



HAL
open science

Variables affectant la latéralisation hémisphérique du langage chez des sujets mono- et plurilingues, à travers l'utilisation d'un paradigme en champs visuels divisés

Mathilde Vildy

► **To cite this version:**

Mathilde Vildy. Variables affectant la latéralisation hémisphérique du langage chez des sujets mono- et plurilingues, à travers l'utilisation d'un paradigme en champs visuels divisés. Sciences cognitives. 2020. dumas-03087115

HAL Id: dumas-03087115

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03087115>

Submitted on 23 Dec 2020

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

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

Année Universitaire 2019 – 2020

Collège Sciences de la Santé
Centre de Formation Universitaire d'Orthophonie de Bordeaux

Mémoire (U.E. 7.5) présenté en vue de l'obtention du
CERTIFICAT DE CAPACITÉ D'ORTHOPHONISTE
Grade Master

Présenté et soutenu en juin 2020

Par Mathilde VILDY

Née le 26/05/1997 à Pessac (33)

**Variables affectant la latéralisation hémisphérique du langage chez des
sujets mono- et plurilingues, à travers l'utilisation d'un paradigme en
champs visuels divisés**

Sous la direction de Mme Isabelle HESLING, enseignante-chercheuse, Bordeaux (GIN-IMN)

Et la co-direction de Mme Anne DELANGUE, orthophoniste, Lima

Membres du jury de soutenance :

- Madame Christine MAFAYOU, orthophoniste, Floirac
- Madame Catherine SEMAL, Professeur de Psychologie, Bordeaux et Talence (INP/ENSC et INCIA)

Année Universitaire 2019 – 2020

Collège Sciences de la Santé
Centre de Formation Universitaire d'Orthophonie de Bordeaux

Mémoire (U.E. 7.5) présenté en vue de l'obtention du
CERTIFICAT DE CAPACITÉ D'ORTHOPHONISTE
Grade Master

Présenté et soutenu en juin 2020

Par Mathilde VILDY

Née le 26/05/1997 à Pessac (33)

**Variables affectant la latéralisation hémisphérique du langage chez des
sujets mono- et plurilingues, à travers l'utilisation d'un paradigme en
champs visuels divisés**

Sous la direction de Mme Isabelle HESLING, enseignante-chercheuse, Bordeaux (GIN-IMN)

Et la co-direction de Mme Anne DELANGUE, orthophoniste, Lima

Membres du jury de soutenance :

- Madame Christine MAFAYOU, orthophoniste, Floirac
- Madame Catherine SEMAL, Professeur de Psychologie, Bordeaux et Talence (INP/ENSC et INCIA)

Résumé

Titre : Variables affectant la latéralisation hémisphérique du langage chez des sujets mono- et plurilingues, à travers l'utilisation d'un paradigme en champs visuels divisés

Résumé : Le rôle dominant de l'hémisphère gauche (HG) dans le traitement du langage a été clairement établi et est désormais un principe fondamental de l'organisation fonctionnelle du cerveau. Il est apparu que plusieurs facteurs inter-individuels ont pu être identifiés comme ayant une influence sur cette organisation. La présente étude a pour objectif d'étudier les facteurs pouvant avoir une influence sur la latéralisation hémisphérique du langage, en utilisant un paradigme en champs visuels divisés simple mais valide, la tâche translingue de décision lexicale (ou TLDT), qui permet de mesurer la latéralisation du langage. Nous avons testé un échantillon de 82 participants Français. Ceux-ci ont tous répondu à différents questionnaires à propos de leur latéralité (manuelle, podale, oculaire et auriculaire), ainsi qu'à des tests de langues, tous étant mono- ou plurilingues, parlant espagnol ou anglais en plus du français comme langue maternelle. Un avantage significatif de l'hémichamp-visuel droit/HG, correspondant à la dominance de l'HG pour le langage, a été révélé pour l'exactitude et les temps de réponse, plus important au niveau de l'exactitude. Cependant, les sujets avec un score de latéralité podale faible et un niveau de maîtrise faible d'une seconde langue (LV2) ont montré une latéralisation à gauche plus faible que les autres. De surcroît, la préférence podale était davantage liée à la latéralisation du langage que la préférence manuelle. Ces résultats suggèrent que la préférence podale devrait être prise en considération, et être préférentiellement utilisée au lieu de la préférence manuelle dans les études à propos de la latéralisation cérébrale, et qu'un niveau de maîtrise élevé de LV2 peut réduire l'asymétrie pour le langage.

Mots clés : latéralisation du langage ; asymétrie hémisphérique ; préférence manuelle ; préférence podale ; bilinguisme ; paradigme en champs visuels divisés

Title : Laterality variables affecting language hemispheric lateralisation in mono- and plurilingual people using a visual half-field paradigm

Abstract : The dominant role of the left hemisphere (LH) in processing language has been well established and is now a fundamental principle of the brain functional organisation. It appears that several inter-individual factors can be identified as having an influence on this organisation. The current study aimed at investigating factors which could have an influence on language hemispheric lateralisation, by using a simple and reliable visual half-field (VHF) paradigm, the translingual lexical decision task (TLDT), that can measure language lateralisation. We tested a sample of 82 French participants. They all performed different questionnaires about laterality (handedness, footedness, eyedness and eareness), as well as foreign language tests, all being mono- or plurilinguals, speaking Spanish or English in addition to French as their mother tongue. A significant right-visual-field/LH advantage corresponding to the dominance of the LH for language was revealed for accuracy and reaction times, with a higher significance for accuracy. However, subjects with low footedness scores and low proficiency in a second language (L2) appeared to be less lateralised than others. Moreover, footedness was more related to language lateralisation than handedness. These findings suggest that footedness should be taken into consideration, and be preferentially used instead of handedness in studies about cerebral lateralisation, and that a higher proficiency in a L2 can reduce asymmetry for language.

Keywords : language lateralisation; hemispheric asymmetry; footedness; handedness; bilingualism; visual half-field paradigm

Nombre de pages : 66. Nombre de références : 188

Unités de recherche

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à Isabelle Hesling, pour son encadrement sans failles, ses précieux conseils et sa disponibilité, mais aussi pour l'amour qu'elle aura su me faire porter à la recherche, par sa pédagogie et son engouement vis-à-vis de celle-ci.

Je remercie également Anne Delangue, pour son énergie positive et ses conseils toujours précieux, même depuis l'autre bout du monde. Ces deux mois de stage en sa présence auront certainement su faire de moi une orthophoniste à la fois plus compétente et plus bienveillante.

Je remercie Markus Hausmann ainsi que Christine Mohr et Mickaël Nurock pour leurs relectures et leurs conseils.

Merci à l'équipe pédagogique du CFUO de Bordeaux pour leur encadrement personnalisé, et plus spécifiquement à Delphine Lamargue Hamel, ainsi qu'aux enseignants de l'UE Statistiques et les élèves du master de biostatistiques, Marie Viaud et Pauline Desnavailles. Un merci tout particulier à Quentin le Grand pour sa disponibilité, par mail comme par visio, et son aide précieuse avec les statistiques.

Merci aux copines d'orthophonie, à toute la promo pour ces cinq années partagées, mais surtout à Sophie, Claire, Lorren et Hannah, pour leur présence et notre soutien mutuel tout au long de ces études. Merci à Yoan, pour ses encouragements permanents, ainsi qu'à sa famille, Marion, Marc et Michèle, pour leur présence durant l'écriture de ce mémoire. Merci à ma famille et à mes amis de m'avoir aidée et encouragée de près ou de loin pendant toutes ces années.

Enfin, je tiens également à remercier tous les participants qui se sont prêtés à cet exercice, pour leur intérêt, leurs réponses rapides, et bien sûr leur aide indispensable dans cette étude.

Sommaire

RESUME.....	3
REMERCIEMENTS.....	4
SOMMAIRE.....	5
TABLE DES FIGURES, TABLEAUX, SCHEMAS.....	6
PREAMBULE.....	7
INTRODUCTION A L'ARTICLE.....	7
I. LA LATERALISATION HEMISPHERIQUE.....	7
1. Evolution et état des connaissances.....	7
2. Variations inter- et intra-individuelles.....	8
3. Effet du bilinguisme sur la latéralisation hémisphérique.....	9
4. Effet de la gaucherie sur la latéralisation hémisphérique.....	9
5. Les cérébro-lésés et la latéralisation hémisphérique.....	11
II. EVALUATIONS DE LA LATERALISATION HEMISPHERIQUE.....	12
1. Découvertes sur des patients cérébro-lésés et méthode anatomo-clinique.....	12
2. La procédure de Wada.....	13
3. Les techniques de neuroimagerie.....	14
4. La présentation en champs visuels divisés.....	15
III. ELEMENTS SUPPLEMENTAIRES DE LA PRESENTE ETUDE.....	17
1. Choix méthodologiques de l'étude.....	17
2. Problématique et hypothèses.....	18
ARTICLE.....	20
ABSTRACT.....	20
KEYWORDS.....	20
INTRODUCTION.....	20
MATERIAL AND METHODS.....	24
1. Participants.....	24
2. Materials.....	25
RESULTS.....	30
1. Translingual lexical decision task.....	30
2. Asymmetry indices.....	30
3. Univariate analyses.....	31
4. Multivariate analyses: linear and logistic regressions.....	36
5. Asymmetry-performance relationships.....	37
6. Summary of the results.....	38
DISCUSSION.....	38
ACKNOWLEDGEMENTS.....	44
DECLARATION OF INTEREST STATEMENT.....	44
REFERENCES.....	44
DISCUSSION ADDITIONNELLE ET PERSPECTIVES CLINIQUES.....	50
I. ASPECTS METHODOLOGIQUES ET STATISTIQUES DE NOTRE ETUDE.....	50
1. Définition du niveau de LV2 des participants.....	50
2. Intégration d'hispanophones à l'étude.....	51

3. <i>Choix des tests statistiques</i>	52
II. LIMITES DE L'UTILISATION DU TLDT.....	52
III. PERSPECTIVES POUR LES CONNAISSANCES ET LA PRATIQUE CLINIQUE.....	53
1. <i>Perspectives pour la recherche fondamentale et clinique</i>	53
2. <i>Perspectives pour la prise en charge en orthophonie de patients présentant de possibles variations de latéralisation</i>	57
IV. CONCLUSION.....	58
BIBLIOGRAPHIE ADDITIONNELLE	59
RESUME	66

Table des figures, tableaux, schémas

FIGURE 1. HISTOGRAMME DE LA DISTRIBUTION DE L'INDEX DE LATERALISATION FONCTIONNELLE HEMISPHERIQUE (HFLI) CHEZ LES DROITIERS (D, PANNEAU DU HAUT), GAUCHERS (G, PANNEAU DU MILIEU) ET DANS L'ECHANTILLON TOTAL (D+G, PANNEAU DU BAS). FIGURE ADAPTEE DE L'ARTICLE DE MAZOYER ET AL. (2014).	10
FIGURE 2. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES EVENEMENTS SURVENANT A CHAQUE ESSAI LORS D'UNE PRESENTATION EN CHAMPS VISUELS DIVISES. FIGURE ADAPTEE DE L'ARTICLE DE BOURNE (2006), DOI.ORG/10.1080/13576500600633982.	17

DANS L'ARTICLE

FIG. 1 - MEAN ACCURACY (%) AND REACTION TIME (SEC) AND STANDARD ERRORS FOR BOTH VISUAL HALF-FIELDS ACCORDING TO SEX	31
FIG. 2 - MEAN ACCURACY (%) AND REACTION TIME (SEC) AND STANDARD ERRORS FOR BOTH VISUAL HALF-FIELDS ACCORDING TO HANDEDNESS	33
FIG. 3 - MEAN ACCURACY (%) AND REACTION TIME (SEC) AND STANDARD ERRORS FOR BOTH VISUAL HALF-FIELDS ACCORDING TO FOOTEDNESS	33
FIG. 4 - MEAN ACCURACY (%) AND REACTION TIME (SEC) AND STANDARD ERRORS FOR BOTH VISUAL HALF-FIELDS ACCORDING TO EYEDNESS	34
FIG. 5 - MEAN ACCURACY (%) AND REACTION TIME (SEC) AND STANDARD ERRORS FOR BOTH VISUAL HALF-FIELDS ACCORDING TO EAREDNESS	34
FIG. 6 - MEAN ACCURACY (%) AND REACTION TIME (SEC) AND STANDARD ERRORS FOR BOTH VISUAL HALF-FIELDS ACCORDING TO THE LEVEL OF PROFICIENCY IN A SECOND LANGUAGE	36
TABLE 1 - DEMOGRAPHIC INFORMATION: SEX, AGE, LEVEL OF EDUCATION, SELF-REPORTED HANDEDNESS, L2 PROFICIENCY IN ENGLISH AND SPANISH, GLOBAL L2 PROFICIENCY, DAILY LINGUISTIC IMMERSION, EARLY OR LATE EXPOSURE TO L2	26
TABLE 2 - MEAN ACCURACY ACC (%) AND REACTION TIME RTs (MS) FOR BOTH VISUAL HALF-FIELD AT THE TLDT PROCEDURE AND ASYMMETRY INDICES FOR ACC AND RTs	31
TABLE 4 - LATERALITY TESTS: GROUPS BY DOMINANT SIDES	35
TABLE 3 - SCORES OF LATERALITY TESTS	35

Préambule

Je présente mon mémoire en vue de l'obtention du Certificat de Capacité d'Orthophoniste. Il s'agit d'un mémoire de recherche, présenté alors sous le format d'article de recherche. Avant de proposer l'article, qui sera prochainement soumis à la revue « *Laterality: Asymmetries of Brain, Behaviour, and Cognition* », je développerai une partie introductive, dans le but d'approfondir celle de mon article et d'apporter certaines précisions. Suite à l'article, inséré dans son entièreté dans ce document, je proposerai une discussion additionnelle, approfondissant celle de l'article, ainsi que des perspectives cliniques à cette recherche.

Introduction à l'article

I. La latéralisation hémisphérique

1. Evolution et état des connaissances

Depuis la découverte que le cerveau n'est pas un organe symétrique, comme postulé depuis des siècles (Xavier Bichat, 1771-1802), symétrie étant en ce temps synonyme d'harmonie, d'équilibre et de santé, la recherche s'est appliquée à étudier le phénomène de latéralisation fonctionnelle ou hémisphérique, appelé également spécialisation hémisphérique, prédominance hémisphérique, ou encore organisation inter-hémisphérique. Ce phénomène a été étudié pour les diverses fonctions cognitives, et notamment pour le langage.

Chaque hémisphère, droit (HD) et gauche (HG), a un rôle différent à jouer dans le traitement de l'information linguistique et paralinguistique (pour une revue voir Lindell, 2006; ainsi que Perrone-Bertolotti et al., 2016).

En effet, les études actuelles montrent que l'implication respective de chaque hémisphère cérébral dans une tâche cognitive donnée est plus complexe qu'une implication en tout ou rien de l'HD ou de l'HG (pour une revue voir Hellige, 2002; Hugdahl, 2000). Nous sommes ainsi en présence d'un continuum dynamique entre la participation de l'HD et celle de l'HG (Jung-Beeman, 2005).

Il a été proposé que les hémisphères cérébraux présentent des modes de traitement de l'information qui leur seraient propres. L'HG réaliserait un traitement analytique et local tandis que l'HD réaliserait un traitement holistique et global (Brederoo et al., 2017; Martin, 1979).

C'est notamment grâce à l'étude de patients split-brain (par exemple Gazzaniga, 1983) que la notion de « dominance hémisphérique » prend une toute nouvelle dimension puisque « l'hémisphère mineur » a un rôle primordial dans certaines fonctions (par exemple le traitement de l'espace, des visages, des émotions, certains aspects linguistiques tels que la prosodie de la parole, entre autres).

Plus particulièrement, à propos du langage, même si les aires de Broca et de Wernicke sont situées dans l'HG, nous savons maintenant que, loin d'être un hémisphère « non verbal », l'HD joue un rôle crucial dans les traitements prosodiques et phonologiques ainsi que dans le traitement de certaines composantes pragmatiques (ironie, métaphores, proverbes) (voir Lindell, 2006). De plus, les récentes études de neuro-imagerie indiquent

qu'en plus des structures corticales, des structures sous-corticales sont impliquées dans le traitement du langage ; en particulier les noyaux gris centraux (ou ganglions de la base) (Macoir et al., 2013) et le cervelet (Mariën & Borgatti, 2018; Starowicz-Filip et al., 2017), qui forment avec le cortex préfrontal un circuit neuronal qui supporte notamment les apprentissages (Caligiore et al., 2019; Kail, 2015; Lieberman, 2016). Il a également été démontré que les circuits neuronaux des aires frontales temporales et pariétales gauches du langage sont aussi impliqués dans la mémoire de travail, l'attention sélective ou le contrôle inhibiteur (Lieberman, 2016). Enfin, de nouvelles régions non impliquées dans les modèles classiques sont maintenant considérées comme pertinentes pour le langage : l'insula antérieure, le cortex temporal médian et inférieur, ou encore la jonction temporo-pariétale (Price, 2000). Le cerveau humain ne possède donc pas un organe consacré exclusivement au langage, comme Chomsky peut le laisser entendre avec sa « faculté du langage » (Hauser et al., 2002).

Si cela n'est pas précisé, on parle souvent d'« hémisphère dominant » en référence au langage (appelé comme ceci car il contrôle à la fois le langage et la main droite), mais ce phénomène est pourtant semblable pour toutes les fonctions cognitives, telles que la mémoire (où l'HG apparaît « dominant », avec toutefois une implication de l'HD, en plus d'un rôle important du système limbique ; LaBar & Cabeza, 2006), ou encore l'attention et les fonctions visuo-spatiales, pour lesquelles l'HD pourrait être considéré comme celui « dominant » (les lésions provoquant souvent des déficits attentionnels comme des hémignégligences ; voir Coslett, 2018), tout comme pour la cognition sociale (Bernard et al., 2018; Lemée et al., 2018).

2. Variations inter- et intra-individuelles

Même si la consistance de la dominance de l'HG pour des tâches langagières a été prouvée, la latéralisation du langage reste inconsistante, même pour une seule personne, puisque des variations inter- et intra-individuelles sont à relever.

Concernant les variations liées aux caractéristiques des individus (ou inter-individuelles), la plupart des personnes ont une dominance de l'HG pour le langage, mais quelques-uns présentent une dominance de l'HD (*strongly-atypicals*) ou une participation des deux hémisphères (ambilatéralité) (Mazoyer et al., 2014). Plusieurs facteurs peuvent être identifiés comme ayant une influence sur cette organisation, comme une asymétrie anatomique, la gaucherie familiale ou la force de la préférence manuelle (Josse et al., 2003; Tzourio-Mazoyer et al., 2010), sans pour autant qu'aucun de ces facteurs ne soit totalement prédictifs. Nous pouvons également citer la préférence manuelle, le sexe, l'âge, ou l'apprentissage d'une seconde langue, comme discutés dans notre article.

Des variations liées aux processus linguistiques ou aux paradigmes expérimentaux (ou intra-individuelles) influent également, puisque certaines tâches linguistiques requièrent une participation plus importante de l'HD que d'autres. Par exemple, la phonologie est principalement soutenue par l'HG, alors que plusieurs études ont suggéré une implication des deux hémisphères pour la sémantique, ainsi qu'une dominance de l'HD pour certaines tâches prosodiques, comme la compréhension et la production de la prosodie affective (Perrone-Bertolotti et al., 2016; Vigneau et al., 2011).

3. Effet du bilinguisme sur la latéralisation hémisphérique

Par le biais de l'expérience et de l'apprentissage, le cerveau humain a démontré une neuroplasticité permanente, et ce même à l'âge adulte. L'acquisition de deux langues, et plus, influence donc cette organisation cérébrale, et ainsi la cognition des individus. En plus d'avoir une action sur les aires langagières du cerveau (en recrutant de nouvelles aires cérébrales ou en renforçant l'activation de certaines, selon que l'apprentissage est précoce ou tardif notamment, ce qui peut interagir avec la latéralisation du langage), l'apprentissage d'une seconde langue influence aussi les processus cognitifs non-linguistiques, comme leurs corrélats neuronaux (pour une revue voir Hayakawa & Marian, 2019). Même lorsqu'une seule langue est utilisée, les informations de deux systèmes linguistiques, ou plus, peuvent être activées en même temps, exigeant alors des mécanismes pour contrôler les interférences. De fait de ce fonctionnement, les bi/plurilingues ont alors un meilleur contrôle exécutif (fonction principalement régulée par le lobe frontal) et présentent de meilleurs résultats au niveau de l'inhibition, de la mémoire de travail, de l'attention divisée, ou encore de tâches multiples, ainsi qu'un déclin cognitif lié à l'âge moins important. On peut également relever de meilleures capacités symboliques et métalinguistiques (pour une revue voir Bialystok et al., 2012).

Il a été montré que des changements structuraux peuvent être induits même par un apprentissage de courte durée ou un entraînement intensif. Ainsi, Hosoda et al. (2013) ont montré que, après 16 semaines seulement, des enfants japonais ayant entraîné intensivement leur vocabulaire anglais présentaient une augmentation de la densité de la matière grise et de la substance blanche dans le gyrus frontal inférieur droit, augmentation corrélée positivement avec l'accroissement du vocabulaire, et non retrouvée dans le groupe contrôle. De plus, même les effets apparemment distincts du langage sur les opérations cognitives découlent probablement de fonctions interdépendantes (pour une revue voir Hayakawa & Marian, 2019), et des réseaux de haute inter-connectivité spécifique des bilingues ont été trouvés (Kail, 2015). Le contrôle du langage chez les bi/plurilingues serait alors, au moins partiellement, assuré par un système général et non spécifique au langage (Abutalebi et al., 2000). Comme plus de la moitié de la population mondiale est bi- ou plurilingue, l'utilité de comprendre un tel phénomène apparaît évident.

4. Effet de la gaucherie sur la latéralisation hémisphérique

a. La gaucherie et les différents types de latéralités

La latéralité fonctionnelle d'un individu se traduit par des manifestations comportementales de dominance cérébrale (ou latéralisation) dans lesquelles il y a une utilisation préférentielle de l'une des moitiés du corps (MeSH, INSERM). Par exemple, lorsqu'un individu utilise sa main droite pour écrire, il se définit comme droitier pour l'écriture.

Dans la plupart des études citées, seule la préférence manuelle est relevée et/ou contrôlée ; nous avons ici également investigué la latéralité podale, oculaire et auriculaire. Des études récentes présentent la latéralisation podale comme moins influencée par des facteurs environnementaux, et ainsi meilleure prédicatrice de la

latéralisation (Elias et al., 1998; Elias & Bryden, 1998; Tran et al., 2014). La latéralité auriculaire et oculaire sont, elles, très peu étudiées en lien direct avec la dominance hémisphérique du langage, mais ne semblent toutefois pas à négliger pour une étude rigoureuse et complète. Environ 90% de la population a une préférence manuelle droite contre seulement une latéralisation de 80% pour le pied, 67% pour l'œil et 60% pour l'oreille (Porac & Coren, 1981). Tran et al. (2014) montrent qu'il existe un lien entre la latéralité oculaire et les autres types de préférences, même si la latéralité auriculaire apparaît plus congruente avec la latéralité générale des individus (*sidedness*). Strauss (1986) va même jusqu'à dire que la préférence auriculaire est un meilleur prédicteur de la latéralisation du langage que les autres types de latéralité, mais dans une tâche d'écoute dichotique. A noter que la dominance sensorielle et les différences d'acuité dans les activités binaurales ou binoculaires doivent être conceptuellement distinguées (Tran et al., 2014).

