol jagridrolfère	madrilsorélogrulfère
	alfugilavtondu	eldotarèvmintu	ursamigulronder
	gofujilfa	gométaldo	vumotilba
	fouvapelazvikère	foivibunolvidane	fonvabéralbugène
	fasichonoivozouka	vozigékatoïfonpu	pokatujoïguranber
	chouvadoïpertagomer	rondaboïservugater	voitipodankurabé
	drondolintierpabocho	droubélonviagokaja	krandovoulérçachodo
	vugézadakou diwon	zovijubamouwila	fochisubésouyada
	fatochékubévozuda	duvobajitofuchaki	pofachisséjjadober
	falbugérerbagojufu	bazvikélèrmivadono	cholvidanatudolèner
	foujidérojakodanol	gondirédofijadonel	favoukérovumadonal



5.2. Test de contrepèterie

	TEST 1		TEST 2		TEST 3	
CONTREPETERIE	patère	boudin	pochette	rasoir	machette	faveur
	tomate	velours	fumée	vallon	thérapie	prosodie
	nutrition	document	conclusion	baluchon	potasse	bidon
	manteau	pichet	crapule	prunier	crapaud	plombier
	mousqueton	testament	pétale	badaud	carbone	sergent
	caleçon	draperie	quolibet	procédé	citronnier	batterie
	brocard	clavier	carton	troubadour	ticket	devis
	martyr	pastiche	derby	cordon	bardeau	dromadaire
	dortoir	trafiquant	parchemin	nirvana	masculin	cornichon
	turbine	garçon	pastel	sulfure	culture	vestige
	batracien	cachalot	calvitie	partisan	manuel	bottine
	défilé	granité	coupole	moteur	dépression	matinée
	virgule	gargote	droitier	tribune	pétanque	bandit
	couchette	motard	sécrétion	véranda	talon	défis
	souris	zombie	félin	valet	verglas	surplus
	forcené	bactérie	potiche	body	biberon	criminel
	potage	bidule	gorgée	serpent	tripier	drastique
	globule	bretteur	fortune	traduction	cordon	droguerie
	posture	mystique	gobelet	crèmerie	carburant	pastoureau
	percale	crispation	constance	vecteur	pistache	castor
	canari	libido	favori	comité	coryza	pédalo
	garçonnet	corbillard	berlingot	portillon	serpentin	charlatan
	cailloutis	figurine	guillotine	location	jugulaire	cachotier
	vertébré	faisan	chasser	jardiner	barbelé	poussin
	déchéance	minorité	nucléaire	débilité	mécréance	polygamie
	floral	poulet	cratère	préfet	travail	briquet
	bricolage	politique	plateforme	commérage	dramaturge	puritaine
	aphasie	opposé	otarie	inédit	utopie	aligot
	calèche	révolte	démarche	finance	bâtisse	réponse
	attarder	exalté	ajuster	exhorter	exhausser	apostat



5.3. Test de 3 minutes de lecture

Texte 1 :

La prise de décision est un domaine qui a suscité beaucoup d'intérêt chez les philosophes, les économistes, les psychologues et les spécialistes des neurosciences. Une question fondamentale qui anime la recherche dans ce domaine est de savoir pourquoi des individus ayant les mêmes options font des choix différents. Pourquoi des modèles rationnels tels que ceux utilisés en économie et dans la théorie classique de la prise de décision n'arrivent pas toujours à prédire le comportement d'un individu avec précision ?

Ces questions et tant d'autres sont importantes dans la mesure où elles orientent la recherche vers l'étude des différences interindividuelles qui pourrait expliquer le comportement des gens en situation de prise de décision. L'étude de l'émotion en tant que facteur distinct dans le processus de décision devient de plus en plus nécessaire. Plusieurs chercheurs ont souligné l'importance des influences expérimentales, sociales et émotionnelles sur la prise de décision. Cependant il faut signaler que le conflit entre le raisonnement rationnel et émotionnel persiste encore. L'émotion est souvent présentée comme un obstacle au raisonnement logique dont il faut se défier.

La polarisation entre émotion et la cognition fonde, de fait, la pensée occidentale et tout particulièrement les sciences. Elle recoupe les polarisations corps – esprit, nature – culture, etc. qui modèlent nos visions et actions. Dans cette optique les façons d'envisager nos activités mentales sont le plus souvent, structurées et orientées en fonction de la rationalité pure. À la lumière d'un certain nombre d'arguments portés par des recherches en psychologie cognitive et en neurobiologie, cette conception d'antagonisme entre émotion et rationalité est profondément remise en cause. Plusieurs recherches ont montré l'importance des émotions dans le fonctionnement cognitif. Certaines études ont mis l'accent sur le lien étroit entre l'émotion et la prise de décision. Il y a donc au moins deux processus distincts de prise de décision : l'un basé sur une intelligence logicomathématique, l'autre dépend des habiletés dédiées à la gestion des émotions intra et interindividuelles.

Ces compétences émotionnelles ont été principalement théorisées à travers le concept d'intelligence émotionnelle. Dans les conceptions actuelles de prise de décision, plusieurs travaux tentent de ne pas opposer les processus logicomathématiques à ceux de l'émotion. Il n'est plus question d'envisager que l'un puisse remplir à la seule fonction de l'autre mais plutôt de comprendre comment ils collaborent. Cette nouvelle conception s'inscrit dans un mouvement de



la recherche où la place de l'approche intégrative des déterminant cognitifs et émotionnels est de plus en plus invoquée pour rendre compte de la performance humaine en général et la prise de décision en particulier.

Texte 2 :

Le thème de la décision constitue un champ d'étude majeur en psychologie et plus particulièrement en psychologie cognitive. Qu'elles soient normatives ou contextuelles, les différentes théories de la décision ont toujours eu pour objectif d'expliquer la prise de décision des individus et l'amélioration des processus y conduisant. Cependant au fil des évolutions de nouveaux concepts ont été utilisés tandis que d'autres ont changé de nature. Ainsi l'existence d'une erreur est d'abord apparue comme impossible puis sa réalité a été admise avec comme corollaire la nécessité de la supprimer et enfin la reconnaissance de son rôle a conduit à la considérer comme partie intégrante du processus décisionnelle.

Une interprétation historique de la théorie décisionnelle permet de dégager trois grandes approches. Dans cette approche les chercheurs mettent en évidence l'application d'un modèle normatif de décision. Cette vision optimisatrice se fondait sur la détermination d'un ensemble des possibles et le calcul de la solution optimale selon le critère de l'utilité subjective attendue. L'amélioration du raisonnement passait par une optimisation des calculs afin de les rendre plus rapidement convergents vers la bonne solution. Dans cette première phase les concepts de démarche heuristique et de biais n'avaient pas leur place puisque l'activité mentale humaine était réputée fondée sur une logique qui restait rationnelle

La vision normative et optimisatrice de la prise de décision a largement été remise en cause par l'introduction de la psychologie et des sciences cognitives. Cette approche classique de la théorie de la décision est directe. A chaque diagnostic est associé une probabilité et à chaque traitement des conséquences. En utilisant un des protocoles de construction de la fonction de valeur du décideur sur les conséquences on peut bâtir la fonction d'utilité du décideur et à travers sa maximisation on est capable d'identifier la solution qui devrait être appliquée car elle maximise l'utilité espérée du décideur. L'existence de cette fonction est garantie par un certain nombre d'axiomes énonçant ce qui, en théorie constitue un comportement rationnel pour un décideur. Les préférences sont transitives. La présence de cycles impliquerait que le décideur pourrait augmenter



indéfiniment la valeur de n'importe quelle solution. De même, les probabilités sont indépendantes. Il faut noter qu'aucune observation sur le comportement du décideur particulier n'a été effectuée pas plus que sur celui du décideur placé dans des situations similaires. C'est le décideur qui doit adapter ses préférences et son comportement à ces axiomes. S'il ne le fait pas c'est qu'il n'est pas rationnel.

Texte 3 :

Donner une juste représentation d'un état possible du monde est une tâche difficile. Chacun de nous a été confronté à cette tâche en prenant ses propres décisions. Il est invraisemblable qu'un modèle de simulation soit construit de nouveau pour chaque problème de décision.

Chaque personne devrait déjà posséder un modèle général des états possibles du monde, un simulateur cognitif qui doit s'appliquer à chaque problème de décision en prenant en compte des informations supplémentaires. Toda considère le simulateur cognitif ainsi que ces composants comme un système qui s'auto-organise. Cependant, l'activité essentielle de n'importe quel système auto-organisateur devrait passer d'auto-organisatrice à productrice, si le système doit avoir une quelconque utilisation pratique. Même si l'auto-organisation et la production ne sont pas incompatibles, le fonctionnement simultané des deux fonctions devrait être inefficace. Par ailleurs, le type d'information dont a besoin le système pour chacune des deux fonctions est généralement différent. Pour la phase d'auto-organisation, l'information structurale est plus importante que l'information situationnelle et vice-versa pour la phase de production. L'avantage d'un système s'organisant de lui-même est qu'il peut d'une manière appropriée se développer et s'accorder avec l'environnement donné. Ce développement adaptatif devrait impliquer que certains invariants structuraux du système soient compatibles avec certains invariants structuraux de l'environnement. C'est ce que Toda nomme la compatibilité structurale. La théorie de la dissonance cognitive semble être appropriée à cette issue. Cet auteur avance que dans certaines de ces conduites, le décideur paraît adopter comme information de référence le résultat de l'élaboration logique d'informations antérieures tenues pour vraies. Chaque information actuelle peut ainsi être comparée à ces déductions. Si la comparaison révèle une incohérence, le décideur tend à rétablir l'équilibre rompu, par exemple en modifiant ses croyances. Le troisième modèle intègre le concept de situation décisionnelle. L'analyse d'une décision doit intégrer le contexte dans lequel elle est apprise. Ce



modèle décisionnel va se focaliser sur la reconnaissance par le décideur de la situation décisionnelle. Ce qui est intéressant dans cette approche, c'est qu'elle n'étudie plus les processus cognitifs isolément des contextes dans lequel ils s'exercent. Elle admet que les décisions ne sont pas planifiées et exécutées hors du contexte de leur situation, c'est-à-dire hors des règles dans lesquelles la situation s'inscrit.

Le contexte peut être définie comme l'ensemble des éléments perçus par le décideur qui exerce une contrainte sur la tâche gérée.



5. CV

JOHANNA NICOLLE – CV



1. PERSONAL DATA

HOME ADDRESS

611 route de la tête du char, 74420 Habère-Lullin

WORK ADDRESS

Department of Neuroscience Biotech Campus 9, chemin des Mines 1211 Geneva

DATE AND PLACE OF BIRTH

18.01.1990, Lyon, France.

NATIONALITY

French

FAMILY STATUS

Children born in 2014, 2016, 2019.

LANGUAGES

French, English

2. PRESENT POSITION

Phd Student (4th year), Neuroscience Departement, University of Geneva

SUPERVISOR: Anne-lise Giraud

THESIS SUBJECTS

- Neural mechanisms of speech perception in dyslexia
- Transcranial Alternating Current Stimulation in auditory cortex as tools for dyslexia rehabilitation

3. DIPLOMAS

2010	B1 level in Sign Language
2014	BA Langage Science (Paris ouest Nanterre University)
2016	M. Sc. Langage Science (Paris ouest Nanterre University)

4. TRAINING



2011 Sign Language training in VISUEL (Paris)
2011 BA training at Paris Ouest Nanterre University
2016 M. SC training at Laboratoire MoDyCo (Paris Ouest Nanterre University)

6. PUBLICATION

Marchesotti, S., Nicolle, J., Merlet, I., Arnal, L. H., Donoghue, J., & Giraud, A.L. (2020). Selective enhancement of low-gamma activity by tACS improves phonemic processing and reading accuracy in dyslexia. *PLoS Biology* 18(9).

Nicolle, J., Giraud, A.L. (2020) Bases neurales du langage, au moyen de l'électrophysiologie humaine et des neurosciences computationnelles. UNADREO.

Nicolle, J., Marchesotti, S., Déaux, E., Merlet, I., & Giraud, A.L. (2021) Antagonist effects of auditory cortex tACS on phonemic and prosodic processing (in prep)

7. CONFERENCES, TALK & POSTER

BryCoCo 2017 Altering phonological awareness with 30Hz tACS (talk)
ABIM 2017, 2018, 2019 Altering phonological awareness with 30Hz tACS (Poster)
NCCR meetings 2019, 2020 Selective enhancement of low-gamma activity by tACS improves phonemic processing and reading accuracy in dyslexia

8. COMPETENCES

Linguistic and neurolinguistic
Psycholinguistic
Statistics
Electrophysiology (signal treatment)
Language: MATLAB and R



6. Publications

Marchesotti, S., Nicolle, J., Merlet, I., Arnal, L. H., Donoghue, J., & Giraud, A.L. (2020). Selective enhancement of low-gamma activity by tACS improves phonemic processing and reading accuracy in dyslexia. *PLoS Biology* 18(9).

Nicolle, J., Giraud, A.L. (2020) Bases neurales du langage, au moyen de l'électrophysiologie humaine et des neurosciences computationnelles. UNADREO.

Nicolle, J., Marchesotti, S., Déaux, E., Merlet, I., & Giraud, A.L. (2021) Antagonist effects of auditory cortex tACS on phonemic and prosodic processing (in prep for *Neurobiology of language*)

RESEARCH ARTICLE

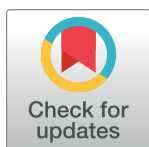
Selective enhancement of low-gamma activity by tACS improves phonemic processing and reading accuracy in dyslexia

Silvia Marchesotti¹*, Johanna Nicolle¹*, Isabelle Merlet², Luc H. Arnal^{1,3}, John P. Donoghue⁴, Anne-Lise Giraud¹*

1 Department of Neuroscience, University of Geneva, Geneva, Switzerland, **2** Univ Rennes, Inserm, LTSI, UMR 1099, Rennes, France, **3** Institut de l'Audition, Institut Pasteur, INSERM, Paris, France, **4** Brown University, Providence, Rhode Island, United States of America

* These authors contributed equally to this work.

* anne-lise.giraud@unige.ch (ALG); silvia.marchesotti@unige.ch (SM)



OPEN ACCESS

Citation: Marchesotti S, Nicolle J, Merlet I, Arnal LH, Donoghue JP, Giraud A-L (2020) Selective enhancement of low-gamma activity by tACS improves phonemic processing and reading accuracy in dyslexia. PLoS Biol 18(9): e3000833. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000833>

Academic Editor: Simon Hanslmayr, University of Glasgow, UNITED KINGDOM

Received: January 30, 2020

Accepted: August 4, 2020

Published: September 8, 2020

Peer Review History: PLOS recognizes the benefits of transparency in the peer review process; therefore, we enable the publication of all of the content of peer review and author responses alongside final, published articles. The editorial history of this article is available here: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000833>

Copyright: © 2020 Marchesotti et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: Data reported in this paper are publicly available at <https://osf.io/6j49q/>.

Funding: This study has been supported by the Wyss Center for Bio and Neuro Engineering (WCP-

Abstract

The phonological deficit in dyslexia is associated with altered low-gamma oscillatory function in left auditory cortex, but a causal relationship between oscillatory function and phonemic processing has never been established. After confirming a deficit at 30 Hz with electroencephalography (EEG), we applied 20 minutes of transcranial alternating current stimulation (tACS) to transiently restore this activity in adults with dyslexia. The intervention significantly improved phonological processing and reading accuracy as measured immediately after tACS. The effect occurred selectively for a 30-Hz stimulation in the dyslexia group. Importantly, we observed that the focal intervention over the left auditory cortex also decreased 30-Hz activity in the right superior temporal cortex, resulting in reinstating a left dominance for the oscillatory response. These findings establish a causal role of neural oscillations in phonological processing and offer solid neurophysiological grounds for a potential correction of low-gamma anomalies and for alleviating the phonological deficit in dyslexia.

Dyslexia is a frequent disorder of reading acquisition affecting up to 7% of schoolchildren and characterized by persistent difficulties with written material throughout adulthood. Identifying the neural bases of dyslexia to devise efficient treatments has motivated intense research in the last decades [1–3]. These treatments include behavioral auditory and reading training [4,5] and, more recently, noninvasive electrical brain stimulation [6–8], even though the exact underlying action mechanisms remain uncertain. From a neuroscience viewpoint, dyslexia poses an interesting challenge because it selectively affects one aspect of language, the mapping of phonemes onto graphemes, while leaving other cognitive domains intact, such as speech perception and production or visual and auditory processing [9]. Although several possible causes have been proposed for dyslexia [10], the predominant one is a phonological deficit, i.e., a difficulty in processing the sounds of language. The deficit primarily affects phonological

006, to A-LG, www.wysscenter.ch) and Swiss National Science Foundation (320030B_182855, to A-LG, www.snf.ch). The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

Abbreviations: AM, amplitude-modulated; ASSR, auditory steady-state response; ECLA, Évaluation de Compétences de Lecture chez l'Adulte de plus de 16 ans (reading skills assessment for adults over age 16); EEG, electroencephalography; FDR, False Discovery Rate; ICA, independent component analysis; LTP, long-term potentiation; NMDA, N-methyl-D-aspartate; RAN, rapid automatized naming; ROI, region of interest; STG, superior temporal gyrus; STP, short-term plasticity; S/N, signal-to-noise ratio; tACS, transcranial alternating current stimulation; tDCS, transcranial direct current stimulation.

awareness, conscious access, representation and internal monitoring of speech sounds [11–13], the capacity to form rich categorical phonemic representations [13,14], and naming and verbal memory [15].

Unlike oral language, which arises through mere exposure, reading requires explicit learning, through which children become aware that the syllables they are used to parsing (e.g., via nursery rhymes) are made of smaller units, the phonemes. Learning to read consists of mapping these new basic phonological building blocks to specific visual symbols. This so-called phoneme–grapheme mapping is only possible if the child is able to match the sound associated with the visual symbol with his/her own phonemic inventory, made of infrasyllabic elements that can be taken out and replaced by another articulable sound [16]. At the acoustic level, critical phonemic contrasts (e.g., /t/ versus /d/ or /d/ versus /b/, etc.) are underpinned by rapid events (noise bursts, formant transitions, voicing, etc.), and grasping them requires auditory sampling at a rate allowing for their neural encoding as individual patterns. The optimal sampling rate should hence enable the integration of basic 30- to 40-ms acoustic segments, comprising roughly vocal tract occlusion and perioclusion cues such as voicing [17].

Theoretical models propose that neural oscillations in the 25–35 Hz range could be the basic speech sampling rate, from which would derive (in an evolutionary sense) the inferior bound of the phonemic temporal format, i.e., the shortest possible linguistic unit (approximately 25–30 ms) that can be individually represented [18]. Basic neurophysiological studies confirm that 2 sounds must be separated by at least 25 ms to be perceptually and neurally individualized [19]. In line with these observations, neuroimaging studies have repeatedly linked dyslexia with a deficit in oscillatory activity in the low-gamma band [20–24]. This deficit could be related to difficulties in the processing of rise time in amplitude-modulated (AM) sounds, typically associated with anomalies in slower neural oscillation ranges [24–26]. Young adults with dyslexia show a disrupted low-gamma 30-Hz response in left auditory cortex and abnormally strong responses at higher frequencies (around 40 Hz), suggesting that auditory sampling could be faster than in typical readers [22,27]. This double anomaly has been associated with a deficit in phonological processing (because of atypical phonemic format) and working memory (because of more basic phonemic elements per language unit to hold in memory [22]), respectively. Furthermore, consistent with atypical morphological asymmetry of temporal cortex in dyslexia [28], left dominance of the low-gamma auditory response is also disturbed. In both cases (anatomical and functional), the asymmetry anomaly is statistically related with the phonological deficit [22].

These findings converge toward a possible oscillation theory of phonemic construction and of the phonological deficit in dyslexia, originating primarily in atypical functioning of the left auditory cortex. This theory is worthy of investigation because it could offer an easy entry point for therapeutic interventions through noninvasive neuromodulation aiming at normalizing oscillatory function in auditory cortex [29]. Building on the hypothesis that disrupted low-gamma activity in left auditory cortex could be causally related to the phonological deficit in dyslexia, we tested whether restoring low-gamma oscillatory function in individuals with dyslexia could improve phonemic perception and, indirectly, reading performance.

To address this question, we used high-definition transcranial alternating current stimulation (tACS) with a 4×1 ring electrode configuration that was focal, painless, and frequency-specific under the assumption that stimulation at 30 Hz should boost neural activity at the same frequency [30,31]. To characterize the effect, the design included several other conditions (a sham stimulation, a 60-Hz tACS condition, a control group, and a delayed measure 1 hour after tACS in which the effects were expected to have largely disappeared). We conducted this neuromodulation study in a single-blind way in 30 adults (15 with dyslexia, 15 fluent readers, mean age 26.4 years, SD \pm 8.1, range 18–47), involving for each subject 22 hours of

experimental procedures spread over 4 experimental days (S1 Fig). After a thorough assessment of dyslexia in all participants on day 1, they performed on days 2–4 a custom-designed battery of language tests (S1 Table) probing reading efficiency (speed and accuracy) and phonological processing (via pseudoword test, i.e., nonlexical word repetition, and spoonerism, i.e., inverting the first phoneme of a word pair). Prior to the language tests, we recorded auditory steady-state response (ASSR) to pure tones modulated in amplitude with a fixed frequency (range: 28–62 Hz) through a 64-channel electroencephalography (EEG) system. EEG data were also acquired prior and after tACS intervention in order to confirm reduced 30-Hz responses in individuals with dyslexia relative to readers without dyslexia and monitor the neurophysiological changes subsequently induced by tACS.

