



HAL
open science

L'écriture en miroir des enfants : une histoire complète

Jean-Paul Fischer

► **To cite this version:**

| Jean-Paul Fischer. L'écriture en miroir des enfants : une histoire complète. 2022. hal-03829694

HAL Id: hal-03829694

<https://hal.science/hal-03829694v1>

Preprint submitted on 25 Oct 2022

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.

L'écriture en miroir des enfants : une histoire complète

par Jean-Paul Fischer (le 25/10/2022)

Sommaire

Présentation	4
1. Une longue histoire	7
1.1. Il se prénomme Alfred	7
1.2. Un tsunami d'écritures de la main gauche	8
1.3. Les premières failles dans l'hypothèse de la gaucherie	10
1.4. La main gauche fait de la résistance.....	12
1.5. L'étiologie de l'écriture en miroir selon Macdonald Critchley.....	14
1.6. La théorie de Samuel Orton	15
1.7. La contribution ambiguë de Gertrude Hildreth	17
1.8. Que font les psychologues ?.....	20
1.9. Que font les éducateurs ?	23
1.10. Interlude	24
2. Les caractères sont-ils orientés ?.....	27
2.1. Les lettres regardent à droite !.....	27
2.2. Les chiffres regardent à gauche !	30
2.3. Les quatre écritures de 5.....	31
2.4. Un bilan et une discussion conclusifs	32
2.5. Une sorte de réciproque.....	33
2.6. Les confirmations fines de la différence entre deux types de caractères	36
3. Des hypothèses théoriques avortées	39
3.1. Le franchissement de la ligne médiane	39
3.2. Une ultime tentative de théorie unifiée	41
3.3. Un apprentissage implicite de l'orientation droite	42
3.4. L'apprentissage statistique de l'orientation droite	45
3.5. Un amorçage par l'écriture précédente	46
4. Quelques mises au point salutaires !	51
4.1. L'attention n'est pas le problème	51
4.2. La recopie et l'écriture de mémoire sont deux tâches différentes.....	52
4.3. Un problème de mémoire et non de perception	54
4.4. Les formes des caractères sont mémorisées précocement.....	56
4.5. Le primat de la modalité visuelle dans l'apprentissage initial de l'écriture.....	60

4.6. Le primat des inversions gauche-droite	61
4.7. Les chiffres sont meilleurs que les lettres	62
4.8. L'écriture en miroir est un phénomène transitoire	63
4.9. Un épilogue : la gaucherie n'a rien à voir avec l'inversion !	64
4.10. Inversion versus confusion.....	66
4.11. Les adultes aussi !	69
5. Les avancées en neuropsychologie.....	73
5.1. L'œuvre pionnière de Michael Corballis	73
5.2. La contribution de Stanislas Dehaene (2007)	76
5.3. Les modélisations cérébrales.....	78
5.3.1. L'orientation disparaît de patch en patch	78
5.3.2. L'orientation a disparu dans le sulcus fusiforme postérieur	79
5.3.3. La voie dorsale au secours de la voie ventrale	80
5.4. Quel mécanisme de transmission de la voie dorsale vers la voie ventrale ?.....	84
5.5. Quelques observations neuroscientifiques sur des adultes.....	86
6. Le mystère éclairci	89
6.1. Les caractères se différencient par leur fréquence d'inversion	89
6.2. L'universalité de la hiérarchie des fréquences	92
6.3. Une observation apparemment discordante	96
6.4. L'apport décisif de l'écriture des prénoms.....	98
6.5. Une confirmation de l'orientation dans la direction de l'écriture	100
6.6. La montagne accouche d'une souris !	102
7. L'école peut-elle (ou doit-elle) éviter l'écriture en miroir ?	103
7.1. Des méthodes empiriques de remédiation.....	103
7.2. L'école maternelle est-elle dangereuse ?	104
7.3. La comparaison de trois types d'école	105
7.4. Une recherche prometteuse (d'après les auteurs !)	107
7.5. L'éducation nationale demande de tourner en sens horaire !.....	108
7.6. L'étude des apprentissages par l'adulte nous éclaire-t-elle ?.....	110
7.7. L'apprentissage de l'écriture (en général) réduit-il les inversions en miroir ?	111
8. Quelques conséquences étonnantes.....	113
8.1. Ecrire et reconnaître un chiffre inversé n'ont pas grand-chose en commun.....	113
8.2. L'écriture en miroir n'a pas grand-chose à voir avec l'inversion en lecture.....	114
8.3. Les enfants à développement atypique ne font peut-être pas plus d'inversions	117
8.4. Une indication auditive active une représentation visuelle.....	121

Présentation

8.5. L'écriture manuelle n'est peut-être pas d'une grande efficacité	122
8.6. La première écriture d'un enfant peut être une écriture en miroir	124
9. Conclusion.....	127
Références	131

Présentation

En tant que chercheur expérimenté, j'ai longtemps hésité à présenter cet essai sur l'écriture en miroir des enfants comme « une histoire complète ». Je sais en effet qu'il est imprudent, et même erroné, de croire qu'un débat ou une recherche scientifique est définitivement clos et n'aura plus de prolongements. Néanmoins, le moment me paraît bien venu pour procéder à une synthèse sur ce sujet de l'écriture en miroir des enfants (à développement typique) qui a occupé la littérature scientifique durant 145 ans. En effet, outre des raisons personnelles d'âge et d'intérêt, le moment de cette synthèse, à savoir la fin du premier quart du 21^e siècle, me paraît particulièrement bien indiqué, pour au moins deux raisons : (1) l'écriture manuelle (dont il est quasi-exclusivement question) est en voie de régression, voire de disparition (notamment l'écriture cursive, en attaché) ; (2) les résultats des recherches en neuroscience et en psychologie cognitive du développement ont considérablement modifié et précisé la compréhension du phénomène dans ce premier quart du 21^e siècle.