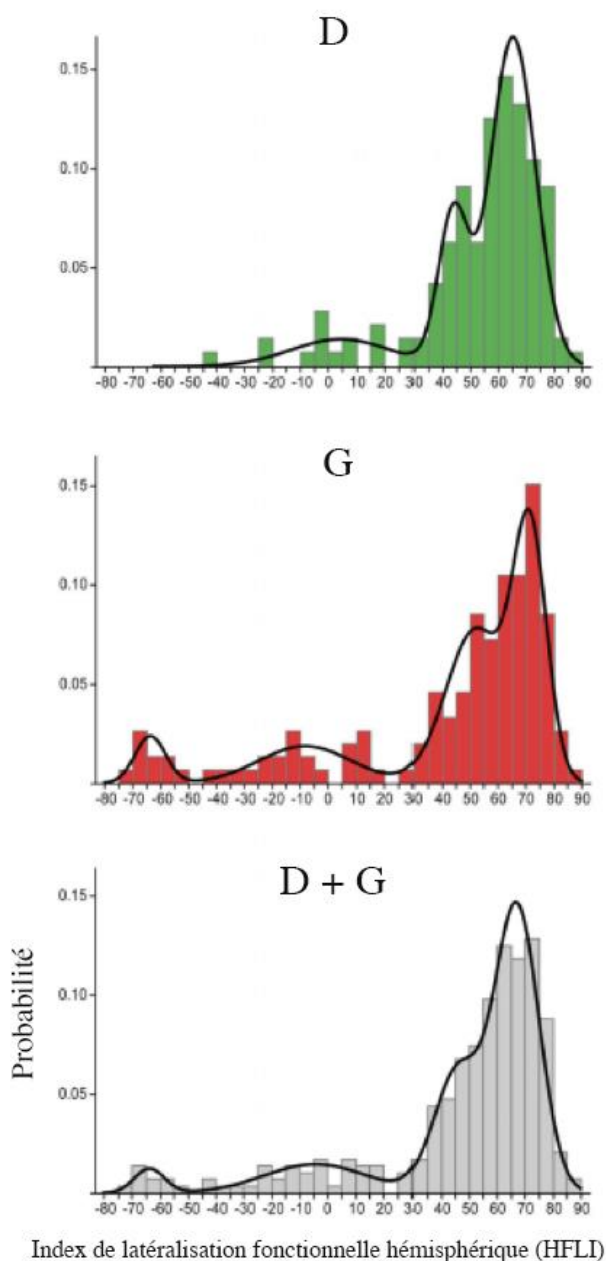


Figure 1. Histogramme de la distribution de l'index de latéralisation fonctionnelle hémisphérique (HFLI) chez les droitiers (D, panneau du haut), gauchers (G, panneau du milieu) et dans l'échantillon total (D+G, panneau du bas). Les lignes entières sont ajustées sur ces distributions par des modèles de combinaison de n répartition gaussienne ($n = 3$ pour D, $n = 4$ pour G et D+G). Figure adaptée de l'article de Mazoyer et al. (2014). doi:10.1371/journal.pone.0101165.g004

b. Une remise en question du lien entre latéralité manuelle et latéralisation du langage

La plupart des études sur la latéralisation du langage contrôlent de manière quasi-systématique la latéralité manuelle des participants (par exemple Hausmann et al., 2019; Hécaen et al., 1981; Isaacs et al., 2006; Mellet et al., 2014; Willemin et al., 2016), *a minima* comme variable contrôle ; de nombreuses études ayant considéré que les gauchers étaient moins latéralisés pour le langage que les droitiers (voir Hécaen, 1984 ou Isaacs et al., 2006). Cependant, Mazoyer et al. (2014) ont démontré que la latéralité manuelle et la latéralisation du langage étaient associées par hasard, sauf chez les individus avec une dominance langagière de l'HD (*strongly-atypical*), organisation retrouvée uniquement chez de rares gauchers. La latéralisation semble alors n'être qu'un indicateur imparfait de la latéralisation du langage, puisque seulement 6,5 % des gauchers sont fortement atypiques, soit 1 % de la population totale. Si l'on considère que 78 % des gauchers sont typiquement latéralisés et 15 % ambilatéraux (voir Figure 1), la latéralité manuelle pourrait ne pas être tant prédictive de la latéralisation du langage. Le lien entre langage et main est alors faible et complexe. Être gaucher augmente simplement plus les chances d'avoir une latéralisation du langage ambilatérale ou fortement atypique mais ne reflète en rien une organisation différente.

5. Les cérébro-lésés et la latéralisation hémisphérique

L'étude de patients cérébro-lésés a grandement contribué aux découvertes sur la spécialisation hémisphérique du langage, comme expliqué dans la partie suivante. Suite à des lésions, les réseaux cérébraux peuvent se réorganiser afin de retrouver ou de compenser la fonction perdue, en étendant l'activation à proximité de la zone fonctionnelle, ou en sollicitant de nouvelles régions non endommagées à distance de la zone fonctionnelle, que ce soit dans le même hémisphère ou dans l'hémisphère controlatéral. Cette prodigieuse capacité du cerveau humain suggère que la récupération du langage se produit dans un réseau bilatéral préexistant, comme l'ont montré Saur et al. (2006), avec 14 patients aphasiques suite à un AVC.

L'aphasie bilingue

De même, l'étude de patients aphasiques et bilingues a contribué à comprendre l'organisation cérébrale du langage, et notamment celle particulière des personnes bi/plurilingues. Malgré les nombreuses études sur le sujet, il est difficile d'arriver à un consensus. Beaucoup de cas avec des tableaux fort différents d'atteinte des deux langues ont été décrits après lésion cérébrale : la L1 peut être mieux préservée que la L2 (Ribot, 1906), mais le tableau inverse a également été rapporté (Ibrahim, 2008), avec à l'extrême, des cas paradoxaux qui préservent une L2 apprise à l'école, très peu utilisée et peu maîtrisée (Aglioti et al., 1996; Leemann et al., 2007). Finalement, beaucoup de patients présentent des niveaux similaires d'atteinte dans les deux langues (Fabbro, 2001) (pour une revue voir Laganaro, 2014). Ces symptômes corroborent à chaque fois différentes hypothèses (hypothèse de systèmes de production du langage séparés, partiellement séparés, ou faisant partie d'un même système étendu ; voir Paradis & Lebrun, 1983). Nous pouvons suggérer que ces constats reflètent alors les grandes variabilités

inter- et intra-individuelles, et que l'organisation cérébrale du langage est en effet bien différente selon la personne, son niveau en L2, l'âge d'acquisition de la L2, le type de bilinguisme, entre autres facteurs...

II. Evaluations de la latéralisation hémisphérique

1. Découvertes sur des patients cérébro-lésés et méthode anatomo-clinique

Le phénomène de latéralisation hémisphérique a été mis en évidence tout d'abord par les études lésionnelles issues de l'aphasiologie. Les premières découvertes fondatrices quant à la connaissance actuelle de la latéralisation du langage furent sans conteste celle de Broca (1865), chirurgien et anthropologue Français, ainsi que celles de Wernicke (1874), neurologue Autrichien, qui constatèrent à l'aide d'observations *post mortem* sur des patients aphasiques, que les lésions responsables des déficits se situaient dans des zones très précises de l'HG. L'« aire de Broca », localisée dans le gyrus frontal inférieur gauche, fut alors considérée comme la zone de production du langage articulé. L'« aire de Wernicke », localisée dans la partie postérieure du gyrus temporal supérieur gauche, fut définie comme la zone permettant la compréhension de la parole et comme étant plus exactement le siège des images auditives des mots. Ces facultés étaient alors atteintes en cas de lésions. De la même manière, Jules Dejerine (1849-1917) associa des troubles de lecture et d'écriture à des lésions de l'HG.

À la fin du XIX^{ème} siècle, les observations cliniques associées à celles *post mortem* avaient fait émerger deux notions fondamentales : d'une part la notion de latéralisation hémisphérique des fonctions cognitives, avec la dominance de l'HG pour le langage (alors appelé hémisphère dominant car il contrôle à la fois le langage et la main droite) et son subordonné l'HD (appelé hémisphère mineur) ; d'autre part la notion d'un lien direct entre une structure cérébrale et un déficit fonctionnel, suggérant l'existence d'une spécialisation régionale ; comme le suggérait déjà, via la palpation digitale du crâne, Franz Josef Gall (1758-1828), avec son concept de phrénologie, évoquant notamment une « bosse des maths » ou une « bosse de la mémoire ».

C'est grâce à cette méthode anatomo-clinique, étudiant en parallèle les lésions et les effets cliniques de celles-ci, qu'un premier modèle neurologique de l'organisation anatomo-fonctionnelle du langage a ainsi été proposé : le modèle bipolaire du langage (décrit par Lichtheim en 1885), distinguant le pôle antérieur de la production et le pôle postérieur de la compréhension (orales et écrites) (pour une description du modèle neurologique du langage du XIX^e siècle, voir Perrone-Bertolotti et al., 2016 et Price, 2000).

Limites du modèle lésionnel et anatomico-clinique

Bien que ce modèle ne soit pas entièrement invalidé, plusieurs limites ont été depuis soulignées (voir par exemple Démonet & Thierry, 2001; Duffau, 2018; Price, 2000). D'une part, les études lésionnelles actuelles montrent qu'un déficit du traitement du langage, que ce soit via la lecture ou l'audition, est associé à des lésions gauches souvent très larges, impliquant ainsi souvent des régions qui ne sont pas incluses dans le modèle lésionnel d'origine (pour une revue, voir Damasio et al., 2004 ainsi que Dronkers et al., 2004). De même, des dommages de l'aire de Broca peuvent induire des difficultés autres que celles de production. D'autre part, le modèle classique

suppose notamment qu'il y a un traitement sériel de l'information, c'est-à-dire que chaque étape du traitement n'est réalisée qu'à partir du moment où la précédente est achevée, ce qui ne correspond pas toujours aux observations (pour une revue, voir Pulvermüller et al., 2009).

Il est maintenant communément admis que le traditionnel concept localisationniste et associationniste est incomplet ; le langage est désormais considéré comme ayant une organisation plus complexe, majoritairement supportée par des réseaux neuronaux largement distribués dans l'HG. Ce modèle contemporain affirme un fonctionnement connexionniste plutôt qu'un recrutement de régions cérébrales indépendantes les unes des autres (Duffau, 2018; Eustache, 2018; Price, 2000).

2. La procédure de Wada

Environ 80 ans après les découvertes de Paul Broca, et bien avant l'avènement de l'IRM, W. James Gardner, un neurochirurgien Américain, fut le premier à rapporter l'utilisation d'injections d'anesthésiques sous-durales pour observer la latéralisation du langage chez des patients, à des fins de planification pré-chirurgicale tout d'abord, avant résection corticale en cas de tumeurs ou d'épilepsie par exemple (Nathoo et al., 2004). Le test de l'amytal de sodium, ou test de Wada, nommé ainsi d'après le neurologue japonais Juhn A. Wada (né en 1924) a été d'abord utilisé pour protéger des effets du traitement électroconvulsif utilisé dans les années 1940 (pour les maladies psychiatriques notamment), mais surtout par la suite largement utilisé pour identifier l'hémisphère dominant pour le langage et la mémoire. (Kemp et al., 2018; Wada, 1997). Ce test a par ailleurs été très utilisé dans les années 1980 pour étudier le changement d'hémisphère dominant voire de main dominante chez les patients ayant eu une lésion cérébrale de l'HG très précoce (avant l'âge d'un an) (pour une revue, voir Kemp et al., 2018).

Limites du test de Wada

Etant donnée sa technique très invasive, l'utilisation du test de Wada est limitée. De potentielles complications ont de plus été relevées, comme une encéphalopathie, un accident vasculaire cérébral (AVC) ou encore une crise d'épilepsie. De rares effets cognitifs, de type attentionnel, ont aussi parfois été rapportés. En outre, les résultats peuvent être difficilement reproductibles, voire ininterprétables en raison de possibles problèmes de flux croisés. La réalisation des tests cognitifs peut également être compliquée par l'endormissement des patients suite à l'injection. (pour une revue, voir Kemp et al., 2018). Une enquête internationale publiée en 2008 a démontré une baisse spectaculaire de l'utilisation du test de Wada dans la planification préchirurgicale pour les patients atteints d'épilepsie du lobe temporal au cours des 15 dernières années (Baxendale et al., 2008). Le test de Wada a été largement supplanté par l'IRMf, qui est non invasive et présente une bonne concordance avec les résultats du test de Wada (Binder, 2011), même si pas toujours relevée (Kemp et al., 2018).

3. Les techniques de neuroimagerie

a. La neuroimagerie structurale

La compréhension du phénomène de latéralisation hémisphérique a grandement évolué grâce aux données issues des techniques de neuro-imagerie. L'imagerie structurale, aussi dite anatomique, permet tout d'abord de situer, d'identifier et de mesurer les différentes zones du cerveau. Elle peut être utilisée afin d'identifier les liens entre expérience et neuroplasticité par les biais de l'apprentissage. Très schématiquement, l'organisation des neurones dans le cerveau distingue la matière grise (cellules nerveuses) et la substance blanche (les synapses et les cellules gliales). Nous pouvons prendre exemple sur les recherches étudiant l'effet du bilinguisme sur le cerveau, qui se sont principalement concentrées sur l'examen de trois paramètres mis à jour à l'aide de méthodes spécifiques : la densité de la matière grise, l'épaisseur corticale qui, en raison des circonvolutions, varie en sens inverse de la densité de la matière grise, et l'intégrité de la substance blanche (Kail, 2015; pour une synthèse des travaux récents sur le bilinguisme, voir Li et al., 2014). Les données de l'imagerie structurale, attestant du changement de la structure corticale suite à un apprentissage, sont convergentes avec celles de l'imagerie fonctionnelle.

Parmi ces méthodes de neuro-imagerie structurale, nous pouvons citer l'IRM, qui utilise la résonance magnétique, ou encore le scanner (scanographe, scanner X ou CT scanner), qui utilise les rayons X. Ces techniques ont permis dès les années 1970 de reconstruire des images anatomiques du cerveau d'une finesse extraordinaire, de plus en plus rapidement et dans les trois dimensions de l'espace. Ces méthodes étaient cependant essentiellement morphologiques ; elles renseignaient sur l'anatomie du cerveau, non son fonctionnement (voir le chapitre I du livre de Dehaene, 1997).

b. La neuroimagerie fonctionnelle (IRMf, TEP, EEG, MEG)

L'avènement des méthodes permettant de mettre en évidence le traitement du langage *in vivo* a largement élargi la conception des aires « spécialisées » du langage, et a permis d'accéder à un modèle basé sur une conception plus « distribuée » des aires du langage (Dehaene, 1997).

L'EEG et la MEG (Dehaene, 1997)

L'électroencéphalographie ou EEG fut parmi les premières techniques modernes à avoir permis de percer le mystère du cerveau en fonctionnement, à la fin des années 1920. Cette technique se base sur l'exploitation des champs électriques des centaines de millions de neurones du cerveau, qui varient en fonction des zones et des activités que l'on est en train de faire, à l'aide de capteurs posés sur le crâne à des endroits précis. La magnétoencéphalographie, ou MEG, est, elle, apparue dans les années 1970, et elle permet d'enregistrer, non pas l'activité électrique des neurones, mais magnétique, par la dépolarisation de ceux-ci.

Ces techniques sont toujours largement utilisées aujourd'hui, pour leur résolution temporelle, de l'ordre de la milliseconde ; l'EEG présentant en plus l'avantage de la portabilité de l'appareil. Toutefois, il est difficile de localiser spatialement les régions cérébrales à l'origine des signaux. De plus, ces techniques ne donnent aucune

indication sur le métabolisme, les enzymes et les neuromédiateurs mis en jeu lors de cette activité.

La TEP et l'IRMf (Debaene, 1997; Rosen et Savoy, 2012)

La tomographie par émission de positons (TEP) est la seule méthode atraumatique qui permette actuellement une étude fonctionnelle non seulement physiologique mais aussi biochimique du cerveau. En injectant une molécule connue et en captant ensuite l'émission de rayons gamma de ces particules, des images tomographiques du cerveau peuvent alors être reconstruites, et permettre de « voir » directement des progressions métaboliques, le parcours et la consommation de glucose ou d'oxygène, ou encore le nombre de récepteurs de la dopamine dans les diverses structures cérébrales.

Le monde de la recherche se trouva transformé lorsque, dans les années 1990, on découvrit qu'il était possible d'observer des activations cérébrales en utilisant l'imagerie par résonance magnétique (IRM) (Belliveau et al., 1991). Désormais utilisée avec la méthode BOLD (Blood Oxygen Level Dependent), l'IRM fonctionnelle (IRMf) mesure les zones où afflue du sang oxygéné, notifiant alors d'une activité neuronale intense.

La TEP est une méthode longue et coûteuse qui fut vite remplacée par l'IRMf pour l'étude des processus cognitifs. En effet, l'IRMf permet de déterminer avec une excellente résolution spatiale, de l'ordre de la fraction de millimètre, les zones du cerveau qui s'activent lors d'une tâche, comme par exemple une tâche de langage. Elle ne nécessite pas l'injection de traceur radioactif ni de produit de contraste et elle peut être répétée autant de fois que souhaité. De plus elle associe directement l'information anatomique et l'information fonctionnelle. Sa résolution temporelle n'est par contre que de l'ordre de la seconde ; c'est pourquoi elle est parfois couplée dans certaines études à l'EEG.

Autres méthodes : DTcf, NIRS...

Les méthodes citées ne sont pas exhaustives, et nous pouvons également ajouter le Doppler transcranien fonctionnel (DTcf), méthode notamment utilisée pour la planification pré-chirurgicale chez des patients épileptiques, qui se base sur la mesure du flux sanguin dans les artères cérébrales, et dont les résultats sont fortement corrélés à ceux des tests de Wada (Schmid et al., 2018). Nous pouvons également citer la NIRS, méthode d'imagerie optique, qui exploite la gamme des ondes lumineuses infra-rouges pour aller observer le cortex *in vivo*, souvent couplée à l'EEG dans l'étude du langage (Wallois et al., 2012).

4. La présentation en champs visuels divisés

Bien que les techniques de neuroimagerie aient prouvé leur grande utilité clinique et expérimentale, ces techniques sont coûteuses, prennent beaucoup de temps et ne sont pas accessibles à tous (Bourne, 2006). Des techniques fiables, simples, non invasives et peu coûteuses de localisation des processus linguistiques ont alors été mises en place : la technique de présentation en champs visuels divisés (VHF) (voir Bourne, 2006), ainsi que la technique d'écoute dichotique développée par Broadbent (1954) (voir Voyer, 1998). Dans son article, Voyer

(1998) indique que des chercheurs qui cherchent des moyens fiables et valides de mesurer les effets de latéralité devraient se concentrer sur les tâches verbales utilisées dans la modalité auditive avec une mesure de l'exactitude (accuracy), en plus de constituer des groupes selon la préférence manuelle des participants, ce qui améliorera la fiabilité des mesures. Si la présentation en champs visuels divisés a été critiquée, par quelques résultats incohérents (par exemple Krach et al., 2006) et par les différences intra- et inter-individuelles dans la latéralisation du langage, les résultats obtenus dans d'autres études sont comparables à ceux obtenus en neuroimagerie (Hunter & Brysbaert, 2008). La validité et la fiabilité de cette technique pour identifier l'hémisphère dominant du langage semble en fait dépendre largement de certains aspects méthodologiques du paradigme (Bourne, 2006; Hunter & Brysbaert, 2008). Cette approche est basée sur le postulat que la dominance de l'HG pour le langage mène à une reconnaissance des mots plus rapide et plus précise dans l'hémichamp visuel droit plutôt que gauche, quand des mots sont présentés dans les deux hémichamps visuels. En effet, par la décussation des nerfs optiques, l'information dans l'hémichamp visuel droit est directement projetée sur l'HG, et inversement. L'information présentée dans l'hémichamp visuel gauche nécessitera alors un transfert inter-hémisphérique pour atteindre l'HG.

En 2006, Bourne a donné des recommandations bien précises et documentées afin de contrôler l'utilisation de la présentation en champs visuels divisés, reprises également par Hunter & Brysbaert en 2008 :

- **Contrôler les participants** : éviter tout problème visuel ou neurologique et évaluer la préférence manuelle.
- **Contrôler l'environnement** : éviter les changements de luminosité de l'ordinateur ainsi qu'une pièce trop claire.
- **Avoir un nombre d'items suffisant** (>150)
- **Contrôler la posture du participant** et sa distance par rapport à l'écran, afin de maintenir l'angle visuel par rapport aux stimuli (voire utiliser une mentonnière pendant la tâche)
- Pour chaque item, 4 principaux événements (voir Figure 2) : le **contrôle de la fixation** (croix permettant d'assurer que le participant regarde au centre par exemple), suivi de la **présentation du stimulus** (mots), ensuite du **masquage** de ce stimulus par un fond (afin d'éviter une image résiduelle), et enfin le recueil de la **réponse du participant** (bi-manuelle, comme dans notre étude, une réponse verbale entraînant une plus forte activation de l'HG).
- **Utiliser une présentation bilatérale plutôt qu'unilatérale**, évitant ainsi des mouvements d'yeux inopportuns et des biais directionnels, et donnant des résultats plus concluants. Les études qui ont contrôlé directement les mouvements des yeux ont fait état de défauts de fixation dans seulement 0,5 % des essais (Geffen et al., 1972). De plus, le stimulus à gauche doit entrer en concurrence avec celui à droite, ce qui fonctionne mieux lorsque la cible arrive dans l'hémisphère dominant et le concurrent dans l'hémisphère non dominant que dans la situation inverse (Hunter & Brysbaert, 2008).
- **Présenter adéquatement les stimuli** : à une certaine distance du pont de fixation (Bourne recommande de mettre le bord intérieur à 2,5-3° du centre, afin d'être hors de la zone de chevauchement des deux

hémichamps visuels) et durant un certain temps (<180 ms et même <150 ms pour une tâche simple, cela évitant alors les saccades oculaires et le traitement des mots avec la fovéa).

- **Présenter les mêmes stimuli à droite et à gauche.**
- **Proposer des items d'essais**, afin de se familiariser avec la rapidité et la difficulté de la tâche, et proposer des pauses pour maintenir l'attention du participant.

C'est cette tâche, toutes recommandations méthodologiques citées ci-dessus prises en compte, qui a été utilisée dans la présente étude, ainsi que dans celle de Hausmann et al. (2019) et Willemin et al. (2016), avec la présentation d'un panel de mots translingues.

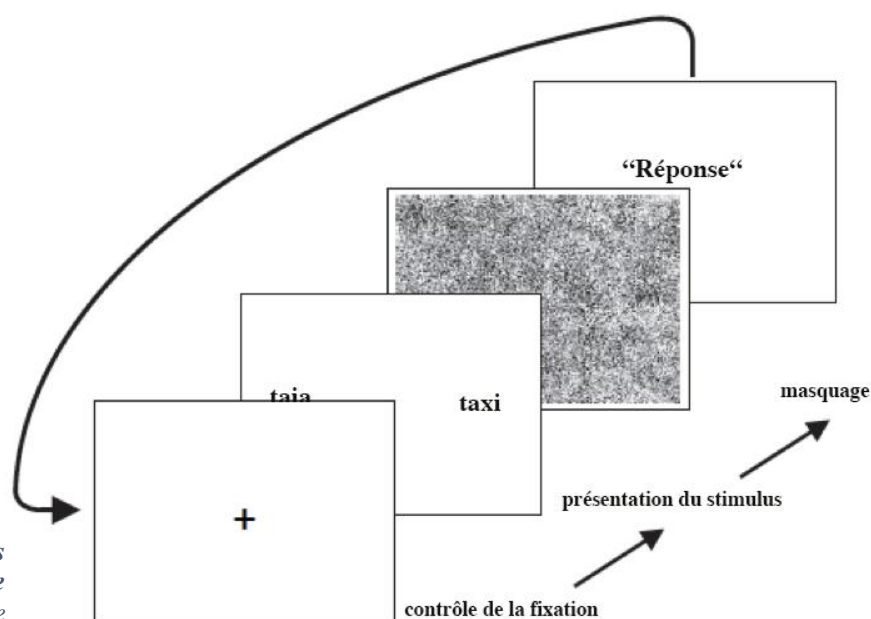


Figure 2. Représentation graphique des événements survenant à chaque essai lors d'une présentation en champs visuels divisés. Figure adaptée de l'article de Bourne (2006), doi.org/10.1080/13576500600633982.

III. Eléments supplémentaires de la présente étude

1. Choix méthodologiques de l'étude

Nous avons recruté un échantillon de 102 participants, plurilingues ou monolingues, ayant le français pour langue maternelle, et les principales langues étrangères étant restreintes à l'anglais ou l'espagnol, dans le but d'éviter les biais dus à une éventuelle organisation cérébrale différente dans les langues. En se basant sur les précédentes études à propos de l'effet de l'âge sur la latéralisation (pour une revue, voir Perrone-Bertolotti et al., 2016), nous avons limité l'âge des participants à une fourchette relativement stable dans la latéralisation du langage (entre 15 et 68 ans), pour éviter l'effet de l'âge. Après avoir recueilli les informations démographiques des participants au moyen d'un questionnaire, nous avons interrogé leurs différents types de latéralité, à l'aide de tests et de questionnaires : la préférence manuelle (celle auto-déclarée ainsi que les scores au Questionnaire d'Edimbourg d'Oldfield, 1971), la préférence podale (avec les scores au Waterloo Footedness Questionnaire d'Elias et al., 1998), la préférence oculaire (avec des dérivés du test de Porta et du test de Miles, Miles, 1929, 1930), ainsi que la préférence auriculaire. L'inventaire de Coren fut utilisé comme une évaluation rapide de ces

quatre facteurs (Coren, 1993) ; ces échelles rapides d'auto-évaluation ont été facilement intégrées dans notre étude, et ont permis des informations supplémentaires sur ces différents facteurs de latéralité. Pour mesurer le niveau de maîtrise d'une seconde langue (LV2), nous avons utilisé en plus d'un auto-questionnaire de rapides tests de placement : le Quick Placement Test en anglais (University of Cambridge Local Examinations Syndicate, 2001), et le DIALANG en espagnol (Alderson, 2005, 2007). Ces évaluations ont été basées sur le CECRL, officiellement publié par le Conseil d'Europe en 2001 (Council of Europe, 2001a), désormais disponible en 38 langues, et communément utilisé dans des contextes pédagogiques et non-pédagogiques dans toute l'Europe (enseignement, apprentissage et évaluation des langues) (Council of Europe, 2009), et même en-dehors (Zou & Zhang, 2017). Utiliser le CECRL (du niveau A1 au C2) nous a semblé bien plus précis qu'une simple dichotomie bilingues/monolingues, pour un phénomène aussi complexe que celui du plurilinguisme. Tous ces facteurs ont été analysés en fonction des scores de latéralisation (indices d'asymétrie ou IA) obtenus avec le TLDT, dans le but de révéler les facteurs ayant potentiellement une influence sur la latéralisation hémisphérique du langage.