ASSRs and behavioral tests were performed before, immediately after, and 1 hour after 20 minutes of focal tACS (≤ 2 mA stimulation) over left auditory cortex, a stimulation duration that is argued to be effective while minimizing potential side effects [32]. The 1 hour after tACS was included to both evaluate and control for potential long-term effect of the stimulation. The specificity of the 30-Hz intervention was further controlled using 2 within-subject conditions: an active control stimulation at 60 Hz probing whether the expected effects could be merely due to delivering alternating current and a placebo stimulation (sham condition) in which no current was delivered. Given the selective deficit in left auditory cortex in subjects with dyslexia, we expect focal tACS to partly restore the 30-Hz neural response in that specific region in the dyslexia group, inducing a benefit for phonemic processing, whereas such an effect is not expected either in controls or after 60-Hz stimulation in either group.

Results

Before examining the effect of tACS on phonemic processing and reading, we first tested whether we could reproduce the 30-Hz deficit in the left auditory cortex that was previously shown in subjects with dyslexia [20,22,27]. This confirmation was a requirement for addressing whether tACS could effectively normalize neural activity. Hence, we analyzed the EEG auditory responses to AM sounds at frequencies between 28 and 62 Hz as measured before tACS. Auditory stimuli evoked typical waveforms with N100 and P200 auditory components [33] and topographies, with the strongest peak-to-peak response amplitude at FCz (Fig 1A). In a first approach, we restricted the EEG analysis to this electrode. In line with a large body of literature [34,35], the time–frequency transformation of the EEG signal during the steady-state interval (ASSR) peaked for auditory stimuli delivered with a 40-Hz amplitude modulation (Fig 2A). Because the 30-Hz response deficit in dyslexia was expected to be lateralized and to dominate in left auditory cortex [22], we further reconstructed the activity of neural generators responsible for the signal recorded on the scalp. Based on previous results [28,36], we performed a source space analysis on 2 regions of interest (ROIs) in each cerebral hemisphere, corresponding to auditory cortex and superior temporal gyrus (STG). Source reconstruction obtained from scalp recording also identified the strongest responses at these locations (S2 Fig). Although the group \times hemisphere interaction was not significant ($F_{1,27} = 2.05$, $p = 0.16$, $\eta^2_p = 0.07$), we could confirm a significant deficit in 30-Hz activity in the left auditory cortex in subjects with dyslexia relative to controls, ($T_{27} = 2.1$, $p < 0.05$, $d = 0.77$; Fig 1C, left), a prerequisite to a local intervention aiming at boosting this activity. We also confirmed that the effect was not present in the right auditory cortex ($T_{27} = 0.068$, $p > 0.05$, $d = 0.02$; Fig 1C, right), indicating that the deficit was lateralized. Further, there was no 30-Hz deficit in the superior temporal region surrounding auditory cortex in either hemisphere, confirming previous observations [22].

Having established that subjects with dyslexia had a selective deficit in neural oscillations at 30 Hz, we examined the impact of tACS on behavior. To directly compare changes in

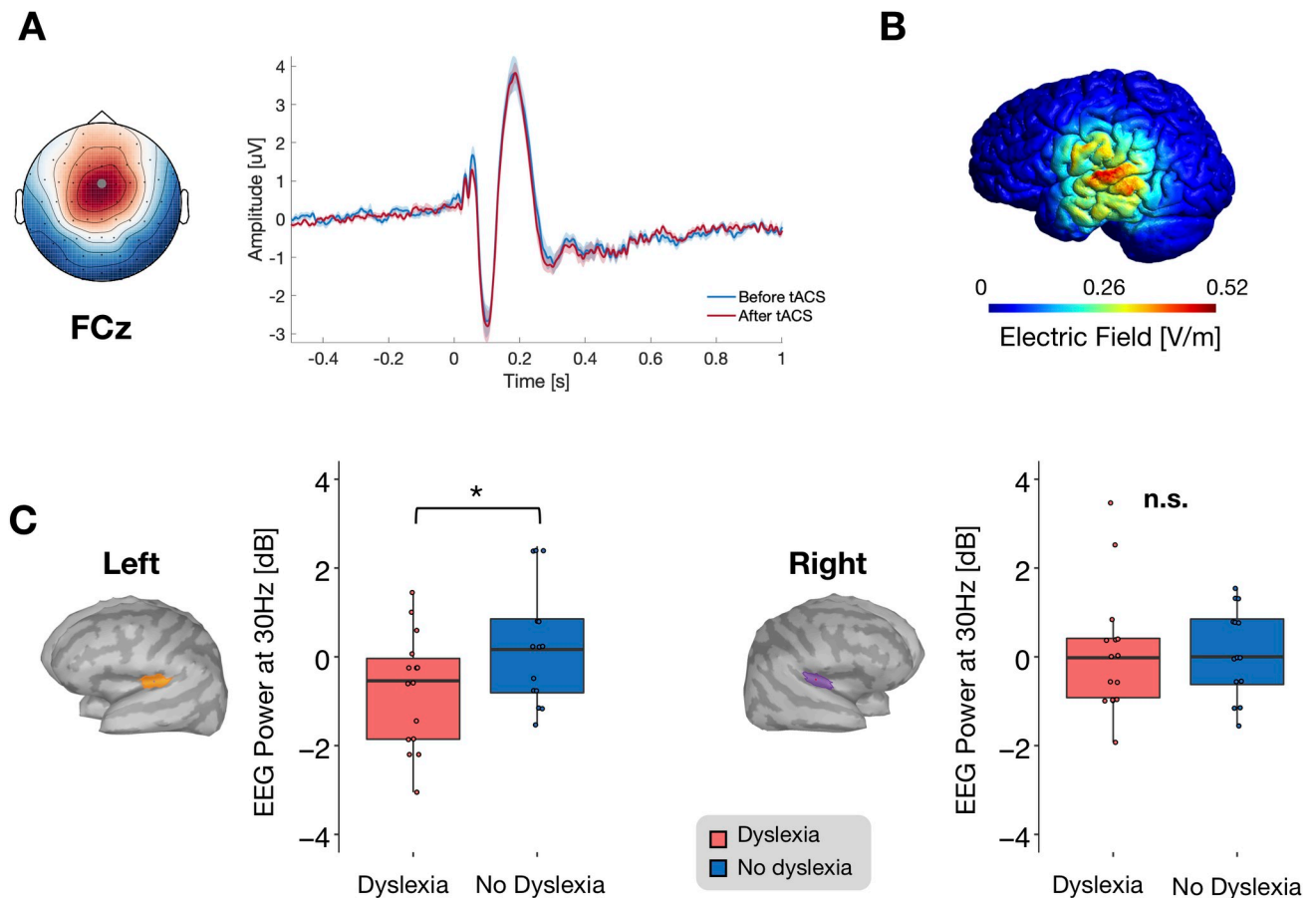


Fig 1. Auditory-evoked response at the level of scalp electrodes, tACS-induced electric field reconstruction, and group difference at baseline at 30 Hz. (A) The average response over time (dyslexia group, all AM frequencies considered) showed the typical auditory N100 and P200 components and related topography. The strongest peak-to-peak response amplitude was recorded at electrode FCz for both the N100 and P200 components. (B) Simulation of the electric field induced by tACS using a high-definition 4×1 electrode configuration, displayed on a head model from an individual subject. The model has been obtained with the freeware software SimNIBS [37] and Gmsh (www.gmsh.info). The electric field elicited by the tACS can be observed selectively in the left hemisphere, more prominently on auditory brain regions, whereas in the contralateral hemisphere, the resultant electric field can be estimated to zero (see S8 Fig). (C) Source reconstruction of the 30-Hz EEG response to 30-Hz AM before tACS. In the left auditory cortex, the dyslexia group showed a reduced response as compared to the no-dyslexia group (left); no difference between the groups was found in the right hemisphere (right). Numerical data used to generate this figure can be found at <https://osf.io/6j49q/>. Significance is denoted with * for $p < 0.05$. AM, amplitude-modulated; EEG, electroencephalography; tACS, transcranial alternating current stimulation.

<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000833.g001>

performance following tACS across stimulation conditions (sham, 30 Hz, 60 Hz) and between the 2 groups (dyslexia, no dyslexia), we considered the between-time-measurements difference, i.e., before and after tACS stimulation. We ran a repeated-measures ANOVA with group (dyslexia, no dyslexia) as a between-subjects factor and stimulation condition (sham, 30 Hz, 60 Hz) as a within-subject factor. We first assessed the effect of tACS on phonemic awareness, considering the number of errors in the repeated phonemes at the pseudoword test. We found a main effect of group ($F_{1,28} = 11.4$, $p < 0.01$, $\eta^2_p = 0.28$) and stimulation conditions ($F_{2,56} = 3.16$, $p = 0.05$, $\eta^2_p = 0.1$) and a significant interaction between group and stimulation conditions ($F_{2,56} = 3.96$, $p < 0.05$, $\eta^2_p = 0.12$, Fig 3A). Post hoc tests revealed that the improvement after 30-Hz tACS was stronger in the dyslexia than in the control group ($T_{74.8} = -4.27$, $p < 0.001$, $d = 1.68$, False Discovery Rate [FDR]), as well as for sham ($T_{56} = -2.62$, $p < 0.05$, $d = 0.73$, FDR) and 60 Hz tACS ($T_{56} = -3.64$, $p < 0.01$, $d = 0.75$, FDR) in the dyslexia group.

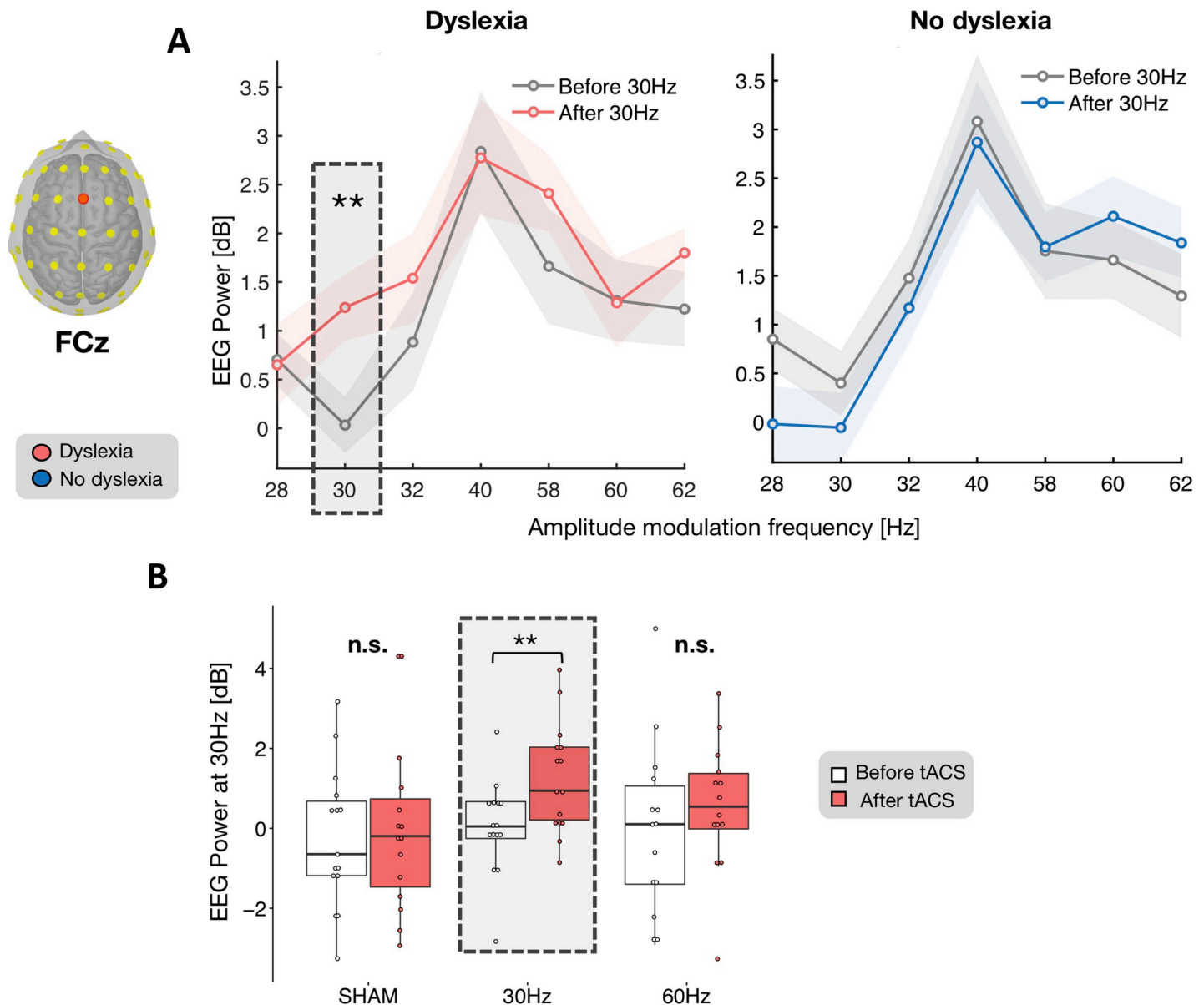


Fig 2. tACS-induced power modulation in ASSR at the scalp level. ASSR in power (dB) to pure sounds modulated in amplitude (AM) with specific frequencies (from 28 Hz to 62 Hz, x-axis) recorded at electrode FCz. This electrode was chosen because it displayed the strongest evoked response in the time domain (Fig 1A). We considered the EEG power at the frequency corresponding to that of the AM pure tones (e.g., 30-Hz EEG power in response to 30-Hz AM tones). Both the dyslexia (A, left) and no-dyslexia groups (A, right) showed the strongest response for 40-Hz AM tones and the weakest for 30-Hz AM tones. In the dyslexia group, the 30-Hz tACS elicited a selective 30-Hz power increase for the 30-Hz AM sounds (A). This effect was absent in the sham and 60-Hz conditions in the dyslexia (B) as well as in the no-dyslexia (A, right) group. Numerical data used to generate this figure can be found at <https://osf.io/6j49q/>. Significance is denoted with ** for $p < 0.01$. AM, amplitude-modulated; ASSR, auditory steady-state response; EEG, electroencephalography; tACS, transcranial alternating current stimulation.

<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000833.g002>

Although several models agree on a phonological deficit in dyslexia, it is still debated whether the underlying core impairment arises at the phonemic or syllabic level [26]. To address the specificity of the phonemic improvement after 30-Hz stimulation, we also evaluated syllable short-term memory from the pseudoword test. We compared the number of omitted or wrongly repeated syllables (absolute values) as measured before and after the 30-Hz tACS and found that tACS did not improve syllable processing ($T_{14} = 0.43$, $p > 0.05$, $d = 0.11$;

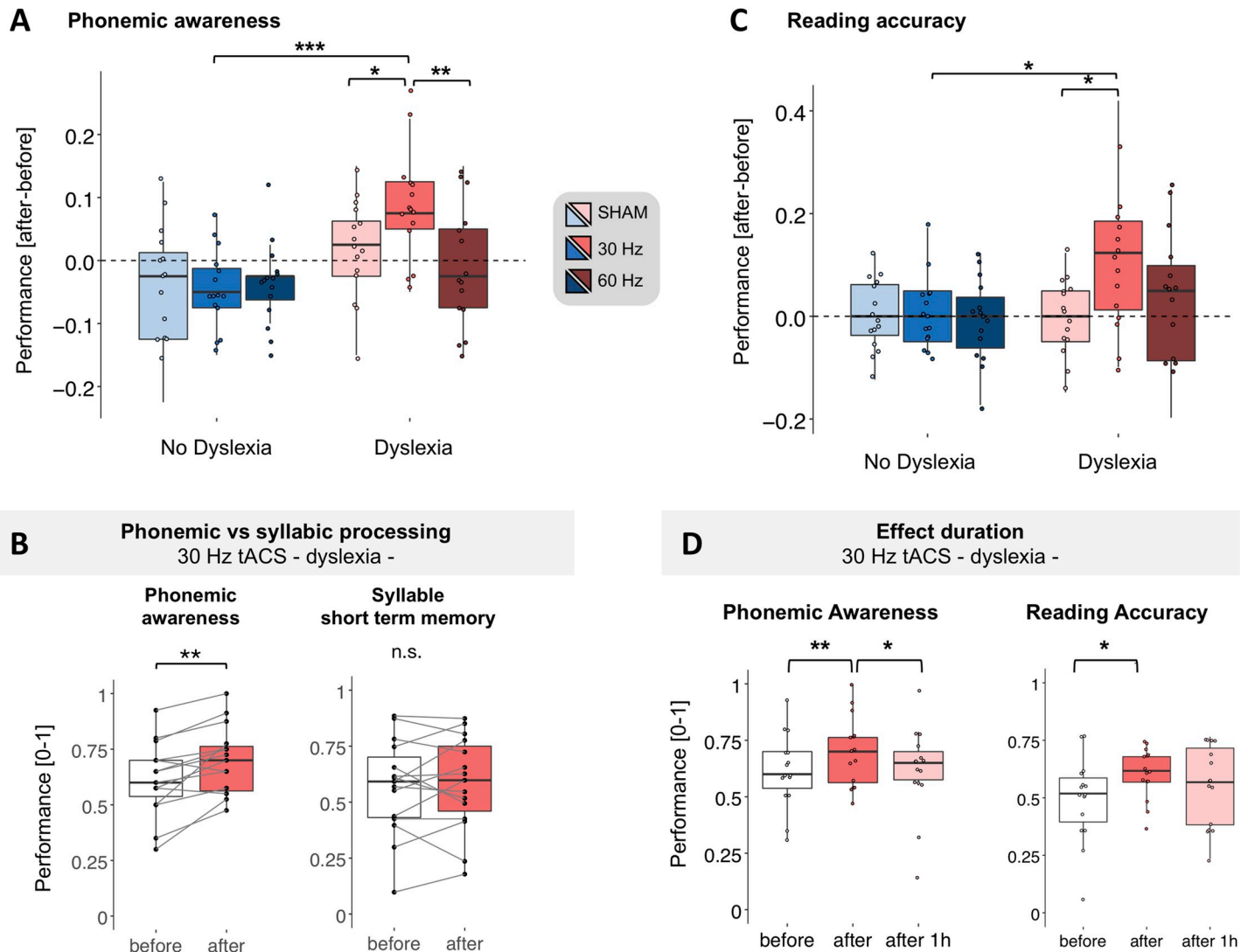


Fig 3. tACS stimulation effectiveness: Behavioral results. Changes in performance occurring after tACS on phonemic awareness (A) and reading accuracy (C) for each tACS condition (sham, 30 Hz, 60 Hz) in the no-dyslexia (shades of blue) and dyslexia (shades of red) groups. Each variable is obtained as the difference between the before versus after tACS measurements. For each of the 2 metrics, we performed a repeated-measures ANOVA with group (dyslexia, no dyslexia) as a between-subjects factor and stimulation condition (sham, 30 Hz, 60 Hz) as a within-subject factor. For both variables, the improvement after 30-Hz tACS was stronger in the dyslexia than in the control group, as well as after the sham in the same group and 60 Hz for the phonemic awareness index only. The improvement in phonemic awareness immediately after 30-Hz tACS in the dyslexic group was not accompanied by changes in syllable short-term memory (B). In the dyslexia group, performance increased after 30-Hz tACS for both phonemic awareness and reading accuracy and decreased 1 hour after for the phonemic awareness index only (D). Numerical data used to generate this figure can be found at <https://osf.io/6j49q/>. Significance is denoted with * for $p < 0.05$, ** for $p < 0.01$, *** for $p < 0.001$. tACS, transcranial alternating current stimulation.

<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000833.g003>

Fig 3B). Note, however, that since we only probed a tACS effect at 30 Hz, this result does not contradict the hypothesis that slower brain rhythms could also play a role in dyslexia by interfering at the syllabic level [38,39].