D'autres raisons m'ont poussé à écrire cette synthèse. L'une est simplement pratique. J'ai, possiblement avec des co-auteurs, publié plusieurs articles (voir les références), et leur réunion dans un même document me paraît utile si, d'aventure, quelqu'un s'intéresse au sujet. Une autre relève davantage de l'amour-propre. Je peux en effet voir, sur Internet, des auteurs affichant des observations statistiques dont ils n'indiquent pas, ou ne connaissent pas, l'origine. Par exemple, le Docteur Kruti Mehta-Dhiwani qui a fondé trois cliniques à Bombay (Mumbai pour les autochtones), signalait aux parents¹ que deux caractères fréquemment inversés sont 3 et J sans nécessairement connaître l'origine de l'information (voir Section 6.1).

Bien que j'aie évité au maximum des précisions, habituelles dans les articles scientifiques (e.g., les niveaux de significativité, erreurs-types), le livre se veut scientifique. Pour cette raison, j'ai gardé une numérotation minimale facilitant les renvois et donc l'argumentation. Je donne aussi exhaustivement les références avec, dans la plupart des cas, le DOI (*digital object identifier*).

Comme dans tout livre qui se respecte, il me faut remercier (avec le risque d'en oublier), pour l'aide précieuse qu'elles m'ont apportée, les personnes qui ont participé, de manière ou d'autre, à cette histoire complète de l'écriture en miroir chez l'enfant. En premier, mon amie de longue date Marie-Bénédicté Parisot qui a très souvent « servi » de juge dans les codages des écritures et qui m'a laissé du temps disponible pour la rédaction. Ensuite, mes co-auteurs (sur le sujet), Anne-Marie Koch, Christophe Luxembourger, Youssef Tazouti et Xavier Thierry ; ceux qui m'ont aidé matériellement (Jérôme Dinet, Directeur du 2LPN) ou stimulé scientifiquement (Michael Corballis[†], Jean-Noël Foulin, Robert McIntosh, Thomas Lachmann, Marine Portex) ; enfin, toutes mes étudiantes², dont Anne-Marie Koch, que je n'ai malheureusement pas su conduire au bout de sa thèse bien que ses résultats étaient et restent fondamentaux et uniques, et toutes les autres qui m'ont rapporté des observations dans les écoles (et que j'ai souvent perdues de vue) : Olivier Bartlett, Audrey Breton, Gaële Chaloppé, Gaëlle Chevalier, Jennifer Collignon, Valentin Descharnes, Laura Durey, Chloé Hess, Stéphanie Grandemange, Caroline Hasbi, Pauline Husson, Adeline Jacque, Estelle Martin-

¹ Sur <https://magicofmom.com/the-phenomenon-of-mirror-writing/> en 2019, mais toujours consultable en juin 2022.

² Je profite de cette féminisation pour préciser qu'une écriture de type inclusif alourdirait par trop le texte. J'ai donc suivi l'orthographe classique sauf, comme ici, lorsque le féminin l'emporte manifestement.

Présentation

Jouan, C. Martignon, Emy Mockels, Audrey Moschini, C. Petit, Michaël Pierrel, Justine Traina, M. Traore, Noémie Werbicki.

1. Une longue histoire

Dans la littérature scientifique, la notion et le nom d' « écriture en miroir » sont apparus en 1878 dans un article d'une revue clinique berlinoise (Buchwald, 1878). Critchley (1927) mentionne que Leutilius aurait déjà décrit, en 1688, un cas d'écriture en miroir chez un patient épileptique. Mais comme Critchley ne donne aucune autre précision sur ce cas, c'est finalement l'article de Buchwald qui est en général considéré comme fondateur de la notion et du nom, du moins du nom allemand, à savoir « *Spiegelschrift* ». L'origine allemande du nom tient (en partie) au fait que la ville de Breslau, où Buchwald exerçait en tant que médecin assistant, était alors la sixième ville de l'Allemagne unifiée en un nouvel Empire. Elle n'est devenue polonaise, sous le nom de Wrocław, qu'à l'issue de la seconde guerre mondiale et nous a, peut-être, évité ou privé d'avoir un nom originellement polonais (*Napis na lustrze* d'après mon traducteur informatique) pour l'écriture en miroir ! Le nom allemand a ensuite été traduit littéralement en français ainsi qu'en anglais (« *mirror writing* »).

L'article de Buchwald a été rapidement commenté par Erlenmeyer (1879) et maintes fois cité (e.g., Figuera, 1902), souvent de seconde main. Par exemple, Canzano et al. (2011) citent une définition de l'écriture en miroir, par Critchley, en l'attribuant à Buchwald ! Une telle confusion ne semble pas du tout accidentelle mais pourrait résulter d'une référence ambiguë de Schott (2007) à Buchwald. La faute de Canzano et al. proviendrait alors du fait qu'ils indiquent une fausse référence (à Buchwald) à la place de la vraie (Schott, ou « Buchwald cité d'après Schott »).

1.1. Il se prénomait Alfred

Alors que son article a souvent été cité, dès sa parution, le prénom de Buchwald est resté longtemps mystérieux. Il était même inconnu, non seulement de Critchley (1927), mais encore bien plus tard, de Schott (2007). Ce dernier possédait certes une copie de l'article, mais comme l'article ne précise pas le prénom, Schott a référencé Buchwald sans (l'initiale de) son prénom dans sa liste des références. Evidemment, ce ne sont pas les articles citant Buchwald de seconde main qui vont nous révéler le prénom, ou tout au moins l'initiale du prénom de Buchwald. Ce n'est qu'en 2012 que la revue allemande « *Gehirn und Geist* », en adaptant et traduisant un article de la revue française *Cerveau et psychologie* (Fischer, 2012a), y a introduit le prénom – Alfred – de Buchwald (Fischer, 2012b).