2. Problématique et hypothèses

La présente étude est une étude ancillaire d'études plus larges (Hausmann et al., 2019; Willemin et al., 2016), qui a pour objectif d'étudier (1) l'effet des différents types de latéralité sur la latéralisation du langage et (2) l'effet de la maîtrise d'une seconde langue, en utilisant un paradigme en champs visuels divisés, avec la tâche translingue de décision lexicale (TLDT).

Comme l'avantage pour le langage de l'hémichamp-visuel droit/HG a déjà été prouvé de manière fiable avec le TLDT, nous devrions le retrouver ici aussi, mais nous aimerions également étudier l'effet des différents types de latéralité sur la latéralisation du langage, dans le but de découvrir si un type de latéralité est plus représentatif de la latéralisation du langage que les autres. Même si la préférence manuelle montre une interaction significative dans certaines études (par exemple Isaacs et al., 2006), cela reste un indicateur imparfait de la latéralisation du langage, puisque seulement 6,5% des gauchers sont « strongly-atypicals » (c'est-à-dire avec une dominance de l'HD pour le langage) (Mazoyer et al., 2014), une telle organisation se retrouvant pour autant uniquement chez les gauchers (ce qui fait un total d'1% dans la population générale). Si l'on considère que 78% des gauchers sont latéralisés typiquement, et 15% « ambilaterals », alors la préférence manuelle n'est peut-être pas aussi prédictive de la latéralisation du langage que ce que les études laissent à penser depuis des années. Il serait alors intéressant d'étudier aussi l'effet de la préférence podale, oculaire et auriculaire. Nous émettons l'hypothèse que d'autres facteurs, tels que le niveau de maîtrise d'une LV2, l'âge d'acquisition de cette LV2, ainsi que le sexe des participants, peuvent avoir un effet sur la latéralisation cérébrale du langage. A propos du niveau de maîtrise d'une LV2, nous pouvons supposer qu'un individu avec un niveau de maîtrise élevé dans sa LV2 aura des scores de latéralisation plus faibles qu'un individu avec une maîtrise faible dans sa LV2 ; respectivement, les participants avec un niveau C auront des scores de latéralisation plus faibles que des participants avec un niveau B ou A, et les participants avec un niveau B auront des scores plus faibles que les participants avec un niveau A. De surcroît,

nous suggérons que les participants avec une exposition précoce à la LV2 auront des scores de latéralisation plus faibles que les participants avec une exposition tardive. La littérature suggère souvent un âge d'acquisition de 6 ans comme séparation entre bi/plurilingues précoces et tardifs (par exemple Hull & Vaid, 2006, 2007), une séparation que nous avons utilisée ici. Enfin, le sexe pourrait avoir une influence sur les scores de latéralisation comme mesurés par le TLDT ; nous supposons que les femmes auront un score de latéralisation plus faible que les hommes. Etant donné que 88% des droitiers et 78% des gauchers sont supposés avoir leur HG dominant pour le langage (Mazoyer et al., 2014), et que environ 10% de la population est gauchère, nous prédisons des AIs positifs dans environ 85% de notre échantillon. Finalement, nous prédisons une relation asymétrie-performance négative, comme cela a été trouvé précédemment dans des tâches verbales en hémichamps divisés (Boles et al., 2008; Hausmann et al., 2019; Hirnstein et al., 2010; pour une revue voir Boles & Barth, 2011).

Laterality variables affecting language hemispheric lateralisation in mono- and plurilinguals using a visual half-field paradigm

Mathilde Vildy, Markus Hausmann, Christine Mohr, Anne Delangue, Isabelle Hesling

ABSTRACT

The dominant role of the left hemisphere (LH) in processing language is now well established and a fundamental principle of the brain functional organisation. It appears that several inter-individual factors can be identified as having an influence on this organisation. The current study aimed at investigating factors which could have an influence on language hemispheric lateralisation, by using a simple and reliable visual half-field (VHF) paradigm, the translingual lexical decision task (TLDT), that can measure language lateralisation. We tested a sample of 82 French participants. They all performed different questionnaires about laterality (handedness, footedness, eyedness and eareness), as well as foreign language tests, all being mono- or bilinguals, speaking Spanish or English in addition to French as their mother tongue. A significant right-visual-field/LH advantage corresponding to the dominance of the LH for language was revealed for accuracy and reaction times, with a higher significance for accuracy. However, people with low footedness scores and low proficiency in a second language (L2) appeared to be less lateralised than others. Moreover, footedness was more related to language lateralisation than handedness. These findings suggest that footedness should be taken into consideration, and be preferentially used instead of handedness in studies about cerebral lateralisation, and that a higher proficiency in a L2 can reduce asymmetry for language.

KEYWORDS

Lateralisation; hemispheric asymmetry; language; footedness; handedness; bilingualism; visual half-field paradigm

INTRODUCTION

Since the discovery that brain was not a symmetrical organ, as thought before (Xavier Bichat, 1771-1802), but that each hemisphere is anatomically different and functionally specialised in a task, scientific research has constantly questioned the hemispheric specialisation of cognitive functions. The dominant role of the left

hemisphere (LH) in processing language has been well established and is now a fundamental principle of the brain functional organisation, as well as the right hemisphere (RH) role for spatial processing. It is one of the most reliable findings in laterality research (Hugdahl, 2000; Ocklenburg & Gunturkun, 2017). Historically, cerebral dominance has long been described from clinical observations of *post mortem* patients with unilateral cerebral lesions (Broca, 1865; Wernicke, 1874), or with invasive tests such as the Wada test, still used for research and surgical intervention, especially in epilepsy (Kemp et al., 2018; Kundu et al., 2019), but now the development of methods making it possible to see language processing *in vivo*, such as neuroimaging techniques (e.g. fMRI, EEG, EMG, PET Scan, fTCD) (Dehaene, 1997) or behavioural techniques (i.e. half-field studies) (Voyer, 1998), enabled to create a model based on a conception of a more distributed language areas network. It has been now demonstrated that the traditional localisationist concept is not entirely right, but that language organisation is complex, and is mainly supported by specific and large antero-posterior neural networks widely distributed on the left hemisphere, rather than by a recruitment of brain regions independent of each other (Duffau, 2018; Price, 2000). This way, we can today point out global networks involved in a specific linguistic task. However, lesion models are still necessary to determine what the anatomical substrates required for a specific process are (Price, 2000). But even if the consistency of the dominance of LH in language tasks has been proved, language lateralisation is inconsistent, even for one person, since there are some inter- and intra-individual variations (see Perrone-Bertolotti et al., 2016).

Concerning variations linked with individuals' features (or inter-individual), most of the people have a LH specialisation for language, but few have a RH specialisation (strongly-atypicals), or present the participation of both hemisphere (ambilaterals) (Mazoyer et al., 2014). Several factors can be identified as having an influence on this organisation, such as anatomical asymmetry, familial sinistrality or manual preference strength (Josse et al., 2003; Tzourio-Mazoyer et al., 2010), but none of them are totally predictive. Handedness is often used in studies on language lateralisation, showing an interaction between the degree of lateralisation and hand preference; left-handers appearing to be more ambilaterals or strongly-atypicals than right-handers (Isaacs et al., 2006). Even if handedness showed a significant interaction in some studies, it is only an imperfect proxy for language lateralisation, since only 6,5% of left-handers are strongly-atypical (with a RH dominance for language), that is 1% of the total population, whereas none of the right-handers were strongly-atypical (Mazoyer et al., 2014). Considering that 78% of left-handers are typically language lateralised, and 15% ambilaterals, handedness may not be as predictive of language lateralisation as long been thought.

The incidence of atypical language dominance not only depends on the direction of handedness but also on the degree of handedness. A familial history of sinistrality may also have an additional effect on the likelihood of atypical dominance (Isaacs et al., 2006; Mellet et al., 2014). But using handedness as the only type of laterality can be discussed since some studies have revealed no effect of handedness on language lateralisation, putting forward that hand lateralisation and language dominance are associated by chance

(except in right-hemisphere dominant individuals) (Mazoyer et al., 2014). The Edinburgh test is the most commonly used (Oldfield, 1971) and the categorisation of right-handers and left-handers is another issue, especially because categorisation of hand-preferences groups varies across studies (see Edlin et al., 2015 for a review) and did not always match self-reported handedness. In addition, between two people with the same dominant hand, Manual Preference Strength can have an impact on lateralisation (MPS+ and MPS- groups are used in Mellet et al., 2014). Other types of laterality such as footedness, eyedness and earedness (Coren, 1993) are little used in these studies, although footedness is less influenced by environmental factors than handedness, and has been shown to be a better predictor of cognitive lateralisation than handedness (Elias et al., 1998; Elias & Bryden, 1998; Tran et al., 2014).

Sex can also be a source of variability, even if it still remains discussed (Hausmann & Güntürkün, 1999; Sommer et al., 2008; Voyer, 2011; for a review see Perrone-Bertolotti et al., 2016). Women appear to be less left-handed than men (Oldfield, 1971; Sommer et al., 2008), and the majority of studies that report sex differences in language lateralisation typically reveal that women are more bilaterally organised than men (Hausmann et al., 1998; Hausmann & Güntürkün, 1999; Mohr et al., 2005; Voyer, 2011). However, the effect size is small (for recent systematic literature reviews see Hirnstein et al., 2019; and Perrone-Bertolotti et al., 2016), and partially due to sex hormonal factors (Bayer & Hausmann, 2009; Hausmann et al., 2013; Hausmann, 2010; Hausmann et al., 2002, for a review see Hausmann, 2017). In an individual life, there is also short-term and long-term variations of this lateralisation, with oestrogen therapy for example (Bayer & Hausmann, 2009) or menstrual cycle (Hausmann et al., 2002).

Age is also a source of variability. For example, young children tend to show more symmetrical organisation for language than adults (Dehaene-Lambertz et al., 2010; Friederici et al., 2011; Holland et al., 2001; Perani et al., 2011; Ressel et al., 2008; Waldie & Mosley, 2000) as well as elderly people during normal aging (Cabeza, 2002; Cabeza et al., 2002; Dennis & Cabeza, 2011).

Moreover, there is an ongoing debate on whether functional brain organisation, and language lateralisation in particular, is affected in individuals who speak two or more languages (Grosjean & Li, 2013; Hull & Vaid, 2007; Paradis & Lebrun, 1983). Indeed, learning a second language (L2) – or not – can also have an influence on cognitive and linguistic lateralisation. Proficiency and age of acquisition of L2 can be two relevant factors for language lateralisation. Some studies have pointed out that an increasing proficiency in L2 was correlated with a weaker language lateralisation (Consonni et al., 2013; Park et al., 2012). Bilinguals seem to have greater bilateral activation during both L1 and L2 processing and weaker language lateralisation compared to monolinguals (Park et al., 2012). Concerning the age of acquisition of L2, some authors have reported that early bilinguals present an increasing right hemisphere involvement compared to late bilinguals for linguistic tasks (Hull & Vaid, 2006, 2007) whereas other studies have not come to this conclusion (Hausmann et al., 2004, 2019; Liu & Cao, 2016; Willemin et al., 2016). Moreover, late proficient bilinguals living in their L2

environment present a more extensive neural network than monolinguals when processing their L2 (Park et al., 2012).

Furthermore, there are variations linked with the linguistic process or the experimental paradigms since some language tasks require more RH participation than others. For example, phonology is mostly sustained by the LH, whereas a few studies have suggested an implication of both hemispheres for semantics, and a RH dominance for some prosodic tasks, such as the comprehension or production of affective prosody (Perrone-Bertolotti et al., 2016; Vigneau et al., 2011).

Although neuroimaging techniques have proved to be of clinical and experimental use, these techniques are costly, time consuming and not available to all researchers (Bourne, 2006). Reliable, simple, non-invasive and cost-effective techniques for localizing language processes was then established: the visual-half-field (VHF) technique (Bourne, 2006), as well as the dichotic listening technique developed by Broadbent (1954) (see Voyer, 1998). If the VHF technique has been criticised, owing to several inconsistent findings (e.g. Krach et al., 2006) and to the intra- and inter-individual differences in language lateralisation, its validity, when run properly, has been proved in some studies; the results obtained being comparable to those obtained in neuroimaging (fMRI, Hunter & Brysbaert, 2008). With this technique, words or non-words are briefly (<150 msec) presented in the left (LVF) or/and the right visual field (RVF). Due to the crossed visual projections, stimuli presented in the RVF are primarily projected to the contralateral LH and vice versa. VHF studies have generally shown to be of satisfying reliability (for a review see Voyer, 1998). However, validity and reliability of VHF techniques to identify the language-dominant hemisphere largely depend on some methodological aspects of the paradigm, such as backward masking, sufficient number of observations, tachoscopic (brief) stimulus presentation, and bilateral presentation of stimuli in LVF and RVF at the same time, which have been proved to provide more stable and larger differences between both visual fields than unilateral presentation of stimuli (Bourne, 2006; Hunter & Brysbaert, 2008). Even with the well-established and reliable VHF paradigm, results can differ, in particular because of the variation of methodological parameters from one study to another, or because of demographic or linguistic differences among the participants, making it difficult to compare studies with each other.

This is why, taking all of these recommendations into account, recent VHF studies have developed a translingual lexical decision task (TLDT), allowing for a valid and reliable measurement of language cerebral lateralisation that can be administered to participants with different linguistic backgrounds (Hausmann et al., 2019; Willemin et al., 2016). The TLDT consists of 16 target words that exist in several languages (with the same meaning). Participants have to decide which of the two stimuli briefly presented simultaneously on a screen to the RVH and LVF represents a word/non-word. A first study with 113 participants from the French-speaking part of Switzerland (Willemin et al., 2016) as well as a second study with 563 participants from 7 different countries (Switzerland, Norway, Germany, United Kingdom, Belgium, Netherlands and Italy) (Hausmann et al., 2019) have validated this task by finding a constant and reliable advantage of LH for

language during this task, revealed by better performance with the RVF, in both the number of correct decisions – or accuracy (ACC) – and reaction times (RT), irrespective of participants' sex, handedness, and bilingualism.

This lateralisation may vary according to the task, just as the asymmetry-performance relationship. Several previous studies have reported smaller functional difference between hemispheres for this kind of reading task associated with generally faster responses and better accuracies (Boles et al., 2008; Hausmann et al., 2019; Hirnstein et al., 2010), even if some studies have found the opposite (Chiarello et al., 2009) (for a review see Boles & Barth, 2011).

The current study is an ancillary study of larger studies (Hausmann et al., 2019; Willemin et al., 2016), which aimed to study (1) the effect of the different types of laterality on language lateralisation (or laterality variables) and (2) the effect of second language proficiency, by using a visual-half-field paradigm with the translingual lexical decision task (TLDT). We recruited a sample of 102 participants, plurilinguals and monolinguals, with French as their native language, and major foreign languages being restricted to English and Spanish, in an attempt to avoid bias due to a possible different organisation in languages. Based on previous studies about the effect of age on lateralisation (see Perrone-Bertolotti et al., 2016), we took a range age relatively stable in language lateralisation (between 15 and 68 years old). Participants' proficiency in L2 was assessed with self-reports and placement tests (using CEFR scales; Council of Europe, 2001a) to differentiate groups according to their proficiency in L2 (from A1 to C2), what seemed more precise than just using the denomination bilingual/monolingual, for such a complex concept as multilingualism. All these factors were confronted with lateralisation scores (asymmetry indices or AIs) obtained with the TLDT in order to reveal the factors which could have an influence on language hemispheric lateralisation.

MATERIAL AND METHODS

1. Participants

One hundred and two participants were recruited through personal contact and public advertisement (69 women). All the participants were French native speakers, monolinguals or French-English or French-Spanish bilinguals. They all reported to have (i) normal or corrected to normal vision, (ii) no previous history of psychiatric or neurological illness, (iii) not taken any medication affecting the CNS. The study was conducted in accordance with the guidelines of the declaration of Helsinki (WMA, 2013), and in line with the European general data protection regulations (EU GDPR) (CNIL, 2018). All the participants gave their informed written consent.

Twenty participants were excluded from data analyses (see Data Analysis for details). The final sample consisted of 82 participants (58 women), with a mean age of 28,5 years of age ($\pm 11,0$). All participants' mother tongue was French. Thirty-nine participants spoke English (N=22) or Spanish (N=17) as second

language. Sixty-three participants self-reported to be right-handed, 15 were left-handed, and 4 had no hand preference (see Table 1). Other preference measures are reported in the corresponding section below.

2. Materials

2.1. Overall procedure

The procedure was administered in a quiet room at the participants' home or at university with always the same experimenter, the same computer and the same conditions. After participants gave their informed written consent, they filled in a demographic questionnaire assessing gender, age, level of education, self-reported handedness and languages spoken. Different self-reported questionnaires about handedness, footedness, eyedness and earedness were then administered to the participants. Then the more general 16-item lateral Preference Inventory test (Coren, 1993) measuring participants' handedness, footedness, eyedness and earedness was administered. . In addition, three tests of ocular dominance (Miles, 1929, 1930) lasting between 3-5 min were administered. Then, participants performed the TLDT procedure. Finally, participants performed the foreign language test either in English (University of Cambridge Local Examinations Syndicate, 2001) or Spanish (Alderson, 2005, 2007), depending on their language preference. One testing session lasted 90 min.

2.2. Laterality questionnaires

2.2.1. Handedness

Handedness was assessed using the Edinburg Handedness Inventory (Oldfield, 1971) which is a well-established handedness questionnaire assessing participants' hand preference on a quantitative scale. Participants had to answer 10 questions about everyday life tasks (such as using scissors or drawing). A laterality index was then computed: $[(R-L)/(R+L) \times 100]$, resulting in scores between -100 and +100, describing a continuum between consistent left-handedness and consistent right-handedness, respectively. Four questions from the Lateral Preference Inventory test (Coren, 1993) made it possible to obtain a scale going from -4 to +4, -4 presenting a consistent left-sidedness and +4 a consistent right-sidedness, a zero score indicating bilaterality. Note that the same scaling was used to assess footedness, eyedness and earedness.

2.2.2. Footedness

The Waterloo Footedness Questionnaire-Revised (WFQ-R) is a well-established questionnaire assessing footedness on a quantitative scale (Elias et al., 1998). Participants had to answer 10 questions about two types of feet tasks (foot preference for manipulating an objet – such as kicking a ball or using a shovel – versus

Sex	Age (years)	Level of education (years of higher education)	Self-reported handedness		English level						Spanish level						2 nd language level			Daily linguistic immersion		Exposure to 2 nd language				
			Left	Right	A0	A1	A2	B1	B2	C1	C2	A0	A1	A2	B1	B2	C1	C2	A	B	C	French	Spanish	early	late	
M n = 24 (29%)	26,3 ± 11,7 (15-68)	+2,1 ± 2,6 (-4 - +5)	5	0	19	0	1	6	7	4	3	3	2	3	9	2	5	1	2	4	11	9	21	3	3	21
F n = 58 (71%)	29,4 ± 10,8 (17-67)	+3,1 ± 1,8 (0 - 8)	10	4	44	0	3	12	19	8	10	6	16	8	10	6	4	6	8	8	23	27	46	12	7	51
Total n = 82	28,5 ± 11,1 (15-68)	+2,8 ± 2,1 (-4 - +8)	15	4	63 (77%)	0	4	18	26	12	13	9	18	11	19	8	9	7	10	12	35	35	67	15	10	72
			(18%)	(5%)		(5%)	(22%)	(32%)	(14%)	(16%)	(11%)	(22%)	(13%)	(23%)	(10%)	(11%)	(9%)	(12%)	(15%)	(42,5%)	(42,5%)	(82%)	(18%)	(12%)	(88%)	

Table 1 - Demographic information: sex, age, level of education, self-reported handedness, L2 proficiency in English and Spanish, global L2 proficiency, daily linguistic immersion, early or late exposure to L2

foot providing support during an activity – such as standing on one foot, or using a foot to get up in a chair). The laterality Index was calculated as such: $[(R-L)/(R+L) \times 100]$, resulting in scores between -100 and +100, a continuum between consistent left-sided and consistent right-sided respectively.

Footedness was also assessed by the 4 questions from the lateral Preference Inventory test by Coren (Coren, 1993).

2.2.3. Earedness and eyedness

These 2 variables were assessed by the 4 questions from the lateral Preference Inventory test by Coren (Coren, 1993).

2.2.4. Tests of ocular dominance

To complete the self-reported questionnaire about eyedness more empirically, participants performed 3 quick ocular dominance tests, lasting between 3-5 min for the 3 tests.

First, the basic Porta test (or sometimes called Rosenbach test, Miles, 1929, 1930) was administered. The observer extends one arm, then with both eyes open he aligns the thumb or index finger with a target (always the same) distant from 5 meters. The observer then alternates closing the eyes or slowly draws the thumb/finger back to the head to determine which eye is viewing the target (i.e. the dominant eye).

Second, as handedness could be an important bias for those tests (Miles, 1929; Soto et al., 2008), participants were asked to perform the Porta test with the other arm to see if they had the same result.

Third, a derivated from the Miles test (Miles, 1929, 1930) was administered. The participant extends both arms, brings both hands together to create a small opening, then with both eyes open views the distant target through the opening. The observer then alternates closing the eyes or slowly draws opening back to the head to determine which eye is viewing the target (i.e. the dominant eye)

The examiner wrote “Right” or “Left” for each test and sometimes “Right and Left”.

2.3. Foreign language tests

The Common European Framework of Reference for Languages (CEFR), officially published by the Council of Europe in 2001 (Council of Europe, 2001b) was used to classify participants’ proficiency in English or Spanish. This framework made it possible to classify participants into 3 different categories: a basic user (Level A), independent user (Level B) and proficient user (Level C), each category being subdivided into 1 and 2, 1 being the lower level.

The CEFR were also used by the participants for their self-assessment.

2.3.1. English test: Quick Placement Test (Cambridge)

We used the paper-pen Quick Placement Test to assess participants' proficiency in English (University of Cambridge Local Examinations Syndicate, 2001b). The 60 questions were multiple-choice questions based on reading, vocabulary and grammatical structures. It lasted about 30-40 minutes, and the results gave a language proficiency level according to the CEFR (from A1 to C2).

2.3.2. Spanish test: DIALANG (Lancaster)

We used the vocabulary test of DIALANG to assess participants' proficiency in Spanish (Alderson, 2005, 2007). DIALANG was developed by an expert team at the University of Lancaster, and was supported by the Council of Europe, using the CEFR scale to evaluate participants' proficiency (from A1 to C2). The vocabulary test was free and the quickest Spanish test that closely resembled the English placement test. It lasted about 20-30 minutes.

2.4. Translingual lexical decision task (TLDT)

The translingual lexical decision task (TLDT) developed by Willemin et al. (2016) and Hausmann et al. (2019) was used. Instructions were first displayed in French on the screen. Participants were comfortably seated at a desk, with a precise distance of 57 cm between eyes and the centre of the screen (see Willemin et al., 2016, and Hausmann et al., 2019, for more detail).

Sixteen international words were chosen of which the majority exist in identical or similar form in several languages (French, German, Italian, English, Dutch and Norwegian: *agenda, alibi, aura, casino, film, gala, garage, jazz, jury, menu, radio, piano, snob, studio, taxi, virus*). Non-words similar to the target words were designed using the pseudo-word creator "Wuggy" (Keuleers & Brysbaert, 2010). More details can be found in Willemin et al. (2016) and Hausmann et al. (2019).

At the beginning, participants performed 10 practice trials which were not considered in the results of the experiment, then 255 experimental trials were presented. For each trial, two stimuli, either word and non-word or two non-words, were presented simultaneously to the right-visual-field (RVF) and the left-visual-field (LVF). Each trial started with a fixation cross presentation for 1000 msec, followed by two stimuli presented briefly (100 msec). Participants had 2000 msec to decide whether a meaningful word was presented in the LVF or RVF (or none), before the next trial started. Participants were instructed to indicate by button press on a keyboard whether they saw a meaningful word to the left ('respond with left index finger on a left-sided button'), to the right ('respond with right index finger on a right-sided button') or saw no meaningful word on either side ('press space bar with both thumbs'). Each letter string combination was presented four times in randomized order: word/ non-word (16 pairs), non-word/word (16 pairs) and 32 non-word/non-word pairs (the 16 original non-word/non-word pairs were also shown in reversed order). Correct responses (%) and mean response times of correct responses were calculated for LVF and RVF. The experiment was

programmed using DMDX (<http://www.u.arizona.edu/~kforster/dmdx/dmdx.htm>, Forster & Forster, 2003). One testing session took 30-45 min.

2.5.Data analyses

Some participants were excluded based on their task performance. Twelve participants were excluded because performance for stimuli presented in their dominant VHF was not significantly above chance level (<25 correct responses out of 64 trials). Eight participants whose performance for stimuli presented in the non-dominant VHF (either LVF or RVF) was significantly below chance level (<18 out of 64) were also excluded. Thresholds above/below chance were calculated based on binomial tests (Cottet-Emard, 2014).

In accordance with previous studies (see Willemin et al., 2016), individual trials were excluded and counted as non-correct if response latencies were below 200 msec (N=4 trials), and those slower than 2000 msec were automatically excluded and counted as non-correct.