To address whether phonemic awareness improvement following 30-Hz tACS stimulation in the dyslexia group could ultimately result in or be associated with better reading performance, we extracted and analyzed separately changes in reading accuracy (see the “Language assessment” section in the Methods) and speed from the text-reading task. With respect to poststimulation reading accuracy (Fig 3C), we found a main effect of group ($F_{1,28} = 4.89$,

$p < 0.05$, $\eta^2_p = 0.09$) and of the stimulation condition ($F_{2,56} = 3.13$, $p = 0.051$, $\eta^2_p = 0.1$), as well as a marginal group \times stimulation interaction ($F_{2,56} = 2.5$, $p = 0.09$, $\eta^2_p = 0.08$). Given this trend and the results found for phonemic awareness, we tested for the same pattern in reading accuracy. As for phonemic awareness, the reading accuracy improvement after 30-Hz tACS was stronger in the dyslexia than the control group ($T_{83.6} = -3$, $p < 0.05$, $d = 0.96$) and stronger than in the sham condition in the dyslexia group ($T_{56} = -3.2$, $p < 0.05$, $d = 0.67$). A similar trend was observed for the 60-Hz tACS condition ($T_{56} = -2.37$, $p = 0.06$, $d = 0.45$).

To further characterize the behavioral improvement with respect to the initial individual reading level of the participants, we correlated the gain in phonemic awareness and in reading accuracy induced by 30-Hz tACS with the ECLA16+ (Évaluation de Compétences de Lecture chez l'Adulte de plus de 16 ans) score [40]. With respect to phonemic awareness, we found a markedly negative relationship across groups ($r = -0.48$, $p < 0.01$; [S3A Fig](#)), although within-groups correlations were not significant (dyslexia: $r = 0.09$, $p = 0.73$; no dyslexia: $r = 0.36$, $p = 0.18$). This result indicates that the intervention was more effective in boosting phonological performance in participants who initially had poor reading skills (lower ECLA16+) than in good readers. For the latter, the effect of tACS on phonological processing was even slightly disruptive. The gain in reading accuracy after 30-Hz tACS also correlated with the ECLA16+ score across groups (reading accuracy: $r = -0.50$, $p < 0.01$, [S3B Fig](#)) but not within groups (dyslexia: $r = -0.33$, $p = 0.23$; no dyslexia: $r = 0.03$, $p = 0.9$), confirming a stronger effect in the poorer readers.

Although we did not find any significant change in performance in reading speed, a qualitative analysis of the results ([S4A Fig](#)) suggests that reading speed was slowed down after all stimulation conditions regardless of dyslexia severity. These results could indicate that the phonemic awareness improvement translated into reading accuracy, whereas reading speed was altered by a nonspecific tACS effect.

Last, we found no effect of tACS in global phonological performance, as assessed by the spoonerism test ([S4B Fig](#)).

Given the specific effectiveness of 30-Hz tACS in enhancing phonemic awareness and reading accuracy in the dyslexia group, we then investigated the persistence of the effects by considering the data acquired 1 hour after the stimulation. We applied the same statistical approach as for the previous data set (i.e., difference after/before): we ran a repeated-measures ANOVA with tACS condition (sham, 30 Hz, 60 Hz) as a within-subjects factor and group (dyslexia, no dyslexia) as a between-subjects factor, considering as a dependent variable the performance difference between the 1-hour-after and before conditions. For both measures, results did not reveal any statistically significant results for the tACS condition, group, or interaction between the 2 factors ([S5 Fig](#)).

The decline of the immediate tACS effect was confirmed by a one-way repeated-measures ANOVA with time (before, after, 1 hour after) as a within-subjects factor on the data (absolute values) of the dyslexia group for the 30-Hz tACS condition for the phonemic awareness and reading accuracy index. Both analyses revealed a main effect of time (phonemic awareness: $F_{2,28} = 7.51$, $p < 0.01$, $\eta^2_p = 0.35$, reading accuracy: $F_{2,28} = 4.35$, $p < 0.05$, $\eta^2_p = 0.23$, [Fig 3D](#)). Performance increased after tACS for both indexes (phonemic awareness: $T_{28} = 3.78$, $p < 0.01$, $d = 0.97$; reading accuracy: $T_{28} = 3.08$, $p < 0.05$, $d = 0.79$, FDR corrected) and decreased 1 hour after for the phonemic awareness index only ($T_{28} = -2.56$, $p < 0.05$, $d = 0.66$, FDR corrected).

Having established that subjects with dyslexia could benefit from 30-Hz tACS, we examined the neural activity underpinning the behavioral improvement occurring selectively at this frequency of stimulation.

To take advantage of a maximal S/N (signal-to-noise ratio), we first used electrode FCz, the sensor displaying the strongest evoked response ([Fig 1A](#)), to assess tACS effects on the 30-Hz

auditory response separately in the 2 groups. tACS at 30 Hz elicited a significant power increase in the 30-Hz ASSR in the dyslexia group ($T_{14} = 3.7$, $p < 0.01$, $d = 0.97$; Fig 2A left, S6 Fig), whereas no effect was found in controls ($T_{13} = 0.8$, $p = 0.43$, $d = 0.21$; Fig 2A right). Critically, we found no enhancement of ASSR power in the dyslexia group after 60 Hz ($T_{13} = 0.991$, $p > 0.05$, $d = 0.256$; Fig 2B) or sham ($T_{14} = 0.458$, $p > 0.05$, $d = 0.118$; Fig 2B) tACS. Overall, these results indicate that 30-Hz tACS was selectively effective at the frequency that was disrupted in the group with dyslexia. The absence of such an effect in controls shows that 30-Hz tACS was ineffective when oscillatory activity was already present.

We further evaluated the 30-Hz tACS effect on the corresponding 30-Hz ASSRs in the dyslexia group separately in each of the 2 abovementioned ROIs (i.e., auditory cortex and STG) by performing a 2×2 repeated-measures ANOVA with time (before/after) and hemisphere (left/right) as factors. In the auditory cortex, we found a significant power increase after 30-Hz tACS (main effect of time, $F_{1,14} = 13.71$, $p < 0.01$, $\eta^2_p = 0.49$; Fig 4A). We then tested whether the 30-Hz tACS applied over the left auditory cortex had a local impact on the neural activity in this region. We found a significant increase in oscillatory response in the left auditory cortex ($T_{14} = 3.4$, $p < 0.05$, $d = 0.88$, FDR corrected; Fig 4A). The effect was not present in the right auditory cortex ($T_{14} = 1.6$, $p > 0.05$, $d = 0.42$, FDR corrected; Fig 4A), even though there was no time \times hemisphere interaction.

Finally, we probed whether the effect propagated to surrounding regions in subjects with dyslexia. We performed the same analysis in the STG and found a significant time \times hemisphere interaction ($F_{1,14} = 10.6$, $p < 0.01$, $\eta^2_p = 0.43$; Fig 4B). Like in the auditory cortex, 30-Hz tACS increased the response in the left hemisphere ($T_{14} = 2.8$, $p < 0.05$, $d = 0.72$, FDR corrected). Furthermore, left tACS tended to reduce the 30-Hz response in the right STG ($T_{14} = -1.5$, $p = 0.1$, $d = 0.4$, FDR corrected) to the extent that after 30-Hz tACS, ASSRs were significantly stronger in the left than the right STG ($T_{14} = -3.1$, $p < 0.05$, $d = 0.8$, FDR corrected), reversing the pattern we observed before stimulation ($T_{14} = 1.8$, $p = 0.12$, $d = 0.45$, FDR corrected). These results indicate that tACS did not only boost 30-Hz neural activity in left auditory regions but also reinstated its left hemispheric dominance in subjects with dyslexia.

In the control group, the same analyses performed in both ROIs did not reveal a significant difference between hemisphere and time. We then sought for a relationship between the severity of dyslexia (ECLA16+) and the gain in the auditory cortex and found a negative correlation in the left hemisphere ($r = -0.46$, $p = 0.013$; Fig 4C, left), but not the right ($r = -0.14$, $p = 0.44$). We also observed that the phonemic awareness gain was markedly related to the 30-Hz ASSR power increase in the left auditory cortex ($r = 0.36$, $p = 0.06$; Fig 4C, right).

Discussion

We show that tACS delivered at 30 Hz could enhance phonological abilities in individuals with dyslexia. This finding has important implications in basic aspects of speech-processing research because the relation between low-gamma neural activity and phonemic encoding has so far only been either conjectured [18,41,42] or inferred using correlational studies [22,43,44]. Selectively reinstating low-gamma auditory activity in subjects with dyslexia, in whom it is disrupted, offers a unique opportunity to address this important issue. By showing that 30-Hz, but not 60-Hz, tACS boosted phonemic, but not syllabic, perception, we can now confidently argue for a causal link between the presence of low-gamma activity in left auditory cortex and basic phoneme encoding via temporal integration windows of about 35 ms [18].

This results evidently also constitutes an interesting promise for potentially normalizing phonological processing in subjects with dyslexia. Previous attempts at improving reading

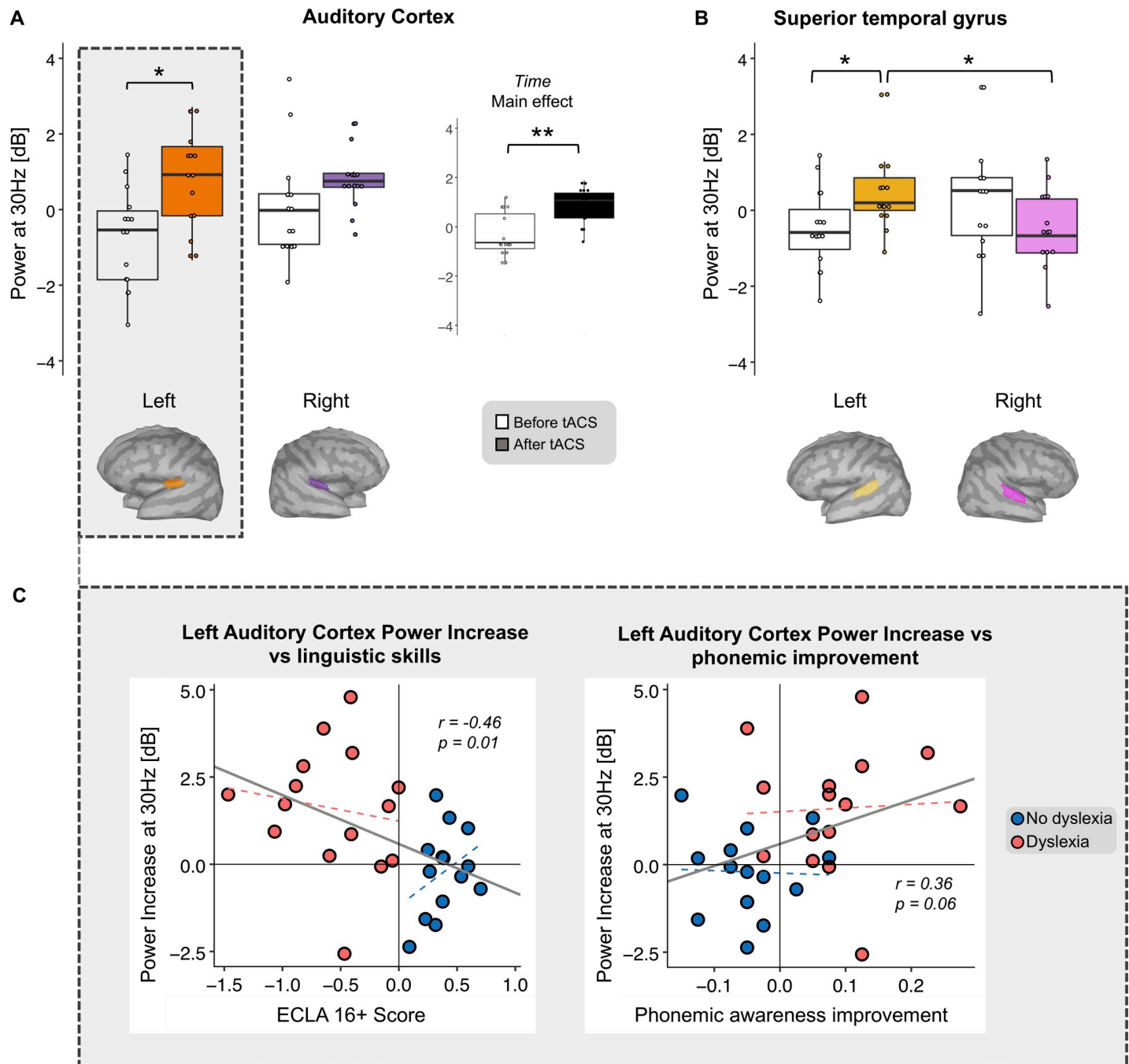


Fig 4. A 30-Hz EEG power increase after 30-Hz tACS in auditory cortex and STG. Average power (dB) of ASSRs to 30-Hz AM pure tones over 2 ROIs in each hemisphere, before (white whisker plots) and after (colored whisker plots) 30-Hz tACS. Differences were tested by considering as fixed effects time (before/after tACS) and hemisphere (left/right) separately in the auditory cortex (A) and the STG (B). In auditory cortex, 30-Hz tACS increased responses bilaterally (A, right: average activity of both hemispheres for each time, main effect of time), an effect driven by a significant power increase in left auditory cortex (A, left). A significant interaction between time and hemisphere in the STG (B) revealed that EEG power after tACS was significantly higher than before on the left hemisphere. In addition, after the stimulation, power in the left hemisphere was stronger than in the right one. The relation between 30-Hz power gain in left auditory cortex and behavioral variables was considered across groups (solid gray lines). Changes in power correlated negatively with dyslexia severity (C, left: $r = -0.46$, $p = 0.01$) and positively (trend) with phonemic improvement (C, right: $r = 0.36$, $p = 0.06$). Within-group trend lines are displayed with dashed lines (red: dyslexia group, $r = -0.15$, $p = 0.59$ for ECLA, $r = 0.05$, $p = 0.85$ for phonemic awareness; blue: control group, $r = 0.35$, $p = 0.22$ for ECLA, $r = -0.036$, $p = 0.9$ for phonemic awareness). Numerical data used to generate this figure can be found at <https://osf.io/6j49q/>. Significance is denoted with * for $p < 0.05$, ** for $p < 0.01$. AM, amplitude-modulated; ASSR, auditory steady-state response; ECLA16+, Évaluation de Compétences de Lecture chez l'Adulte de plus de 16 ans; EEG, electroencephalography; ROI, region of interest; STG, superior temporal gyrus; tACS, transcranial alternating current stimulation.

<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000833.g004>

efficiency and phonological processing using neuromodulation already gave encouraging results [6–8]. However, because these studies have either used transcranial direct current stimulation (tDCS), which does not target specific brain rhythms, or tACS but without showing a specific effect on oscillatory activity, the exact neural bases of performance enhancement could not be specified. The current results show that phonological processing improved via a focal and specific enhancement of 30-Hz oscillatory activity in left auditory cortex. This finding confirms previous ones in other disorders, showing that tACS can indeed influence neuronal activity in a frequency- and location-specific manner [45,46]. Phonological performance improvement hence likely reflects changes in neuronal entrainment towards the frequency of the tACS stimulation [45,47].

Interestingly, the facilitating tACS effect on phonological processing was most pronounced in individuals who had poor reading skills, whereas a slightly disruptive effect was observed in very good readers. This result could be related to previous observations that very fast readers may have developed neural reading strategies that largely skip phonological processing [48]. In these subjects, a 30-Hz tACS might interfere negatively with reading by weighing too much on phonological processing.

The observation that tACS was selectively effective in individuals with dyslexia confirms previously shown performance-dependent effects of transcranial electrical stimulation, in which a larger behavioral improvement occurred more strongly in poorly performing than in proficient individuals [49–51]. As observed experimentally [52] and predicted by computational models [31,53], tACS efficacy depends on the gain in endogenous oscillation power. Accordingly, the current data associate a stronger phonological improvement to a higher oscillation power gain in left auditory cortex. This is consistent with previous observations that oscillatory power increases after tACS only when baseline oscillatory activity is low [52,54], which might reflect a ceiling effect whereby high/normal oscillation power cannot be further enhanced (at least with the well-tolerated current intensities). Such a ceiling effect in controls could provide a plausible explanation for a stronger positive 30-Hz tACS effect in poorer readers.

From a neurobiological perspective, tACS performance-dependent effectiveness might reflect individual changes in the excitatory/inhibitory balance, a variable that has previously been associated with reading performance [55]. The presence of variable levels of dysregulation of cortical excitability in dyslexia could explain why the same stimulation did not lead to comparable effects in all subjects.

Reinstating 30-Hz activity had an immediate impact on the phonological deficit, as it improved both pseudoword reading and text-reading accuracy by about 15%. However, a single 20-minute tACS exposure was not sufficient to induce a long lasting low-gamma power enhancement. Short-lived effects (<1 hour) following acute tACS intervention are extensively reported in the literature [56–58]. They are argued to reflect short-term plasticity (STP), which declines over a period of half an hour [59,60]. STP selectively amplifies synaptic signals in a frequency-dependent manner, presumably inducing spike-timing-dependent plasticity via N-methyl-D-aspartate (NMDA) receptors [59–61]. However, whether the beneficial tACS effects on phonological processing globally reflects a normalization of glutamatergic activity, previously shown to be excessive in poor readers [55], remains to be demonstrated.

STP per se is not sufficient to induce long-term potentiation (LTP) lasting from hours to days [59,60]. Longer-lasting changes can be obtained by repeating the tACS simulation over several consecutive days [62]. With tDCS, cumulative effects can be observed after only 3 daily 20-minute exposures [63] and can last up to 1 month after the first session. A 6-month effect has been observed after 6 days of tACS combined with targeted behavioral training [64]. We could hence expect to induce a longer-lasting improvement of phonemic processing and to

stabilize tACS effects through consecutive, repetitive stimulation sessions, and these effects could even be potentiated by combining tACS administration with phonological training [65].

Although a single intervention acutely improved performance, a chronic treatment could be expected to not only durably normalize the phonemic sampling capacity but also induce large-scale modifications of the reading network [12]. Our results already suggest that larger-scale effects could be induced by tACS because it induced a relateralization of 30-Hz responses to the left temporal cortex. A similar immediate interhemispheric effect was previously reported in the context of interactions between primary motor cortices using other neuromodulation techniques [66,67]. If stabilized by repeated stimulation, such a large-scale effect might also confer on the 30-Hz tACS procedure the interesting advantage of (re)circumscribing phonemic processing to the left hemisphere, an important functional property for improving reading speed in the longer run. Future protocols might also exploit dose-dependent neural entrainment by tACS to tailor stimulation intensity to individual neural deficits in gamma activity [46].

An important finding of the current study is that tACS improved reading accuracy (see [S2 Table](#) for individual number of reading errors), but not reading speed. Distinct effects on reading speed and accuracy likely reflect that the acute 20-minute stimulation acted primarily on phonemic encoding locally in bilateral temporal cortices, but not (yet) on phonological downstream processing. The access to phonemic representation via interactions with the left inferior frontal cortex remained presumably unchanged by the stimulation. Such critical interactions might, however, improve if the phonemic representation format were durably normalized by repeated tACS; if this is the case, an improvement of reading speed could be expected, in accordance with the phonological deficit hypothesis.

In summary, the current results demonstrate for the first time, to our knowledge, the causal role of low-gamma oscillatory activity in phonemic processing and further show the selective impact of targeted tACS on the phonological deficit in dyslexia. This new line of research offers interesting perspectives for promoting plasticity in the reading network via the correction of basic properties of the auditory cortex [68].

Methods

Participants

Fifteen adults previously diagnosed with dyslexia (dyslexia group: 13 women, 2 men, mean age 27.4 years, SD \pm 9, range 18–47) and 15 fluent readers (no-dyslexia group: 11 women, 4 men, mean age 25.6 years, SD \pm 7.8, range 18–47) took part in our study ([S3 Table](#) and [S7 Fig](#)).

The experimental paradigm was approved by the local Ethics Committee (Commission cantonale d'éthique de la recherche, project #15–264) and was performed in accordance with the Declaration of Helsinki. The study has been registered retrospectively in a publicly accessible clinical trials registry approved by WHO on www.clinicaltrials.gov (NCT04277351). All participants provided written informed consent and received a financial compensation for their participation.

The exclusion criteria were a history of brain injury, neurological or psychiatric disorders, and the presence of invasive electronic implants. All participants had normal hearing acuity as assessed with an audiogram (pure-tone frequency threshold between 250 and 8,000 Hz) and adequate nonverbal intelligence (standard score above 80 on Raven's progressive matrices [69]). The 2 groups did not present any differences in nonverbal intelligence ($T_{28} = 1.37$, $p > 0.05$, $d = 0.5$).

To be included in the dyslexia group, participants were required to present a history of dyslexia previously assessed by a speech-language therapist that had to be confirmed by the ECLA16+ test during the inclusion day.

Experimental paradigm

The protocol was spread over 4 experimental days (S1 Fig): an inclusion day to assess language and cognitive performance and 3 experimental days, during which tACS was administered. The tests lasted approximately 5–6 h/day, amounting to a total duration of 22 hours of experimental time per participant (S1 Fig).

The auditory stimuli used in the language tests and during the EEG experiment were delivered binaurally using insert earphones (ER-2; Etymotic Research, Elk Grove Village, IL, USA) at 70–75 dB SPL via a graphical user interface developed in MATLAB (version 2015; The MathWorks, Natick, MA, USA). Responses to the language tests were recorded with a microphone and subsequently analyzed by a certified linguist.