Si le prénom de Buchwald n'est qu'anecdotique, en revanche sa contribution à l'orientation des recherches sur l'écriture en miroir est majeure. D'abord, il en a donné une définition dont on remarquera qu'elle est centrée sur sa culture : c'est une écriture de droite à gauche qui ne ressemble à notre écriture usuelle que si on la regarde dans un miroir. Notons que si Buchwald définit ainsi une écriture en miroir complète, il ne rejette pas la simple inversion des caractères (lettres ou chiffres) puisque le premier patient qu'il décrit, de 45 ans, a produit, en cours de rémission, les chiffres de la figure 1, fort vraisemblablement en écrivant de gauche à droite.

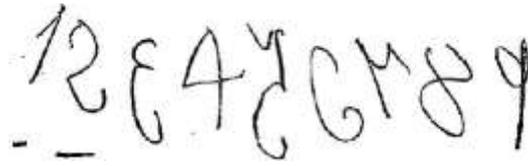


Figure 1 : L'écriture des chiffres du premier patient, en cours de rémission, de Buchwald (1878, p. 7). Écriture de la main gauche, par suite d'une hémiplégié droite.

Ensuite, Buchwald a largement contribué au développement des hypothèses selon lesquelles l'écriture en miroir (1) concerne principalement des cas pathologiques, et, (2) ne se produit guère qu'avec la main gauche. Il n'a en effet décrit que trois patients adultes présentant tous une hémiplégié droite et, de ce fait, contraints d'écrire de la main gauche. Mais, il a aussi ouvert la voie à l'observation de l'écriture en miroir chez les enfants. En fin d'article, il rapporte en effet des observations sur des enfants tout venant qui écrivaient en miroir de la main gauche (non usuelle), apparemment non consciemment. Pour étayer encore davantage l'hypothèse (2) et suggérer que l'écriture en miroir est l'écriture naturelle de la main gauche, Buchwald rapporte alors précisément le cas d'une fille de 11 ans. Celle-ci a écrit son nom de la main gauche (non usuelle) correctement, mais maladroitement, lentement et avec beaucoup d'attention, mais, lorsqu'on lui a demandé d'écrire plus vite, elle s'est mise à écrire en miroir beaucoup plus joliment.

L'hypothèse (2), issue de l'article de Buchwald, a alors connu un succès dont l'ampleur est difficile à imaginer à une époque où la communication n'était pas encore facilitée par Internet. Dès l'année suivant l'article fondateur de Buchwald, Erlenmeyer (1879) dans un livre plus général sur l'écriture, se réfère longuement à ce dernier. Il est vrai qu'il avait une bonne raison de s'y référer puisqu'il pensait avoir l'explication de ce type d'écriture : c'est l'écriture abductive qui conduirait à l'écriture en miroir. Cette notion d'abduction – un mouvement centrifuge qui part du corps vers l'extérieur –, opposée à celle d'adduction, est en effet à la base de son analyse de l'écriture. Erlenmeyer n'hésite pas alors à critiquer l'appellation d'écriture en miroir (*Spiegelschrift*), introduite par Buchwald, en suggérant qu'il eut mieux valu l'appeler écriture abductive de la main gauche (*linkshändige Abductionsschrift*). Cette explication a ensuite été retenue comme l'« hypothèse motrice de l'écriture en miroir » (Eager & Fisher, 1932). En accord avec la suggestion d'Erlenmeyer, Figuera (1902) l'a érigée en définition de l'écriture en miroir : « On désigne sous ce nom, comme tout le monde le sait, la façon spéciale d'écrire de la main gauche, qui constitue graphiquement une copie de l'écriture normale, quand on la présente à un miroir et qu'on y regarde son image » (p. 147).

1.2. Un tsunami d'écritures de la main gauche

De manière impressionnante, l'hypothèse (2) de Buchwald, et ses relais, a conduit à de nombreuses observations d'élèves dans leurs écoles. À ces élèves, on demandait simplement d'écrire, à titre expérimental, de leur main gauche. Elle a conduit aussi à la comparaison des élèves gauchers et droitiers. Mais même pour de telles comparaisons le test portait sur leur écriture de la main gauche puisque les chercheurs étaient convaincus que c'est la seule main qui produit une écriture en miroir.

Ireland (1881) fut sans doute l'un des premiers en date à publier une telle observation comparative. Il commence par citer Buchwald (et Erlenmeyer), puis décrit quelques cas d'enfants, ou d'ados présentant une hémiplégié droite et écrivant de ce fait de la main gauche, ou de gauchers. Mais le plus intéressantes sont ses deux statistiques d'enseignants rapportées pour montrer « qu'il y a une tendance physiologique des enfants gauchers de tomber dans

Chapitre 1

l'écriture en miroir » (p. 364). Dans les deux observations, les élèves (vraisemblablement de Stirling, en Ecosse) devaient écrire avec la main gauche. Les résultats sont d'une rare netteté : non seulement le test de probabilité exacte de Fisher, calculé sur les données du tableau 1 confirme que la différence entre les élèves gauchers et droitiers est fortement significative dans les deux observations, mais écrire en miroir implique même logiquement être gaucher !