For the remaining trials percentages in accuracies (ACCs) and reaction times (RTs) for correct word decisions were calculated for each participant. Non-correct word decisions and catch trials (i.e. non-words trials), where participants had to press the space bar, were not entered in the analysis. In a second analysis, asymmetry indices (AIs), as $[(RVF \text{ performance} - LVF \text{ performance}) / (RVF \text{ performance} + LVF \text{ performance})] \times 100$ were calculated, resulting in values between -100 and +100, representing a continuum between an expected RVF/LH advantage and an unexpected LVF/RH advantage in language lateralisation. AIs for RTs were inverted, so that positive scores referred to left dominant language lateralisation. We also calculated absolute asymmetry indices (absolute AIs) as an absolute value of the AIs ratio and which was taken as a measurement of asymmetry magnitude, irrespective of whether the directional bias was to the left or right, resulting in values between 0 and 100. Before the analysis, we assessed whether AIs were normally distributed.

For quantitative explanatory variables, we also assessed the model fit, by testing the assumptions of linearity in logistic regressions, linearity and homoscedasticity, and normality of residuals in linear regressions. If needed, the variables were then transformed into qualitative variables for the analysis (into 4 classes, following the quartiles, or less, according to the literature or criteria of the present study).

To evaluate which factors were associated with language lateralisation, we first performed a univariate analysis, with ANOVAs or linear regressions between AIs and each factor. Then a multivariate analysis, performing a linear and a logistic regression between AIs and the influent factors of WFQ scores and the level of proficiency in a foreign language (A, B, C), controlled with sex, was performed.

To see the dominance of RVF/LH, we also checked with a Student t-test differences between ACCs and RTs in the LVF and RVF. We investigated mean ACCs and RTs of each subgroup through repeated ANOVAs to see if there were differences between them. Then, with AIs, we performed χ^2 tests, with likelihood ratio, to see if our participants AIs for ACCs and RTs were significantly far or not from the assumption of 85% with

positive AIs in global population. Asymmetry-performance relationships were investigated with partial correlations.

All the statistical analyses were performed using JMP15 (<http://www.jmp.com>, SAS Institute Inc., 2018).

RESULTS

1. *Translingual lexical decision task*

Accuracy: Average accuracies (ACCs) in the RVF/LH were higher than average accuracies in the LVF/RH (see table 2). Confidence interval to 95% for the RVF/LH was from 66,7 to 73,1 and confidence interval for the LVF/RH was from 52,2 to 59,4. A Student t-test revealed that the difference between mean ACCs in the LVF and RVH was significant, $t(162) = -5.9, p < 10^{-7}$.

We subjected ACCs (%) to repeated ANOVAs. Mean ACCs were significantly higher for subjects with a higher proficiency in a foreign language ($m = 55,3 \pm 10,7$ for group A, $63,4 \pm 10,4$ for group B and $64,9 \pm 12,6$ for group C), $F(2, 79) = 3.23, p < .05$. No further effects or interactions between other factors (sex, age, level of education, handedness, footedness) were significant, all $F \leq 1.46$, all $p \geq .23$.

Reaction Time: Average reaction times (RTs) in the RVF/LH were lower than average reaction times in the LVF/RH (see table 2). Confidence interval to 95% for LVF/RH was from 0,66 to 0,71, and confidence interval to 95% for RVF/LH was from 0,62 to 0,67. A Student t-test revealed that the difference between mean reaction times for the LVF and the RVF was significant $t(162) = 2, p < .02$.

We subjected RTs (sec) to repeated ANOVAs. No significant effects or interactions were found between mean RTs and other factors (sex, age, level of education, handedness, footedness, proficiency in L2), all $F \leq 2$, all $p \geq .14$.

2. *Asymmetry indices*

Asymmetry Indices (see Method for details) for both ACCs and RTs are presented in table 2.

Accuracy: There were 64 participants with positive AIs to ACC (78%) with a confidence interval to 95% from 68% to 86%, and 18 participants with negative AIs (22%) with a confidence interval to 95% from 14% to 32%.

Reaction Time: There were 58 participants with positive AIs to RT (71%) with a confidence interval to 95% from 60% to 79%, and 24 participants with negative AIs (29%) with a confidence interval to 95% from 20% to 40%.

To examine if there was a significant difference between general population lateralization and our population, we performed two bilateral χ^2 tests, with likelihood ratio, between these present rates and the reference rate of 85% of people with expected positive AIs, and found that probabilities for Accuracy were not significantly

different from the reference value, $\chi^2(1) = 2.8, p = .09$, but probabilities for Reaction Time were significantly different from the reference value, $\chi^2(1) = 10.8, p < .001$.

	Accuracy (%)		Reaction Time (ms)		AIs for ACC	AIs for RTs
	LVF/RH	RVF/LH	LVF/RH	RVF/LH		
n = 82	55,8 ± 16,2 (28,1 – 98,4)	69,9 ± 14,5 (31,2 – 95,3)	68,4 ± 10,6 (50,3 – 96,2)	64,8 ± 11,9 (43,7 – 112,8)	11,9 ± 17 (-39,2 – 48)	2,8 ± 8,2 (-35 – 20,7)

Table 2 - Mean accuracy ACC (%) and Reaction Time RTs (ms) for both visual half-field at the TLDT procedure and Asymmetry Indices for ACC and RTs

3. Univariate analyses

TLDT lateralisation and sex

Lateralisation scores for ACCs were lower for women than for men (women being more ambilaterals) ($m = 14,4$ and $10,9$ for men and women respectively, see Fig. 1 for results in both VHF), but an ANOVA revealed that these differences were not significant, $F(1, 80) = .73, p = .39$.

Lateralisation scores for RTs were lower for women than for men ($m = 5$ and $1,9$ for men and women respectively, (see Fig. 1 for results in both VHF), but an ANOVA revealed that these differences were not significant, $F(1, 80) = 2.38, p = .13$.

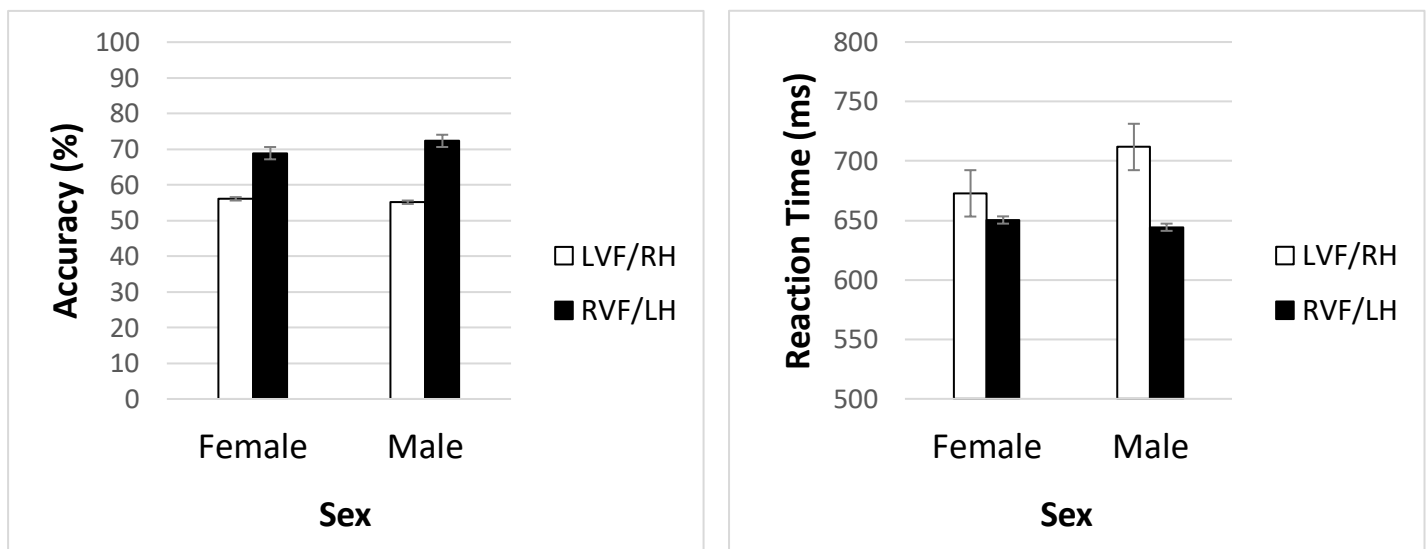


Fig. 1 - Mean accuracy (%) and reaction time (sec) and standard errors for both visual half-fields according to sex

TLDT lateralisation and age

As the link between AIs and age was not linear, we transformed the age into a categorical variable, according to the quartiles (1: from 15 to 21 years old; 2: 22-24 yo; 3: 24-30 yo; 4: 31-68 yo).

An ANOVA revealed that the differences of mean lateralisation scores with age were not significant, neither for ACCs (respectively, $m = 8,9; 12; 13,1; 12,8$), $F(3, 78) = .21, p = .89$, nor for RTs (respectively, $m = 2,2; 4; 3,1; 1,5$), $F(3, 78) = .37, p = .77$.

TLDT lateralisation and level of education

As the link between TLDT lateralisation and the level of education was not linear, we transformed the level of education into a categorical variable, according to the quartiles (1: less than 2 years of higher studies after bachelor's degree; 2 years of higher studies; 3: 3 years of higher studies; 4: 4 years of higher studies or more). For this analysis, only subjects who had completed their studies were retained ($n = 52$, or 63,4% of the general sample).

Group 3 obtained lower lateralisation scores for ACCs than the other groups (respectively, $m = 12,9; 14,4; 4,2; 10,8$), but these differences were not significant as revealed by an ANOVA, $F(3, 49) = .59, p = .62$.

Group 3 obtained lower lateralisation scores for RTs (respectively $m = 5,7; 3,8; -1,2; 1,1$), but these differences were not significant as revealed by an ANOVA, $F(3, 49) = .98, p = .41$.

TLDT lateralisation and different types of laterality

Scores to the different laterality tests are shown in Table 3.

To examine if one type of laterality (footedness, handedness, eyedness and earedness) was more associated with language lateralisation, the AIs for ACCs and Reaction Time were entered into multiple linear regressions.

Mean responses in both VHF according to dominant hand groups, foot, eye and ear are presented in Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 and Fig. 5.

Handedness:

A linear regression revealed no significant interaction between the AIs for ACCs and Edinburgh scores, $F(1, 80) = 3.4, p = .07$. No significant interaction was revealed between the AIs for Reaction Time and Edinburgh scores, $F(1, 80) = .53, p = .47$.

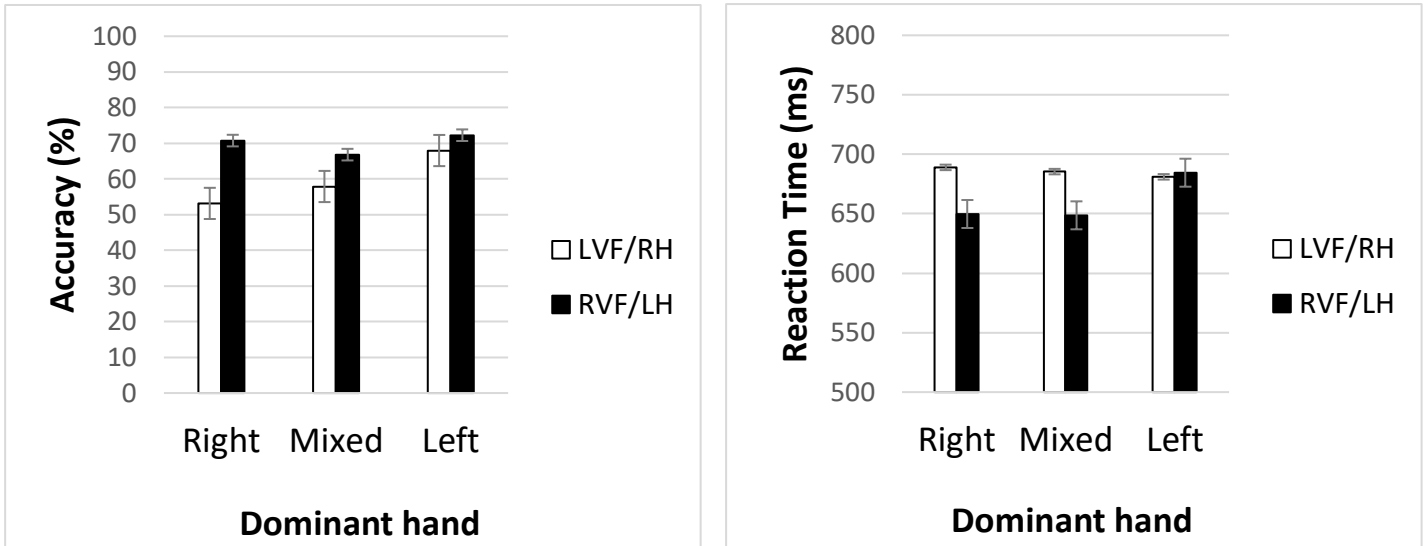


Fig. 2 - Mean accuracy (%) and reaction time (sec) and standard errors for both visual half-fields according to handedness

Footedness:

A linear regression revealed a significant interaction between the AIs for ACCs with Waterloo Footedness Questionnaire (WFQ) scores and, $F(1, 80) = 5.2, p = .03$, whereas no significant interaction was found with the AIs for Reaction Time, $F(1, 80) = 1.86, p = .18$.

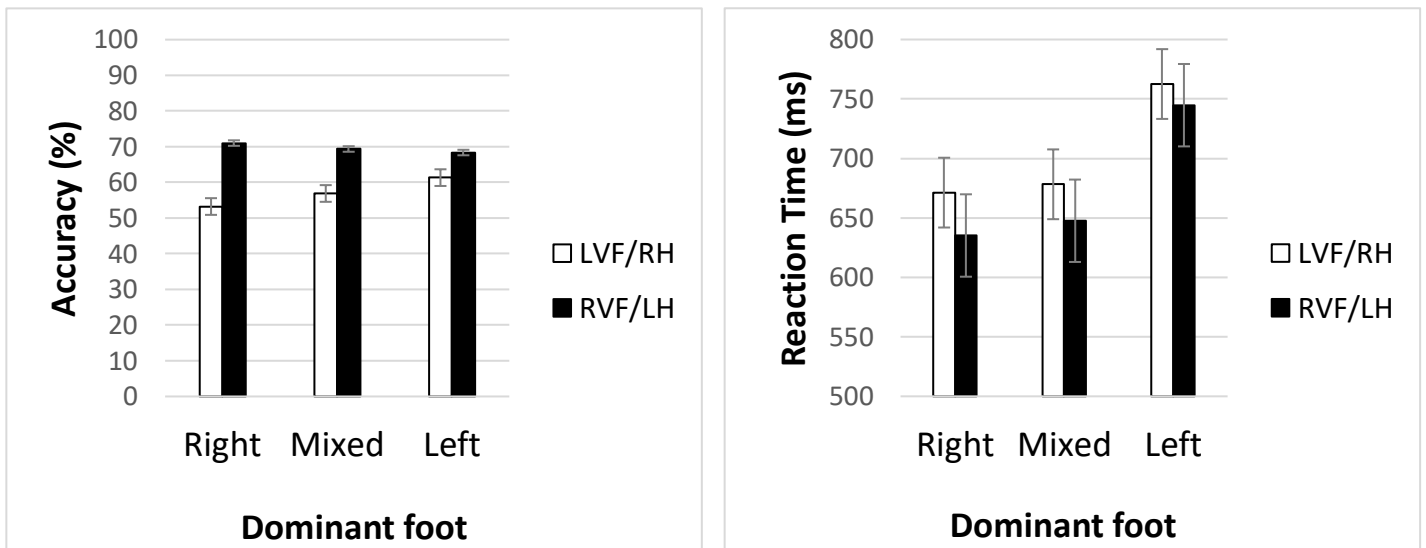


Fig. 3 - Mean accuracy (%) and reaction time (sec) and standard errors for both visual half-fields according to footedness

Eyedness:

A linear regression revealed no significant interaction between the Coren eye scores and the AIs for ACCs, $F(1, 80) = .10, p = .75$ and the AIs for Reaction Time $F(1, 80) = .13, p = .72$.

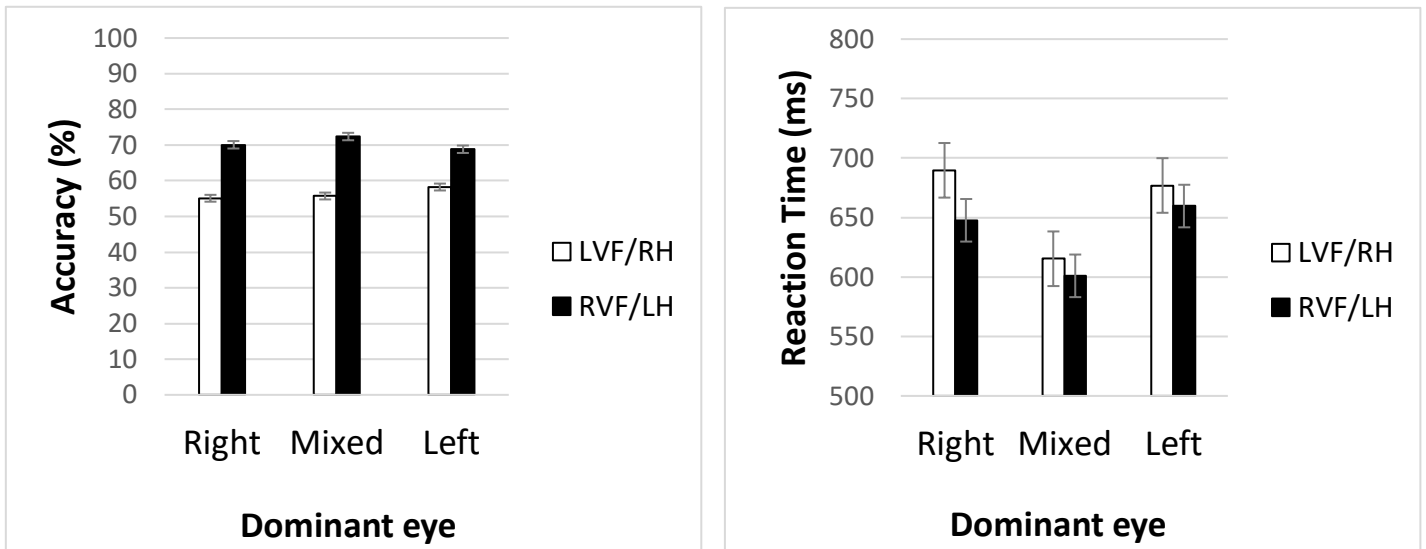


Fig. 4 - Mean accuracy (%) and reaction time (sec) and standard errors for both visual half-fields according to eyedness

Earedness:

A linear regression revealed no significant interaction between the Coren Ear scores and the AIs for ACCs, $F(1, 80) = .93, p = .34$ and the AIs for Reaction Time $F(1, 80) = .86, p = .35$.

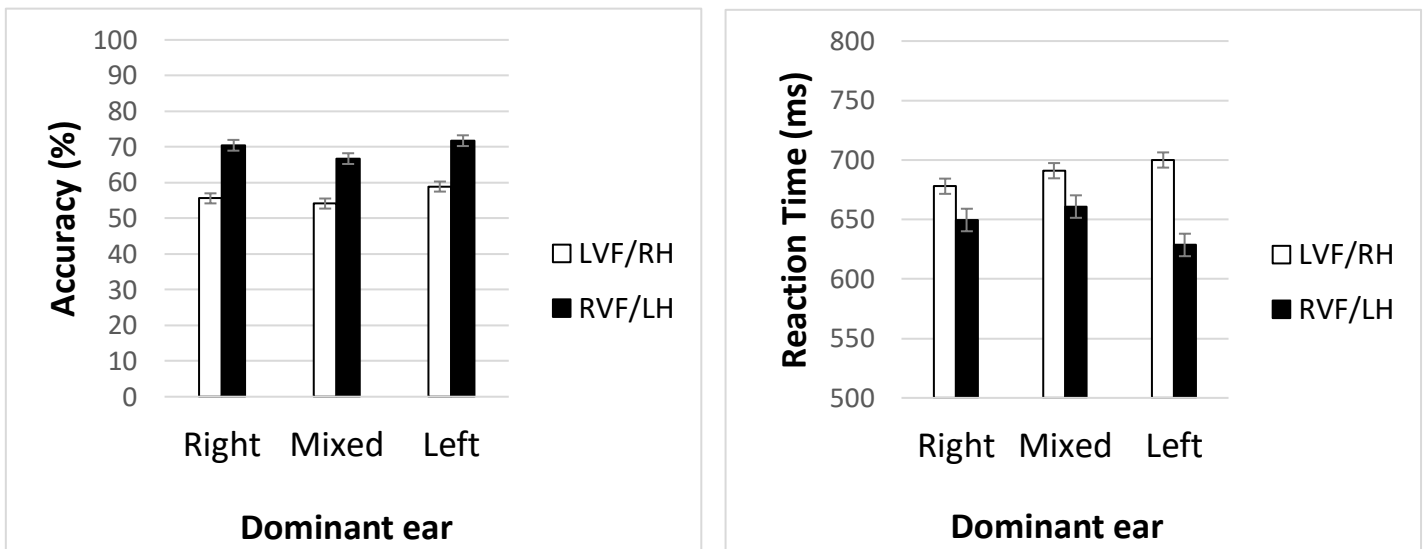


Fig. 5 - Mean accuracy (%) and reaction time (sec) and standard errors for both visual half-fields according to earedness

We used categorical variables to compare the different laterality variables (determining sidedness in the same 3 groups for hand, foot, eye and ear: left-sided – between -100 and -50 or -4 and -2 –, bilateral – between -49 and +49 or -1 and +1 – and right-sided – between +50 and +100 or +2 and +4), but no conclusive results were revealed. Left-sided groups were too small for analysis. Note a linear distribution for each variable:

right-sided having higher laterality scores than bilaterals, having themselves higher scores than left-sided. See Table 4 to see these groups and the results.

Sex	Edinburgh Handedness Inventory	Waterloo Footedness Questionnaire	Coren Hand	Coren Foot	Coren Eye	Coren Ear
M n = 24 (29%)	36,7 ± 49,8 (-70 – +90)	24,2 ± 31,2 (-55 – +90)	2,4 ± 3 (-4 – +4)	2 ± 2,3 (-4 – +4)	1,7 ± 2,7 (-4 – +4)	1,5 ± 2,2 (-2 – +4)
F n = 58 (71%)	44 ± 51,3 (-100 – +100)	33,4 ± 45,2 (-100 – +100)	2,5 ± 2,7 (-4 – +4)	2,3 ± 2,1 (-4 – +4)	1,5 ± 2,9 (-4 – +4)	1,6 ± 2,6 (-4 – +4)
Total n = 82	41,8 ± 50,7 (-100 – +100)	30,7 ± 41,6 (-100 – +100)	2,5 ± 2,8 (-4 – +4)	2,2 ± 2,1 (-4 – +4)	1,6 ± 2,8 (-4 – +4)	1,6 ± 2,5 (-4 – +4)

Table 4 - Scores of laterality tests

	Hand		Foot		Eye		Ear	
Right	53 (65%)		29 (35%)		61 (74%)		52 (63%)	
	Als ACC 14,7 ± 17,1 [10 – 19,5]	Als RTs 3,2 ± 8,8 [0,8 – 5,7]	Als ACC 15,2 ± 14,4 [9,7 – 20,6]	Als RTs 3 ± 9 [-0,4 – 6,4]	Als ACC 12,8 ± 16,8 [8,5 – 17,1]	Als RTs 3,4 ± 8,6 [1,2 – 5,6]	Als ACC 12,9 ± 17 [8,2 – 17,7]	Als RTs 2,3 ± 7,9 [0,1 – 4,5]
Bilateral	21 (25%)		49 (60%)		3 (4%)		17 (21%)	
	Als ACCs 8,2 ± 14,8 [1,5 – 14,9]	Als RTs 2,9 ± 7,1 [-0,3 – 6,1]	Als ACC 10,5 ± 17 [5,7 – 15,4]	Als RTs 2,8 ± 7,8 [0,6 – 5,1]	Als ACC 12,4 ± 4,5 [1,3 – 23,6]	Als RTs 1,7 ± 4,5 [-9,5 – 13]	Als ACC 10,4 ± 17,9 [1,2 – 19,6]	Als RTs 2,7 ± 9,3 [-2,1 – 7,5]
Left	8 (10%)		4 (5%)		18 (22%)		13 (16%)	
	Als ACCs 2,8 ± 18,3 [-12,5 – 18,1]	Als RTs -0,2 ± 6,3 [-5,4 – 5,1]	Als ACC 5,2 ± 31,9 [-45,6 – 55,9]	Als RTs 1,3 ± 6,9 [-9,7 – 12,4]	Als ACC 8,9 ± 18,8 [-0,4 – 18,2]	Als RTs 1,2 ± 6,9 [-2,3 – 4,6]	Als ACC 9,7 ± 16,3 [-0,2 – 19,6]	Als RTs 5,1 ± 7,9 [0,3 – 9,9]

Table 3 - Laterality tests: groups by dominant sides

TLDT lateralisation and proficiency in a second language (L2)

Subjects were divided into 3 groups according to their proficiency in a second language (A, B and C levels where A represents a low proficiency, B a moderate proficiency and C a high proficiency). Groups B and C presented a lower lateralisation concerning the AIs for ACCs than group A (m = 22,8; 9,7; 10,4, for group A, B and C, respectively; see Fig. 5 for results in both VHF) and an ANOVA revealed a significant effect, $F(2, 79) = 3.1, p < .05$. Concerning the AIs for RTs, and group B presented a lower lateralization than groups A and C (respectively, m = 4; 1,3; 4) without any significant difference, $F(2, 79) = 1,1, p = .35$.