Inclusion day (day 1). The dyslexia diagnosis was confirmed during the inclusion day using the ECLA16+ test, a standardized tool to evaluate reading proficiency (positive values indicates high performance [40]). The test includes multiple subtests assessing phonological awareness, short-term memory, and reading skills. Further statistical analysis (2-tailed unpaired *t* test between groups) confirmed that the dyslexia group performed worse than fluent readers for all individual skills tested (phonological awareness: $T_{28} = 7.6$, $p < 0.0001$, $d = 2.78$; verbal short-term memory: $T_{28} = 4.2$, $p < 0.001$, $d = 1.55$; reading skills: $T_{28} = 4.9$, $p < 0.0001$, $d = 1.79$; S3 Table). Subjects additionally performed a rapid automatized naming (RAN) test, which confirmed that the dyslexia group had reduced lexical access (2-tailed unpaired *t* test between groups, $T_{28} = 5.62$, $p < 0.0001$, $d = 2.06$; S3 Table). Last, for familiarization purposes, participants underwent a training session with the same battery of custom-designed language tests as those used during the experimental days (see below).

Experimental days (days 2–4). During each of the following experimental days (day 2 to 4), participants received 1 of 3 tACS stimulation conditions (30 Hz, 60 Hz, and a sham condition in which subjects received no stimulation) in a counterbalanced order across subjects. Experimental days were separated by at least 10 days. Each experimental day included measurements at 3 time points—before, after, and 1 hour after tACS, respectively—in order to reveal both immediate and potentially longer-lasting tACS effects. At the beginning of each of the 3 time measurements, we recorded ASSRs to pure tones modulated in amplitude at various frequencies (28–62 Hz) by means of EEG, followed by language tests.

Language assessment

Language tests were specifically designed for this study by a certified linguist in order to probe those skills that are most strongly impaired in dyslexia, namely phonological awareness, short-term memory, and reading speed and accuracy. These skills were assessed using 3 tests: pseudoword repetition, spoonerism, and text reading (S1 Table). The development of a custom-designed solution was necessary to ensure the diversity of linguistic material across experimental time measurements (before, after, 1 hour after) and minimize learning effects that might occur over repeated measurements within the same experimental day. All versions of each of the 3 subgroups of tests (1 for each measurement, before, after, and 1 hour after) had similar phonological and syntactic features, as well as the same lexical frequency.

To assess equal difficulty in all 3 tests and exclude learning effects within 1 day, we ran a pilot study in 28 fluent readers, different from those included in the main experiment. Participants performed the 3 subgroups of language tests in the same order and with the same timing as in the experimental paradigm. Because statistical tests did not show a significant difference across measurements, we assumed that there was no difference in terms of difficulty within the test material and no detectable learning effect over 3 consecutive measurements (one-way repeated-measures ANOVA). This triple battery of tests was then used during each of the 3

experimental days (1 for each tACS condition), leading to a total of 3 repetitions per subtest. To account for potential learning effects occurring over the 3 experimental days, we regressed out the slope relative to the improvement as described in the section “Statistical analysis of language tests.”

Pseudoword repetition. This test assesses the participant’s phoneme representation (i.e., the ability to retrieve and recall each phoneme) and syllabic short-term memory (i.e., the ability to recall syllable sequences as accurately as possible [70,71]). A total of 30 different items were included in the test; these were different within each subtest and between the 3 time measurements (i.e., before, after, and 1 hour after tACS), leading to a total of 90 items. Each pseudoword consisted of 4 to 8 syllables. Participants were instructed to repeat single pseudowords immediately after hearing them. We evaluated phonemic awareness by considering errors in phoneme repetition due to a perception deficit, i.e., regarding a single articulatory feature (voice onset timing or place of articulation). Syllable short-term memory was computed by taking into account the number of non- or wrongly repeated syllables.

Spoonerism. This task assesses phonological and lexical structure awareness [40,72]. Participants were presented with 2 regular words and were asked to repeat them after transposing the first phoneme (e.g., hand–pig becomes pand–hig). From this test, we calculated an accuracy index as the total number of correctly inverted words and a speed score as the average time required to perform one phoneme inversion. A global phonological awareness score was computed by averaging the 2 abovementioned indexes.

Text reading. This test evaluates reading skills, taking into account lexical knowledge (written word identification) and decoding abilities (lexical orthography to phonology conversion) [73]. Participants were asked to read as fluently as possible a scientific text for 3 minutes [74]. Reading speed corresponded to the number of read words and reading accuracy to the number of phoneme-to-grapheme errors.

EEG recording and stimuli

Along with the language tests, we recorded EEG using a 64-channel setup (Brain Products GmbH, Gilching, Germany) before, immediately after, and 1 hour after each tACS condition (30 Hz, 60 Hz, and sham). Because the EEG cap was not removed between time measurements, a passive-electrode EEG system was chosen to ensure stable impedances throughout the entire experimental day (approximately 6 h). Electrode AFz was used as ground contact and FCz as reference. Raw signals were sampled at 1 kHz using proprietary software (Recorder, BrainProducts GmbH).

During the EEG recordings, we presented AM sounds to entrain brain oscillations in a frequency-specific manner (frequency-tagging) and measured the resultant ASSR in the steady period beginning 500 ms after sound onset and following the initial auditory-evoked potential. Frequency-tagging probes the capacity of auditory cortical regions to synchronize to an auditory stimulus with constant amplitude [75,76]. Pure tones (carrier frequency: 1,000 Hz) modulated in amplitude at specific frequencies (28, 30, 32, 40, 58, 60, and 62 Hz) were presented for 1.5 s. Because of technical issues, the auditory stimuli at 40 Hz were not presented in 1 participant of the no-dyslexia group during the sham session. For each AM condition, the stimulus presentation was repeated 40 times with a 3.5-s interstimulus interval. Each EEG-ASSR block lasted approximately 25 minutes, during which participants remained seated in front of a screen placed 1 meter away from their forehead, displaying a muted video of their choice. In order to minimize artifacts on the EEG traces, participants were asked to avoid eye and body movements.

tACS

tACS (Starstim, Neuroelectronics, Barcelona, Spain) was delivered via 5 electrodes (Pistim, Neuroelectronics; πcm^2 contact area) placed over the left auditory cortex and integrated into the 64-channel EEG cap to ensure invariant position between participants. Electroconductive gel was used to ensure optimal conductance between the electrodes and the scalp. Stimulation electrodes were arranged in a 4×1 ring configuration at TTP7h, FTT9h, FCC5h, CPP5h, and TPP9h, with the central one delivering an alternating current below 2 mA and the surrounding 4 electrodes delivering one-fourth of the central electrode's current in the opposite polarity (S1 Fig). The 4×1 electrode configuration is a well-established experimental procedure that delivers the electrical stimulation focally to a specific brain region [77].

The tACS intensity was tuned separately for each participant, starting from 0.6 mA and increasing by steps of 200 μA until perception threshold, with a maximum peak-to-peak intensity of 2 mA. The current was then reduced below that threshold, and this value was kept constant throughout the entire duration of the experiment, with 20 s of ramp-up and ramp-down. The average peak-to-peak stimulation intensity across participants was 1.1 mA for the 30-Hz tACS and 1.2 mA for the 60-Hz condition. In the sham condition, 30-Hz tACS was delivered only during the ramp-up and ramp-down periods (20 s); no current was delivered during the 20-minute intervention. The tACS stimulation lasted 20 minutes, a duration that is common in cognitive neuroscience research [32]. During the tACS, as for the EEG recording, participants sat comfortably in front of a screen, watching a muted video of their choice but without receiving any auditory stimulation.

Overall, participants' reports indicate that they could not tell whether they received real or sham tACS: out of 30 participants, only 7 correctly suspected not having received a stimulation during the sham condition, whereas 18 participants did not suspect any sham tACS and believed they had received electrical stimulation over the 3 experimental days.

At the end of each stimulation session, subjects were debriefed about side effects (pain, tingling or any skin sensation, warming, fatigue, or attentional difficulties), associated with tACS by rating the level of discomfort on a scale between 0 and 10 (S7 Fig). A repeated-measures ANOVA with group (dyslexia/no dyslexia) as a between-subjects factor and tACS condition (sham/30 Hz/60 Hz) as a within-subjects factor revealed a main effect of stimulation condition ($F_{2,28} = 9.1$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.23$). Post hoc analyses showed weaker reported side effects for the sham than the 30-Hz ($T_{29} = 3$, $p < 0.01$, $d = 0.54$) and 60-Hz conditions ($T_{29} = 4.3$, $p < 0.001$, $d = 0.78$). We found no difference in the reported negative perceptions between the 2 active stimulation groups. Given the absence of significant difference in the reported side effects between the 30-Hz and 60-Hz conditions and between groups, we can exclude that the enhanced behavioral performance following the 30-Hz tACS, selective in the dyslexia group, could have been influenced by discomfort sensations.

Data analysis

Statistical analysis of language tests. All behavioral data were rescaled between 0 (low performance) and 1 (high performance) by taking into consideration the entire pool of 30 subjects separately for each subtest. Even though no learning effect over the 3 time measurements (i.e., before, after, and 1 hour after) within the same day was observed in the pilot behavioral study run in 28 independent subjects, we identified a trend for improvement over experimental days. For this reason, we considered, for each participant and each test separately, the performance during the first session (before stimulation) of each experimental day. We computed a slope value reflecting the theoretical improvement that might occur between the first and last experimental day and regressed it out from the data set (see S4 Table for a quantitative evaluation of the learning across experimental days).

In order to investigate the impact of tACS on the different components contributing to reading skills, we analyzed phonemic awareness (pseudoword reading), reading accuracy and speed, and global phonological awareness (spoonerism test) separately. We considered the difference in performance observed immediately after versus before and 1 hour after versus before. Separately for these 2 time points (immediately after and 1 hour after), we ran a mixed repeated-measures ANOVA with group (dyslexia, no dyslexia) as a between-subjects factor and tACS condition (sham, 30 Hz, 60 Hz) as a within-subjects factor. First, we used this approach to investigate immediate effects (after/before) in all metrics (phonemic awareness, reading accuracy and speed, global phonological awareness) and then to restrict the analysis on the 1-hour-after change in those metrics that showed a modulation immediately after the tACS.

We also probed whether potential changes in phonemic awareness were accompanied by variations in syllable processing and analyzed syllable short-term memory for the specific tACS condition and time measurement of interest (30 Hz, immediately after tACS).

Following up on the mixed ANOVA, post hoc comparisons were performed based on estimated marginal means and corrected for multiple comparisons using the FDR method. In accordance with our hypothesis, we restricted between-groups comparisons to performance difference of the same tACS condition.

To investigate whether potential tACS-induced behavioral changes were related to dyslexia severity, we performed Pearson correlation analyses between the ECLA16+ score and the performance difference at the time point of interest.

All behavioral analyses were performed with R (2018).

EEG preprocessing and analysis. EEG data preprocessing was conducted using the EEGlab v14.1.2 [78] and SASICA [79] toolboxes within the MATLAB (The MathWorks) environment. Signals were down-sampled at 500 Hz and filtered using a Hamming windowed-sinc FIR filter between 1 and 70 Hz. EEG epochs were defined from 1 s prestimulus to 2 s poststimulus. Epochs contaminated by strong muscular artifacts were excluded by visual inspection. Noisy channels were automatically identified using a custom-written MATLAB script based on the presence of high-frequency activity, inspected visually, and subsequently removed. When a single channel exhibited an epoch-specific artifact, the signal was interpolated for that epoch only. Data were then re-referenced to average reference. Independent component analysis (ICA) was applied to the epoched data set, the dimensionality of which was previously reduced by principal component analysis to 32 components. Artifactual components were identified using a semiautomatic method based on, among others, measures of focal channel topography, autocorrelation, and generic discontinuity available through the SASICA toolbox. After ICA-based denoising, the artifact-contaminated channels initially removed were interpolated using spherical splines, and all epochs were visually inspected again and rejected if artifacts remained. Data from 1 participant in the no-dyslexia group and data relative to the 60-Hz session in 1 participant in the dyslexia group were excluded from the analysis because of a strong artifact contamination. EEG data acquired 1 hour after the tACS conditions had poor signal quality because of the duration of the acquisition (approximately 4 hours after the EEG setup). In a few cases, we even had to interrupt the EEG recording session. For this reason, the 1-hour-after EEG data sets have not been taken into consideration.

Subsequent data analyses were performed using Fieldtrip [80] and Brainstorm [81] toolboxes, together with custom scripts.

Surface EEG space analysis. First, we computed the grand average signal over time for the dyslexia group to identify the auditory-evoked potential and the scalp electrode exhibiting the strongest peak-to-peak amplitude. We restricted the surface space analysis to this electrode, FCz. The time-frequency transform in both surface and source spaces was estimated using a

discrete Fourier transform (Hanning taper; 1–70 Hz; 1 Hz steps). At the surface level, we quantified the ASSR for each AM condition as the average power at the AM frequency between 500 ms and 1,500 ms after sound onset, normalized with respect to the 1 s prestimulus baseline. For each AM condition, we tested for differences between the measurements obtained before and immediately after the stimulation (2-tailed paired *t* test).

Source space analysis. The distributed source space, consisting of a 15,000-vertex mesh of the cortical surface, was obtained from the segmentation of a template MRI (Colin27, MNI). Using the OpenMEEG [82] implementation in Brainstorm software [81], we generated a 3-layer EEG Boundary Element Method model consisting of the inner skull, outer skull, and the scalp surfaces, with corresponding conductivity values of 0.33:0.0125:0.33 S/m, respectively. Within this model, the source activity of dipoles distributed over the cortical surface was estimated by a minimum-norm approach with noise normalization (dSPM) and constrained orientation (depth weighting order: 0.5, maximal amount: 10; S/N: 3; noise covariance regularization: 0.1). Spatial smoothing (FWHM 3mm) was applied for displaying the average source activity (S2 Fig). We outlined 2 ROIs of 79–96 vertices in the primary auditory cortex and the STG for each hemisphere. The average time–frequency spectrum over each ROI was calculated from source activity with the same method as for the surface analysis. To assess whether we could replicate previous findings [22], we tested for differences between the 2 groups at baseline in the ASSR at 30 Hz by performing a repeated-measures ANOVA with group (dyslexia/no dyslexia) as within-subjects factor and hemisphere (left/right) as between-subjects factor. We then tested our *a priori* hypothesis that activity is reduced in the left auditory cortex in the dyslexia group relative to the control group by comparing the 2 groups separately in the left and right primary auditory cortex (2-tailed unpaired *t* test). Subsequent source space analyses were performed to address putative tACS effects between measurements obtained before and after the 30-Hz tACS. Differences in the laterality of power response were investigated separately for each of the 2 ROIs with a 2×2 ANOVA, using time (before/after) and hemisphere (left/right) as factors. We investigated the relationship between changes in power following the 30-Hz tACS and behavioral measurements such as the performance improvement in phonemic awareness after the 30-Hz tACS and the dyslexia severity (ECLA16 + score) by performing Pearson correlation analyses.

Supporting information

S1 Fig. Experimental paradigm. Each participant (15 with dyslexia, 15 without dyslexia) undertook 4 days of testing. During the inclusion day (day 1), the severity of dyslexia was assessed with the ECLA16+ test together with evaluating baseline performance on 3 language tests. These included the pseudoword repetition test, spoonerism test, and text reading, probing, among other things, errors at the phonemic and syllabic level. This allowed us to evaluate phonological awareness, verbal short-term memory, and reading accuracy, as well as the ability to convert lexical orthography to phonology. During each of the following experimental days (days 2–4), one of the 3 tACS stimulation conditions (sham, 30 Hz, and 60 Hz) was administered, with the tACS condition order counterbalanced across subjects. The stimulation lasted 20 minutes and was delivered by means of 5 tACS electrodes organized as a 4×1 ring and centered over the left auditory cortex. Within each experimental day, performance on the 3 language tests was evaluated at 3 time points: before, immediately after, and 1 hour after tACS stimulation. At each time point and for each tACS condition, EEG was recorded by means of a 64-channel cap. We used ASSRs to AM pure-tone sounds with fixed frequencies (from 28 Hz to 60 Hz) to entrain brain oscillations in a frequency-specific manner. AM, amplitude-modulated; ASSR, auditory steady-state response; ECLA16+, Évaluation de Compétences de Lecture

chez l'Adulte de plus de 16 ans; EEG, electroencephalography; tACS, transcranial alternating current stimulation.

(TIF)

S2 Fig. Auditory-evoked response in the source space. Source localization revealed that the neural generators of the evoked response at short latencies (approximately 60 ms poststimulus onset) are located over the primary auditory cortex bilaterally.

(TIF)

S3 Fig. Relationship between language skills and behavioral improvement. Changes in performance occurring after 30-Hz tACS (difference after/before) for both phonemic awareness (A, $r = -0.48$, $p = 0.007$) and reading accuracy (B, $r = -0.5$, $p = 0.005$) show a strong negative relationship with language skills (ECLA16+, higher values indicate better reading skills) across groups (solid gray lines). Within-group trend lines are displayed with dashed lines (red: dyslexia group, $r = 0.09$, $p = 0.73$ for phonemic awareness, $r = -0.32$, $p = 0.23$ for reading accuracy; blue: control group, $r = 0.36$, $p = 0.18$ for phonemic awareness, $r = 0.034$, $p = 0.9$ for reading accuracy). Numerical data used to generate this figure can be found at <https://osf.io/6j49q/>. ECLA16+, Évaluation de Compétences de Lecture chez l'Adulte de plus de 16 ans; tACS, transcranial alternating current stimulation.

(TIF)

S4 Fig. Immediate tACS stimulation effects on reading speed and global phonological awareness. Changes in performance immediately after tACS for each condition (sham, 30 Hz, 60 Hz) in the no-dyslexia (shades of blue) and dyslexia (shades of red) groups are calculated as the difference with respect to the performance measured before the tACS. For reading speed and global phonological awareness, we performed a repeated-measures ANOVA with group (dyslexia, no dyslexia) as a between-subjects factor and stimulation condition (sham, 30 Hz, 60 Hz) as a within-subject factor and found no statistically significant changes. Reading speed: group, $F_{1,28} = 0.02$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.001$; tACS condition, $F_{2,56} = 0.38$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.013$; interaction group \times tACS condition, $F_{2,56} = 2.38$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.07$. Global phonological awareness: group, $F_{1,28} = 1.2$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.05$; tACS condition, $F_{2,56} = 1.57$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.05$; interaction group \times tACS condition, $F_{2,56} = 1.09$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.03$. Numerical data used to generate this figure can be found at <https://osf.io/6j49q/>. tACS, transcranial alternating current stimulation.

(TIF)

S5 Fig. tACS stimulation effects on phonemic awareness and reading accuracy 1 hour after stimulation. Changes in performance occurring 1 hour after tACS on phonemic awareness (A) and reading accuracy (B) for each tACS condition (sham, 30 Hz, 60 Hz) in the no-dyslexia (shades of blue) and dyslexia (shades of red). Each parameter is calculated as the difference with respect to the performance measured before tACS. For each of the two metrics, we performed a repeated-measures ANOVA with group (dyslexia, no dyslexia) as a between-subjects factor and stimulation condition (sham, 30 Hz, 60 Hz) as a within-subject factor and found no statistically significant changes. Phonemic awareness: group, $F_{1,28} = 0.02$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.001$; tACS condition, $F_{2,56} = 0.08$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.003$; interaction group \times tACS condition, $F_{2,56} = 1.63$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.05$. Reading accuracy: group, $F_{1,28} = 2.93$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.11$; tACS condition, $F_{2,56} = 2.07$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.09$; interaction group \times tACS condition, $F_{2,56} = 1.23$, $p > 0.05$, $\eta^2_p = 0.04$. Numerical data used to generate this figure can be found at <https://osf.io/6j49q/>. tACS, transcranial alternating current stimulation.

(TIF)

S6 Fig. Difference at the topographical level in power response to auditory stimuli at 30 Hz measured before versus immediately after the 30-Hz tACS in the dyslexia group. The topography displays t values for each of the 64 channels obtained through 2-tailed paired-samples t test. Positive values indicate a stronger response after the 30-Hz tACS; black dots highlight electrodes with $p < 0.05$. Numerical data used to generate this figure can be found at <https://osf.io/6j49q/>. tACS, transcranial alternating current stimulation.

(TIF)

S7 Fig. Demographic information and reported side effects of tACS. Individual demographic information, language skills measured during the inclusion day (ECLA16+), nonverbal intelligence (Raven matrix), and reported side effects of tACS for each stimulation condition (sham/30 Hz/60 Hz). This included physical sensations—such as pain, warming, tingling—and anxiety, fatigue, and attention. The reported side effects were stronger for the active conditions as compared with the sham stimulation. There was no difference between the dyslexia and no-dyslexia groups. Numerical data used to generate this figure can be found at <https://osf.io/6j49q/>. Significance is denoted with ** for $p < 0.01$, *** for $p < 0.001$. ECLA16+, Évaluation de Compétences de Lecture chez l'Adulte de plus de 16 ans; tACS, transcranial alternating current stimulation.