Tableau 1 : Les données d'Ireland attribuant l'écriture en miroir (de la main gauche) aux seuls enfants gauchers (tableau construit par nous d'après la description verbale d'Ireland, 1881).

Latéralité	Ecriture Miroir		Ecriture Miroir	
	Oui	Non	Oui	Non
Gauche	5	0	3	3
Droite	0	55	0	128
Observation	60 élèves élémentaires		134 élèves de la 4 ^e à la 6 ^e année	

En Allemagne, Cahen-Brach, un médecin au destin tragique puisqu'il est mort, ainsi que son épouse, au camp de concentration de Theresienstadt, fin 1942, et que l'un de leurs deux fils jumeaux a été déporté et exterminé en 1943 au camp de Majdanek (d'après Hock, 2021), a observé l'écriture en miroir sur 649 élèves de l'école publique. Pour que ces élèves puissent se concentrer sur l'écriture avec la main gauche, leur nom, ainsi que les chiffres de 1 à 9, avaient été préalablement écrits par l'expérimentateur sur l'ardoise. Cahen-Brach était, en 1893, médecin praticien, spécialement pour enfants, à Francfort/Main. Il n'avait pas spécialement vocation à investiguer l'écriture en miroir puisque l'année précédente il avait publié un article sur la gonorrhée des jeunes filles. Mais le sujet devait exciter la curiosité des pédiatres. Les résultats sont rapportés dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2 : Les écritures en miroir du nom et des chiffres avec la main gauche observées par Cahen-Brach (tableau construit d'après Hildreth, 1950a, p. 69).

Age	Classe	Garçons		Filles	
		N	%	N	%
7	I	20	43	29	43
	II	7	11	11	22
10	III	7	14	4	8
	IV	3	6	4	8
13	V	5	9	3	7
	VI	8	13	6	10
Total Miroirs		50	15.3	57	17.7
Total Elèves		327		322	

Les quelques 600 élèves testés par Cahen-Brach ne représentent toutefois qu'un effectif léger comparativement aux plus de 3000 de Lochte (1896). Dans l'observation de Lochte, les élèves devaient écrire leur nom et âge de la main gauche, en commençant au milieu de la feuille pour leur laisser la possibilité d'écrire aussi bien vers la droite que vers la gauche. Comme les plus jeunes élèves de 6-7 ans ne savaient pas encore les écrire, Lochte leur a demandé d'écrire quelques mots ou lettres connus, et des chiffres, toujours de la main gauche. Les résultats portent sur 2804 élèves testés à Berlin, et 421 autres testés à Zehlendorf, un quartier de Berlin. Le seul résultat clair qui résulte de cette observation sur 3225 élèves est la diminution avec le

niveau scolaire des écritures en miroir. En outre, à partir des données des écoles de Berlin, Lochte a observé que seulement 12 des 69 élèves gauchers ont écrit en miroir. Il en a conclu que « c'est une preuve claire que, en aucune façon, tous les enfants gauchers ont une tendance particulière à écrire en miroir » (p. 389). Autrement dit, la réciproque – (être gaucher) \Rightarrow (écrire en miroir) – de l'implication établie sur les données d'Ireland, à savoir (écrire en miroir) \Rightarrow (être gaucher), n'est pas valide. Une analyse statistique plus poussée à partir de ces données nous a toutefois permis de vérifier que les élèves gauchers ont quand même davantage écrit en miroir que les élèves droitiers : le pourcentage d'écriture en miroir des gauchers ($12/69 \approx 17\%$) diffère significativement de celui des droitiers (entre 5 et 7%, selon que l'on considère des écritures complètement ou partiellement en miroir).

1.3. Les premières failles dans l'hypothèse de la gaucherie³

Alors que l'on sait aujourd'hui que tous les enfants produisent des écritures en miroir au moins partielles (i.e., de certains caractères, notamment les chiffres), il peut paraître curieux que l'on ait mis tellement longtemps à s'en apercevoir ! En fait, quelques chercheurs l'avaient rapidement et clairement souligné. J'ai longtemps cru que c'est le physiologiste, psychologue et chimiste William Preyer qui, en 1882 lors de la première édition de son livre, « *L'âme de l'enfant* », avait rapporté le premier cette inversion des écritures par un enfant droitier. Dans une phrase allemande longue et lourde, il écrit en effet : « Le fait que mon garçon, lorsque je lui ai laissé écrire des chiffres ordinaires, que je dessinais, dans sa cinquième année, ait, à ma grande surprise, toujours reproduit la plupart des chiffres – le plus longtemps le 1 et le 4 – avec une écriture en miroir, ce dernier souvent aussi retourné, alors que le 5 était toujours correct, n'est pas dû à un défaut de la vue, mais à une transposition imparfaite de la représentation visuelle dans la représentation motrice nécessaire pour écrire. » (Preyer, 1895, p. 41)⁴. Mais ce reportage anecdotique de Preyer à propos de son fils ne figure pas dans les deux premières éditions du livre ! Preyer, ayant vraisemblablement eu vent de cette découverte curieuse d'enfants capables d'écrire en miroir, a inclus l'anecdote dans une section de son livre, rajoutée lors de sa troisième édition, en 1890. Preyer a donc moins de chances d'être le premier à avoir rapporté, au moins verbalement car il ne reproduit aucune écriture de son fils, l'écriture en miroir d'un enfant typique droitier ! Mais il garde ses chances d'être le premier car le seul autre cas mentionné par Hale et Kuh (1901) date de 1900.