Concerning Accuracy, post-hoc analyses (Student t-test) revealed a significant difference between group A and group B ($p < .02$) and group A and group C ($p < .03$), whereas no significant difference was revealed between group B and group C ($p = 86$).

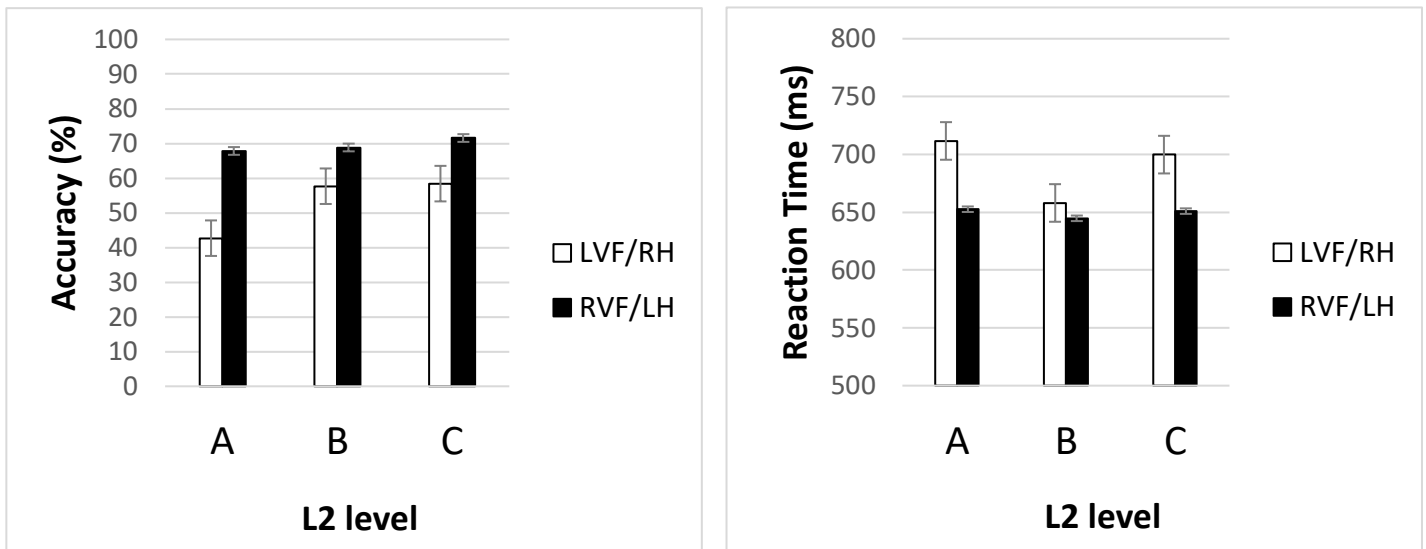


Fig. 6 - Mean accuracy (%) and reaction time (sec) and standard errors for both visual half-fields according to the level of proficiency in a second language

TLDT lateralisation and early/late exposure to a second language (L2)

Subjects with an early exposure to L2 presented higher lateralisation scores for ACCs ($m = 13,7$ vs $11,7$, for early and late exposure respectively), without any significant difference, $F(1, 80) = .13, p = .72$

Concerning the AIs for RTs ($m = 4,8$ vs $2,5$) no significant difference was revealed between early and late exposure to L2 $F(1, 80) = .16, p = .69$.

4. Multivariate analyses: linear and logistic regressions

To search for factors associated with increasing or decreasing AIs, the AIs for ACCs were subjected to a linear regression with proficiency in L2 groups (A, B, C) and the WFQ scores, controlled by sex, revealing a significant intercept effect, $F(4, 77) = 3.3, p < .01$. The effect of WFQ was significant, $F(1, 80) = 5.9, p < .02$, indicating differences in the degree of language lateralisation according to the dominant foot ; gender and proficiency in L2 being considered as equal. The effect of the proficiency in L2 was significant, $F(2, 79) = 3.1, p < .05$, indicating differences in the degree of language lateralisation according to the proficiency in a foreign language. Post-hoc analyses revealed significant differences between proficiency and language lateralisation for group A as compared to group C, $t = 2.47, p < .01$, whereas no significant difference was revealed for group B as compared to group C, $t = -1.92, p = .06$.

The AIs for RTs were subjected to the same linear regression, revealing a non-significant intercept effect, $F(4, 77) = 1.9, p < .12$. The effect of WFQ was not significant, $F(1, 80) = 2.7, p < .10$, as well as the effect of proficiency in L2, $F(2, 79) = 1.4, p = .26$, and the effect of gender, $F(1, 80) = 3.2, p = .08$ (but the last one showed a trend, which was not visible for AIs for ACCs).

To search for factors associated with language lateralisation, whether on the right or on the left, we also performed a logistic regression, transforming the explainable variable into a binary variable: subjects with a probable left language lateralisation (0), i.e. having positive AI, and subjects with a probable right language lateralisation, or bilateralisation (1), i.e. subjects having negative AI or AI equal to zero.

We first subjected AIs for ACCs to a logistic regression, with the proficiency in L2 groups (A, B, C) and the WFQ scores, with sex as covariate, revealing a non-significant intercept, $\chi^2(4) = 7.8, p < .10$. The likelihood ratio test indicated that the effect of WFQ was significant, $\chi^2(1) = 5.1, p < .02$, but not the effect of the proficiency in L2, $\chi^2(2) = 2.6, p < .27$, or the effect of gender, $\chi^2(1) = .10, p < .75$.

Participants were 17,5 times more likely to be typically lateralized (0) with an increasing score to the WFQ, and vice versa (OR = 17.5 [95% CI = 1.4 – 227.2] ; $p = .023$).

For the effect of foreign language, participants having an A level in L2 were 4,6 times more likely to be typically lateralized (0) than participants having a B level, and vice versa, this effect was not significant (OR (A/B) = 4.6 [95% CI = 0.5 – 41.4] ; $p = .18$). Participants having an A level in L2 were 2,6 times more likely to be typically lateralized (0) than participants having a C level, and vice versa, this effect was not significant (OR (A/C) = 2.6 [95% CI = 0.28 – 24.4] ; $p = .40$). Participants having a B level in L2 were 1,7 times more likely to be atypically lateralized (1) than participants having a C level, this effect was not significant (OR (C/B) = 1.7 [95% CI = 0.5 – 5.6] ; $p = .34$).

Concerning the AIs for Reaction Time, the intercept effect was not significant. The WFQ scores, $\chi^2(1) = 1.1, p < .28$, proficiency in L2, $\chi^2(2) = 3.8, p < .15$, the effect of gender, $\chi^2(1) = .02, p < .87$ were not significant at the likelihood ratio test level.

5. Asymmetry-performance relationships

To investigate asymmetry-performance relationships, and to assess if less lateralized subjects had better results than others, for both for accuracy and reaction time, we used partial correlations (controlled for footedness) between AIs (sided and absolute) and averaged performance across LVF and RVF for both ACCs and RTs. For ACCs, we found consistently small, but significant negative partial correlation between AIs and overall ACCs (for total sample, $-.277, p < .04$). For RTs, partial correlations were negative, but not significant (for total sample, $-.138, p < .22$). The asymmetry-performance relationships were consistently stronger and always significant when absolute AIs were taken into account (for total sample, $-.350, p < .001$ for ACCs and $.235, p < .03$). The results for both ACCs and RTs pointed into the same direction, i.e., the smaller participants' asymmetry, the better their performance (i.e., higher ACCs and faster RTs).

6. Summary of the results

As in previous studies (Hausmann et al., 2019; Willemin et al., 2016), we found a consistent advantage of RVF/LH.

A Student t-test between mean ACCs and mean RTs revealed that the difference between mean ACCs and RTs for the LVF and the RVF was significant ($p < .0000001$ and $p < .02$, respectively).

Participants with a higher proficiency in a foreign language presented better ACCs ($p < .05$).

Bilateral χ^2 tests revealed that AIs for ACCs were in accordance with results from previous studies assessing that about 85% of people in the global population have a left lateralisation for language (i.e., positive AIs) but there was no consistency with previous studies for the AIs for RTs.

Using a univariate analysis, each factor (sex, age, level of education, different types of laterality, proficiency in L2, early/late exposure to L2) was tested with AIs (for ACCs and for RTs): we compared means with ANOVAs for qualitative data, and we used linear regression for quantitative variables. The only significant effects or interactions were scores to the WFQ (footedness) and proficiency in L2 (level A, B or C). We should note that, for proficiency, the difference between group A and group B ($p < .02$) as well as the difference between group A and group C ($p < .03$) were significant, whereas no significant difference was revealed between group B and group C ($p = 0.86$). No other significant effects or interactions were found investigating sex, age, level of education, early vs late exposure to a second language, and other types of laterality (including handedness).

Multivariate analysis pointed in the same direction. Controlled for gender, WFQ scores and proficiency in L2 were significant for the AIs for ACCs using a linear regression ($p < .02$ and $p < .05$), showing factors associated with the increase or decrease of lateralisation scores (or AIs). Controlled on gender, WFQ scores were the only significant effect on AIs for ACCs ($p < .02$) in the logistic model, showing factors associated with language lateralisation. In both regressions, the same interactions between groups A, B and C were found. Lateralisation scores (AIs) of group A were lower than in group B and C, but participants in group B had little higher lateralisation scores, both almost equal.

These analyses (univariate and multivariate) were significant for AIs for ACCs but not for RTs.

As in previous studies (Boles et al., 2008; Hausmann et al., 2019; Hirnstein et al., 2010; Willemin et al., 2016), we also found using partial correlations asymmetry-performance relationships, that the smaller participants' asymmetry, the better their performance : for ACCs ($p < .04$ with sided AIs, and $p < .001$ with absolute AIs) and for RTs ($p < .22$ with sided AIs, and $p < .03$ with absolute AIs)

DISCUSSION

The current study investigated the laterality variables affecting language hemispheric lateralisation in a sample of 80 plurilingual and monolingual French participants, by using a visual half-field paradigm, the Translingual Lexical Decision Task (Hausmann et al., 2019; Willemin et al., 2016). Our results revealed a

consistent RVF/LH advantage, stronger for Accuracies than for Reaction Times, which is in accordance with previous studies (Hausmann et al., 2019; Willemin et al., 2016). In fact, TLDT is a reliable tool to test for the well-established RVF/LH advantage in language processing frequently found in properly designed VHF tests (see Bourne, 2006; Hunter & Brysbaert, 2008). This advantage was also highlighted when AIs were taken into account, as in Hausmann et al. (2019) and Willemin et al. (2016). Several previous neuroimaging and behavioural studies have successfully applied AIs (also called Absolute laterality indices) to determine the degree of language lateralisation in brain activation and performance data (Hirnstein et al., 2008, 2014; Knecht et al., 2003; Seghier, 2008) and “to reliably identify hemispheric dominance in language” (Hunter & Brysbaert, 2008, p.322). Positive AIs for accuracies of our sample were revealed in 78% people, meaning a left lateralization, which is in accordance with previous studies which have estimated a left language lateralisation in around 80-90% of the general population (depending on the classification : typical/atypical, or typical/ambilateral/strongly-atypical) (Mazoyer et al., 2014).

Note that it was not the case for AIs for reaction time.

TLDT and laterality indices

Handedness is frequently used in studies about language lateralisation, but yet, the study of Mazoyer et al. (2014) has shown that hand lateralisation and language dominance are associated by chance, except in right-hemisphere dominant individuals (strongly-atypicals). At the present time, no behavioural factor is known to be 100% representative of language lateralisation, since this cerebral lateralisation can vary from task to task, even linguistic ones (see Perrone-Bertolotti et al., 2016; Stroobant et al., 2009). And, to our knowledge, no study has investigated whether ambilaterality and right hemisphere dominance are two different language lateralization phenotypes or extreme expressions of a continuous atypical phenotype so far (Mazoyer et al., 2014). However, results from the Waterloo Footedness Questionnaire-Revised (WFQ) in the present study revealed a significant interaction between AIs for ACCs and footedness, whereas Edinburgh scores did not. Moreover, there was a significant correlation between the increase of WFQ scores and lateralisation scores (Figures 2 to 5). In fact, handedness can be conditioned by many socio-cultural and environmental biases (Elias et al., 1998; Gabbard, 1993; Hécaen, 1984; Muraleedharan et al., 2020). Footedness would be less conditioned by such factors, and more representative of cerebral lateralisation, especially for linguistic and emotional factors (Elias et al., 1998; Elias & Bryden, 1998; Muraleedharan et al., 2020). First, footedness was pointed to be the most important indicator of sidedness, whereas handedness would be a biased indicator of underlying sidedness (Tran et al., 2014). Even if footedness can be influenced by a lot of environmental factors (such as sports practices or wounds), Elias et al. (1998) found that the foot preference items significantly correlated with the measures of cerebral lateralization were items assessing foot preference for manipulating an object (such as picking up a marble with one’s toes for example). Moreover, the leg used to kick a ball had 100% agreement between the self-reported and observed dominant leg in van Melick et al.

study (2017), but a considerable number of the participants switched the dominant leg in a unilateral stabilizing task. Footedness – whether measured with the Waterloo Footedness Questionnaire-Revised (WFQ-R), or the self-reported footedness (by kicking a ball for example) – seems to be more representative of language lateralisation, even if it is not totally representative.

The Coren test is less sensitive than the Edinburgh and the WFQ tests since scores range from -4 to 4 whereas Edinburgh and WFQ scores range from -100 to 100. However, eyedness and earedness have been revealed not to be indicative of language lateralisation at all (Elias et al., 1998, 1998; Tran et al., 2014), which is in accordance with the results from our study. Note that all the questionnaires and tests used are subjective measures of sidedness. However, a recent report indicates that none of the different measures of sidedness (self-reports, questionnaires, relative member skill, performance at reaching a task) emerged as clearly superior to the others as regards to their correlation with the cerebral dominance for language (Isaacs et al., 2006). The same issue can be noted for ocular tests : more objective tests exist (Soto et al., 2008), but the classically used tests chosen here were much more easier to obtain and to realise.

Moreover, it is difficult to correctly classify groups using the Edinburgh, WFQ or Coren tests. Based on the laterality index of Edinburgh, previous studies, like the Oldfield one (and 27.6% of the other articles), did 2 groups (left-handed and right-handed, with a cut-off score at 0), while other studies did various groups (see Edlin et al., 2015, for a review). Cut-off scores were highly variable in the other studies, and the mean cut-off score was 47.83 (\pm 34.61). In the present study, we chose to do 3 groups: “left-sided” (-100 to -50), “bi-sided” (-49 to +49) and “right-sided” (+50 to +100), but it often does not match with the self-reported handedness or footedness. For example, left-sided was really rare (8 for the hand, 4 for the foot).

TLDT and language proficiency in L2

Whatever the VHF, mean ACCs and mean RTs were quite equivalent for each subgroup, except for people with a higher proficiency in a second language (group B and C compared to group A). This phenomenon may be explained by the relationship between better vocabulary knowledge and superior lexical decision performance exposed by Willemin et al. (2016). TLDT words being equally frequent in French and in English, and most of them being also frequently used in Spanish, we can assume that participants of group B and C have better vocabulary knowledge for TLDT words, which would be correlated with superior lexical decision performance in both visual fields. However, as also suggested by Hausmann et al. (2019), it is rather unlikely that these higher or lower results have a major influence on language lateralisation as measured with TLDT (with AIs). In summary, it would suggest that the level in L2 can have a small influence on language lateralisation, subjects with an A level, i.e., with a low proficiency in L2 or monolinguals, have a significantly higher dominance of LH for language in VHF task than subjects with a moderate proficiency in L2 (B level) or high proficiency in L2 (C level).

Even if language lateralisation varies over the course of a lifetime, these variations remain subtle. Moreover, plurilingualism contribution on language lateralization is so complex that multi-factors should be considered. There is an old (Paradis & Lebrun, 1983) but still on-going debate on potential differences in language lateralisation in monolingual and early and late bilinguals, early bilinguals being considered as subjects with a L2 acquisition before the age of 6 years old. In their meta-analysis, Hull & Vaid (2006, 2007) revealed a robust effect of the age of L2 acquisition on language lateralisation regardless of proficiency, showing an increasing right hemisphere involvement in early bilinguals relative to late bilinguals, so a more bilateral language activation for both languages in early bilinguals, and a LH dominance in late bilinguals. However, a recent meta-analysis on neuroimaging data (Liu & Cao, 2016) found that late bilinguals, compared to early bilinguals presented more additional, including bilateral, brain regions in second than in first language processing. On the contrary, Consonni et al. (2013) assessed that neural convergence for language depends on proficiency but not on the age of acquisition of L2. In fact, it seems difficult to describe a coherent picture of something as complex and fluctuant as the effect of learning of a second language on brain organisation, even if it is well known that it creates structural changes, especially for late learners, as exemplified by Klein et al. (2014) who have revealed that the left inferior frontal gyrus presented higher cortical thickness than the right in late bilinguals. For early bilinguals, language motor areas partially overlap in both languages, creating small changes compared to monolinguals; whereas for late bilinguals, these activations are separated (for a summary, see Grosjean & Li, 2013). Depending on the studies, the left-right asymmetry is described as less important for early or for late bilinguals, but it is interesting to note that activated areas vary according to each individual, and according to each task (Hausmann et al., 2004). In fact, concerning hemispheric specialization, language experience affects non-language abilities, and a study has revealed that, besides a typical left-hemisphere advantage in word matching for both languages, a reduced right-hemisphere advantage in face discrimination in bilinguals was found as indicated by response times measures (where monolingual controls showed typical hemispheric asymmetries in both tasks) (Hausmann et al., 2004). Moreover, brain areas involved in language would be determined not only by age, but also by socio-psychological factors such as motivation and learning context, or by the language(s) learned (Liu & Cao, 2016). All of this can explain the strong inter-individual variability in all types of plurilinguals.

TLDT and early vs late exposure in L2

No significant difference has been revealed between participants with an early compared to a late exposure to L2; however subjects with early exposure tend to have higher lateralisation scores, which is in accordance with results from previous studies (Hausmann et al. 2019; Willemin et al. 2016; Liu & Cao 2016). However, our subgroups were quite restricted, and bilingualism itself presents a lot of bias, since it is not a constant variable. It is a lifelong process, with changing contexts, and it presents inter- and intra-individually. Even if we tried to reduce bias linked to the language (by taking only French as the mother tongue and English or

Spanish for L2), two bi- or plurilinguals are never the same, and it was hard in this study to speak about “early monolinguals”. Indeed, participants exposed early to a L2 (or a second mother tongue) here, now in adulthood, were often removed from a C2 level in this second language.

TLDT, L2 proficiency and laterality indices

The footedness score (calculated with the WFQ scores) and the level of proficiency in a second language (from low, to moderately or highly proficient subjects) were the factors associated with an increase or a decrease in the lateralization score, whether to the right or to the left. These results can explain why subjects move away from +100, but not why they are classified as typically lateralized or atypically lateralized.

TLDT and sex

Sex played no role in our study, though lateralisation scores tend to be a little bit higher for men than for women. Thus, we did not find that men were significantly more lateralised than women. Men were quite underrepresented (24 out of 82) in our sample. While sex differences have been reported a few times in the literature (Hausmann et al., 1998; Hausmann & Güntürkün, 1999; Voyer, 2011), they are not always reported (Sommer et al., 2008) or some studies only reveal small effects (Voyer, 2011) (for a review see Hiscock et al., 2001). Such inconsistencies might partly emerge from methodological and time-sensitive issues (Mohr et al., 2005) and partly because sex hormonal factors have been largely ignored (Bayer & Hausmann, 2009; Hausmann et al., 2013; Hausmann, 2010; Hausmann et al., 2002). In fact, if men are more likely to be left-handed than women (Sommer et al., 2008), women seem not to be globally less lateralised for language, but to be a more heterogeneous and inconsistent group in language lateralisation than men, with differences of intra-hemispheric organisation and more distributed anatomical-functional networks (see Perrone-Bertolotti et al., 2016).

TLDT and age

Age played no role in our study, but we deliberately restricted the age range, where lateralisation fluctuations are more limited. Even if language areas are set up really early, even in infants (Dehaene-Lambertz et al., 2010), a more bilateral language processing occurs in young children (Friederici et al., 2011; Holland et al., 2001; Perani et al., 2011; Ressel et al., 2008; Waldie & Mosley, 2000), the left hemisphere becoming more and more specialized over the course of a lifetime. A decrease in inter-hemispheric asymmetry has been found during normal aging (Cabeza, 2002), recruiting additional areas in the non-dominant hemisphere. It can reflect a compensatory strategy for some authors (Cabeza et al., 2002), or a phenomenon of dedifferentiation (Dennis & Cabeza, 2011), meaning that the differentiation between systems (i.e. visual cortices, learning systems) is reduced, and less supported by specific cerebral areas. We can observe in our study lower lateralization scores for the youngest, which tends to shift towards a bilateralisation for the oldest,

as reported in the literature. We can hypothesize that these scores would have been significant by considering young children and elderly people. However, the TLDT procedure does not seem really suitable for children and the elderly (it is a difficult task, requiring sustained attention over a long period of time, with really fast stimulus presentation), so such studies seem difficult as it stands. Moreover, these differences would be irrelevant especially in non-reading children, for whom a lexical decision task is impossible. Such a lexical decision task does not seem to be the most appropriate way to study the factor of age.

TLDT and asymmetry-performance relationship

The asymmetry-performance relationship was measured with TLDT using the common procedure (Boles et al., 2008; Hirnstein et al., 2010). The analyses revealed consistently significant negative correlations for ACCs, indicating that the smaller the asymmetry, the better participants' ACC. For RTs, the relationship was smaller, but significant with absolute AIs, and pointed into the same direction, that is better performance (faster responses) was associated with asymmetry reduction. These results are in line with Hausmann et al. (2019) and are partly consistent with previous findings (Boles et al., 2008) but they are not in accordance with others (Chiarello et al., 2009), which suggests inconsistency in the literature and the relevance of individual and task-related factors (Hirnstein et al., 2010). Boles et al. (2008) showed that asymmetry-performance varies depending on the task, suggesting for example that larger asymmetries are associated with better performance for processes acquired early in ontogenesis (auditory vs visual). Moreover, there is evidence that asymmetry-performance relationships are generally complex and might not necessarily be linear (Hirnstein et al., 2014). A non-linear relationship would suggest that individuals with symmetric brain organization performed at their best and that performance would deteriorate with increasing asymmetry, regardless of its direction. This finding is partly in line with the present study which reveals the strongest (linear) relationship for absolute AIs. It should be noted, however, that the approach of calculating these correlations has been criticised, as explained in Hausmann et al. (2019), as well as the calculation of AIs. One limitation is the relatively large number of participants who were excluded mainly because of performance issues (i.e., ACCs in the dominant and non-dominant visual field below and above chance, respectively; almost 20% of our participants were excluded this way), suggesting that the TLDT was relatively demanding. If changes in the stimulus presentation duration, for elderly people for example, have to be done, it is recommended to follow the recommendations of Bourne (2006) about VHF paradigms.

In summary, the current findings are in line with the previous studies with TLDT, indicating that TLDT is a reliable VHF task to assess hemispheric dominance for language in large samples, especially concerning accuracy. Handedness is currently used in language lateralisation, however, as revealed here and in the literature, it does not seem to reflect consistently language lateralisation, where footedness seems to be more appropriate. We have also found a link between language lateralisation and proficiency in L2 – people with

low proficiency in L2 tending to have a strongest left dominance for language – whereas no effect of age of acquisition was revealed, all of these factors being inconsistently interacting with language lateralisation in the literature. Although the present results suggest a negative relationship between the degree of asymmetry and the general performance in TLDT, possible differences in performance in subgroups only marginally affected RVF/LH advantage in this task, making the task a reliable and easy to administer measurement of language lateralisation. This task can be applied in experimental settings as well as in the clinical context, across linguistic and national boundaries, for example in localising language functions in patients with unilateral brain lesions, patients with aphasias, or in stuttering patients, which inconsistency in laterality have been little studied.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the teachers and students of the Biostatistics Master's degree of Bordeaux, ISPED, and more specifically Quentin Le Grand, PhD candidate at INSERM center, for their precious help with statistics.

DECLARATION OF INTEREST STATEMENT

No potential conflict of interest was reported by the authors.