(TIF)

S8 Fig. Simulated electric field induced by the 4×1 high-definition tACS applied to the left hemisphere (see Fig 1), displayed on an individual head model. Results show null electric field in the right hemisphere, contralateral to the stimulation site. The coronal view at the peak strength shows focal activity over left auditory regions. tACS, transcranial alternating current stimulation.

(TIF)

S1 Table. Battery of language tests. Three language tests were designed by a certified linguist to probe phonological processing, short-term memory, and reading skills (speed and accuracy). The pseudoword repetition test consisted of repeating nonlexical words that contain existing syllables in French. The spoonerism test consisted in transposing the first phoneme of 2 words, chosen to have similar phonological and syntactic features and with the same lexical frequency across the 3 subtests, one for each time measurement. Text reading consisted of reading a scientific text for 3 minutes.

(TIF)

S2 Table. Dyslexia diagnosis during the inclusion day. Scores in the dyslexia and no-dyslexia groups for the ECLA16+ diagnosis test and the RAN test evaluating phonological awareness, reading skills, and short-term memory. Negative values represent performance below average, positive values performance above average; all values are z -scores. Stars indicates significant differences between the dyslexia and no-dyslexia groups. Significance is denoted with *** for $p < 0.001$. ECLA16+, Évaluation de Compétences de Lecture chez l'Adulte de plus de 16 ans; RAN, rapid automatized naming.

(TIF)

S3 Table. Individual number of reading errors in the dyslexia group at each time measurement during the 30-Hz tACS condition. Each row corresponds to one participant in the dyslexia group. tACS, transcranial alternating current stimulation.

(TIF)

S4 Table. Regression of potential learning effect across the 3 experimental days. Individual slopes were calculated by considering the performance measured “before” stimulation

separately for each variable of interest (phoneme, syllables, etc.). The table displays the average performance during the first experimental day (asterisks indicates number of errors instead of absolute performance), the average slopes, and learning rate across participants. The slopes were significantly different from zero (one-sample *t* test) for all variables except for the Phonemic Awareness index $T_{29} = 0.57$, $p > 0.05$, $d = 0.1$). They were similar in the 2 groups (dyslexia, no dyslexia) in all variables but phonological awareness response speed (spoonerism test: $T_{28} = 2.39$, $p < 0.05$, $d = 0.87$, 2-sample unpaired *t* test). Please note that this index was not analyzed individually but pooled together with the spoonerism accuracy in order to compute a Global Phonological Awareness index. (TIF)

Acknowledgments

We thank P. Mégevand for helpful discussion about the data analysis and comments on the manuscript; S. Martin for comments on the manuscript; and C. Pacoret, F. Hummel, and the Neurostimulation platform of the Biotech Campus for technical advice. We also thank E. Pool for helpful discussion on the statistical approach.

Author Contributions

Conceptualization: Anne-Lise Giraud.

Data curation: Silvia Marchesotti, Johanna Nicolle.

Formal analysis: Silvia Marchesotti, Johanna Nicolle, Isabelle Merlet, Luc H. Arnal, Anne-Lise Giraud.

Funding acquisition: Anne-Lise Giraud.

Investigation: Silvia Marchesotti, Johanna Nicolle.

Methodology: Silvia Marchesotti, Johanna Nicolle, Isabelle Merlet, Anne-Lise Giraud.

Software: Silvia Marchesotti, Johanna Nicolle, Isabelle Merlet.

Supervision: Anne-Lise Giraud.

Visualization: Silvia Marchesotti.

Writing – original draft: Silvia Marchesotti, Johanna Nicolle, John P. Donoghue, Anne-Lise Giraud.

References

1. Norton ES, Beach SD, Gabrieli JDE. Neurobiology of dyslexia. *Curr Opin Neurobiol.* 2015; 30: 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2014.09.007> PMID: 25290881
2. Bakker DJ. Treatment of developmental dyslexia: A review. *Dev Neurorehabil.* 2006; 9: 3–13. <https://doi.org/10.1080/13638490500065392> PMID: 16352500
3. Alexander AW, Slinger-Constant A-M. Current Status of Treatments for Dyslexia: *J Child Psychol Psychiatry Allied Discip.* 2004; 19: 744–758. <https://doi.org/10.1177/08830738040190100401> PMID: 15559890
4. Frey A, François C, Chobert J, Velay J, Habib M, Besson M. Music Training Positively Influences the Preattentive Perception of Voice Onset Time in Children with Dyslexia: A Longitudinal Study. *Brain Sci.* 2019; 9: 91. <https://doi.org/10.3390/brainsci9040091> PMID: 31010099
5. Loo JHY, Rosen S, Bamiou D-E. Auditory Training Effects on the Listening Skills of Children With Auditory Processing Disorder. *Ear Hear.* 2016; 37: 38–47. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000225> PMID: 26418044

6. Rufener K, Krauel K, Meyer M, Heinze H-J, Zaehle T. Transcranial electrical stimulation improves phoneme processing in developmental dyslexia. *Brain Stimul.* 2019; 12(4): 930–937. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.02.007> PMID: 30826318
7. Costanzo F, Rossi S, Varuzza C, Varvara P, Vicari S, Menghini D. Long-lasting improvement following tDCS treatment combined with a training for reading in children and adolescents with dyslexia. *Neuropsychologia.* 2019; 130:38–43. Epub 2018 Mar 14. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.016> PMID: 29550525
8. Heth I, Lavidor M. Improved reading measures in adults with dyslexia following transcranial direct current stimulation treatment. *Neuropsychologia.* 2015; 70: 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.02.022> PMID: 25701796
9. Georgiou GK, Papadopoulos TC, Zarouna E, Parrila R. Are auditory and visual processing deficits related to developmental dyslexia? *Dyslexia.* 2012; 18: 110–129. <https://doi.org/10.1002/dys.1439> PMID: 22419585
10. Ramus F, Rosen S, Dakin SC, Day BL, Castellote JM, White S, et al. Theories of developmental dyslexia: Insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain.* 2003; 126: 841–865. <https://doi.org/10.1093/brain/awg076> PMID: 12615643
11. Swan D, Goswami U. Phonological awareness deficits in developmental dyslexia and the phonological representations hypothesis. *J Exp Child Psychol.* 1997; 66: 18–41. <https://doi.org/10.1006/jecp.1997.2375> PMID: 9226932
12. Boets B, Wouters J, Van Wieringen A, Ghesquière P. Auditory temporal information processing in pre-school children at family risk for dyslexia: Relations with phonological abilities and developing literacy skills. *Brain Lang.* 2006; 97: 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2005.07.026> PMID: 16112723
13. Boets B, Op De Beeck H, Vandermosten M, Scott SK, Gillebert CR, Mantini D, et al. Intact but less Accessible Phonetic Representations in Adults with Dyslexia. *Science.* 2013; 342(6163): 1251–1255. <https://doi.org/10.1126/science.1244333> PMID: 24311693
14. Lieder I, Adam V, Frenkel O, Jaffe-Dax S, Sahani M, Ahissar M. Perceptual bias reveals slow-updating in autism and fast-forgetting in dyslexia. *Nat Neurosci.* 2019; 22: 256–264. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0308-9> PMID: 30643299
15. Vellutino FR, Fletcher JM, Snowling MJ, Scanlon DM. Specific reading disability (dyslexia): What have we learned in the past four decades? *J Child Psychol Psychiatry Allied Discip.* 2004; 45: 2–40. <https://doi.org/10.1046/j.0021-9630.2003.00305.x> PMID: 14959801
16. Schulte-Körne G, Deimel W, Bartling J, Remschmidt H. The role of phonological awareness, speech perception, and auditory temporal processing for dyslexia. *Eur Child Adolesc Psychiatry.* 1999; 8 Suppl 3: 28–34. <https://doi.org/10.1007/PL00010690> PMID: 10638366
17. Steinschneider M, Volkov IO, Noh MD, Garell PC, Howard MA. Temporal encoding of the voice onset time phonetic parameter by field potentials recorded directly from human auditory cortex. *J Neurophysiol.* 1999; 82: 2346–57. <https://doi.org/10.1152/jn.1999.82.5.2346> PMID: 10561410
18. Giraud AL, Poeppel D. Cortical oscillations and speech processing: Emerging computational principles and operations. *Nat Neurosci.* 2012; 15: 511–517. <https://doi.org/10.1038/nn.3063> PMID: 22426255
19. Joliot M, Ribary U, Llinas R. Human oscillatory brain activity near 40 Hz coexists with cognitive temporal binding. *Proc Natl Acad Sci.* 1994; 91: 11748–11751. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.24.11748> PMID: 7972135
20. Lizarazu M, Lallier M, Molinaro N, Bourguignon M, Paz-alonso PM, Lerma-usabiaga G, et al. Developmental Evaluation of Atypical Auditory Sampling in Dyslexia: Functional and Structural Evidence. 2015; 5002: 4986–5002. <https://doi.org/10.1002/hbm.22986> PMID: 26356682
21. Di Liberto GM, Peter V, Kalashnikova M, Goswami U, Burnham D, Lalor EC. Atypical cortical entrainment to speech in the right hemisphere underpins phonemic deficits in dyslexia. *Neuroimage.* 2018; 175: 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.03.072> PMID: 29609008
22. Lehongre K, Ramus F, Villiermet N, Schwartz D, Giraud AL. Altered low-gamma sampling in auditory cortex accounts for the three main facets of dyslexia. *Neuron.* 2011; 72: 1080–1090. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.11.002> PMID: 22196341
23. Lallier M, Molinaro N, Lizarazu M, Bourguignon M, Carreiras M. Amodal Atypical Neural Oscillatory Activity in Dyslexia. *Clin Psychol Sci.* 2017; 5: 379–401. <https://doi.org/10.1177/2167702616670119>
24. Van Hirtum T, Ghesquière P, Wouters J. Atypical neural processing of rise time by adults with dyslexia. *Cortex.* 2019; 113: 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.12.006> PMID: 30640141
25. Goswami U. Speech rhythm and language acquisition: an amplitude modulation phase hierarchy perspective. *Ann N Y Acad Sci.* 2019; 1453: 67–78. <https://doi.org/10.1111/nyas.14137> PMID: 31237357
26. Goswami U. A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences.* 2011; 15(1): pp. 3–10. Epub 2010 Nov 18. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.10.001> PMID: 21093350

27. Lehongre K, Morillon B, Giraud A-L, Ramus F. Impaired auditory sampling in dyslexia: further evidence from combined fMRI and EEG. *Front Hum Neurosci*. 2013; 7: 454. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00454> PMID: 23950742
28. Vanderauwera J, Altarelli I, Vandermosten M, De Vos A, Wouters J, Ghesquière P. Atypical Structural Asymmetry of the Planum Temporale is Related to Family History of Dyslexia. *Cereb Cortex*. 2016; 28: 63–72. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw348> PMID: 29253247
29. Opitz A, Falchier A, Yan C-G, Yeagle EM, Linn GS, Megevand P, et al. Spatiotemporal structure of intracranial electric fields induced by transcranial electric stimulation in humans and nonhuman primates. *Sci Rep*. 2016; 6: 31236. <https://doi.org/10.1038/srep31236> PMID: 27535462
30. Herrmann CS, Strüder D, Helfrich RF, Engel AK. EEG oscillations: From correlation to causality. *Int J Psychophysiol*. 2016; 103: 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2015.02.003> PMID: 25659527
31. Merlet I, Birot G, Salvador R, Molaei-Ardekani B, Mekonnen A, Soria-Frish A, et al. From Oscillatory Transcranial Current Stimulation to Scalp EEG Changes: A Biophysical and Physiological Modeling Study. *PLoS ONE*. 2013; 8(2): e57330. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057330> PMID: 23468970
32. Antal A, Alekseichuk I, Bikson M, Brockmüller J, Brunoni AR, Chen R, et al. Low intensity transcranial electric stimulation: Safety, ethical, legal regulatory and application guidelines. *Clin Neurophysiol*. 2017; 128: 1774–1809. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.06.001> PMID: 28709880
33. Steinschneider M, Liégeois-Chauvel C, Brugge JF. Auditory Evoked Potentials and Their Utility in the Assessment of Complex Sound Processing. In: Winer J, Schreiner C, editors. *The Auditory Cortex*. Boston, MA: Springer; 2011. pp. 535–559. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0074-6>
34. Korczak P, Smart J, Delgado R, Strobel TM, Bradford C. Auditory steady-state responses. *J Am Acad Audiol*. 2012; 23: 146–70. <https://doi.org/10.3766/jaaa.23.3.3> PMID: 22436114
35. Ross B, Borgmann C, Draganova R, Roberts LE, Pantev C. A high-precision magnetoencephalographic study of human auditory steady-state responses to amplitude-modulated tones. *J Acoust Soc Am*. 2000; 108: 679–691. <https://doi.org/10.1121/1.429600> PMID: 10955634
36. Ma Y, Koyama MS, Milham MP, Castellanos FX, Quinn BT, Pardoe H, et al. Cortical thickness abnormalities associated with dyslexia, independent of remediation status. *NeuroImage Clin*. 2015; 7: 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2014.11.005> PMID: 25610779
37. Saturnino GB, Puonti O, Nielsen JD, Antonenko D, Madsen KHH, Thielscher A. SimNIBS 2.1: A Comprehensive Pipeline for Individualized Electric Field Modelling for Transcranial Brain Stimulation. *bioRxiv* 500314 [Preprint]. December 19, 2018 [cited 2020 Jan 1]. <https://doi.org/10.1101/500314> Available from: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/500314v1>
38. Goswami U, Thomson J, Richardson U, Stainthorp R, Hughes D, Rosen S, et al. Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia: A new hypothesis. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2002; 99: 10911–10916. <https://doi.org/10.1073/pnas.122368599> PMID: 12142463
39. Goswami U, Gerson D, Astruc L. Amplitude envelope perception, phonology and prosodic sensitivity in children with developmental dyslexia. *Read Writ*. 2010; 23: 995–1019. <https://doi.org/10.1007/s11145-009-9186-6>
40. Gola-Asmussen C, Lequette C, Pouget G, Rouyet C, Zorman M. (Reading skills assessment for adults over age 16) ECLA 16+: Evaluation des compétences de lecture chez l'adulte de plus de 16 ans. Grenoble: Cognisciences; 2010. Available from: <http://www.cognisciences.com/accueil/outils/article/ecla-16>
41. Ghitza O. Linking speech perception and neurophysiology: Speech decoding guided by cascaded oscillators locked to the input rhythm. *Front Psychol*. 2011; 2: 130. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00130> PMID: 21743809
42. Poeppel D. The analysis of speech in different temporal integration windows: Cerebral lateralization as "asymmetric sampling in time." *Speech Commun*. 2003; 41: 245–255. [https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(02\)00107-3](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(02)00107-3)
43. Gross J, Hoogenboom N, Thut G, Schyns P, Panzeri S, Belin P, et al. Speech Rhythms and Multiplexed Oscillatory Sensory Coding in the Human Brain. *PLoS Biol*. 2013; 11(12): e1001752. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001752> PMID: 24391472
44. Kösem A, van Wassenhove V. Distinct contributions of low- and high-frequency neural oscillations to speech comprehension. *Lang Cogn Neurosci*. 2017; 32: 536–544. <https://doi.org/10.1080/23273798.2016.1238495>
45. Krause MR, Vieira PG, Csorba BA, Pilly PK, Pack CC. Transcranial alternating current stimulation entrains single-neuron activity in the primate brain. *Proc Natl Acad Sci*. 2019; 116: 5747–5755. <https://doi.org/10.1073/pnas.1815958116> PMID: 30833389
46. Johnson L, Alekseichuk I, Krieg J, Doyle A, Yu Y, Vitek J, et al. Dose-Dependent Effects of Transcranial Alternating Current Stimulation on Spike Timing in Awake Nonhuman Primates. *bioRxiv* 696344

- [Preprint]. 2019 [cited 2020 Jan 1]. <https://doi.org/10.1101/696344> Available from: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/696344v1>
47. Vieira PG, Krause MR, Pack CC. tACS entrains neural activity while somatosensory input is blocked. *bioRxiv* 691022 [Preprint]. 2019 [cited 2020 Jan 1]. <https://doi.org/10.1101/691022> Available from: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/691022v1>
 48. Lazard DS, Giraud AL. Faster phonological processing and right occipito-temporal coupling in deaf adults signal poor cochlear implant outcome. *Nat Commun*. 2017; 8: 14872. <https://doi.org/10.1038/ncomms14872> PMID: 28348400
 49. Sarkar A, Dowker A, Cohen Kadosh R. Cognitive Enhancement or Cognitive Cost: Trait-Specific Outcomes of Brain Stimulation in the Case of Mathematics Anxiety. *J Neurosci*. 2014; 34: 16605–16610. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3129-14.2014> PMID: 25505313
 50. Chang C-F, Muggleton NG, Walsh V, Cheng S-k, Hung DL, Juan C-H, et al. Unleashing Potential: Transcranial Direct Current Stimulation over the Right Posterior Parietal Cortex Improves Change Detection in Low-Performing Individuals. *J Neurosci*. 2012; 32: 10554–10561. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0362-12.2012> PMID: 22855805
 51. Santarnecchi E, Muller T, Rossi S, Sarkar A, Polizzotto NR, Rossi A, et al. Individual differences and specificity of prefrontal gamma frequency-tACS on fluid intelligence capabilities. *Cortex*. 2015; 75: 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.11.003> PMID: 26707084
 52. Neuling T, Rach S, Herrmann CS. Orchestrating neuronal networks: sustained after-effects of transcranial alternating current stimulation depend upon brain states. *Front Hum Neurosci*. 2013; 7: 161. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00161> PMID: 23641206
 53. Ali MM, Sellers KK, Frohlich F. Transcranial Alternating Current Stimulation Modulates Large-Scale Cortical Network Activity by Network Resonance. *J Neurosci*. 2013; 33: 11262–11275. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5867-12.2013> PMID: 23825429
 54. Alagapan S, Schmidt SL, Lefebvre J, Hadar E, Shin HW, Fröhlich F. Modulation of Cortical Oscillations by Low-Frequency Direct Cortical Stimulation Is State-Dependent. *PLoS Biol*. 2016; 14(3): e1002424. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002424> PMID: 27023427
 55. Pugh KR, Frost SJ, Rothman DL, Hoeft F, Del Tufo SN, Mason GF, et al. Glutamate and Choline Levels Predict Individual Differences in Reading Ability in Emergent Readers. *J Neurosci*. 2014; 34: 4082–4089. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3907-13.2014> PMID: 24623786
 56. Benussi A, Koch G, Cotelli M, Padovani A, Borroni B. Cerebellar transcranial direct current stimulation in patients with ataxia: A double-blind, randomized, sham-controlled study. *Mov Disord*. 2015; 30: 1701–1705. <https://doi.org/10.1002/mds.26356> PMID: 26274840
 57. Lefebvre S, Thonnard JL, Laloux P, Peeters A, Jamart J, Vandermeeren Y. Single session of dual-tDCs transiently improves precision grip and dexterity of the paretic hand after stroke. *Neurorehabil Neural Repair*. 2014; 28: 100–110. <https://doi.org/10.1177/1545968313478485> PMID: 23486918
 58. Kasten FH, Dowsett J, Herrmann CS. Sustained aftereffect of α -tACS lasts up to 70 min after stimulation. *Front Hum Neurosci*. 2016; 10: 1–9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00001> PMID: 26858619
 59. Volianskis A, Collingridge GL, Jensen MS. The roles of STP and LTP in synaptic encoding. *PeerJ*. 2013; 2013: 1–13. <https://doi.org/10.7717/peerj.3> PMID: 23638365
 60. Castro-alamancos MA, Connors BW. Short-term synaptic enhancement and long-term potentiation in neocortex. *Neurobiology*. 1996; 93: 1335–1339.
 61. Wischnewski M, Engelhardt M, Salehinejad MA, Schutter DJLG, Kuo MF, Nitsche MA. NMDA Receptor-Mediated Motor Cortex Plasticity After 20 Hz Transcranial Alternating Current Stimulation. *Cereb Cortex*. 2019; 29: 2924–2931. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy160> PMID: 29992259
 62. Gebodh N, Esmaeilpour Z, Adair D, Schestattsky P, Fregni F, Bikson M. Transcranial Direct Current Stimulation Among Technologies for Low-Intensity Transcranial Electrical Stimulation: Classification, History, and Terminology. In: Knotkova H, Nitsche MA, Bikson M, Woods AJ, editors. *Practical Guide to Transcranial Direct Current Stimulation: Principles, Procedures and Applications*. Cham: Springer International Publishing; 2019. pp. 3–43. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95948-1_1
 63. Soekadar SR, Witkowski M, Birbaumer N, Cohen LG. Enhancing Hebbian Learning to Control Brain Oscillatory Activity. *Cereb Cortex*. 2014; 25(9): 2409–2415. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu043> PMID: 24626608
 64. Cohen Kadosh R, Soskic S, Iuculano T, Kanai R, Walsh V. Modulating neuronal activity produces specific and long-lasting changes in numerical competence. *Curr Biol*. 2010; 20: 2016–2020. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.10.007> PMID: 21055945
 65. Hamilton RH, Kessler SK, Castillo-Saavedra L, Fregni F, Martin D, Loo C, et al. Methodological Considerations for Transcranial Direct Current Stimulation in Clinical Trials. In: Knotkova H, Nitsche MA, Bikson M, Woods AJ, editors. *Practical Guide to Transcranial Direct Current Stimulation: Principles,*