Dix ou 20 ans après Preyer, Figuera (1902), dans une note au 4^e congrès brésilien de médecine et de chirurgie, rapporte l'observation de 107 enfants et d'un adulte. Les enfants brésiliens ont été observés par des professionnels de la clinique pédiatrique de la Faculté de Rio de Janeiro pour une partie (ils ont de 9 à 16 ans d'après les cas rapportés), et dans des écoles municipales de Foz de Iguaçu (Etat de Minas-Geraes) pour l'autre partie. L'adulte inclus dans l'observation accompagnait son fils à la clinique et, sollicité à écrire successivement de la main droite et de la main gauche, a produit avec cette dernière l'écriture inverse. Dès l'introduction, Figuera note – probablement parce qu'il connaissait les résultats de ses observations – que le résultat d'Ireland (voir ci-devant), d'une rare netteté, n'est pas infaillible. Et, de fait, il constate que les deux fois où l'écriture inverse s'est montrée (1 enfant et l'adulte), il s'agissait

³ Dans tout ce texte, le terme gaucherie est à prendre dans son acception physiologique, à savoir une prédominance fonctionnelle de la main gauche.

⁴ Je suppose que l'enfant était droitier : Preyer le souligne, au moins indirectement, par exemple lorsqu'il note qu'à 19 mois, lorsqu'on lui mettait la cuillère à gauche de l'assiette son fils avait une courte réflexion préalable avant de la saisir de la main gauche.

d'individus non gauchers. Figuera en conclut que « si l'écriture en miroir peut se présenter chez des enfants névropathes et principalement chez les gauchers, elle se montre également chez des enfants sains, qui ne sont pas gauchers, et manquent en un grand nombre de cas d'affections nerveuses du jeune âge » (p. 154, corrigée).

Presque au moment de la parution de l'article de Figuera, Hale et Kuh (1901) ont reproduit les écritures d'enfants droitiers, à développement typique, produisant spontanément des écritures en miroir, entre autres celles d'un garçon de 5 ans et 6 mois (voir Fig. 2). Hale et Kuh, dont les observations sont incompatibles avec la théorie mécanique d'Erlenmeyer écrivent alors que la plupart des déclarations de ce dernier sur l'écriture pour droitiers et gauchers sont totalement fausses. Quant à eux, ils avancent, déjà en 1901 et sans la moindre hésitation que « presque tous les enfants, à une certaine période de leur développement, produiront spontanément une écriture en miroir, et ce, également avec la main droite » (p. 1382). Cette assertion sera ensuite reprise par Fuller (1916), par référence à ces deux auteurs. Mais les propres observations de ce dernier, rapportées trop sommairement sur 18 enfants « normaux » qui venaient juste d'apprendre les lettres, ne conduisent pas à l'étayer davantage.



Figure 2 : Les écritures en miroir des chiffres 2, 3, 7 et des nombres 21 et 16⁵, peut-être les premières reproduites d'un enfant droitier (Figure reproduite à partir de Hale et Kuh, 1901, Fig. 1, p. 1381).

Ayant rejeté la thèse d'Erlenmeyer, Hale et Kuh, respectivement assistant clinique en ophtalmologie et en neurologie, suggèrent alors une explication de l'écriture en miroir par l'inversion rétinienne de l'image : « Le monde extérieur est imprimé sur la rétine dans une image inversée ; ce n'est que par une expérience laborieusement acquise que nous apprenons à interpréter cette image et à produire une écriture normale, redressée ». Ils écartent une objection immédiate, à savoir que l'image rétinienne inversée devrait conduire aussi à une inversion haut-bas. Ils suggèrent que l'explication l'inversion gauche-droite est corrigée en dernier car c'est la plus difficile à surmonter⁶.

Au niveau adulte, de sérieuses réserves quant à la qualité de l'écriture en miroir de la main gauche sont venues de la recherche de Downey (1914) sur 25 étudiantes de 17 à 24 ans de l'Université du Wyoming. Elle lui a permis de présenter un tableau des inter-corrélations entre différentes écritures/lectures, en miroir ou non : écriture en miroir main droite, lecture en miroir horizontal, écriture en miroir main gauche, lecture en miroir vertical, écriture miroir vertical main droite, écriture normale de la main gauche. Il apparaît dans ce tableau que les corrélations de l'écriture en miroir de la main droite avec les autres écritures/lecture sont élevées ($\geq .413$), sauf avec l'écriture normale de la main gauche (.062). Malgré un possible effet d'habitude, Downey remarque alors qu' « il n'apparaît pas que la main gauche est, en

⁵ J'ai repris l'indication des auteurs, mais l'écriture de 16 pourrait aussi être une écriture complètement en miroir de 61.

⁶ Dehaene (2007, p. 356) parle de « naïveté » à propos d'une telle explication de l'écriture en miroir. Par ailleurs, elle expliquerait mal que les enfants font beaucoup moins d'inversions en copiant les caractères qu'en les écrivant de mémoire (voir Section 4.2).

général, plus efficiente que la droite dans l'écriture en miroir chez les individus, qu'ils soient gauchers ou droitiers » (p. 437). Et l'analyse de la qualité des écritures conduit Downey à observer une « meilleure qualité de l'écriture en miroir avec la main droite », et à en conclure « qu'il n'existe pas de tendance naturelle pour la main gauche à exceller dans une telle inversion, sauf dans les cas où il y a une tendance latente à la gaucherie » (p. 439). En fin d'article, Downey suggère même une corrélation entre le degré de latéralisation droite et l'efficacité de la lecture en miroir qui irait à l'encontre de la vue traditionnelle (en 1914) et remarque que c'est ce que l'on pourrait attendre si la spécialisation des fonctions s'accompagne d'une adéquation croissante de l'orientation. Par la suite, des recherches plus sophistiquées et plus générales ont tenté de comparer l'efficacité relatives des mouvements abductifs versus adductifs mais sans conclusion vraiment décisive (voir l'introduction de Fischer & Koch, 2016a).