REFERENCES

- Alderson, J. C. (2005a). *Diagnosing Foreign Language Proficiency : The Interface Between Learning and Assessment*. A&C Black.
- Alderson, J. C. (2005b). *Diagnosing Foreign Language Proficiency : The Interface Between Learning and Assessment*. A&C Black.
- Alderson, J. C. (2007a). The CEFR and the Need for More Research. *The Modern Language Journal*, 91(4), 659-663. JSTOR.
- Alderson, J. C. (2007b). The CEFR and the Need for More Research. *The Modern Language Journal*, 91(4), 659-663. JSTOR.
- Bayer, U., & Hausmann, M. (2009). Estrogen therapy affects right hemisphere functioning in postmenopausal women. *Hormones and Behavior*, 55(1), 228-234.
<https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2008.10.009>
- Boles, D. B., & Barth, J. M. (2011). “Does degree of asymmetry relate to performance?” A critical review. *Brain and Cognition*, 76(1), 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.01.013>
- Boles, D. B., Barth, J. M., & Merrill, E. C. (2008). Asymmetry and performance : Toward a neurodevelopmental theory. *Brain and Cognition*, 66(2), 124-139.
<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2007.06.002>
- Bourne, V. J. (2006). The divided visual field paradigm : Methodological considerations. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 11(4), 373-393.
<https://doi.org/10.1080/13576500600633982>
- Broca, P. (1865). Sur le siège de la faculté du langage articulé. *Bulletins et Mémoires de la Société*

- d'Anthropologie de Paris*, 6(1), 377-393. <https://doi.org/10.3406/bmsap.1865.9495>
- Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults : The HAROLD model. *Psychology and Aging*, 17(1), 85-100. <https://doi.org/10.1037//0882-7974.17.1.85>
- Cabeza, R., Anderson, N. D., Locantore, J. K., & McIntosh, A. R. (2002). Aging gracefully : Compensatory brain activity in high-performing older adults. *NeuroImage*, 17(3), 1394-1402. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1280>
- Chiarello, C., Welcome, S. E., Halderman, L. K., & Leonard, C. M. (2009). Does degree of asymmetry relate to performance? An investigation of word recognition and reading in consistent and mixed handers. *Brain and Cognition*, 69(3), 521-530. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.11.002>
- CNIL. (2018, mai 23). *Le règlement général sur la protection des données—RGPD | CNIL*. <https://www.cnil.fr/fr/reglement-europeen-protection-donnees>
- Consonni, M., Cafiero, R., Marin, D., Tettamanti, M., Iadanza, A., Fabbro, F., & Perani, D. (2013). Neural convergence for language comprehension and grammatical class production in highly proficient bilinguals is independent of age of acquisition. *Cortex*, 49(5), 1252-1258. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.04.009>
- Coren, S. (1993). The Lateral Preference Inventory for measurement of handedness, footedness, eyedness, and earedness : Norms for young adults. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 31, 1-3. <https://doi.org/10.3758/BF03334122>
- Cottet-Emard, F. (2014). *Probabilités et tests d'hypothèses*. De Boeck Supérieur.
- Council of Europe. (2001a). *Common European Framework of Reference for Languages : Learning, Teaching, Assessment*. Cambridge University Press.
- Council of Europe. (2001b). *Common European Framework of Reference for Languages : Learning, Teaching, Assessment*. Cambridge University Press.
- Dehaene, S. (1997). *Le cerveau en action*. <https://www.cairn.info/le-cerveau-en-action--9782130482703.htm>
- Dehaene-Lambertz, G., Montavont, A., Jobert, A., Alliol, L., Dubois, J., Hertz-Pannier, L., & Dehaene, S. (2010). Language or music, mother or Mozart? Structural and environmental influences on infants' language networks. *Brain and Language*, 114(2), 53-65. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2009.09.003>
- Dennis, N. A., & Cabeza, R. (2011). Age-related dedifferentiation of learning systems : An fMRI study of implicit and explicit learning. *Neurobiology of Aging*, 32(12), 2318.e17-30. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2010.04.004>
- Duffau, H. (2018). The error of Broca : From the traditional localizationist concept to a connectomal anatomy of human brain. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 89, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2017.04.003>
- Edlin, J. M., Leppanen, M. L., Fain, R. J., Hackländer, R. P., Hanaver-Torrez, S. D., & Lyle, K. B. (2015). On the use (and misuse?) of the Edinburgh Handedness Inventory. *Brain and Cognition*, 94, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2015.01.003>
- Elias, L. J., & Bryden, M. P. (1998). Footedness is a better predictor of language lateralisation than handedness. *Laterality*, 3(1), 41-51. <https://doi.org/10.1080/713754287>
- Elias, L. J., Bryden, M. P., & Bulman-Fleming, M. B. (1998). Footedness is a better predictor than is handedness of emotional lateralization. *Neuropsychologia*, 36(1), 37-43. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(97\)00107-3](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(97)00107-3)
- Forster, K. I., & Forster, J. C. (2003). DMDX : A Windows display program with millisecond accuracy. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 35(1), 116-124. <https://doi.org/10.3758/BF03195503>

- Friederici, A. D., Brauer, J., & Lohmann, G. (2011). Maturation of the language network : From inter- to intrahemispheric connectivities. *PLoS One*, 6(6), e20726. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020726>
- Gabbard, C. (1993). Foot laterality during childhood : A review. *The International Journal of Neuroscience*, 72(3-4), 175-182. <https://doi.org/10.3109/00207459309024106>
- Grosjean, F., & Li, P. (2013). *The Psycholinguistics of Bilingualism*. John Wiley & Sons.
- Hausmann, M. (2010). Hormonal effects on the plasticity of cognitive brain functions. *WIREs Cognitive Science*, 1(4), 607-612. <https://doi.org/10.1002/wcs.21>
- Hausmann, M., Becker, C., Gather, U., & Güntürkün, O. (2002). Functional cerebral asymmetries during the menstrual cycle : A cross-sectional and longitudinal analysis. *Neuropsychologia*, 40(7), 808-816. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00179-8](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00179-8)
- Hausmann, M., Behrendt-körbitz, S., Kautz, H., Lamm, C., Radelt, F., & Güntürkün, O. (1998). Sex differences in oral asymmetries during wordrepetition. *Neuropsychologia*, 36(12), 1397-1402. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(98\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(98)00027-X)
- Hausmann, M., Brysbaert, M., van der Haegen, L., Lewald, J., Specht, K., Hirnstein, M., Willemin, J., Barton, J., Buchilly, D., Chmetz, F., Roch, M., Brederoo, S., Dael, N., & Mohr, C. (2019). Language lateralisation measured across linguistic and national boundaries. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 111, 134-147. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.10.020>
- Hausmann, M., Durmusoglu, G., Yazgan, Y., & Güntürkün, O. (2004). Evidence for reduced hemispheric asymmetries in non-verbal functions in bilinguals. *Journal of Neurolinguistics*, 17(4), 285-299. [https://doi.org/10.1016/S0911-6044\(03\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S0911-6044(03)00049-6)
- Hausmann, M., & Güntürkün, O. (1999). Sex Differences in Functional Cerebral Asymmetries in a Repeated Measures Design. *Brain and Cognition*, 41(3), 263-275. <https://doi.org/10.1006/brcg.1999.1126>
- Hausmann, M., Hamm, J. P., Waldie, K. E., & Kirk, I. J. (2013). Sex hormonal modulation of interhemispheric transfer time. *Neuropsychologia*, 51(9), 1734-1741. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.05.017>
- Hécaen, H. (1984). *Les gauchers : Étude neuropsychologique*. FeniXX.
- Hirnstein, M., Hausmann, M., & Güntürkün, O. (2008). The evolutionary origins of functional cerebral asymmetries in humans : Does lateralization enhance parallel processing? *Behavioural Brain Research*, 187(2), 297-303. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2007.09.023>
- Hirnstein, M., Hugdahl, K., & Hausmann, M. (2014). How brain asymmetry relates to performance – a large-scale dichotic listening study. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00997>
- Hirnstein, M., Hugdahl, K., & Hausmann, M. (2019). Cognitive sex differences and hemispheric asymmetry : A critical review of 40 years of research. *Laterality*, 24(2), 204-252. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2018.1497044>
- Hirnstein, M., Leask, S., Rose, J., & Hausmann, M. (2010). Disentangling the relationship between hemispheric asymmetry and cognitive performance. *Brain and Cognition*, 73(2), 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.04.002>
- Hiscock, M., Perachio, N., & Inch, R. (2001). Is there a sex difference in human laterality? IV. An exhaustive survey of dual-task interference studies from six neuropsychology journals. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 23(2), 137-148. <https://doi.org/10.1076/j.cen.23.2.137.1206>
- Holland, S. K., Plante, E., Weber Byars, A., Strawsburg, R. H., Schmithorst, V. J., & Ball, W. S. (2001). Normal fMRI brain activation patterns in children performing a verb generation task. *NeuroImage*,

- 14(4), 837-843. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0875>
- Hugdahl, K. (2000). Lateralization of cognitive processes in the brain. *Acta Psychologica*, 105(2), 211-235. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(00\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(00)00062-7)
- Hull, R., & Vaid, J. (2006). Laterality and language experience. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 11(5), 436-464. <https://doi.org/10.1080/13576500600691162>
- Hull, R., & Vaid, J. (2007). Bilingual language lateralization : A meta-analytic tale of two hemispheres. *Neuropsychologia*, 45(9), 1987-2008. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.03.002>
- Hunter, Z. R., & Brysbaert, M. (2008). Visual half-field experiments are a good measure of cerebral language dominance if used properly : Evidence from fMRI. *Neuropsychologia*, 46(1), 316-325. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.07.007>
- Isaacs, K. L., Barr, W. B., Nelson, P. K., & Devinsky, O. (2006). Degree of handedness and cerebral dominance. *Neurology*, 66(12), 1855-1858. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000219623.28769.74>
- Josse, G., Mazoyer, B., Crivello, F., & Tzourio-Mazoyer, N. (2003). Left planum temporale : An anatomical marker of left hemispheric specialization for language comprehension. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 18(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2003.08.007>
- Kemp, S., Prendergast, G., Karapanagiotidis, T., Baker, G., Kelly, T. P., Patankar, T., & Keller, S. S. (2018). Concordance between the Wada test and neuroimaging lateralization : Influence of imaging modality (fMRI and MEG) and patient experience. *Epilepsy & Behavior: E&B*, 78, 155-160. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2017.09.027>
- Keuleers, E., & Brysbaert, M. (2010). Wuggy : A multilingual pseudoword generator. *Behavior Research Methods*, 42(3), 627-633. <https://doi.org/10.3758/BRM.42.3.627>
- Klein, D., Mok, K., Chen, J.-K., & Watkins, K. E. (2014). Age of language learning shapes brain structure : A cortical thickness study of bilingual and monolingual individuals. *Brain and Language*, 131, 20-24. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.05.014>
- Knecht, S., Jansen, A., Frank, A., van Randenborgh, J., Sommer, J., Kanowski, M., & Heinze, H. J. (2003). How atypical is atypical language dominance? *NeuroImage*, 18(4), 917-927. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00039-9)
- Krach, S., Chen, L. M., & Hartje, W. (2006). Comparison between visual half-field performance and cerebral blood flow changes as indicators of language dominance. *Laterality*, 11(2), 122-140. <https://doi.org/10.1080/13576500500384975>
- Kundu, B., Rolston, J. D., & Grandhi, R. (2019). Mapping language dominance through the lens of the Wada test. *Neurosurgical Focus*, 47(3), E5. <https://doi.org/10.3171/2019.6.FOCUS19346>
- Liu, H., & Cao, F. (2016). L1 and L2 processing in the bilingual brain : A meta-analysis of neuroimaging studies. *Brain and Language*, 159, 60-73. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.05.013>
- Mazoyer, B., Zago, L., Jobard, G., Crivello, F., Joliot, M., Perchey, G., Mellet, E., Petit, L., & Tzourio-Mazoyer, N. (2014). Gaussian Mixture Modeling of Hemispheric Lateralization for Language in a Large Sample of Healthy Individuals Balanced for Handedness. *PLOS ONE*, 9(6), e101165. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101165>
- Mellet, E., Jobard, G., Zago, L., Crivello, F., Petit, L., Joliot, M., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2014). Relationships between hand laterality and verbal and spatial skills in 436 healthy adults balanced for handedness. *Laterality*, 19(4), 383-404. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2013.796965>
- Miles, W. R. (1929). Ocular dominance demonstrated by unconscious sighting. *Journal of Experimental Psychology*, 12(2), 113-126. <https://doi.org/10.1037/h0075694>
- Miles, W. R. (1930). Ocular Dominance in Human Adults. *The Journal of General Psychology*, 3(3), 412-430. <https://doi.org/10.1080/00221309.1930.9918218>

- Mohr, C., Michel, C. M., Lantz, G., Ortigue, S., Viaud-Delmon, I., & Landis, T. (2005). Brain State-dependent Functional Hemispheric Specialization in Men but not in Women. *Cerebral Cortex*, *15*(9), 1451-1458. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi025>
- Muraleedharan, A., Ragavan, S., & Devi, R. (2020). Are Footedness and Lateral Postures Better Predictors of Hemispheric Dominance Than Handedness : A Cross-sectional Questionnaire-Based Clinical and Pedigree Study. *Journal of Neurosciences in Rural Practice*, *11*(1), 130-134. <https://doi.org/10.1055/s-0039-3400699>
- Ocklenburg, S., & Gunturkun, O. (2017). *The Lateralized Brain : The Neuroscience and Evolution of Hemispheric Asymmetries*. Academic Press.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness : The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, *9*(1), 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Paradis, M., & Lebrun, Y. (1983). La neurolinguistique du bilinguisme : Représentation et traitement de deux langues dans un même cerveau. *Langages*, *18*(72), 7-13. <https://doi.org/10.3406/lgge.1983.1188>
- Park, H. R. P., Badzakova-Trajkov, G., & Waldie, K. E. (2012). Language lateralisation in late proficient bilinguals : A lexical decision fMRI study. *Neuropsychologia*, *50*(5), 688-695. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.01.005>
- Perani, D., Saccuman, M. C., Scifo, P., Anwander, A., Awander, A., Spada, D., Baldoli, C., Poloniato, A., Lohmann, G., & Friederici, A. D. (2011). Neural language networks at birth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *108*(38), 16056-16061. <https://doi.org/10.1073/pnas.1102991108>
- Perrone-Bertolotti, M., Tzourio-Mazoyer, N., Hoyau, E., Mazoyer, B., & Baciú, M. (2016). *Latéralisation hémisphérique du langage : Résultats des études comportementales et de la neuroimagerie* (p. 147-166).
- Price, C. J. (2000). The anatomy of language : Contributions from functional neuroimaging. *Journal of Anatomy*, *197 Pt 3*, 335-359. <https://doi.org/10.1046/j.1469-7580.2000.19730335.x>
- Ressel, V., Wilke, M., Lidzba, K., Lutzenberger, W., & Krägeloh-Mann, I. (2008). Increases in language lateralization in normal children as observed using magnetoencephalography. *Brain and Language*, *106*(3), 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2008.01.004>
- Seghier, M. L. (2008). Laterality index in functional MRI : Methodological issues. *Magnetic Resonance Imaging*, *26*(5), 594-601. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2007.10.010>
- Sommer, I. E., Aleman, A., Somers, M., Boks, M. P., & Kahn, R. S. (2008). Sex differences in handedness, asymmetry of the Planum Temporale and functional language lateralization. *Brain Research*, *1206*, 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.01.003>
- Soto, D., Inclán, F., Leiros, L., & Blanco, M. (2008). A new method to asses eye dominance. *Psicológica*, *29*.
- Stroobant, N., Buijs, D., & Vingerhoets, G. (2009). Variation in brain lateralization during various language tasks : A functional transcranial Doppler study. *Behavioural Brain Research*, *199*(2), 190-196. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.11.040>
- Tran, U. S., Stieger, S., & Voracek, M. (2014). Evidence for general right-, mixed-, and left-sidedness in self-reported handedness, footedness, eyedness, and earedness, and a primacy of footedness in a large-sample latent variable analysis. *Neuropsychologia*, *62*, 220-232. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.07.027>
- Tzourio-Mazoyer, N., Petit, L., Razafimandimby, A., Crivello, F., Zago, L., Jobard, G., Joliot, M., Mellet, E., & Mazoyer, B. (2010). Left hemisphere lateralization for language in right-handers is controlled in part by familial sinistrality, manual preference strength, and head size. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *30*(40), 13314-13318.

- <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2593-10.2010>
- University of Cambridge Local Examinations Syndicate. (2001a). *Quick Placement Test*. Oxford University Press.
- University of Cambridge Local Examinations Syndicate. (2001b). *Quick Placement Test*. Oxford University Press.
- van Melick, N., Meddeler, B., Hoogeboom, T., Nijhuis-van der Sanden, M., & Cingel, R. (2017). How to determine leg dominance : The agreement between self-reported and observed performance in healthy adults. *PLOS ONE*, *12*, e0189876. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189876>
- Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P.-Y., Jobard, G., Petit, L., Crivello, F., Mellet, E., Zago, L., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2011). What is right-hemisphere contribution to phonological, lexico-semantic, and sentence processing? Insights from a meta-analysis. *NeuroImage*, *54*(1), 577-593. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.07.036>
- Voyer, D. (1998). On the Reliability and Validity of Noninvasive Laterality Measures. *Brain and Cognition*, *36*(2), 209-236. <https://doi.org/10.1006/brcg.1997.0953>
- Voyer, D. (2011). Sex differences in dichotic listening. *Brain and Cognition*, *76*(2), 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.02.001>
- Waldie, K. E., & Mosley, J. L. (2000). Developmental trends in right hemispheric participation in reading. *Neuropsychologia*, *38*(4), 462-474. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(99)00091-3)
- Wernicke, C. (1874). *Der aphasische Symptomencomplex : Eine psychologische Studie auf anatomischer Basis*. Cohn.
- Willemin, J., Hausmann, M., Brysbaert, M., Dael, N., Chmetz, F., Fioravera, A., Gieruc, K., & Mohr, C. (2016). Stability of right visual field advantage in an international lateralized lexical decision task irrespective of participants' sex, handedness or bilingualism. *Laterality*, *21*(4-6), 502-524. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2015.1130716>
- World Medical Association Declaration of Helsinki : Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. (2013). *JAMA*, *310*(20), 2191-2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>
-

Discussion additionnelle et perspectives cliniques

I. Aspects méthodologiques et statistiques de notre étude

1. Définition du niveau de LV2 des participants

La plupart des études parlent de « bilingues » ou « non-bilingues », mais nous avons choisi ici de parler de « niveau de maîtrise de la seconde langue » (LV2), puisque le bi/plurilinguisme est très difficile à définir (certains considérant comme bilingues les personnes maîtrisant parfaitement les deux langues, d'autres ceux utilisant les deux langues dans la vie quotidienne ; Fratti et al., 2011; Grosjean, 1989; Laganaro, 2014; Lorenzen Bonnie & Murray Laura L., 2008; Macnamara, 1967; Paradis & Libben, 2014), apprendre une LV2 nous a alors paru plus complexe que cette simple dichotomie bilingues/monolingues. Les tableaux descriptifs du CECRL (Cadre Européen Commun de Référence pour les Langues) (Council of Europe, 2001b) sont proposés pour chaque sous-niveau, à travers différentes compétences linguistiques, à savoir la compréhension (elle-même divisée entre l'écoute et la lecture), la parole (divisée entre l'interaction orale et la production orale continue) ainsi que l'écriture. Le CECRL est considéré comme opérant à un niveau abstrait, comme un modèle, plutôt que comme un véritable cadre où le contenu et les spécifications des tests seraient clairement définis. Mais alors, comment décider d'un niveau « global » de LV2 pour une personne, alors qu'une langue représente autant de compétences différentes ? Le choix va évidemment être subjectif, et non représentatif de toutes ces compétences (une personne peut être B1 en écriture mais C1 en écoute par exemple). Les échelles du CECRL sont seulement purement descriptives, et donc relatives et subjectives, basées parfois sur l'intuition et l'empirique (comme expliqué par Fulcher, 2003), et ayant de nombreuses limites (comme l'a présenté l'étude de Cephe & Toprak, 2014). A propos des tests de langage « objectifs » que nous avons choisis, ce que les précédentes études avaient recommandé de faire (Hausmann et al., 2019), il n'a pas été aisé de trouver des tests de positionnement rapides et gratuits. Cela nous apparaît comme un élément primordial à développer pour de futures recherches scientifiques, ainsi que pour le domaine de l'éducation. Le Quick Placement Test (University of Cambridge Local Examinations Syndicate, 2001) était disponible en CD-ROM ou dans une version papier-crayon. Nous avons utilisé la version 2 papier-crayon photocopiable, utilisée également à des fins pédagogiques par l'Université de Bordeaux, car cela était accessible et gratuit, à l'inverse de la version CD-ROM. La version papier-crayon inclut tous les types de questions du CD-ROM (lecture, vocabulaire et structures grammaticales), à l'exception de la compréhension orale. Tous les items sont des questions à choix multiples. Répondre aux 60 questions prenait environ 30-40 minutes, et les résultats donnaient un niveau de compétence linguistique selon le CECRL (de A1 à C2). Nous avons ajouté à cela un test d'espagnol, car de nombreux individus dans le Sud de la France sont de meilleurs locuteurs espagnols qu'anglais. Nous avons également eu l'opportunité de tester un bon nombre de Français bilingues vivant au Pérou. Un tel test n'était pas directement disponible pour l'espagnol, c'est pourquoi nous avons décidé d'utiliser le DIALANG, et son test de vocabulaire en espagnol. DIALANG est un très bon outil pour une étude telle que celle-ci. Il s'agit d'un « système d'évaluation destiné aux apprenants en langues qui

souhaitent obtenir des informations diagnostiques sur leurs compétences (Council of Europe, 2001, p. 226), outil pouvant tester 14 langues différentes. Il peut être utilisé en ligne, gratuitement, donc facilement accessible à tous, mais il reste un test informel, qui ne fournit aucun certificat à la fin. Le seul moyen de sauvegarder les résultats des participants était alors de prendre des captures d'écran de ceux-ci. Si le DIALANG pouvait tester toutes les compétences du langage (écoute, écriture, lecture, structures grammaticales et vocabulaire), et de cette manière être le test de langue gratuit le plus représentatif possible des compétences en LV2, cela prendrait toutefois trop de temps pour une telle étude, puisque chaque test de compétence prend environ 30 minutes. Nous avons alors dû choisir qu'un seul test de compétence, et avons adopté celui de vocabulaire, car il s'agissait de celui se rapprochant le plus de ce à quoi le test de placement en anglais ressemblait à notre sens. De surcroît, le test espagnol du DIALANG n'était pas vraiment approprié pour les personnes parlant un espagnol d'Amérique Latine, qui possède quelques différences avec l'espagnol d'Espagne ; cela donnait donc souvent un niveau (ou plus) plus bas que le réel niveau attendu des participants.

Par conséquent, le niveau de maîtrise de LV2 d'un participant pouvait varier selon le test utilisé, les compétences testées, ou la disposition du participant le jour où le test était réalisé... C'est pourquoi nous avons choisi de ne pas nous en remettre uniquement au Quick Placement Test ou au DIALANG (qui sont également subjectifs, et non représentatifs de toutes les compétences), ni uniquement à l'auto-questionnaire, mais aux deux, dans le but de déterminer pour chaque participant un niveau général de maîtrise de LV2 apparaissant comme le plus représentatif possible.

2. Intégration d'hispanophones à l'étude

Les mots du TLDT existent en français, en italien, en allemand, en néerlandais et en anglais, mais pas en espagnol. Par conséquent, ce test est entièrement adapté pour la Suisse par exemple (Willemin et al., 2016), mais ne reflète pas totalement le contexte linguistique français, ou évidemment celui de beaucoup de pays à travers le monde. Toutefois, 10 mots du TLDT sur les 16 existent et sont fréquents en espagnol également ; et pour les 6 non-existants, quelques-uns possèdent seulement de légères différences. Nous pouvons suggérer que la langue espagnole n'ait pas eu un impact majeur sur cette étude pour plusieurs raisons, et ainsi que le TLDT semble valide et fiable dans de telles conditions. Premièrement, le français était la langue première (LV1) pour tous nos participants dans la présente étude. Deuxièmement, nous savons que la latéralisation du langage pour la LV2 reflète la latéralisation du langage de la LV1, au moins pour les bilingues tardifs (Hull & Vaid, 2007). Enfin, Hausmann et al. (2019) ont suggéré que les différences de fréquences de certains mots pouvaient avoir contribué, au moins partiellement, à des réponses plus ou moins bonnes en exactitude (ACCs) et en temps de réponse (RTs), mais que ces différences de groupes dans les performances globales n'ont pas interagi avec l'hémichamp visuel préférentiel, indiquant des degrés similaires de latéralisation du langage dans tous les groupes, peu importe la langue parlée. Les très légères variations entre les groupes linguistiques dans l'avantage de l'hémichamp-visuel droit/HG dans l'étude de Hausmann et al. (2019) rendent plutôt improbable le fait que ces facteurs aient joué

un rôle majeur dans la latéralisation du langage telle que mesurée avec le TLDT. Nous pouvons également noter que d'autres études en cours utilisent le TLDT à l'étranger, dont certaines à Buenos Aires, en Argentine.