- Procedures and Applications. Cham: Springer International Publishing; 2019. pp. 347–377. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95948-1_12
66. Suppa A, Ortu E, Zafar N, Deriu F, Paulus W, Berardelli A, et al. Theta burst stimulation induces after-effects on contralateral primary motor cortex excitability in humans. *J Physiol*. 2008; 586: 4489–4500. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2008.156596> PMID: 18669534
 67. Vines BW, Nair DG, Schlaug G. Contralateral and ipsilateral motor effects after transcranial direct current stimulation. *Neuroreport*. 2006; 17: 671–674. <https://doi.org/10.1097/00001756-200604240-00023> PMID: 16603933
 68. Hyafil A, Giraud AL, Fontolan L, Gutkin B. Neural Cross-Frequency Coupling: Connecting Architectures, Mechanisms, and Functions. *Trends Neurosci*. 2015; 38: 725–740. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2015.09.001> PMID: 26549886
 69. Raven J. C., Court J. H., & Raven J. Manual for Raven's progressive matrices and vocabulary scales. London: H. K. Lewis; 1984.
 70. Pickering SJ. Assessment of Working Memory in Children. In: Pickering SJ, editor. *Working Memory and Education*. Burlington, MA: Academic Press; 2006. pp. 241–271. <https://doi.org/10.1016/B978-012554465-8/50011-9>
 71. Snowling MJ. Early identification and interventions for dyslexia: A contemporary view. *J Res Spec Educ Needs*. 2013; 13: 7–14. <https://doi.org/10.1111/j.1471-3802.2012.01262.x> PMID: 26290655
 72. Frederickson N, Frith U, Reason R. *Phonological Assessment Battery (Manual and Test Materials)*. London: NFER-Nelson; 1997.
 73. Sprenger-Charolles L, Siegel LS, Béchennec D, Serniclaes W. Development of phonological and orthographic processing in reading aloud, in silent reading, and in spelling: A four-year longitudinal study. *J Exp Child Psychol*. 2003; 84: 194–217. [https://doi.org/10.1016/S0022-0965\(03\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0022-0965(03)00024-9) PMID: 12706384
 74. Masmoudi S, Naceur A. *Du percept à la décision. Intégration de la cognition, l'émotion et la motivation*. Ottignies-Louvain-la-Neuve, Belgium: De Boeck; 2010.
 75. Miyazaki T, Thompson J, Fujioka T, Ross B. Sound envelope encoding in the auditory cortex revealed by neuromagnetic responses in the theta to gamma frequency bands. *Brain Res*. 2013; 1506: 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2013.01.047> PMID: 23399682
 76. Ross B, Herdman AT, Pantev C. Stimulus Induced Desynchronization of Human Auditory 40-Hz Steady-State Responses. 2005; 4082–4093. <https://doi.org/10.1152/jn.00469.2005> PMID: 16107530
 77. Datta A, Bansal V, Diaz J, Patel J, Reato D, Bikson M. Gyri-precise head model of transcranial direct current stimulation: Improved spatial focality using a ring electrode versus conventional rectangular pad. *Brain Stimul*. 2009; 2: 201–207.e1. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2009.03.005> PMID: 20648973
 78. Delorme A, Makeig S. EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *J Neurosci Methods*. 2004; 134: 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009> PMID: 15102499
 79. Chaumon M, Bishop DVM, Busch N a. A Practical Guide to the Selection of Independent Components of the Electroencephalogram for Artifact Correction. *J Neurosci Methods*. 2015; 250: 47–63. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2015.02.025> PMID: 25791012
 80. Oostenveld R, Fries P, Maris E, Schoffelen JM. FieldTrip: Open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Comput Intell Neurosci*. 2011; 2011: 156869. Epub 2010 Dec 23. <https://doi.org/10.1155/2011/156869> PMID: 21253357
 81. Tadel F, Baillet S, Mosher JC, Pantazis D, Leahy RM. Brainstorm: A user-friendly application for MEG/EEG analysis. *Comput Intell Neurosci*. 2011; 2011: 879716. <https://doi.org/10.1155/2011/879716> PMID: 21584256
 82. Gramfort Alexandre, Papadopoulos Théodore, Olivi Emmanuel, Clerc Maureen. OpenMEEG: open-source software for quasistatic bioelectromagnetics. *Biomed Eng Online*. 2010; 9: 45. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-9-45> PMID: 20819204

Johanna NICOLLE

Doctorante en Neurosciences
Université de Genève
Département des neurosciences fondamentales
Campus Biotech, Genève, Suisse

Anne-Lise GIRAUD

Professeur en Neurosciences
Université de Genève
Département des neurosciences fondamentales
Campus Biotech, Genève, Suisse

Correspondance :
Anne-Lise GIRAUD
Professeur en Neurosciences
Campus Biotech, 9 Chemin des mines,
1211 Geneva, Suisse
Anne-Lise.Giraud@unige.ch

Bases neurales du langage, au moyen de l'électrophysiologie humaine et des neurosciences computationnelles

Résumé

La compréhension de la parole constitue un champ d'étude majeur en sciences du langage, en psychologie et en neurosciences. Cette pluridisciplinarité dénote la richesse mais également l'extrême complexité du langage, cet outil propre à l'être humain. La compréhension de la parole repose sur une hiérarchie d'opérations allant de la phonologie à la syntaxe. Une des opérations majeures dans ce processus est le découpage d'un flux acoustique continu en unités pouvant être mise en relation avec nos représentations linguistiques constituant les briques à la base du langage c'est-à-dire, les syllabes, les mots et les groupes de mots. Les neurosciences permettent actuellement de comprendre avec précision les différents mécanismes neuronaux permettant le découpage du flux de parole en différentes unités signifiantes. Nous savons qu'une des fonctions de l'activité

neuronale du cortex temporal (auditif en particulier) est de décomposer l'information verbale en unités plus petites, c'est-à-dire en mots, syllabes et phonèmes par effet de synchronisation temporelle. Bien que la majorité des observations neurophysiologiques aient été réalisées chez des individus sains, le domaine a également bénéficié des études chez des personnes atteintes de troubles du langage. Les dysfonctions neuronales dont elles souffrent permettent de comprendre et légitimer l'importance des mécanismes requis pour traiter correctement les sons d'une langue. En outre, c'est en mobilisant des disciplines encore plus vastes, comme les neurosciences computationnelles ou les techniques de stimulation non invasives, que nous sommes désormais capables de spécifier les bases neurales de la perception de la parole.

Mots-clés

Langage, électrophysiologie, stimulation, neurosciences computationnelles

Neural bases of language, using human electrophysiology and computational neuroscience

Abstract

Language comprehension constitutes a major field of study in language science, psychology or neuroscience. This multidisciplinary denotes the richness but also the extreme complexity of language, a tool that is specific to human beings. Understanding speech is based on a hierarchy of operations ranging from phonology to syntax. One of the major operations in this process is the segmentation of a continuous acoustic flow into units that can be put in relation with our linguistic representations constituting the basic building blocks of language, namely syllables, words and groups of words. Neuroscience currently enables the precise understanding of the various neural mechanisms allowing the segmentation of the flow of speech into significant units. It is now possible to argue that one of the functions of the neuronal activity in the temporal cortex (auditory in particular) is to divide verbal information into smaller units, i.e. words, syllables and phonemes by time synchronization effect. Although the majority of neurophysiological observations are performed in healthy individuals, the field has also been explored by studying individuals with speech disorders. The neuronal disorders that affect them allows us to

understand and legitimize the importance of the mechanisms required to correctly process the sounds of a language. Moreover, by mobilizing even broader disciplines such as computational neurosciences or non-invasive stimulation techniques, we are now able to further specify the neural bases of speech perception.

Keywords

Language, electrophysiology, stimulation, computational neuroscience

Introduction

A l'oral ou à l'écrit, comprendre le sens d'un énoncé simple peut paraître parfaitement naturel et intuitif. Que ce soit un flux de parole continu ou une suite de mots écrits, espacés par un blanc typographique, le sens nous parvient sans effort, de même qu'il est aisé d'utiliser les mots pour agir sur notre environnement, planifier un événement ou tout simplement transmettre une pensée. Cependant, cette simplicité apparente est loin de la cascade d'événements physiologiques, multiples et complexes qui régit la perception, la compréhension et la production du langage. De la perception auditive d'un mot ou groupe de mots à la compréhension, des étapes spécifiques doivent se succéder dans un ordre précis et sans interférence. Nous savons à l'heure actuelle que la première étape consiste à traiter auditivement l'onde sonore qui va ensuite être transmise au cortex cérébral via une série d'activités neuronales permettant de segmenter et d'analyser les plus petits indices acoustiques. La reconnaissance de la plus petite unité acoustique articulable pouvant être distinguée d'une autre, autrement dit le phonème, est cruciale pour différencier les syllabes ou les mots entre eux ; il s'agit là de l'étape de l'encodage phonologique. L'étape de la reconnaissance lexicale deviendra ensuite possible grâce à un processus de rassemblement des sons extraits qui seront associés à une représentation mentale plus abstraite stockée en mémoire. A l'écrit le processus est similaire, lors des débuts de l'apprentissage de la lecture, une lettre ou un petit groupe de lettres (p.e. « ch », « ou »), doivent être reconnus visuellement puis être appariés à leur correspondance sonore, un phonème. Le niveau suivant, l'étape de l'assemblage permet à l'apprenant d'associer un groupement de lettres à une syllabe ou morphème, puis un automatisme se met en place permettant de créer une représentation visuelle abstraite des mots qui sera automatiquement mise en relation avec sa forme sonore et représentation mentale. La reconnaissance de chaque unité linguistique est donc cruciale pour atteindre, aussi bien à l'oral qu'à l'écrit, le niveau sémantique, c'est-à-dire l'accès au sens du signal émis. Bien que ces processus apparaissent comme relativement intuitifs et faciles pour nombre d'individus, ils restent néanmoins difficiles si l'une de ces étapes est compliquée par un trouble neuro-développemental. C'est le cas, par exemple, des enfants atteints de dyslexie ou de troubles du spectre autistique montrant des difficultés, plus ou moins sévères pour maîtriser entièrement le langage oral et écrit. Il est scientifiquement démontré que des causes neurologiques, sous-jacentes à ces troubles entravent les premières étapes de

représentation phonologique, c'est-à-dire la perception, ou encore la conscience qu'un mot peut se découper en syllabes et qu'il contient des unités encore plus petites, les phonèmes. Sur la base de résultats récents obtenus via diverses méthodologies, que ce soit par des techniques de neuroimagerie cérébrale, de neuromodulation chez l'individu sain ou souffrant de troubles du langage, ou par l'utilisation des neurosciences computationnelles, cet article décrit les bases neurales en jeu dans le traitement du signal de parole et propose des concepts possibles de réhabilitation de la parole fondés sur l'évidence scientifique.

I – Contexte

A – Le langage en tant que faculté humaine

Le langage est une compétence que chaque être humain sain acquiert pas à pas dès sa naissance. Aucune définition du langage ne fait l'unanimité mais nous retiendrons la plus simple « *faculté générale de pouvoir s'exprimer au moyen de signes* (Saussure, 1931) ». Communément, il s'agit d'une caractéristique propre à l'espèce humaine et une condition nécessaire au développement des caractéristiques essentielles de l'humanité telles que la pensée, la transmission des connaissances ou encore la prise de décision. À travers les espèces, qui ont chacune leur propre système de communication, l'homme est le seul à avoir développé un système aussi performant, constitué d'une combinaison complexe de symboles pouvant retranscrire un état, une pensée ou une émotion. C'est donc grâce à cette capacité d'attribuer une combinaison des signes arbitraires à une ou des unités symboliques ou physiques que l'être humain a pu se démarquer des autres espèces. Sur cette base, une des questions fondamentales qui oriente de nombreuses études en neurosciences est la suivante : comment l'être humain parvient-il à combiner, puis segmenter tous ces symboles lors de la réception de la parole, et plus précisément toutes les unités discrètes que ces symboles contiennent, que ce soient les phonèmes ou les syllabes ?

B – Les sons de la parole

1 – Caractéristiques générales du signal de parole

Afin de comprendre le traitement des sons de la parole, il est primordial de préciser de quoi est constitué le flux de parole. Sur le plan acoustique la parole se présente comme une modulation, au cours du temps, de la pression de l'air émise par la cavité buccale. Un son de parole correspond à une combinaison complexe de vibrations mécaniques se propageant dans l'air. L'appareil phonatoire de l'être humain offre de multiples possibilités de configurations articulatoires, et permet ainsi de créer un nombre important de sons pouvant à la fois être distincts les uns des autres et se combiner entre eux rapidement. Chaque unité sonore produite est le résultat d'un processus complexe où, après l'arrivée d'un flux d'air provenant des poumons, c'est l'action de la position, de la forme et des mouvements des structures articulaires du conduit vocal comprenant le larynx, le pharynx et la bouche qui va offrir ses caractéristiques aux sons. Les cavités buccale et nasale, ainsi que la position de la langue et des lèvres, en prenant une forme particulière

pour chaque son, vont permettre de leur donner une « couleur » et ainsi de les différencier les uns des autres (Abercrombie, 1967).

2 – Caractéristiques spectrales du signal de parole

L'onde mécanique générée lors de la parole possède des caractéristiques spectrales particulières. Ces caractéristiques reflètent la forme que prennent les organes de la parole ou organes résonateurs ; c'est-à-dire que le tractus vocal, en prenant une forme physique particulière permet de faire varier les fréquences de résonance qui sont à l'origine des formants. Les formants peuvent être définis comme les maxima d'énergie en amplitude des différentes fréquences de vibration du son. Acoustiquement parlant, les voyelles, en français, sont caractérisées par les fréquences des trois premiers formants qui diffèrent respectivement en fonction du mouvement du pharynx (F1), du lieu d'articulation, antérieur ou postérieur, du degré d'ouverture de la cavité buccale, du caractère oral ou nasal (F2) et de la forme prise par la cavité labiodentale (F3). Les voyelles sont aisément identifiables par leurs formants mis en évidence sur un spectrogramme (Figure 1b.). Les consonnes sont plus complexes et leurs différents traits acoustiques concernent tous les formants (Figure 1b.). Leur mode de production est caractérisé par l'obstruction du passage de l'air dans les cavités supra-glottiques. Elles peuvent être le résultat d'un bruit d'explosion ou de friction et peuvent être accompagnées ou non d'un voisement. Elles se classent en fonction de leur mode d'articulation (occlusives, fricatives ou sonores) et de leur lieu d'articulation (dentales, labiodentales ou post-alvéolaires).

3 – Transition de formants

La transition de formants contribue à distinguer les sons au sein d'un flux continu de parole. La complexité et la rapidité de transition des sons sont telle que le signal sonore est difficile à décomposer, les différents traits articulatoires étant émis simultanément. Or, l'identification des phonèmes de la langue est une condition nécessaire pour une perception adéquate, surtout lors de l'apprentissage du langage. Pour cela, la transition des formants va nous donner les indices nécessaires à leur identification (Delattre *et al.*, 1955). La transition de formants correspond à un changement rapide de résonance du tractus vocal et du passage entre deux états des cavités phonatoires. La trajectoire ainsi que la durée de la transition vont rendre compte de la variation acoustique lors du passage d'une consonne à une voyelle ou inversement. La perception parfaite de cette transition est cruciale. La reconnaissance des consonnes est intimement liée aux transitions phonétiques qui dépendent de l'entourage vocalique (Lefevre, 1985). En effet, si l'identification d'un phonème par rapport à un autre n'est pas correctement assurée, la compréhension peut échouer. Par exemple, il est nécessaire aux auditeurs de bien différencier le phonème /v/ du phonème /f/ dans la mesure où, suivi d'une voyelle ils génèrent deux mots différents (« fût » et « vue »). En outre, l'information spectrale n'est pas l'unique composante à prendre en compte. Les composantes temporelles permettent également de comprendre comment les unités constituant le flux de parole sont cérébralement découpées, perçues et traitées.

4 – Caractéristiques temporelles du signal de parole

Les caractéristiques temporelles contenues dans le flux de parole sont incontestablement des plus importantes ; il s'agit là de groupements d'énergie sur différentes échelles de temps qui sont mis en évidence par les modulations

en amplitude comprises entre 2 et 50 Hz (Rosen, 1992) au sein de l'enveloppe de la parole (Figure 1a.). Ces informations sont cruciales pour le décodage et le traitement du signal de la parole (Shannon *et al.*, 1998). Les syllabes correspondent au groupement d'énergie, sur l'échelle du temps, le plus proéminent et le plus visible sur les contours du signal sonore, car tracées par les modulations en amplitude (Mermelstein, 1975). De plus, bien que non clairement visibles dans les contours du signal sonore, car condensés dans la structure fine du signal, les indices phonémiques sont bien présents et permettent de distinguer les mots entre eux. La parole est donc un signal sonore continu rythmé par la présence d'un rythme prosodique très lent ainsi que d'un rythme syllabique plus rapide. Cette rythmicité est capitale car elle permet la segmentation du signal de parole. Elle a aussi d'ailleurs été testée dans plusieurs langues (Coupé *et al.*, 2019 ; Pellegrino *et al.*, 2011). Une récente étude a réalisé un protocole expérimental sur 17 langues pour évaluer la quantité d'information encodée dans chacune d'entre elle (Coupé *et al.*, 2019). L'équipe de chercheurs a découvert que le débit pouvait être parfois différent mais que cela n'affectait pas le débit moyen d'information, ce débit étant en moyenne de 39 bits par seconde. Cette valeur correspond au produit entre le nombre de syllabes prononcées par minute et la quantité d'information par syllabes. Ainsi, l'équipe a pu découvrir que cette quantité d'information était liée à la capacité cognitive humaine, c'est-à-dire la capacité de mémorisation dans le traitement en temps réel du signal de parole. Cet indice nous permet également de comprendre que bien qu'il n'y ait pas réellement de rythme phonémique, car il existe une trop grande variation de temps entre chaque phonème, les rythmes cérébraux ont la capacité de traiter les contrastes phonémiques les plus rapides (environ 20 ms).

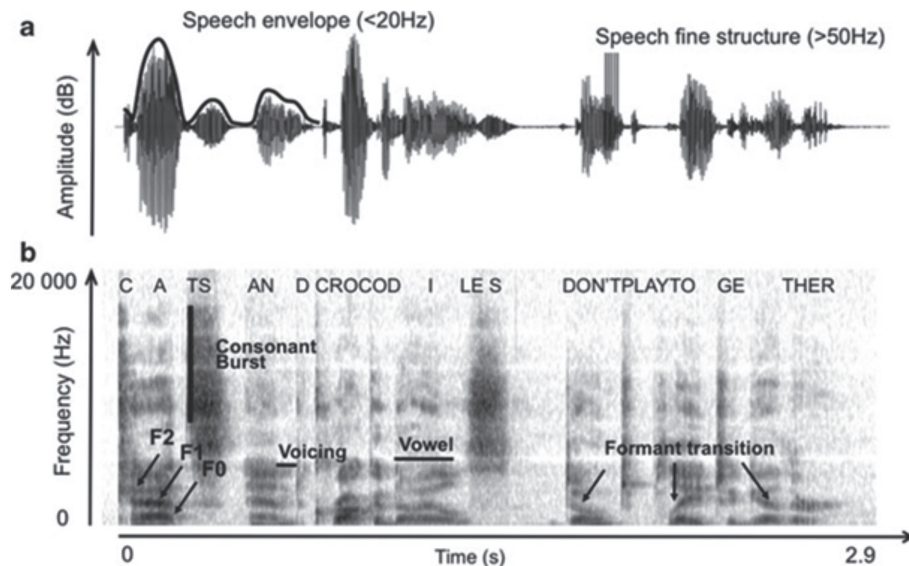


Figure 1 : Onde mécanique (a) et spectrogramme (b) d'une phrase. L'enveloppe d'une phrase est tracée à gauche de la Figure a. et la structure fine à droite. Au sein du spectrogramme, la fréquence fondamentale est visible dans la partie basse et le premier et second formant s'y ajoutent pour former les voyelles (Poeppel, 2003).

La question est donc de comprendre comment le cortex cérébral parvient à traiter toutes ces informations, c'est-à-dire comment il va réussir à prendre appui sur les caractéristiques, principalement temporelles du signal de la parole pour le décomposer en des unités discrètes, permettant l'encodage des traits distinctifs.