1.4. La main gauche fait de la résistance

Malgré cette critique empirique par Downey de l'efficacité de la main gauche, le problème de la gaucherie persistait au début du 20^e siècle. En témoigne l'éloge de la bi-manualité par Manfred Fraenkel (1908) : « Un système éducatif, qui délaisse un des membres les plus importants du corps humain, est condamnable pour cette raison. Chaque enseignant a le devoir de développer, chez chaque enfant, non seulement chaque capacité intellectuelle, mais aussi tous les membres jusqu'à leur niveau de capacité le plus élevé » (p. 1307). Fraenkel signale alors qu'à Londres une société « pour la formation bi-manuelle » s'est constituée. Il termine, avec beaucoup d'emphase : « Messieurs ! Nous médecins ferions bien d'offrir la plus grande attention à cette question importante. Seule l'école est en état de transformer notre prédisposition unilatérale en prédisposition bilatérale » (p. 1309). Cet air du temps n'a pu alors que contribuer à la prolifération des observations sur l'écriture de la main gauche, en continuation de celles de Fraenkel, sur les enfants (Fuller, 1916 ; Gordon, 1921 ; Hanse, 1931) comme sur les adultes (Bertha, 1942).

La recherche de Gordon est exemplaire de ce point de vue. Convaincu que seule l'écriture de la main gauche conduit à l'écriture en miroir, il a commencé par tester 829 élèves d'école élémentaire ordinaire. Malgré l'utilisation de la main gauche, en général non usuelle pour ces élèves, seuls 4 d'entre eux ont écrit en miroir (0.48 %). Gordon s'est alors focalisé sur des écoles spéciales pour déficients mentaux. Il y a testé 729 élèves de 8 à 16 ans, en leur demandant d'utiliser la main gauche (en général non usuelle). Parmi ces élèves, Gordon s'est intéressé plus particulièrement aux élèves gauchers avec, fait important, la latéralité établie avec d'autres moyens que l'écriture. Sans tenir compte de leur main d'écriture, il relève 30% d'élèves (41/137) écrivant en miroir avec une plus grande fréquence chez les filles (40%) comparativement aux garçons (18%). Les analyses et préoccupations de Gordon à propos de la gaucherie sont telles qu'il précise encore davantage ses statistiques. Chez les garçons comme chez les filles 40% des élèves gauchers écrivent de la main droite. Parmi ces derniers 32% des garçons gauchers et 62% des filles gauchères (mais écrivant usuellement de la main droite), ont écrit en miroir de la main gauche. Cette statistique conduit Gordon à suggérer que les enfants écrivant usuellement de la main droite peuvent écrire en miroir du fait que, à un moment ou un autre, ils ont écrit avec la main gauche, une suggestion qui me semble contredite par la suite. En effet, Gordon suggère aussi que les enfants gauchers qui écrivent de la main droite ont pu, lors d'une pratique de l'écriture de la main gauche, corriger une inclination à écrire en miroir

Chapitre 1

de la même main à une période ultérieure, et que ces enfants seraient donc moins sujets à ce genre d'écriture que l'enfant droitier qui écrit de la main gauche pour la première fois.

Gordon s'est toutefois aussi posé de bonnes questions. Ainsi, lorsqu'il se demande « pourquoi certains enfants écrivent-ils en miroir lorsqu'ils commencent à écrire, alors qu'aucune sensation musculaire ne peut être établie dans ces cas-là ? » (p. 358). Mais, à l'époque, il ne lui était pas possible, ni de connaître, ni d'entrevoir la réponse. Également, à propos d'une observation selon laquelle des enfants testés sur la copie de mots Anglais et Russes ont seulement fait des erreurs avec les lettres communes aux deux alphabets – à savoir celles dont les formes avaient une légère relation – mais ont copié correctement les lettres compliquées particulières au Russe, dont ils n'avaient jamais vu la forme auparavant, Gordon avance une explication vague mais pas fautive : quelque chose aurait « affecté les fibres nerveuses connectant le centre hypothétique de la mémoire visuelle des mots avec d'autres parties du cerveau » (p. 361). Enfin, à propos des quelques lettres fréquemment écrites en miroir, spécialement s, d, b, 4, 6 et 9, Gordon a aussi observé que cette écriture est sans doute différente de celle de l'écriture en miroir dont il discute. Il semble ainsi entrevoir, avec un siècle d'avance, la démonstration empirique de la différence entre l'inversion en miroir (lors de l'écriture) et la confusion en mémoire déclarative (Fischer & Luxembourger, 2022).

Ces recherches sur l'écriture de la main gauche ont alors éclipsé, voire empêché, celles sur les jeunes enfants tout-venant écrivant en général avec leur main droite, possiblement en miroir. Ce non-intérêt pour l'écriture en miroir des enfants à développement typique droitiers et écrivant avec leur main droite est tel que Scheidemann (1936) croit, erronément (voir Section 1.3), avoir publié le premier cas d'enfant droitier écrivant en miroir. Il s'agit de Thomas, un enfant de 6 ans droitier, sans problème par ailleurs, qui a, entre autres, produit les écritures en miroir des chiffres 2 et 3 de la figure 3. Scheidemann précise que Thomas est dominant de l'œil droit et ne montre aucune tendance à la gaucherie, et commente : « Cela est notable puisque tous les cas d'écriture en miroir rapportés jusqu'à ce jour ont été rencontrés avec des enfants gauchers, et seulement sur des enfants extrêmement gauchers » (p. 492).