Dans notre étude, 20 participants ont été recrutés à Lima, au Pérou, mais, à notre connaissance, il n'existe pas d'étude portant à strictement parler sur l'effet de vivre à l'étranger, avec une immersion linguistique quotidienne différente de la LV1. Nous pourrions supposer qu'un Français vivant en France ou au Pérou n'aura pas exactement la même organisation cérébrale, mais l'impact ne semble en fait pas différent de l'impact du plurilinguisme et du pluriculturalisme et de l'effet de la maîtrise d'une langue étrangère. Et, comme nous venons de l'évoquer, le français était la LV1 pour tout le monde, et la latéralisation de la langue en L2 reflète la latéralisation de la langue en L1 (Hull & Vaid, 2007).

L'analyse de nos résultats semblait aller dans ce sens, puisqu'après une régression linéaire entre les IA (indices d'asymétrie) et l'immersion linguistique quotidienne (participants en France vs au Pérou), nous n'avons pas du tout trouvé d'effet significatif pour les IA au niveau de l'exactitude des réponses, $F(1, 80) = .03$, $p < .86$, ou pour les IA au niveau du temps de réaction, $F(1, 80) = .006$, $p < .94$.

3. Choix des tests statistiques

La régression linéaire nous a permis de questionner les facteurs associés avec une augmentation ou une diminution du score de latéralisation, que ce soit vers la droite ou vers la gauche, et nous avons trouvé qu'une augmentation ou une diminution du score pouvait être associé avec une augmentation ou une diminution du score de latéralité podale (calculé avec les scores au Waterloo Footedness Questionnaire ou WFQ), ainsi qu'avec une augmentation ou diminution du niveau de maîtrise d'une LV2 (les scores étant significativement différents entre les sujets peu compétents et les sujets modérément ou hautement compétents). Cependant, cette analyse ne nous permettait pas de mettre en évidence les facteurs associés à cette latéralisation du langage, que ce soit à droite ou à gauche. Cela expliquait en effet pour quelles raisons nous pouvions nous éloigner du score de latéralisation de +100, mais pas pourquoi nous étions latéralisés de manière typique ou atypique. C'est pourquoi nous avons réalisé une régression logistique. Nous avons alors trouvé que le facteur le plus important associé à la latéralisation du langage était la latéralité podale (calculée avec les scores au WFQ). Cela paraît sensé que le niveau de maîtrise d'une seconde langue ne puisse pas déterminer si une personne fait partie de celles latéralisées typiquement (groupe 0) ou atypiquement (groupe 1), ceci étant acquis au cours de la vie, là où la latéralité naturelle plus.

II. **Limites de l'utilisation du TLDT**

Le TLDT semble être une mesure fiable et un test approprié sur de très grands échantillons, mais il reste toutefois trop subjectif pour être pertinent à un niveau individuel (il ne permet pas vraiment de connaître la latéralisation hémisphérique d'une personne, ou d'affirmer qu'il est *strongly-atypical* par exemple). Même si le

paradigme en champs visuels divisés est économique et facile à administrer, il peut être difficilement valide à petite échelle, étant donné également qu'il y a beaucoup de participants à exclure, du fait de la difficulté d'être au-dessus du niveau de hasard (*chance level*). Une telle étude se garderait de vouloir représenter la latéralisation hémisphérique comme le peuvent les techniques de neuroimagerie, comme dans l'étude de Mazoyer et al. (2014) par exemple : ici notre fourchette pour les IA est plus étroite, et pas véritablement entre -100 et +100, car tous les participants potentiellement les plus latéralisés ont été exclus, le niveau de hasard empêchant quelqu'un d'avoir d'excellents scores dans un seul hémichamp visuel, et pratiquement aucune réponse dans l'autre hémichamp visuel. En effet, toutes les personnes ayant obtenu moins de 18 bonnes réponses du côté de leur hémichamp non-dominant ont dû être écartées de l'analyse.

En plus de ne pas être le paradigme le plus adéquat pour étudier l'effet de l'âge sur la latéralisation, comme nous l'avons évoqué dans notre article, par la tâche de lecture et par la relative difficulté due à la présentation extrêmement rapide des stimuli, cela n'apparaît pas non plus être la technique la plus indiquée pour étudier spécifiquement les *strongly-atypicals*, par la rareté de ceux-ci et le manque d'analyse fiable au niveau individuel évoqué plus haut.

Bourne (2006) conseillait d'évaluer la préférence manuelle lors d'une tâche en hémichamps visuels divisés, afin de ne prendre que les individus droitiers par exemple, dans le but d'éviter les schémas de latéralisation atypique, et ainsi d'augmenter la fiabilité de la tâche. Cette affirmation a tout d'abord été remise en question par les résultats de Mazoyer et al. (2014) sur le lien (erroné) entre la gaucherie et la latéralisation atypique. De plus, des participants gauchers ont été inclus à l'étude de Hunter & Brysbaert (2008) afin d'augmenter la fourchette des indices d'asymétrie. Plus récemment, Willems et al. (2014) ont précisément préconisé d'inclure spécifiquement les gauchers dans les études neuroscientifiques et neurogénétiques, au lieu de les exclure, car cela permettrait d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement du cerveau, ainsi que d'avoir une vision plus précise de la latéralisation cérébrale et de ses fondements génétiques.

III. Perspectives pour les connaissances et la pratique clinique

1. Perspectives pour la recherche fondamentale et clinique

Ce protocole a un objectif plutôt axé vers la recherche fondamentale et clinique en neurolinguistique et en orthophonie que vers la pratique orthophonique en elle-même.

Cette étude permet d'aller vers une meilleure compréhension de la latéralisation du langage dans la population générale, à l'aide d'un test bien plus accessible que nombre d'autres, mais également de mieux comprendre les possibles facteurs influençant sur l'organisation cérébrale de tout un chacun, notamment l'effet d'un apprentissage comme celui d'une langue nouvelle. Il apparaît que la latéralité podale devrait être plus souvent, si ce n'est systématiquement, prise en compte, et son évaluation devrait en tout cas ne pas être interchangeable avec le recueil de la latéralisation manuelle, dont l'importance apparaît comme souvent surestimée.

De plus, par sa nature translingue, transculturelle, simple d'utilisation et non-onéreuse, le TLDT continuera certainement à être utilisé dans de telles études, permettant d'étudier la latéralisation du langage à plus grande échelle, et à travers le monde.

a. L'étude de la latéralisation dans les troubles du langage

Une utilisation de cette tâche dans des études cliniques peut également être à envisager, chez des sujets présentant des troubles du langage (spécifiques ou non) par exemple.

Certaines études concluent que l'architecture du cerveau pour le langage en cas de dyslexie (trouble spécifique de la lecture) est latéralisée de la même manière que chez les enfants non dyslexiques, comme celle de Helland et al. (2018) qui utilisent une tâche d'écoute dichotique, là où de nombreuses autres études supposent une latéralisation cérébrale différente, anatomique comme fonctionnelle (voir par exemple Hakvoort et al., 2016; Leonard & Eckert, 2008; Mather, 2003). Chez les dyslexiques, les réseaux de l'HG paraissent moins s'activer durant des tâches de lecture en comparaison des normo-lecteurs (McCandliss et al., 2003; Richlan et al., 2009), et quelques études ont même observé une activation accrue dans l'HD plutôt que l'HG (Dufor et al., 2007; K. R. Pugh et al., 2000, 2008). Pris ensemble, ces résultats tirés d'études en neuroimagerie semblent soutenir qu'une activation cérébrale plus symétrique reflèterait potentiellement un processus non-optimal, résultant en une lecture plus lente (Sandak et al., 2004). De manière générale, avoir un cerveau latéralisé semble améliorer son efficacité dans les tâches cognitives qui exigent l'utilisation simultanée mais différente des deux hémisphères (Rogers et al., 2004). Cette différence de symétrie HG-HD chez les dyslexiques a longtemps été expliquée comme une possible cause de ce trouble spécifique du langage (voir Hakvoort et al., 2016), mais Bishop (2013) la considère plutôt comme une conséquence. Du point de vue anatomique, à l'aide d'analyse d'IRM d'enfants et d'adultes souffrant de troubles de la lecture et du langage, Leonard & Eckert (2008) ont permis d'identifier deux groupes présentant des profils anatomiques contrastés lors de la tâche de lecture. Les personnes ayant des cerveaux petits et symétriques ont tendance à présenter des déficits dans de multiples domaines du langage écrit et oral, tandis que celles qui ont des structures asymétriques plus importantes sont plus susceptibles de présenter les déficits phonologiques isolés observés chez les adultes atteints de dyslexie compensée. Les personnes dont le cerveau est de taille modérée et asymétrique affichent généralement les meilleures performances globales. Comme expliqué par Leonard et Eckert, des recherches plus approfondies pourraient permettre de déterminer si les altérations phonologiques dans ces deux groupes sont associées à des facteurs de risques génétiques et environnementaux différents nécessitant des types d'intervention différents. Une asymétrie du planum temporal est aussi souvent relevée dans les cas de dyslexie ou de dyslexie familiale (Bloom et al., 2013; Vanderauwera et al., 2018), tout comme la duplication du gyrus de Heschl (Marie et al., 2015). Cependant, le lien entre les asymétries anatomiques et les asymétries fonctionnelles demeure faible et bien que certaines études aient démontré ce lien (Josse et al., 2006, 2009; Tzourio et al., 1998), d'autres ne sont pas parvenues à l'établir (Dorsaint-Pierre et al., 2006).

Dans son étude avec des adolescents dyslexiques et dysgraphiques, via un paradigme comportemental et moteur, Mather (2003) conclut que les individus dyslexiques et dysorthographiques (trouble spécifique de l'orthographe) partagent une limitation de traitement de l'hémisphère gauche qui ne se limite pas au langage écrit. À la lumière d'autres résultats de recherche qu'il juge pertinents, il suggère que cette limitation est due à un mauvais mécanisme de balayage, ne permettant pas de convertir les données spatiales (par exemple, les modèles orthographiques) en une forme temporelle – une déficience supposée être causée par la tentative d'enseigner le langage écrit à des enfants qui tardent à établir une dominance motrice de l'hémisphère gauche.

La latéralisation cérébrale du langage dans le cas de la dysphasie (trouble spécifique du langage oral) a également été étudiée (de Guibert et al., 2011), même si les résultats des études de neuroimagerie fonctionnelle sont rares et inconsistants, en partie à cause de l'hétérogénéité des troubles (Dibbets et al., 2006; Ellis Weismer et al., 2005; K. Hugdahl et al., 2004). De Guibert et al., 2011 ont réalisé une étude en IRMf avec des enfants dysphasiques vs non-dysphasiques, en utilisant un panel de tâches langagières ne nécessitant ni lecture ni compétences métalinguistiques (tâches auditives et visuelles). Les enfants atteints de troubles spécifiques du langage ont présenté un manque significatif de latéralisation à gauche dans toutes les régions fondamentales du langage (gyrus frontal inférieur-opercularis, gyrus frontal inférieur-triangularis, gyrus supramarginal et gyrus temporal supérieur), mais aucune différence de latéralisation pour le reste du cerveau. Ce sous-type de trouble spécifique du langage paraît donc bien associé à une latéralisation et un fonctionnement atypiques des zones centrales du langage, ce qui mériterait d'être approfondi.

Cette asymétrie atypique du cerveau et notamment du langage est également retrouvé dans d'autres troubles du langage non spécifiques : dans l'autisme par exemple (Bigler et al., 2007; De Fossé et al., 2004; Flagg et al., 2005; Joseph et al., 2014), même si l'asymétrie des zones du langage comme Broca paraît davantage liée à un trouble du langage qu'à un diagnostic spécifique d'autisme (De Fossé et al., 2004).

La tâche du TLDT peut toutefois être difficile à utiliser avec des personnes ayant des troubles du langage, notamment dyslexiques, par l'importante attention soutenue et visuelle requise (les dyslexiques ayant fréquemment des déficits attentionnels), et par bien sûr la lecture rapide des mots. Nous pouvons remarquer qu'une de nos participantes était diagnostiquée dysphasique et n'a pas eu de difficulté particulière avec la tâche, mais que la variabilité des troubles et de leurs symptômes peut rendre ardu le recrutement de ces participants. Nous pouvons alors conseiller d'utiliser d'autres techniques que celle-ci pour étudier ces troubles, telles que la méthode d'écoute dichotique, ou des techniques de neuroimagerie.

D'autres cas cliniques semblables peuvent être à relever et une piste de recherche à investiguer. Hodgson & Hudson (2017) ont par exemple trouvé une latéralisation du langage atypique chez des adultes avec un trouble de la coordination développementale (ou dyspraxie), démontrée avec la méthode du Doppler Transcranien fonctionnel.

b. Une latéralisation peu étudiée chez les bègues

Au début du XX^{ème} siècle, des chercheurs de l'Iowa ont publié articles et livres soutenant que le développement du bégaiement était lié au fait de forcer des enfants naturellement gauchers à devenir droitiers ; la latéralité manuelle (et certainement encore plus podale) et la latéralisation cérébrale du langage étant considérés comme ayant certains facteurs ontogénétiques communs (Ocklenburg et al., 2014). Cette théorie est controversée aujourd'hui, mais il apparaît tout de même que ce stress peut augmenter ou révéler le bégaiement, toutefois expliqué par une pluralité de raisons, dont neurologiques et héréditaires (pour une revue voir Kushner, 2012). A partir de telles observations, cela a ouvert la porte à la question plus large du rôle de la faible latéralisation dans le bégaiement. De nombreuses études plus récentes, certaines avec des techniques de neuroimagerie, ont conclu à une latéralisation hémisphérique plus faible voire atypique chez les personnes bègues (Foundas et al., 2003), et ont suggéré que le bégaiement serait lié à un signal de transmission perturbé entre les deux hémisphères (pour une revue Büchel & Sommer, 2004). Il apparaît que les gauchers, les « gauchers contrariés » ou les ambidextres sont plus nombreux chez les bègues (Bryngelson Bryng, 1939), sans toutefois que ces liens aient été amplement explorés.

Une ouverture très intéressante serait d'utiliser le protocole de la présente étude pour tenter de comprendre les différences de latéralisation du langage chez les personnes bègues ou non fluentes, différences ayant déjà été démontrées, mais peu approfondies (Kushner, 2012), ce qui pourrait mener à une meilleure compréhension de ces troubles et donc une meilleure prise en charge.

c. Les fonctions langagières chez les patients avec des lésions unilatérales

Il serait intéressant de pouvoir localiser les fonctions langagières chez les patients avec des lésions unilatérales à travers un protocole simple et accessible à tous. Toutefois, le paradigme de notre étude paraît impossible à appliquer avec ce type de pathologie, car il serait alors limité aux personnes n'ayant pas de troubles aphasiques touchant la lecture, ni un déficit attentionnel ou moteur de l'hémi-espace, troubles très fréquents chez les personnes aphasiques suite à un AVC par exemple. Une telle étude devrait alors être menée avec d'autres techniques comportementales ou de neuroimagerie (voir Introduction).

Quant à l'aphasie bilingue, comme nous l'avons vu dans l'introduction, elle se compose d'une symptomatologie extrêmement variée et hétérogène, par des structures corticales langagières latéralisées différemment avant l'AVC selon les personnes et leur expérience bilingue, mais aussi par les phénomènes variés de plasticité cérébrale suite à cet accident. En ce qui concerne les programmes de réhabilitation pour les aphasiques multilingues, plusieurs questions ont été soulevées, dont beaucoup nécessitent encore une réponse satisfaisante. Il apparaît toutefois extrêmement important de les évaluer avec des tests comparables dans toutes leurs langues (Fabbro, 2001). Quant à la prise en charge de ces patients, bon nombre d'études ont montré un effet positif de la prise en charge dans une seule langue (souvent la seule possibilité dans certains services de rééducation), avec un possible transfert inter-langues, mais bien plus important si la prise en charge est réalisée

dans la LV1. Ce transfert ne reste toutefois pas assuré, et semble limité. Dans la plupart des situations, la rééducation proposée en LV2 n'aura donc pas d'effets sur la LV1, ce qui implique que l'autre langue devrait également être rééduquée lorsque cela est possible et nécessaire pour le patient (pour une revue voir Faroqi-Shah et al., 2010; ou encore Laganaro, 2014; ou Ansaldo & Saidi, 2014).

2. Perspectives pour la prise en charge en orthophonie de patients présentant de possibles variations de latéralisation

Il ne fait aucun doute que mieux comprendre les possibles variations de latéralisation et d'organisation cérébrale chez les patients permettra de meilleurs diagnostics et prises en charge orthophoniques. Ainsi, les orthophonistes, et autres professionnels médicaux et paramédicaux, sauront se questionner sur son fonctionnement cérébral face à un patient fortement gaucher, avec une gaucherie familiale et une préférence forte pour le pied gauche également, ou encore face à un patient en situation de plurilinguisme, cérébro-lésé, que ce soit dans la région du langage ou non, aphasique bilingue, ou encore bègue, voire investiguer plus au besoin. De plus, cette étude nous permet de mieux comprendre l'interaction entre la latéralité naturelle et la latéralisation du langage, et il pourrait être intéressant, évidemment dans un cadre de recherche scientifique, mais également dans un cadre clinique d'interroger, non pas seulement la latéralité manuelle, qui reste essentielle du fait de sa fonction dans l'écriture et bien d'autres tâches courantes évidemment, mais également la latéralité podale, lors des bilans orthophoniques et des anamnèses notamment. La simple question « Avec quel pied tapez-vous dans un ballon ? » semblerait déjà être un bon indicateur.

En outre, il peut être intéressant de diagnostiquer les cas de latéralité plus hésitantes et d'ambidextrie, car, selon certaines études, cela peut être un facteur de risque pour certains enfants, qui seront alors plus à même de développer des troubles du langage, des troubles scolaires, des troubles mentaux un TDA/H (trouble déficitaire de l'attention, avec ou sans hyperactivité) (Rodriguez et al., 2010). Ces résultats corroborent ceux d'études antérieures qui ont établi un lien entre l'ambidextrie et la dyslexie (Richardson, 1994). De plus, il a été grandement démontré qu'il y avait une forte prévalence de non-droitiers, et notamment d'ambidextres, dans des troubles psychiatriques comme les troubles schizophrènes (Hirnstein & Hugdahl, 2014; Oertel-Knöchel & Linden, 2011; Sommer et al., 2001; Tran & Voracek, 2015) ou bipolaires (Oertel-Knöchel & Linden, 2011; Ravichandran et al., 2017; Royer et al., 2015; Tréhout et al., 2017; van Dyck et al., 2012) ; avec des différences de latéralisation du langage considérées comme des biomarqueurs spécifiques de ces troubles (Oertel-Knöchel & Linden, 2011; Tréhout et al., 2017). Selon les chercheurs, il serait probable que des différences cérébrales puissent expliquer ces corrélations, mais pour valider cette hypothèse, il serait nécessaire de faire plus de recherches sur ce sujet ; par exemple de reprendre un protocole tel que celui-ci, ou d'utiliser des techniques de neuroimagerie, sur une plus large cohorte de sujets ambidextres.

Il va sans dire qu'il est primordial de comprendre les mécanismes sous-jacents des troubles ou pathologies des patients pris en charge en orthophonie afin de mieux les prendre en charge et induire une plasticité cérébrale

volontaire. Ainsi, différents mécanismes, même pour la prise en charge d'un même trouble, pourront peut-être induire des prises en charge différentes. Sur le plan de la prise en charge, les résultats de cette étude pourraient contribuer à des premières pistes de réflexion pour orienter et établir précisément des stratégies de réhabilitation, et permettre de créer de nouveaux protocoles, ou en tout cas donner de nouveaux éclairages dans le cadre de la prise en charge de patients étant à la fois aphasiques et bilingues, en s'appuyant sur l'organisation spécifique du langage chez des sujets ayant acquis une maîtrise avancée d'une LV2. Ainsi, un patient aphasique bilingue serait possiblement moins latéralisé sur le plan langagier qu'un patient monolingue, et la réhabilitation pourrait s'en trouver menée différemment, en sollicitant plus l'hémisphère droit par exemple (à travers des tâches faisant appel au chant, à la mélodie, ou à des inférences pragmatiques par exemple), ou via des thérapies prenant en compte les deux langues, comme cela a déjà pu être fait dans certaines études (Croft et al., 2011). Cela ne vaut évidemment pas que pour les aphasiques bilingues, mais également pour tous les autres patients pouvant potentiellement présenter des variables de latéralité comme présentées dans cette étude. Nous pouvons également citer une nouvelle fois l'étude de Leonard & Eckert (2008), tentant de distinguer différents processus cérébraux à l'œuvre dans des troubles de la lecture, afin de déterminer si des types d'interventions différents seraient profitables.

IV. Conclusion

Les résultats de la présente étude sont en accord avec les études précédentes sur le TLDT, indiquant que le TLDT est une tâche en hémichamps visuels divisés fiable pour évaluer la dominance hémisphérique du langage dans de grands échantillons, notamment en ce qui concerne l'exactitude des réponses (*accuracy*). La préférence manuelle est actuellement largement utilisée dans les études sur la latéralisation du langage, cependant, comme révélé dans notre étude ainsi que dans quelques précédentes, elle ne semble pas refléter de manière satisfaisante la latéralisation du langage, et la latéralité podale semble être plus appropriée, plus révélatrice. Nous avons également constaté un lien entre la latéralisation du langage et le niveau de maîtrise d'une seconde langue – les personnes ayant une faible maîtrise en LV2 tendant à avoir une plus forte dominance de l'HG pour le langage – alors qu'aucun effet de l'âge d'acquisition n'a été révélé. Ces facteurs n'interagissent pas parfaitement avec les résultats de la littérature, ceux-ci étant très inconsistants, certainement en raison de la grande hétérogénéité du phénomène de bilinguisme. Bien que les résultats de notre étude suggèrent une relation négative entre le degré d'asymétrie et la performance générale au TLDT, les éventuelles différences de performance dans les sous-groupes n'ont affecté que marginalement l'avantage de l'hémichamp visuel droit/HG dans cette tâche, ce qui en fait une mesure fiable et facile à administrer de la latéralisation du langage. Cette tâche peut être appliquée aussi bien dans un cadre expérimental que dans le contexte clinique, au-delà des frontières linguistiques et nationales, par exemple pour localiser les fonctions du langage chez les patients bègues, dont l'inconsistance de la latéralité n'a été que peu étudiée. Une meilleure connaissance de ces facteurs de latéralité semble également être à poursuivre, en vue de proposer de nouvelles approches de rééducation fonctionnelle. Enfin, il serait intéressant d'investiguer plus avant la complémentarité de la spécialisation hémisphérique, dont le langage n'est qu'une

facette. Si le langage fait partie d'un réseau spécialisé dominé par l'HG, ce n'est qu'en comprenant son intrication avec tous les autres réseaux spécialisés du cerveau, comme celui de l'attention visuo-spatiale par exemple, largement supporté par l'HD (que l'on sait notamment complémentaire dans le langage écrit), que nous pourrions mieux comprendre l'être humain et ses pathologies.