II – Bases neurales de la perception du flux de parole

A – L'activité cérébrale

1 – Fonctionnement du système nerveux

Au sein du cortex, le neurone a pour fonction essentielle d'intégrer l'information qu'il reçoit et de la communiquer aux neurones avec lesquels il est connecté. Cette information est transmise d'un neurone à l'autre par le biais de décharges ou potentiels d'action ceux-ci étant une inversion transitoire et brève du potentiel de la membrane neuronale. Les neurones échangent au niveau d'un point de contact appelé synapse. Les potentiels d'action du neurone présynaptique déclenchent l'émission de neurotransmetteurs qui excitent ou inhibent le neurone post-synaptique. À un niveau plus global, l'activité électrique corticale consiste en des fluctuations cycliques de l'excitabilité neuronale à différentes fréquences. Lorsque l'activité électrique périodique est cohérente dans une bande de fréquence donnée au sein d'une population de neurones on parle alors d'oscillations neuronales. Plus spécifiquement, les neurones, aussi bien au repos (activité intrinsèque) que lors d'une entrée sensorielle ou d'une activité cognitive, « oscillent » en se synchronisant entre eux et en rythme avec les modulations de l'entrée sensorielle, par exemple les modulations du rythme de la parole. Cette activité oscillatoire reflète un effet de résonance avec les stimuli extérieurs, correspondant à un phénomène d'absorption physique de l'énergie à une fréquence précise.

2 – L'électrophysiologie humaine

Étudier la dynamique de l'activité cérébrale humaine est possible grâce à l'électrophysiologie qui permet d'enregistrer les phénomènes électriques se produisant au sein du cortex cérébral. Les signaux électriques émis par les neurones peuvent être, tout comme le signal sonore, décomposés en termes de temps et de fréquence (évolution du contenu fréquentiel de l'activité neuronale au cours du temps). Les deux techniques les plus à même d'étudier cette dynamique et de comprendre les liens entre activité électrique neuronale et fonctionnement cognitif sont l'électroencéphalographie (EEG) et la magnéto encéphalographie (MEG). L'EEG est une technique d'enregistrement de l'activité cérébrale non invasive qui permet, par le placement de multiples électrodes à la surface du scalp de détecter et d'enregistrer l'activité électrique émise par les neurones. La MEG qui est une technique basée sur la mesure des champs magnétiques générés par l'activité électrochimique des neurones. L'EEG et la MEG sont des techniques complémentaires car la première est sensible aux potentiels post-synaptiques des neurones tandis que la seconde est associée aux courants ioniques intracellulaires (Barth, 1991). L'EEG est sensible aux sources radiales et tangentielles, tandis que MEG ne détecte que les composantes tangentielles. Les signaux EEG subissent une distorsion due aux tissus entre le cerveau et les électrodes, tels que le cuir chevelu et le crâne, alors que ce n'est pas le cas pour les signaux MEG (Cohen & Cuffin, 1983).

3 – Fonctionnement général du système nerveux

Cinq rythmes cérébraux ont pu être distingués parmi les différentes fréquences auxquelles les neurones peuvent se synchroniser, et donc « osciller » : les rythmes delta (~0.5-4 Hz), thêta (~4-8 Hz), alpha (~8-12 Hz), bêta (~13-20 Hz) et enfin le rythme gamma (~25-200 Hz). Dans cette dernière bande de fréquence, on peut distinguer la bande gamma basse (~25-40 Hz), la bande gamma haute (~50-150 Hz) et la bande gamme très haute dont la fréquence est supérieure à 200 Hz (Draguhn & Buzsáki, 2004). La connaissance de ces rythmes, désormais possible grâce aux techniques d'imagerie, a permis une avancée non négligeable dans le domaine de la neurolinguistique qui peut désormais étudier les synchronisations neuronales en fonction du rythme contenu dans l'enveloppe temporelle de la parole.

B – Rôle des oscillations dans la perception du signal de parole

1 – Couplage entre l'activité corticale et la parole

D'un point de vue uniquement acoustique, le découpage de la parole est principalement déterminé par la cadence syllabique. Cependant, sur le plan neurophysiologique un découpage plus fin est possible, lequel est approprié pour une segmentation à l'échelle des indices phonèmes les plus courts (25-50 ms).

Sur la base de données acquises en psychophysique et neurosciences, il a été proposé un modèle d'échantillonnage temporel asymétrique (Asymmetric Sampling in Time) suggérant que la parole est découpée à au moins deux échelles temporelles en parallèle, une échelle lente correspondant aux syllabes et une échelle rapide appropriée pour l'encodage des indices phonémiques qui constituent les syllabes. La première serait majoritairement présente au niveau du cortex auditif droit, dont l'activité neurale oscille préférentiellement à basses fréquences (4-8 Hz, bande thêta), et la deuxième préférentiellement au niveau du cortex auditif gauche, dont l'activité neurale oscille à un rythme plus rapide (25-40 Hz, bande gamma basse). Cette asymétrie oscillatoire pourrait permettre la segmentation du signal sonore en paquets d'informations, à partir de la représentation de l'information spectrale dans le cortex auditif primaire. Cela s'explique par le fait que les phases de haute excitabilité neuronale se synchronisent sur les événements acoustiques, amplifiant donc la réponse neuronale. Précisément, c'est grâce à un phénomène de résonance entre les fréquences oscillatoires du signal de parole et les fréquences intrinsèques de l'activité neuronale, présente au sein des cortex auditifs droit et gauche, qu'un alignement de phase entre le rythme thêta et l'enveloppe temporelle du signal sonore est possible (Ding *et al.*, 2015 ; Giraud *et al.*, 2007). Ainsi, le rythme thêta s'aligne sur le rythme syllabique, lui aussi étant aux alentours de 4 à 8 Hz ; le rythme gamma, quant à lui, ne s'aligne pas directement sur le rythme phonémique, les phonèmes ayant une variation de temps importante, mais est capable de les encoder via sa fréquence intrinsèque rapide. Ainsi le rythme gamma peut découper le flux phonémique pour représenter les transitions de formants rythmées entre 25 et 40 Hz. Il existe, de surcroît, au moins trois types de réponses au sein de la bande gamma. Les premières sont les réponses évoquées par un stimulus, et se produisent relativement tôt après le début de ce dernier (50 – 150 ms), toutes alignant leurs phases avec lui. Les secondes sont les réponses induites de bande gamma et sont obtenues plus tard après le début du stimulus (200 – 300 ms) ; leurs phases ne s'alignent pas avec le

stimulus. Enfin, des stables qui « résonnent » avec les stimulus acoustiques lorsque celui-ci à une modulation temporelle à peu près constante, p.e. les voyelles. Ces réponses segmentent le flux acoustique de parole en unités signifiantes et distinctives et permettent l'échantillonnage syllabique et phonémique.

Des études plus récentes ont fait évoluer cette théorie du couplage cortico-acoustique et ont proposé que les activités oscillatoires évoluent en cascade sous-tendant le traitement parole (Ghitza *et al.*, 2013 ; Giraud & Poeppel, 2012 ; Lakatos *et al.*, 2005). Ces études ont ainsi démontré que les informations temporelles saillantes, comme le début d'une syllabe par exemple, génèrent une décharge des neurones ainsi qu'un recalage de la phase des oscillations dans les bandes thêta et gamma.

1 - Théorie du *nesting* (ou *enchâssement*) oscillatoire

Pour explorer comment le décodage et la compréhension de l'information pouvaient être aussi rapides et efficaces, les modèles présentés ont aussi suggéré que ces deux fenêtres d'intégration, à deux échelles temporelles différentes, syllabique et phonémique, fonctionnaient de manière dépendante. On nomme cela le phénomène de « *nesting* », c'est-à-dire d'enchâssement (Giraud & Poeppel, 2012). Ce phénomène reflète le fait que la phase de l'activité thêta, qui signale la frontière syllabique, contrôle l'activité et l'amplitude de la bande de fréquence gamma grâce aux mécanismes de modulation en amplitude des phénomènes oscillatoires. Plus précisément, la phase de l'activité gamma est réinitialisée par le rythme thêta et peut donc se calquer sur la fréquence phonémique (Figure 2.). Ainsi, l'activité oscillatoire au sein des bandes de fréquences thêta et gamma, alterne entre des périodes de haute et de basse excitabilité sur ces deux échelles temporelles syllabiques et phonémiques. Ce mécanisme est central dans la perception de la parole.

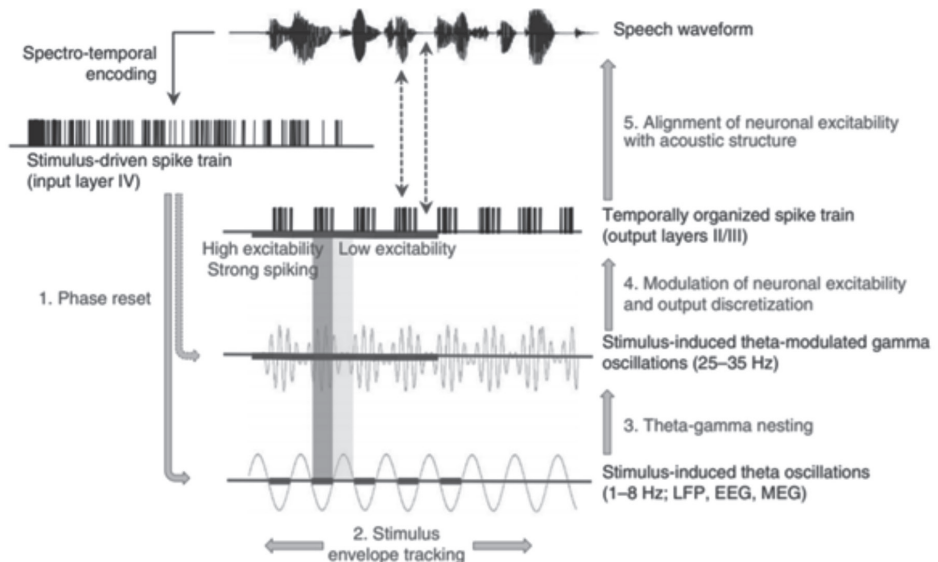


Figure 2 : Représentation schématisée des processus imbriqués lors de la perception de la parole (Giraud & Poeppel, 2012).

Il a par la suite été établi que l'intelligibilité de la parole était majoritairement dépendante du bon encodage syllabique. Si le suivi de l'enveloppe temporelle encodant les syllabes est partiellement dégradé, l'encodage des informations phonémiques le sera aussi (Ahissar *et al.*, 2001 ; Peelle & Davis, 2012). De surcroît, Ghitza, dans son modèle « Tempo », a suggéré la présence de deux autres échelles temporelles au sein de cette cascade oscillatoire. Les bandes beta (~13-30 Hz) et delta (~0.5-4 Hz) participent à cet échantillonnage (Ghitza, 2012). Il est suggéré que la première a les mêmes fonctions que la bande gamma, en étant toutefois un plus basse, et la seconde agirait pour décoder l'information prosodique (information très lente) pouvant refléter le décodage des mots et groupements verbaux. Afin d'étudier plus en détail le rôle des oscillateurs thêta dans l'analyse de la parole, Ghitza (2012) a testé l'intelligibilité de stimuli filtrés en supprimant les informations dans la bande thêta et delta (2-9 Hz). Cette manipulation a réduit l'intelligibilité, confirmant les prédictions du modèle Tempo. Le rôle critique de l'information dans la bande thêta est, de façon incontestable, prédictive de l'analyse et du décodage du signal sonore. Dans une étude ultérieure, les participants ont été testés avec une parole accélérée de trois à huit fois, ce qui empêche l'intelligibilité, puis de nouveau dégradés par l'insertion d'intervalles de silence permettant de restaurer un rythme thêta, c'est-à-dire une cadence syllabique. De façon remarquable, cette dernière manipulation permet de restaurer l'intelligibilité. Cette étude a permis d'établir l'importance capitale du rythme thêta dans la parole même si l'information phonémique est fortement comprimée (Ghitza, 2014).

III – Mécanismes oscillatoires et troubles du langage

A – Les troubles du langage

1 – Rôle des troubles du langage dans la compréhension du traitement neural du langage

Étayer les hypothèses existantes sur le décodage de la parole en explorant les mécanismes oscillatoires parmi les individus atteints d'un trouble congénital du langage complémente désormais les recherches en neurosciences. Bien que la quantité d'études visant à tester la synchronisation oscillatoire parmi les populations atteintes de troubles du langage ne soit pas aussi importante que parmi la population saine, ces découvertes donnent de nombreux indices sur le rôle des mécanismes cérébraux. Certains troubles cognitifs peuvent comporter un désordre oscillatoire, mais il est difficile d'établir si les déficits oscillatoires causent les troubles observés ou y sont seulement associés. Au sein du système cérébral, un défaut oscillatoire correspond à une mauvaise coordination des neurones, entre populations ou entre régions, générant un défaut de traitement et de formatage du signal. Il est donc suggéré que ce désordre puisse entraîner un déficit neuro-développemental fonctionnel pouvant avoir des conséquences non négligeables sur la perception auditive et conduire à d'importants troubles langagiers. Il nous incombe donc désormais de pouvoir travailler sur la profonde compréhension de ce désordre.

Les troubles du langage touchent une proportion non négligeable de la population et sont souvent invalidants. Ils regroupent l'ensemble des désordres ayant trait aux capacités linguistiques et aux compétences de communication

aussi bien à l'oral qu'à l'écrit. Parmi d'autres, les troubles du langage oral chez les individus ayant un trouble du spectre autistique, au même titre que les troubles de la dyslexie ou de l'aphasie, ont suscité beaucoup d'intérêt.

2 – Déficit oscillatoire dans l'autisme

Les troubles du langage parmi les individus atteints de troubles du spectre autistique sont aussi fréquemment présents. Les troubles du spectre autistique sont des troubles neuro-développementaux qui portent atteinte aux relations sociales et à la communication verbale et non verbale. Les troubles du langage oral et écrit ne sont pas systématiques. Cependant un des signes d'appel permettant de déceler l'autisme chez les très jeunes enfants est un retard d'acquisition du langage (Lord *et al.*, 1994). Plus de la moitié de la population souffrant de troubles du spectre autistique développera un trouble du langage persistant et la moitié de ces derniers resteront non verbaux ou persisteront dans un langage très peu fonctionnel. Ceci étant, le traitement auditif chez ces sujets a été examiné avec de l'électrophysiologie par l'étude des potentiels évoqués (ERP) en EEG ou MEG. Nombre d'études ont montré que les troubles auditifs étaient associés à une amplitude et une latence atypiques des oscillations en réponse à un son. Lepistö et collègues ont démontré une amplitude réduite aux réponses corticales suivant l'écoute de sons purs (Lepistö *et al.*, 2008). Bruneau et collègues ont démontré une latence retardée des réponses (Bruneau *et al.*, 2003). Cependant ces résultats font débat, d'autres groupes de chercheurs ayant suggéré l'inverse aussi bien au niveau de l'amplitude que de la latence.

Concernant le traitement phonologique, il reste assez difficile de l'examiner autant d'un point de vue comportemental que neurophysiologique. Il a tout de même été possible de démontrer que plus de la moitié des enfants souffrant d'autisme avec un trouble du langage sévère et ayant un QI entre 25 et 141 montraient des troubles importants des représentations phonologiques, par exemple des difficultés sévères lors d'une tâche de répétition de pseudo-mots (Kjelgaard & Tager-Flusberg, 2001). Plus tard quelques études ont tenté de comprendre comment les variantes allophoniques étaient traitées avec une tâche de perception d'une voyelle interrompue pour être transformée en une autre (/a/ devenant brusquement /u/) et une tâche présentant un continuum entre /a/ et /u/ en faisant varier la fréquence fondamentale. Les résultats obtenus ont démontré que les enfants autistes avaient un traitement phonémique opposé de celui des neurotypiques, les enfants autistes étant plus sensibles aux variations acoustiques au sein d'un même phonème qu'entre deux phonèmes (Serniclaes *et al.*, 2004), ce qui suggère un problème de découpage de l'information de parole.

Malgré la diversité des résultats obtenus durant ces dernières décennies, l'accent reste sur un traitement atypique des sons qui, par conséquent, induit un développement du langage retardé, incohérent ou absent. Une récente étude proposée par Jochaut *et al.* (2015), a montré que dans l'autisme, l'activité oscillatoire dans la bande de fréquence thêta échouait à se synchroniser avec le rythme syllabique en réponse à des stimuli de parole (Jochaut *et al.*, 2015). Cela signifie qu'elle ne parvient pas à s'engager de façon synergique avec les modulations temporelles du signal générant par effet de cascade une incapacité du rythme gamma à réguler son activité sur le rythme phonémique. Ces résultats soutiennent la théorie de l'échantillonnage en présentant l'évidence qu'un suivi inefficace de l'enveloppe temporelle réduit les chances de décodage et de

traitement du signal de la parole.

3 – Déficit oscillatoire dans la dyslexie

Le trouble de la dyslexie est, quant à lui, un trouble développemental spécifique qui altère l'apprentissage de la lecture et de l'écriture et, dans une moindre mesure, les compétences de compréhension de la parole chez environ 5 à 10 % des individus. Les enfants atteints de dyslexie ont donc des difficultés à apprendre à lire et écrire avec la même facilité, précision et rapidité qu'un enfant neurotypique. Bien que plusieurs causes possibles aient été proposées pour la dyslexie, la principale est un déficit phonologique, c'est-à-dire une difficulté à traiter les sons du langage. Le déficit affecte principalement la conscience phonologique, l'accès conscient, des sons de la parole (Boets *et al.*, 2013 ; Lieder *et al.*, 2019 ; Swan & Goswami, 1997), la capacité à former des représentations phonémiques catégoriques, ainsi que la dénomination et la mémoire verbale (Vellutino *et al.*, 2004). Ce trouble neurodéveloppemental, spécifique à la lecture/écriture, a donc des causes sous-jacentes complexes qu'il est nécessaire de comprendre. Une étude pionnière a d'ailleurs démontré que les sujets atteints de dyslexie avaient un jugement auditif déviant par rapport aux individus neurotypiques (Tallal & Stark, 1981 ; Tallal *et al.*, 1993). Les chercheurs ont utilisé un test de jugement temporel, consistant à faire écouter deux sons à deux groupes de sujets distincts (groupe atteint de dyslexie et normo-lecteurs), en faisant varier l'intervalle de temps entre eux. Ils se sont aperçus que les individus du groupe souffrant de troubles dyslexiques avaient plus de difficultés à discriminer ces deux sons lorsque l'intervalle était très bref, inférieur à 150 ms. Cela suggère que la perception des transitions rapides au sein du signal de la parole, c'est-à-dire le traitement des informations rapides inhérentes à ce signal, est moins précise parmi la population atteinte de dyslexie. En d'autres termes, le traitement de la transition des formants, qui sont des transitions rapides de l'ordre de 40 ms, est moins efficace.

Cette étude, pionnière, n'est cependant pas suffisante pour rendre compte à elle seule des causes des troubles de la dyslexie. Une quantité impressionnante d'études se sont accordées sur un déficit du traitement temporel auditif chez les personnes atteintes de dyslexie lié aux troubles de la conscience phonologique et de la perception générale de la parole (Boets *et al.*, 2007 ; Ramus, 2001 ; Ramus *et al.*, 2013 ; Schulte-Körne *et al.*, 1999). Des patterns oscillatoires atypiques suscitant des troubles de perception auditive de bas niveau sont capables d'expliquer une partie des déficits associés à la dyslexie (Schulte-Körne *et al.*, 1999). Des modèles théoriques proposent que la coordination des oscillations corticales régit l'intégration temporelle des entrées auditives. Une activité oscillatoire anormale et désordonnée impacterait alors profondément le traitement de l'information auditive, avec un effet sur la perception et le développement normal du langage. Ce phénomène a été démontré par une première étude suggérant que les individus atteints de dyslexie présentaient des réponses diminuées pour les modulations en amplitude à 20 Hz, comparativement aux sujets non-atteints par la dyslexie. Elle a également montré que les personnes souffrant de dyslexie ne montraient pas de réponses diminuées par rapport aux normo-lecteurs lors de la présentation de sons modulés en amplitude à 4 Hz (Poelmans *et al.*, 2011). Molinaro *et al.* (2016) ainsi que Lizarazu *et al.* (2015) sont parvenus aux mêmes résultats vis-à-vis des basses fréquences en suggérant de surcroît une absence de déficit au niveau de la bande de fréquence thêta. Cela suscite l'intérêt en indiquant que

les sujets atteints de dyslexie traitent correctement la fréquence syllabique mais pas la fréquence phonémique, induisant peut-être un trouble de la perception des phonèmes. En utilisant un continuum de sons modulés en amplitude variant entre 10 et 80 Hz, une autre étude a montré que l'activité oscillatoire au sein du cortex auditif gauche, était bien présente à la fréquence phonémique (~30 Hz) parmi les normo-lecteurs lors de l'écoute de sons modulés en amplitude à 30 Hz mais non chez les sujets souffrant de dyslexie, qui montraient plutôt une réponse augmentée aux sons entre 60 et 80 Hz dans le cortex auditif gauche (Lehongre *et al.*, 2011). De nouvelles réponses furent ensuite proposées par plusieurs groupes ayant observé un déficit de synchronisation des fréquences delta (0-2 Hz). Un tel déficit reflète une qualité de décodage de l'enveloppe temporelle de basse fréquence moins précise chez les sujets atteints de dyslexie lors de l'écoute de phrases au niveau du cortex auditif droit et du gyrus frontal inférieur gauche et se traduit par un trouble de perception du rythme global d'une phrase. Ces études démontrent qu'un déficit oscillatoire est bien présent chez les individus atteints de dyslexie aussi bien au niveau des fréquences basses (delta) que hautes (bêta et gamma), altérant ainsi la segmentation du flux auditif. Un tel déficit de capacité de traitement des informations auditives de basses fréquences et de traitement des informations de plus hautes fréquences est tout à fait à même de causer les troubles de perception phonémique et de segmentation dans la dyslexie. De même, l'enfant ayant des troubles de découpage de l'information en unités phonémiques pourrait alors être atteint de troubles de l'apprentissage de la lecture/écriture bien que sa capacité à distinguer les syllabes pour apprendre sa langue n'aura pas été atteinte. Le traitement auditif de bas niveau reflétant un trouble de la perception phonologique (et plus spécifiquement phonémique) est ainsi une des hypothèses les plus prégnantes pouvant expliquer les troubles de la dyslexie à l'heure actuelle.