Figure 3 : Les écritures inversées de 2 et 3 par Thomas, 6 ans (figure reproduite à partir de la Fig. 1 de Scheidemann, 1936, p. 490).

Cette attribution de l'écriture en miroir à la (seule) gaucherie des enfants a été tellement profonde qu'elle persiste encore, au 21^{ème} siècle, dans de nombreux livres (et esprits !), même si elle est souvent plus nuancée. Par exemple, pour Millichap (2000), l'écriture en miroir se caractérise par le fait qu'elle est presque toujours exécutée de la main gauche. Pour Henderson et Pehoski (2006), les tendances des enfants gauchers à écrire/dessiner et à scanner l'information de droite à gauche pourraient conduire à des inversions, mais cela ne présuppose pas nécessairement des problèmes ; ils ajoutent que les enfants gauchers pourraient ainsi subir une période d'inversion et d'écriture en miroir plus extensive.

1.5. L'étiologie de l'écriture en miroir selon Macdonald Critchley

Critchley (1927), dans un court article écrit au début de sa longue carrière (né en 1900, il est décédé en 1997 et a même publié un ouvrage posthume en 1998), a proposé un tableau sur l'étiologie de l'écriture en miroir. Il y mentionne que « certains enfants normaux qui apprennent à écrire (de la main gauche ou droite) » produisent de telles écritures. Il distingue aussi l'écriture complète en miroir des inversions plus fragmentaires. Mais sa formulation relative aux enfants typiques, en limitant l'écriture en miroir à « certains » d'entre eux, reste en retrait par rapport à l'assertion de Hale et Kuh selon laquelle « tous » les enfants, à un certain stade de leur développement, produisent des inversions. Néanmoins, elle aurait pu éviter à Scheidemann son erreur.

Cet article, ou ce tableau de Critchley, a largement contribué à répandre une pratique, certes amusante (je l'ai beaucoup pratiquée au cours des fêtes de la science ou autres semaines du cerveau), mais qui n'est nullement une écriture en miroir. Cette pratique consiste à écrire sur son front ou sous la table, en interposant évidemment une feuille entre le stylo et le support. Lorsque nous écrivons normalement, c'est-à-dire de gauche à droite dans notre culture, sur notre front ou sous la table, nous voyons, après coup, une écriture en miroir sur la feuille. Mais nous n'avons pas pour autant écrit en miroir, de droite à gauche, en inversant chacune des lettres. Ce n'est qu'un observateur qui nous regarderait de face, ou couché sous la table, qui aurait pu nous voir écrire en miroir ! En France, Morlaas (1939), sans référer à Critchley, a repris exactement

les trois moyens pour provoquer l'écriture en miroir chez des sujets normaux énumérés par ce dernier, à savoir :

- (1) Faire écrire les deux mains simultanément ;
- (2) Faire écrire l'une ou l'autre main, le papier étant appliqué au front ;
- (3) Les faire écrire, le papier étant appliqué à l'envers d'une table.

Malheureusement, Morlaas n'a pas vu, ou compris, que si l'écriture (de la main gauche chez un droitier) est bien une écriture en miroir dans le cas (1), les deux autres – (2) et (3) – sont des cas d'écriture normale (chez un droitier écrivant de la main droite), dont le résultat est simplement vu en miroir par un observateur extérieur ou par le scripteur qui retourne le papier.

1.6. La théorie de Samuel Orton

Samuel Torrey Orton, né en 1876, avait terminé ses études de médecine à l'Université de Pennsylvanie en 1905. Il n'était pas, avant 1925, un publiant prolifique. Il essayait de publier un article scientifique chaque année (d'après June Liday Orton, sa seconde épouse, qui a préfacé Orton, 1937/1999). Mais en 1925, lorsqu'il était en Iowa, il a commencé ses études sur des enfants à difficultés spécifiques en langage. Et, surtout, il a publié un article qui connaîtra une grande diffusion (Orton, 1925). Il est vrai qu'Orton a su favoriser cette diffusion en ouvrant sa propre clinique à New York en 1928, en devenant président élu de l'*American Association for Research in Nervous and Mental Disease* en 1932, en publiant un livre *Reading, writing, and speech problems in children* en 1937 (reproduit dans Orton, 1937/1999), et en réussissant à faire financer son troisième programme de recherches par la fondation Rockefeller de 1939 à 1944. Après son décès, en 1948, la mémoire de l'œuvre d'Orton est entretenue notamment par le Prix Samuel Torrey Orton, une distinction attribuée depuis 1966 par l'*International Dyslexia Association* pour des contributions à la compréhension de la dyslexie, dont le dernier en date (de 2022) a été attribué à Fumiko Hoeft (e.g., Hoeft et al., 2011), et les deux précédents à John Gabrieli, en 2021 (e.g., Gabrieli, 2009), et Malatesha Joshi en 2020, éditeur en chef actuel de la revue *Reading and Writing*.

Avant de discuter son article de 1925, il faut toutefois rendre à César ce qui appartient à César. Ce proverbe biblique, ici écourté, doit suggérer que l'idée d'un rôle différencié des deux hémisphères cérébraux dans la production des écritures en miroir est loin d'être totalement nouvelle lorsqu'Orton publie sa figure bien connue (voir Fig. 4). De manière générale, on peut remarquer que l'idée d'un rôle de la spécialisation hémisphérique pour expliquer l'écriture en miroir était déjà présente à l'époque. Ainsi, Blom (1928) cite 5 ou 6 auteurs ayant basé leur explication de l'écriture en miroir sur une représentation bilatérale dans les cortex cérébraux bien antérieurement à l'article d'Orton. Même Erlenmeyer (1879) avait déjà associé la gaucherie manuelle et la cérébralité hémisphérique droite pour étayer son hypothèse motrice. Mais, de manière plus directement en rapport avec la théorie d'Orton, il faut surtout mentionner Ireland (1881, non cité par Orton, 1925) qui avait suggéré, plus de 40 ans avant Orton, que l'image de C serait, par exemple, C dans l'hémisphère droit et \complement dans l'hémisphère gauche. C'est en effet quasi explicitement ce que l'on peut lire sur le schéma d'Orton reproduit sur la figure 4.