Bibliographie additionnelle

- Abutalebi, J., Miozzo, A., & Cappa, S. F. (2000). Do subcortical structures control 'language selection' in polyglots? Evidence from pathological language mixing. *Neurocase*, 6(1), 51-56. <https://doi.org/10.1080/13554790008402757>
- Aglioti, S., Beltramello, A., Girardi, F., & Fabbro, F. (1996). Neurolinguistic and follow-up study of an unusual pattern of recovery from bilingual subcortical aphasia. *Brain: A Journal of Neurology*, 119 (Pt 5), 1551-1564. <https://doi.org/10.1093/brain/119.5.1551>
- Ansaldo, A. I., & Saidi, L. G. (2014). *Aphasia Therapy in the Age of Globalization : Cross-Linguistic Therapy Effects in Bilingual Aphasia* [Review Article]. Behavioural Neurology; Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2014/603085>
- Baxendale, S., Thompson, P. J., & Duncan, J. S. (2008). The role of the Wada test in the surgical treatment of temporal lobe epilepsy : An international survey. *Epilepsia*, 49(4), 715-720; discussion 720-725. https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2007.01515_1.x
- Belliveau, J. W., Kennedy, D. N., McKinstry, R. C., Buchbinder, B. R., Weisskoff, R. M., Cohen, M. S., Vevea, J. M., Brady, T. J., & Rosen, B. R. (1991). Functional mapping of the human visual cortex by magnetic resonance imaging. *Science (New York, N.Y.)*, 254(5032), 716-719. <https://doi.org/10.1126/science.1948051>
- Bernard, F., Lemée, J.-M., Ter Minassian, A., & Menei, P. (2018). Right Hemisphere Cognitive Functions : From Clinical and Anatomic Bases to Brain Mapping During Awake Craniotomy Part I: Clinical and Functional Anatomy. *World Neurosurgery*, 118, 348-359. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.05.024>
- Bialystok, E., Craik, F. I. M., & Luk, G. (2012). Bilingualism : Consequences for mind and brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(4), 240-250. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.03.001>
- Bigler, E. D., Mortensen, S., Neeley, E. S., Ozonoff, S., Krasny, L., Johnson, M., Lu, J., Provencal, S. L., McMahon, W., & Lainhart, J. E. (2007). Superior temporal gyrus, language function, and autism. *Developmental Neuropsychology*, 31(2), 217-238. <https://doi.org/10.1080/87565640701190841>
- Binder, J. R. (2011). Functional MRI is a valid noninvasive alternative to Wada testing. *Epilepsy & Behavior: E&B*, 20(2), 214-222. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2010.08.004>
- Bishop, D. V. M. (2013). Cerebral asymmetry and language development : Cause, correlate, or consequence? *Science (New York, N.Y.)*, 340(6138), 1230531. <https://doi.org/10.1126/science.1230531>
- Bloom, J. S., Garcia-Barrera, M. A., Miller, C. J., Miller, S. R., & Hynd, G. W. (2013). Planum temporale morphology in children with developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 51(9), 1684-1692. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.05.012>
- Brederoo, S. G., Nieuwenstein, M. R., Lorist, M. M., & Cornelissen, F. W. (2017). Hemispheric specialization for global and local processing : A direct comparison of linguistic and non-linguistic stimuli. *Brain and Cognition*, 119, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.09.005>
- Bryngelson Bryng. (1939). A Study of Laterality of Stutterers and Normal Speakers. *Journal of Speech*

- Disorders*, 4(3), 231-234. <https://doi.org/10.1044/jshd.0403.231>
- Büchel, C., & Sommer, M. (2004). What causes stuttering? *PLoS Biology*, 2(2), E46. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0020046>
- Caligiore, D., Arbib, M. A., Miall, R. C., & Baldassarre, G. (2019). The super-learning hypothesis : Integrating learning processes across cortex, cerebellum and basal ganglia. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 100, 19-34. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.02.008>
- Cephe, P. T., & Toprak, E. T. (2014). The Common European Framework of Reference for Languages : Insights for language testing. *Journal of Language and Linguistic Studies*, 10(1), 79-88.
- Coslett, H. B. (2018). Apraxia, Neglect, and Agnosia. *Continuum (Minneapolis, Minn.)*, 24(3, BEHAVIORAL NEUROLOGY AND PSYCHIATRY), 768-782. <https://doi.org/10.1212/CON.0000000000000606>
- Council of Europe. (2009). *Relating Language Examinations to the Common European Framework of Reference for Languages : Learning, Teaching, Assessment (CEFR)*.
- Croft, S., Marshall, J., Pring, T., & Hardwick, M. (2011). Therapy for naming difficulties in bilingual aphasia : Which language benefits? *International Journal of Language & Communication Disorders*, 46(1), 48-62. <https://doi.org/10.3109/13682822.2010.484845>
- Damasio, H., Tranel, D., Grabowski, T., Adolphs, R., & Damasio, A. (2004). Neural systems behind word and concept retrieval. *Cognition*, 92(1-2), 179-229. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2002.07.001>
- De Fossé, L., Hodge, S. M., Makris, N., Kennedy, D. N., Caviness, V. S., McGrath, L., Steele, S., Ziegler, D. A., Herbert, M. R., Frazier, J. A., Tager-Flusberg, H., & Harris, G. J. (2004). Language-association cortex asymmetry in autism and specific language impairment. *Annals of Neurology*, 56(6), 757-766. <https://doi.org/10.1002/ana.20275>
- de Guibert, C., Maumet, C., Jannin, P., Ferré, J.-C., Tréguier, C., Barillot, C., Le Rumeur, E., Allaire, C., & Biraben, A. (2011). Abnormal functional lateralization and activity of language brain areas in typical specific language impairment (developmental dysphasia). *Brain: A Journal of Neurology*, 134(Pt 10), 3044-3058. <https://doi.org/10.1093/brain/awr141>
- Démonet, J. F., & Thierry, G. (2001). Language and brain : What is up? What is coming up? *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 23(1), 49-73. <https://doi.org/10.1076/jcen.23.1.49.1218>
- Dibbets, P., Bakker, K., & Jolles, J. (2006). Functional MRI of task switching in children with Specific Language Impairment (SLI). *Neurocase*, 12(1), 71-79. <https://doi.org/10.1080/13554790500507032>
- Dorsaint-Pierre, R., Penhune, V. B., Watkins, K. E., Neelin, P., Lerch, J. P., Bouffard, M., & Zatorre, R. J. (2006). Asymmetries of the planum temporale and Heschl's gyrus : Relationship to language lateralization. *Brain: A Journal of Neurology*, 129(Pt 5), 1164-1176. <https://doi.org/10.1093/brain/awl055>
- Dronkers, N. F., Wilkins, D. P., Van Valin, R. D., Redfern, B. B., & Jaeger, J. J. (2004). Lesion analysis of the brain areas involved in language comprehension. *Cognition*, 92(1-2), 145-177. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.11.002>
- Dufor, O., Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., & Démonet, J.-F. (2007). Top-down processes during auditory phoneme categorization in dyslexia : A PET study. *NeuroImage*, 34(4), 1692-1707. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.10.034>
- Ellis Weismer, S., Plante, E., Jones, M., & Tomblin, J. B. (2005). A functional magnetic resonance imaging investigation of verbal working memory in adolescents with specific language impairment. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, 48(2), 405-425. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2005/028\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2005/028))
- Eustache, F. (2018). *Manuel de neuropsychologie*.

- Fabbro, F. (2001). The bilingual brain : Bilingual aphasia. *Brain and Language*, 79(2), 201-210. <https://doi.org/10.1006/brln.2001.2480>
- Faroqi-Shah, Y., Frymark, T., Mullen, R., & Wang, B. (2010). Effect of treatment for bilingual individuals with aphasia : A systematic review of the evidence. *Journal of Neurolinguistics*, 23(4), 319-341. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2010.01.002>
- Flagg, E. J., Cardy, J. E. O., Roberts, W., & Roberts, T. P. L. (2005). Language lateralization development in children with autism : Insights from the late field magnetoencephalogram. *Neuroscience Letters*, 386(2), 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2005.05.037>
- Foundas, A. L., Corey, D. M., Angeles, V., Bollich, A. M., Crabtree-Hartman, E., & Heilman, K. M. (2003). Atypical cerebral laterality in adults with persistent developmental stuttering. *Neurology*, 61(10), 1378-1385. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000094320.44334.86>
- Fratti, S., Bowden, S. C., & Pino, O. (2011). Diagnostic memory assessment in Italian-born Australians. *International Psychogeriatrics*, 23(7), 1133-1143. <https://doi.org/10.1017/S1041610211000305>
- Fulcher, G. (2003). *Testing Second Language Speaking*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315837376>
- Gazzaniga, M. S. (1983). Right hemisphere language following brain bisection. A 20-year perspective. *The American Psychologist*, 38(5), 525-537. <https://doi.org/10.1037//0003-066x.38.5.525>
- Geffen, G., Bradshaw, J. L., & Nettleton, N. C. (1972). Hemispheric asymmetry : Verbal and spatial encoding of visual stimuli. *Journal of Experimental Psychology*, 95(1), 25-31. <https://doi.org/10.1037/h0033265>
- Grosjean, F. (1989, janvier). *Neurolinguists, Beware ! The Bilingual Is Not Two Monolinguals in One Person*. *Brain and Language; Brain Lang.* [https://doi.org/10.1016/0093-934x\(89\)90048-5](https://doi.org/10.1016/0093-934x(89)90048-5)
- Hakvoort, B., van der Leij, A., van Setten, E., Maurits, N., Maassen, B., & van Zuijen, T. (2016). Dichotic listening as an index of lateralization of speech perception in familial risk children with and without dyslexia. *Brain and Cognition*, 109, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2016.09.004>
- Hauser, M. D., Chomsky, N., & Fitch, W. T. (2002). The faculty of language : What is it, who has it, and how did it evolve? *Science (New York, N.Y.)*, 298(5598), 1569-1579. <https://doi.org/10.1126/science.298.5598.1569>
- Hayakawa, S., & Marian, V. (2019). Consequences of multilingualism for neural architecture. *Behavioral and Brain Functions: BBF*, 15(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s12993-019-0157-z>
- Hécaen, H., De Agostini, M., & Monzon-Montes, A. (1981). Cerebral organization in left-handers. *Brain and Language*, 12(2), 261-284. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(81\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0093-934X(81)90018-3)
- Helland, T., Morken, F., Bless, J. J., Valderhaug, H. V., Eiken, M., Helland, W. A., & Torkildsen, J. V. K. (2018). Auditive training effects from a dichotic listening app in children with dyslexia. *Dyslexia (Chichester, England)*, 24(4), 336-356. <https://doi.org/10.1002/dys.1600>
- Hellige, J. B. (2002). Spécialisation hémisphérique : Données récentes. *Spécialisation hémisphérique : données récentes*, 12(1), 7-49.
- Hirnstein, M., & Hugdahl, K. (2014). Excess of non-right-handedness in schizophrenia : Meta-analysis of gender effects and potential biases in handedness assessment. *The British Journal of Psychiatry: The Journal of Mental Science*, 205(4), 260-267. <https://doi.org/10.1192/bjp.bp.113.137349>
- Hodgson, J. C., & Hudson, J. M. (2017). Atypical speech lateralization in adults with developmental coordination disorder demonstrated using functional transcranial Doppler ultrasound. *Journal of Neuropsychology*, 11(1), 1-13. <https://doi.org/10.1111/jnp.12102>
- Hosoda, C., Tanaka, K., Nariai, T., Honda, M., & Hanakawa, T. (2013). Dynamic neural network reorganization associated with second language vocabulary acquisition : A multimodal imaging study. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 33(34),

- 13663-13672. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0410-13.2013>
- Hugdahl, K., Gundersen, H., Brekke, C., Thomsen, T., Rimol, L. M., Ersland, L., & Niemi, J. (2004). fMRI brain activation in a Finnish family with specific language impairment compared with a normal control group. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, 47(1), 162-172. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2004/014\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2004/014))
- Ibrahim, R. (2008). Performance in L1 and L2 observed in Arabic-Hebrew bilingual aphasic following brain tumor : A case constitutes double dissociation. *Psychology Research and Behavior Management*, 1, 11-19. <https://doi.org/10.2147/prbm.s4125>
- Joseph, R. M., Fricker, Z., Fenoglio, A., Lindgren, K. A., Knaus, T. A., & Tager-Flusberg, H. (2014). Structural asymmetries of language-related gray and white matter and their relationship to language function in young children with ASD. *Brain Imaging and Behavior*, 8(1), 60-72. <https://doi.org/10.1007/s11682-013-9245-0>
- Josse, G., Hervé, P.-Y., Crivello, F., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Hemispheric specialization for language : Brain volume matters. *Brain Research*, 1068(1), 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.11.037>
- Josse, G., Kherif, F., Flandin, G., Seghier, M. L., & Price, C. J. (2009). Predicting language lateralization from gray matter. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 29(43), 13516-13523. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1680-09.2009>
- Jung-Beeman, M. (2005). Bilateral brain processes for comprehending natural language. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(11), 512-518. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.09.009>
- Kail, M. (2015). Les bases cérébrales de l'acquisition bilingue. *Que sais-je?*, 109-124.
- Kushner, H. I. (2012). Retraining left-handers and the aetiology of stuttering : The rise and fall of an intriguing theory. *Laterality*, 17(6), 673-693. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2011.615127>
- LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2006). Cognitive neuroscience of emotional memory. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(1), 54-64. <https://doi.org/10.1038/nrn1825>
- Laganaro, M. (2014). Prise en charge de patients aphasiques bilingues dans leur deuxième langue. *Revue de neuropsychologie, Volume 6(3)*, 207-210.
- Leemann, B., Laganaro, M., Schwitler, V., & Schnider, A. (2007). Paradoxical switching to a barely-mastered second language by an aphasic patient. *Neurocase*, 13(3), 209-213. <https://doi.org/10.1080/13554790701502667>
- Lemée, J.-M., Bernard, F., Ter Minassian, A., & Menei, P. (2018). Right Hemisphere Cognitive Functions : From Clinical and Anatomical Bases to Brain Mapping During Awake Craniotomy. Part II: Neuropsychological Tasks and Brain Mapping. *World Neurosurgery*, 118, 360-367. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.07.099>
- Leonard, C. M., & Eckert, M. A. (2008). Asymmetry and dyslexia. *Developmental Neuropsychology*, 33(6), 663-681. <https://doi.org/10.1080/87565640802418597>
- Li, P., Legault, J., & Litcofsky, K. A. (2014). Neuroplasticity as a function of second language learning : Anatomical changes in the human brain. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 58, 301-324. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2014.05.001>
- Lieberman, P. (2016). The evolution of language and thought. *Journal of Anthropological Sciences = Rivista Di Antropologia: JASS*, 94, 127-146. <https://doi.org/10.4436/JASS.94029>
- Lindell, A. K. (2006). In your right mind : Right hemisphere contributions to language processing and production. *Neuropsychology Review*, 16(3), 131-148. <https://doi.org/10.1007/s11065-006-9011-9>
- Lorenzen Bonnie, & Murray Laura L. (2008). Bilingual Aphasia : A Theoretical and Clinical Review. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 17(3), 299-317. <https://doi.org/10.1044/1058->

0360(2008/026)

- Macnamara, J. T. (1967). *How Can One Measure the Extent of a Person's Bilingual Proficiency?*
- Macoir, J., Fossard, M., Mérette, C., Langlois, M., Chantal, S., & Auclair-Ouellet, N. (2013). The role of basal ganglia in language production : Evidence from Parkinson's disease. *Journal of Parkinson's Disease, 3*(3), 393-397. <https://doi.org/10.3233/JPD-130182>
- Marie, D., Jobard, G., Crivello, F., Perchey, G., Petit, L., Mellet, E., Joliot, M., Zago, L., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2015). Descriptive anatomy of Heschl's gyri in 430 healthy volunteers, including 198 left-handers. *Brain Structure and Function, 220*(2), 729-743. <https://doi.org/10.1007/s00429-013-0680-x>
- Mariën, P., & Borgatti, R. (2018). Language and the cerebellum. *Handbook of Clinical Neurology, 154*, 181-202. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63956-1.00011-4>
- Martin, M. (1979). Hemispheric specialization for local and global processing. *Neuropsychologia, 17*(1), 33-40. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(79\)90019-8](https://doi.org/10.1016/0028-3932(79)90019-8)
- Mather, D. S. (2003). Dyslexia and dysgraphia : More than written language difficulties in common. *Journal of Learning Disabilities, 36*(4), 307-317. <https://doi.org/10.1177/00222194030360040301>
- McCandliss, B. D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). The visual word form area : Expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Sciences, 7*(7), 293-299. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00134-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00134-7)
- Nathoo, N., Mayberg, M. R., & Barnett, G. H. (2004). W. James Gardner : Pioneer neurosurgeon and inventor. *Journal of Neurosurgery, 100*(5), 965-973. <https://doi.org/10.3171/jns.2004.100.5.0965>
- Ocklenburg, S., Beste, C., Arning, L., Peterburs, J., & Güntürkün, O. (2014). The ontogenesis of language lateralization and its relation to handedness. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 43*, 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.04.008>
- Oertel-Knöchel, V., & Linden, D. E. J. (2011). Cerebral asymmetry in schizophrenia. *The Neuroscientist: A Review Journal Bringing Neurobiology, Neurology and Psychiatry, 17*(5), 456-467. <https://doi.org/10.1177/1073858410386493>
- Paradis, M., & Libben, G. (2014). *The Assessment of Bilingual Aphasia*. Psychology Press.
- Porac, C., & Coren, S. (1981). *Lateral Preferences and Human Behavior*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8139-6>
- Pugh, K. R., Frost, S. J., Sandak, R., Landi, N., Rueckl, J. G., Constable, R. T., Seidenberg, M. S., Fulbright, R. K., Katz, L., & Mencl, W. E. (2008). Effects of Stimulus Difficulty and Repetition on Printed Word Identification : An fMRI Comparison of Nonimpaired and Reading-disabled Adolescent Cohorts. *Journal of Cognitive Neuroscience, 20*(7), 1146-1160. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20079>
- 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 Research Reviews, 6*(3), 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)
- Pulvermüller, F., Shtyrov, Y., & Hauk, O. (2009). Understanding in an instant : Neurophysiological evidence for mechanistic language circuits in the brain. *Brain and Language, 110*(2), 81-94. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2008.12.001>
- Ravichandran, C., Shinn, A. K., Öngür, D., Perlis, R. H., & Cohen, B. (2017). Frequency of non-right-handedness in bipolar disorder and schizophrenia. *Psychiatry Research, 253*, 267-269. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2017.04.011>
- Ribot, T. (1839-1916) A. du texte. (1906). *Les maladies de la mémoire (18e édition) / par Th. Ribot,...* <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k255891x>

- Richardson, A. J. (1994). Dyslexia, handedness and syndromes of psychosis-proneness. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 18(3), 251-263. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(94\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0167-8760(94)90011-6)
- Richlan, F., Kronbichler, M., & Wimmer, H. (2009). Functional abnormalities in the dyslexic brain : A quantitative meta-analysis of neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, 30(10), 3299-3308. <https://doi.org/10.1002/hbm.20752>
- Rodriguez, A., Kaakinen, M., Moilanen, I., Taanila, A., McGough, J. J., Loo, S., & Järvelin, M.-R. (2010). Mixed-Handedness Is Linked to Mental Health Problems in Children and Adolescents. *Pediatrics*, 125(2), e340-e348. <https://doi.org/10.1542/peds.2009-1165>
- Rogers, L. J., Zucca, P., & Vallortigara, G. (2004). Advantages of having a lateralized brain. *Proceedings Biological Sciences*, 271 Suppl 6, S420-422. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2004.0200>
- Rosen, B. R., & Savoy, R. L. (2012). fMRI at 20 : Has it changed the world? *NeuroImage*, 62(2), 1316-1324. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.03.004>
- Royer, C., Delcroix, N., Leroux, E., Alary, M., Razafimandimby, A., Brazo, P., Delamillieure, P., & Dollfus, S. (2015). Functional and structural brain asymmetries in patients with schizophrenia and bipolar disorders. *Schizophrenia Research*, 161(2-3), 210-214. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2014.11.014>
- Sandak, R., Mencl, W. E., Frost, S. J., & Pugh, K. R. (2004). The Neurobiological Basis of Skilled and Impaired Reading : Recent Findings and New Directions. *Scientific Studies of Reading*, 8(3), 273-292. https://doi.org/10.1207/s1532799xssr0803_6
- Saur, D., Lange, R., Baumgaertner, A., Schraknepper, V., Willmes, K., Rijntjes, M., & Weiller, C. (2006). Dynamics of language reorganization after stroke. *Brain: A Journal of Neurology*, 129(Pt 6), 1371-1384. <https://doi.org/10.1093/brain/awl090>
- Schmid, E., Thomschewski, A., Taylor, A., Zimmermann, G., Kirschner, M., Kobulashvili, T., Brigo, F., Rados, M., Helmstaedter, C., Braun, K., Trinka, E., & E-PILEPSY consortium. (2018). Diagnostic accuracy of functional magnetic resonance imaging, Wada test, magnetoencephalography, and functional transcranial Doppler sonography for memory and language outcome after epilepsy surgery : A systematic review. *Epilepsia*, 59(12), 2305-2317. <https://doi.org/10.1111/epi.14588>
- Sommer, I., Ramsey, N., Kahn, R., Aleman, A., & Bouma, A. (2001). Handedness, language lateralisation and anatomical asymmetry in schizophrenia : Meta-analysis. *The British Journal of Psychiatry: The Journal of Mental Science*, 178, 344-351. <https://doi.org/10.1192/bjp.178.4.344>
- Starowicz-Filip, A., Chrobak, A. A., Moskała, M., Krzyżewski, R. M., Kwinta, B., Kwiatkowski, S., Milczarek, O., Rajtar-Zembaty, A., & Przewoźnik, D. (2017). The role of the cerebellum in the regulation of language functions. *Psychiatria Polska*, 51(4), 661-671. <https://doi.org/10.12740/PP/68547>
- Strauss, E. (1986). Hand, Foot, Eye and Ear Preferences and Performance on a Dichotic Listening Test. *Cortex*, 22(3), 475-482. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(86\)80009-0](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(86)80009-0)
- Tran, U. S., & Voracek, M. (2015). Schizophrenia and mixed-handedness. *The British Journal of Psychiatry: The Journal of Mental Science*, 207(2), 178. <https://doi.org/10.1192/bjp.207.2.178>
- Tréhout, M., Leroux, E., Delcroix, N., & Dollfus, S. (2017). Relationships between corpus callosum and language lateralization in patients with schizophrenia and bipolar disorders. *Bipolar Disorders*, 19(6), 496-504. <https://doi.org/10.1111/bdi.12526>
- Tzourio, N., Crivello, F., Mellet, E., Nkanga-Ngila, B., & Mazoyer, B. (1998). Functional anatomy of dominance for speech comprehension in left handers vs right handers. *NeuroImage*, 8(1), 1-16. <https://doi.org/10.1006/nimg.1998.0343>
- van Dyck, L. I., Pittman, B. P., & Blumberg, H. P. (2012). Non-right-handedness in adolescents and adults

- with bipolar disorder. *Bipolar Disorders*, 14(5), 571-572. <https://doi.org/10.1111/j.1399-5618.2012.01037.x>
- Vanderauwera, J., Altarelli, I., Vandermosten, M., De Vos, A., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2018). Atypical Structural Asymmetry of the Planum Temporale is Related to Family History of Dyslexia. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 28(1), 63-72. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw348>
- Wada, J. A. (1997). Youthful season revisited. *Brain and Cognition*, 33(1), 7-10. <https://doi.org/10.1006/brcg.1997.0879>
- Wallois, F., Mahmoudzadeh, M., Patil, A., & Grebe, R. (2012). Usefulness of simultaneous EEG-NIRS recording in language studies. *Brain and Language*, 121(2), 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.03.010>
- Willems, R. M., Van der Haegen, L., Fisher, S. E., & Francks, C. (2014). On the other hand : Including left-handers in cognitive neuroscience and neurogenetics. *Nature Reviews. Neuroscience*, 15(3), 193-201. <https://doi.org/10.1038/nrn3679>
- Zou, S., & Zhang, W. (2017). Exploring the adaptability of the CEFR in the construction of a writing ability scale for test for English majors. *Language Testing in Asia*, 7. <https://doi.org/10.1186/s40468-017-0050-3>

Résumé

Titre : Variables affectant la latéralisation hémisphérique du langage chez des sujets mono- et plurilingues, à travers l'utilisation d'un paradigme en champs visuels divisés

Résumé : Le rôle dominant de l'hémisphère gauche (HG) dans le traitement du langage a été clairement établi et est désormais un principe fondamental de l'organisation fonctionnelle du cerveau. Il est apparu que plusieurs facteurs inter-individuels ont pu être identifiés comme ayant une influence sur cette organisation. La présente étude a pour objectif d'étudier les facteurs pouvant avoir une influence sur la latéralisation hémisphérique du langage, en utilisant un paradigme en champs visuels divisés simple mais valide, la tâche translingue de décision lexicale (ou TLDT), qui permet de mesurer la latéralisation du langage. Nous avons testé un échantillon de 82 participants Français. Ceux-ci ont tous répondu à différents questionnaires à propos de leur latéralité (manuelle, podale, oculaire et auriculaire), ainsi qu'à des tests de langues, tous étant mono- ou plurilingues, parlant espagnol ou anglais en plus du français comme langue maternelle. Un avantage significatif de l'hémichamp-visuel droit/HG, correspondant à la dominance de l'HG pour le langage, a été révélé pour l'exactitude et les temps de réponse, plus important au niveau de l'exactitude. Cependant, les sujets avec un score de latéralité podale faible et un niveau de maîtrise faible d'une seconde langue (LV2) ont montré une latéralisation à gauche plus faible que les autres. De surcroît, la préférence podale était davantage liée à la latéralisation du langage que la préférence manuelle. Ces résultats suggèrent que la préférence podale devrait être prise en considération, et être préférentiellement utilisée au lieu de la préférence manuelle dans les études à propos de la latéralisation cérébrale, et qu'un niveau de maîtrise élevé de LV2 peut réduire l'asymétrie pour le langage.

Mots clés : latéralisation du langage ; asymétrie hémisphérique ; préférence manuelle ; préférence podale ; bilinguisme ; paradigme en champs visuels divisés

Title : Laterality variables affecting language hemispheric lateralisation in mono- and plurilingual people using a visual half-field paradigm

Abstract : The dominant role of the left hemisphere (LH) in processing language has been well established and is now a fundamental principle of the brain functional organisation. It appears that several inter-individual factors can be identified as having an influence on this organisation. The current study aimed at investigating factors which could have an influence on language hemispheric lateralisation, by using a simple and reliable visual half-field (VHF) paradigm, the translingual lexical decision task (TLDT), that can measure language lateralisation. We tested a sample of 82 French participants. They all performed different questionnaires about laterality (handedness, footedness, eyedness and eareness), as well as foreign language tests, all being mono- or plurilinguals, speaking Spanish or English in addition to French as their mother tongue. A significant right-visual-field/LH advantage corresponding to the dominance of the LH for language was revealed for accuracy and reaction times, with a higher significance for accuracy. However, subjects with low footedness scores and low proficiency in a second language (L2) appeared to be less lateralised than others. Moreover, footedness was more related to language lateralisation than handedness. These findings suggest that footedness should be taken into consideration, and be preferentially used instead of handedness in studies about cerebral lateralisation, and that a higher proficiency in a L2 can reduce asymmetry for language.

Keywords : language lateralisation; hemispheric asymmetry; footedness; handedness; bilingualism; visual half-field paradigm

Nombre de pages : 66. Nombre de références : 188

Unités de recherche