IV – Évolution des méthodes : des neurosciences computationnelles aux stimulations électriques réhabilitatrices

L'exploration des mécanismes oscillatoires grâce aux techniques d'électrophysiologie a permis de grandes avancées dans la recherche sur le langage. Cependant, la possibilité de créer des modèles computationnels ou d'intervenir directement sur ces oscillations lorsqu'un trouble du langage est présent se révèle indispensable pour établir le rôle causal des mécanismes oscillatoires dans la perception de la parole.

A – Modèles computationnels

Relativement récemment des modèles computationnels ont été développés pour tenter de valider les hypothèses émergeant des données psychophysiques et neurophysiologiques. Les neurosciences computationnelles nous offrent en effet des outils mathématiques et informatiques qui permettent de formaliser les concepts ou théories sous-jacentes et d'en analyser leurs propriétés. L'idée est de simuler le fonctionnement du système auditif à partir des données connues

et de les comparer ensuite à la réalité biologique. Les modèles computationnels interviennent donc pour permettre de reproduire les phénomènes oscillatoires précédemment exposés tout en contrôlant précisément les facteurs qui les influencent. En essence, un modèle computationnel de l'activité neurale est un ensemble d'équations qui peuvent reproduire les données obtenues par des capteurs de l'activité cérébrale. Par exemple, un modèle neuronal va être capable de reproduire les potentiels d'actions émis par les neurones, que l'on peut enregistrer par exemple chez la souris ou plus rarement chez l'homme. Ainsi, Hyafil *et al.* (2015), ont développé un modèle qui permet de reproduire un rythme thêta qui s'adapte au rythme syllabique entendu, tout en étant coordonné à un rythme gamma servant à encoder le contenu des différentes syllabes. Hovsepian *et al.* (2020), ont approfondi ce concept avec un autre modèle computationnel reproduisant le potentiel de champ moyen (c'est-à-dire l'activité combinée de milliers de neurones), pour démontrer que l'information entre les rythmes thêta et gamma doit circuler de manière bidirectionnelle afin de permettre au rythme thêta de transmettre efficacement l'instant exact du début de chaque syllabe. Ainsi, en testant l'influence des différents paramètres influençant les modèles, comme l'importance des connexions entre les neurones, ces modèles permettent de valider ou d'invalidier des hypothèses spécifiques sur le rôle et la nature des oscillations neurales dans le traitement de la parole.

B - La stimulation transcrânienne

De nouvelles techniques permettant de moduler l'activité neuronale ont fourni de nombreux indices sur les circuits neuronaux responsables de la bonne perception, compréhension et production du langage. La neuromodulation peut être réalisée à l'aide d'une stimulation électrique très faible par courant continu (tDCS) ou alternatif (tACS), qui permet de cibler une fréquence bien précise. Lors d'une des premières études visant à entreprendre la stimulation électrique en 1965, Penfield a observé qu'envoyer une stimulation électrique directement dans le lobe temporal gauche en intracrânien (aire de Wernicke) pouvait altérer la production du langage au point de rendre le sujet aphasique (privé de production verbale) pendant la durée de stimulation. Ces premiers résultats ont permis d'acquérir une vision des mécanismes cérébraux, des fonctions cognitives majeures et du langage pour ensuite parvenir à proposer des méthodes moins invasives telles que la TMS (Stimulation Magnétique Transcrânienne), la tDCS ou la tACS. Ces nouvelles techniques permettent de moduler efficacement l'activité cérébrale tout en étant imperceptibles car seulement apposées sur le cuir chevelu.

La stimulation électrique transcrânienne est non invasive et consiste à faire circuler des courants de très faible amplitude (0,6 mA/cm²) à travers la boîte crânienne à l'aide d'électrodes apposées sur le scalp, ceci permettant de moduler l'activité cérébrale en induisant un changement local de l'excitabilité neuronale. De nombreux résultats sont désormais disponibles suggérant que l'utilisation de la tDCS ou tACS pourrait aussi modifier la perception auditive ou les capacités de lecture chez les sujets atteints de troubles du langage. Les premières études réalisées ont appliqué la tDCS, pour tenter de modifier les capacités de lecture en appliquant le courant continu au niveau du cortex temporal postérieur gauche chez des sujets normo-lecteurs (Turkeltaub *et al.*, 2012). Les auteurs ont pu ainsi améliorer les compétences de lecture parmi les sujets ayant des performances

de lecture inférieures à la moyenne. De même, l'utilisation de la tDCS au niveau du cortex frontal gauche permet d'améliorer la dénomination chez des sujets atteints d'aphasie survenue suite à un accident vasculaire cérébral (Baker *et al.*, 2010). L'utilisation de la tACS a également montré des résultats pouvant modifier la perception auditive. C'est le cas notamment de l'étude de Baltus *et al.* (2018), qui a proposé un modèle d'utilisation de la tACS en adaptant la stimulation 4 Hz au-dessus ou 4 Hz en dessous (selon les groupes) du rythme gamma individuel. Le rythme gamma maximum de chaque sujet était calculé par l'utilisation de réponses corticales à l'état stable (*Auditory steady state response*) à des tonalités modulées en amplitude avec une fréquence porteuse de 1000 Hz et des fréquences de modulation allant de 21 à 70 Hz puis retenu comme rythme gamma individuel. Une tâche de détection de blanc au sein d'un stimulus audio a été utilisée pour tester si l'augmentation de 4 Hz du rythme gamma individuel au niveau du cortex auditif pouvait améliorer l'acuité auditive. Ce protocole optimisé a donc finalement montré que les individus ayant reçu une fréquence de stimulation supérieure à leur rythme individuel avaient amélioré leur capacité de détection d'un blanc au sein d'un bruit. Une étude similaire a été réalisée par Rufener *et al.* (2019), qui ont démontré pouvoir changer la perception phonémique grâce à de la tACS. Rufener *et al.* ont appliqué cette méthode chez des enfants et adolescents atteints de dyslexie en utilisant la fréquence de 40 Hz. L'idée était alors de parvenir à augmenter les capacités de décodage phonémique en proposant une tâche de catégorisation de phonème sous EEG. Il s'est avéré que les adolescents ont amélioré leurs capacités après la tACS et que l'amplitude de l'ERP était également plus importante lors de la perception des phonèmes. La dernière étude utilisant la technique de la tACS à une fréquence de 30 Hz appliquée au niveau du lobe temporal gauche a montré une amélioration des compétences de perception phonémiques, de la qualité de décodage graphème/phonème et une augmentation des oscillations à 30 Hz. Ces améliorations étaient également corrélées avec le niveau linguistique des sujets en prenant en compte un continuum entre dyslexie sévère et absence de dyslexie (Marchesotti *et al.*, 2020). Outre l'objectif de modifier la perception auditive, ces études ont offert la possibilité d'étayer les premières théories oscillatoires en démontrant que le rythme gamma était générateur du décodage phonémique.

Conclusion

L'étude de la perception du langage est à l'interface de différents domaines de recherche. L'apport des sciences du langage et de la linguistique est, sans appel, crucial pour comprendre comment les sons sont produits, comment ils évoluent dans le temps et comment ils sont distinguables entre eux. La psychologie, ou plus spécifiquement la psycholinguistique, a donné les premières bases permettant d'expliquer en quoi chaque étape de perception, du phonème au signal sonore global, était d'une importance majeure dans le développement du langage, l'apprentissage de la lecture-écriture ainsi que dans le développement des capacités cognitives. Les neurosciences permettent maintenant d'établir des liens entre ces deux derniers domaines en proposant un pont entre le fonctionnement cérébral normal de la perception de la parole chez les individus

neurotypiques et le fonctionnement anormal dans une population d'individus atteints de troubles du langage. Les méthodes de neuroimagerie n'ayant fait qu'évoluer, il nous a été possible de formuler de nouvelles théories permettant de comprendre au niveau individuel et global comment étaient régis la perception et le traitement des sons constituant notre outil principal de communication, la parole. Grâce à un phénomène de résonance avec les modulations en fréquence et en amplitude des sons, l'activité oscillatoire des neurones peut suivre le rythme de la parole et permettre l'extraction, le décodage et la reconnaissance de ses traits distinctifs. Un déficit de synchronisation neuronale avec l'input auditif (thêta) ou d'activité oscillatoire intrinsèque (gamma) peut induire des difficultés à accéder au développement normal du langage. Cependant, les nouvelles technologies, en permettant de moduler l'activité neuronale, peuvent constituer un recours aussi bien pour traiter le trouble que pour comprendre avec plus de précision l'importance des phénomènes oscillatoires dans le fonctionnement normal. La description des lois qui régissent le fonctionnement de notre cerveau est aussi possible grâce aux neurosciences computationnelles qui nous offrent la possibilité de visualiser sous un autre angle le fonctionnement oscillatoire. Enfin, les nouvelles techniques de stimulation cérébrale, en permettant de moduler l'activité oscillatoire dans différentes régions du cortex cérébral, sont d'abord d'une grande utilité pour comprendre comment l'activité neuronale agit dans la perception et la production du langage. Ces techniques pourraient à l'avenir également permettre des traitements ciblés, individualisés de certaines maladies neurodéveloppementales du langage en permettant au cerveau de corriger des défauts au niveau de l'activité neuronale collective (les circuits) dès l'enfance.

Références bibliographiques

Abercrombie, D. (1967). *Elements of General Phonetics*. Edinburgh University Press. 209 pages.

Ahissar, E., Nagarajan, S., Ahissar, M., Protopapas, A., Mahncke, H., & Merzenich, M. M. (2001). Speech comprehension is correlated with temporal response patterns recorded from auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98 (23), 13367 – 13372. <https://doi.org/10.1073/pnas.201400998>

Baker, J., Rorden, C., & Fridriksson, J. (2010). Using transcranial direct current stimulation (tDCS) to treat stroke patients with aphasia. *Stroke*, 41 (6), 1229 – 1236. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.109.576785>

Barth, D. S. (1991). Empirical comparison of the MEG and EEG: Animal models of the direct cortical response and epileptiform activity in neocortex. *Brain Topography*, 4 (2), 85 – 93. <https://doi.org/10.1007/BF01132765>

Boets, B., Beeck, H. P. Op De, Vandermosten, M., Scott, S. K., Gillebert, C. R., Mantini, D., Bulthé, J., & Sunaert, S. (2013). Intact but less Accessible Phonetic Representations in Adults with Dyslexia. *Science*, December, 1251 – 1255. <https://doi.org/10.1126/science.1244333>

Boets, B., Wouters, J., van Wieringen, A., & Ghesquière, P. (2007). Auditory processing, speech perception and phonological ability in pre-school children at high-risk for dyslexia: A longitudinal study of the auditory temporal processing theory. *Neuropsychologia*,

45 (8), 1608 – 1620. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.01.009>

Bruneau, N., Bonnet-Brilhault, F., Gomot, M., Adrien, J. L., & Barthélémy, C. (2003). Cortical auditory processing and communication in children with autism: Electrophysiological/behavioral relations. *International Journal of Psychophysiology*, 51 (1), 17 – 25. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(03\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(03)00149-1)

Cohen, D., & Cuffin, B. N. (1983). Demonstration of useful differences between magnetoencephalogram and electroencephalogram. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 56 (1), 38 – 51. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(83\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(83)90005-6)

Coupé, C., Oh, Y., Dediu, D., & Pellegrino, F. (2019). Different languages, similar encoding efficiency: Comparable information rates across the human communicative niche. *Science Advances*, 5 (9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2594>

Delattre, P., Liberman, A. M., & Cooper, F. (1955). Acoustic Loci and Transitional cues for consonants. *Pdf*, 27.

Ding, N., Melloni, L., Zhang, H., Tian, X., & Poeppel, D. (2015). Cortical tracking of hierarchical linguistic structures in connected speech. *Nature Neuroscience*, 19 (1), 158 – 164. <https://doi.org/10.1038/nn.4186>

Draguhn, A., & Buzsáki, G. (2004). Neuronal Oscillations in Cortical Networks. *Science*, 304 (June), 1926 – 1930.

Ghitza, O. (2012). On the role of theta-driven syllabic parsing in decoding speech: Intelligibility of speech with a manipulated modulation spectrum. *Frontiers in Psychology*, 3 (JUL), 1 – 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00238>

Ghitza, O. (2014). Behavioral evidence for the role of cortical ?? oscillations in determining auditory channel capacity for speech. *Frontiers in Psychology*, 5 (JUL), 1 – 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00652>

Ghitza, O., Giraud, A.-L., & Poeppel, D. (2013). Neuronal oscillations and speech perception: critical-band temporal envelopes are the essence. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6 (January), 340. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00340>

Giraud, A.-L., & Poeppel, D. (2012). Cortical oscillations and speech processing: emerging computational principles and operations. *Nature Neuroscience*, 15 (4), 511 – 517. <https://doi.org/10.1038/nn.3063>

Giraud, A., Kleinschmidt, A., Poeppel, D., Lund, T. E., Frackowiak, R. S. J., & Laufs, H. (2007). Endogenous Cortical Rhythms Determine Cerebral Specialization for Speech Perception and Production. *Neuron*, 56 (6), 1127 – 1134. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.09.038>

Hovsepyan, S., Olasagasti, I., & Giraud, A. L. (2020). Combining predictive coding and neural oscillations enables online syllable recognition in natural speech. *Nature Communications*, 11 (1), 1 – 12. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16956-5>

Hyafil, A., Fontolan, L., Kabdebon, C., Gutkin, B., & Giraud, A. L. (2015). Speech encoding by coupled cortical theta and gamma oscillations. *ELife*, 4 (MAY), 1 – 45. <https://doi.org/10.7554/eLife.06213>

Jochaut, D., Lehongre, K., Saitovitch, A., Devauchelle, A. D., Olasagasti, I., Chabane, N., Zilbovicius, M., & Giraud, A. L. (2015). Atypical coordination of cortical oscillations in response to speech in autism. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9 (MAR), 1 – 12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00171>

Kjelgaard, M. M., & Tager-Flusberg, H. (2001). An investigation of language impairment in autism: Implications for genetic subgroups. *Language and Cognitive Processes*, 16 (2 – 3), 287 – 308. <https://doi.org/10.1080/01690960042000058>

- Lakatos, P., Shah, A. S., Knuth, K. H., Ulbert, I., Karmos, G., & Schroeder, C. E. (2005). An oscillatory hierarchy controlling neuronal excitability and stimulus processing in the auditory cortex. *Journal of Neurophysiology*, 94 (3), 1904 – 1911. <https://doi.org/10.1152/jn.00263.2005>
- Lefevre, F. (1985). Sous la dir. d'Elisabeth Lhote. *Une méthode d'analyse auditive des confusions phonétiques : la confrontation indiciaire* (thèse de doctorat en Phonétique inédite). Université de Besançon.
- Lehongre, K., Ramus, F., Villiermet, N., Schwartz, D., & Giraud, A. L. (2011). Altered low-gamma sampling in auditory cortex accounts for the three main facets of dyslexia. *Neuron*, 72 (6), 1080 – 1090. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.11.002>
- Lepistö, T., Kajander, M., Vanhala, R., Alku, P., Huottilainen, M., Näätänen, R., & Kujala, T. (2008). The perception of invariant speech features in children with autism. *Biological Psychology*, 77 (1), 25 – 31. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2007.08.010>
- Lieder, I., Adam, V., Frenkel, O., Jaffe-Dax, S., Sahani, M., & Ahissar, M. (2019). Perceptual bias reveals slow-updating in autism and fast-forgetting in dyslexia. *Nature Neuroscience*, 22 (2), 256 – 264. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0308-9>
- Lord, C., Rutter, M., & Le Couteur, A. (1994). 1994_Adi-R. 24 (5), 1 – 27. papers://9813c380-4a5a-426e-ab3b-10e227534cf8/Paper/p696
- Marchesotti, S., Nicolle, J., Merlet, I., Arnal, L. H., Donoghue, J., & Giraud, A. (2020). Selective enhancement of low-gamma activity by tACS improves phonemic processing and reading accuracy in dyslexia. *PLoS Biology*.
- Mermelstein, P. (1975). Automatic segmentation of speech into syllabic units. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58 (4), 880 – 883. <https://doi.org/10.1121/1.380738>
- Peelle, J. E., & Davis, M. H. (2012). Neural oscillations carry speech rhythm through to comprehension. *Frontiers in Psychology*, 3 (SEP), 1 – 17. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00320>
- Pellegrino, F., Coupé, C., & Marisco, E. (2011). A Cross-Language Perspective on Speech Information Rate. *Language*, 87 (3), 539 – 558. <https://doi.org/10.1353/lan.2011.0057>
- Poelmans, H., Luts, H., Vandermosten, M., Boets, B., Chesquièrre, P., & Wouters, J. (2011). Reduced sensitivity to slow-rate dynamic auditory information in children with dyslexia. *Research in Developmental Disabilities*, 32 (6), 2810 – 2819. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.05.025>
- Poeppel, D. (2003). The analysis of speech in different temporal integration windows: Cerebral lateralization as « asymmetric sampling in time. » *Speech Communication*, 41 (1), 245 – 255. [https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(02\)00107-3](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(02)00107-3)
- Ramus, F. (2001). Outstanding Questions about Phonological Processing in Dyslexia. *Dyslexia*, 7 (4), 197 – 216. <https://doi.org/10.1002/dys.205>
- Ramus, F., Marshall, C. R., Rosen, S., & Van Der Lely, H. K. J. (2013). Phonological deficits in specific language impairment and developmental dyslexia: Towards a multidimensional model. *Brain*, 136 (2), 630 – 645. <https://doi.org/10.1093/brain/aws356>
- Rosen, S. (1992). Temporal information in speech: acoustic, auditory and linguistic aspects. *Phil. Trans. R. Soc. Lond*, 336, 367 – 373. <https://doi.org/10.1121/1.1907782>
- Saussure, F. de. (1931). Cours de linguistique générale. 3^{ème} Edition. Payot Paris.

- Schulte-Körne, G., Deimel, W., Bartling, J., & Remschmidt, H. (1999). The role of phonological awareness, speech perception, and auditory temporal processing for dyslexia. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 8 Suppl 3, 28 – 34. <https://doi.org/10.1007/PL00010690>
- Serniclaes, W., Van Heghe, S., Mousty, P., Carré, R., & Sprenger-Charolles, L. (2004). Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *Journal of experimental child psychology*, 87 (4), 336-361. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2004.02.001>
- Shannon, R. V., Zeng, F.-G., & Wygonski, J. (1998). Speech recognition with altered spectral distribution of envelope cues. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104 (4), 2467 – 2476. <https://doi.org/10.1121/1.423774>
- Swan, D., & Goswami, U. (1997). Phonological awareness deficits in developmental dyslexia and the phonological representations hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 66 (1), 18 – 41. <https://doi.org/10.1006/jecp.1997.2375>
- Tallal, P., & Stark, R. E. (1981). Speech acoustic-cue discrimination abilities of normally developing and language-impaired children. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 69 (2), 568 – 574. <https://doi.org/10.1121/1.385431>
- Tallal, P., Galaburda, A. M., Llinás, R. R., & von Euler, C. (Eds.). (1993). *Temporal information processing in the nervous system: Special reference to dyslexia and dysphasia*. (pp. ix, 442). New York Academy of Sciences.
- Turkeltaub, P. E., Benson, J., Hamilton, R. H., Datta, A., Bikson, M., & Coslett, H. B. (2012). Left lateralizing transcranial direct current stimulation improves reading efficiency. *Brain Stimulation*, 5 (3), 201 – 207. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.04.002>
- Vellutino, F. R., Fletcher, J. M., Snowling, M. J., & Scanlon, D. M. (2004). Specific reading disability (dyslexia): What have we learned in the past four decades? *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 45 (1), 2 – 40. <https://doi.org/10.1046/j.0021-9630.2003.00305.x>