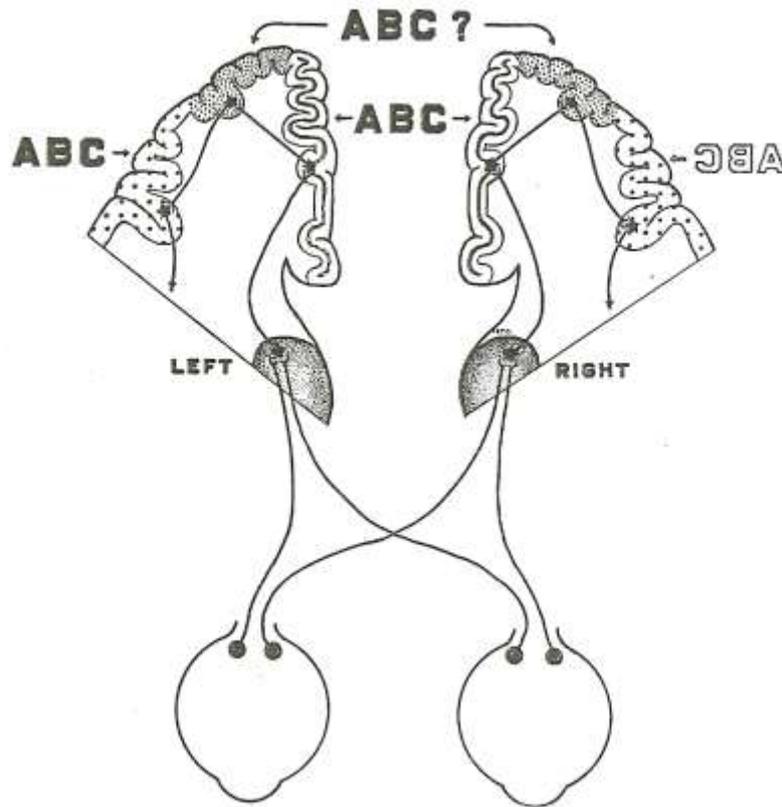


Figure 4 : Le schéma « historique » d'Orton (Figure reproduite à partir de la Fig. 11 d'Orton, 1925, p. 609).

Orton (1925) a écrit précisément que « le stockage en mémoire des images des lettres et des mots se produit dans les deux hémisphères, et qu'avec les premiers efforts pour apprendre à lire, les stimuli visuels externes irradient également dans les cortex associatifs des deux hémisphères, et y sont enregistrés à la fois dans l'orientation dextrogyre et sinistrogyre » (p. 608). Blom (1928), qui a analysé 81 articles sur l'écriture en miroir a intégré cette hypothèse, d'une représentation différenciée dans les deux hémisphères cérébraux, dans les 6 hypothèses théoriques censées expliquer l'écriture en miroir. Mais si, curieusement, il n'inclut pas Orton parmi les auteurs ayant défendu une telle hypothèse, l'une des conclusions de Blom, à savoir qu'un enfant qui écrit en miroir aura probablement des difficultés en lecture et en orthographe semble bien lui avoir été inspirée par Orton. Cette conclusion est en effet un point majeur de la théorie d'Orton, un point qui a largement contribué à la populariser vue l'importance de la lecture dans notre société. Regardons donc plus précisément les arguments d'Orton qui lui ont permis de relier la dyslexie, ou *strephosymbolia* comme il l'a appelée, à l'écriture en miroir.

Déjà, le nom lui-même ne laisse guère de doute sur le fait qu'Orton voulait rattacher l'inversion des symboles (lettres, chiffres, ...) au problème de la lecture/écriture puisqu'il a choisi le préfixe « stréphi » (du grec στρεφω qui signifie torsion) précisément pour indiquer une inversion, sans distinction entre lecture et écriture (une distinction clairement introduite par les termes spécifiques dyslexie et dysgraphie). Lorsque Orton postule alors « l'existence dans le cerveau d'un enregistrement mnémorique en miroir qui sert de modèle aux expressions motrices » (Orton, 1925, p. 608), on conçoit aisément que les enfants vont non seulement produire des confusions en lecture (e.g., b et d, p et q), mais aussi en écriture. Il avait d'ailleurs déjà insisté, dans son article, sur ce point : « Cependant, cela, encore une fois, ne prend pas en

compte les images sensorielles qui servent de pattern à l'écriture de mémoire. Écrire sous la forme directe ou en miroir est possible chez certaines personnes avec l'une ou l'autre main, et cette potentialité est probablement latente chez nous tous bien que difficile à développer à cause de l'entraînement exclusif à l'écriture avec une main » (p. 599). Une telle explication de l'association entre difficultés de lecture et écriture en miroir, par le truchement des mêmes représentations doubles (correcte et en miroir) des lettres, reste toutefois théorique. Dans son article avec Gillingham, Orton présente donc aussi un argument empirique en faveur d'une telle association : « Quand l'écriture en miroir est produite spontanément avec la main droite, elle suggère une torsion dans la reproduction d'un intérêt considérable et probablement d'une certaine valeur pronostique dans la mesure où la plupart des enfants que nous avons vus et qui ont exhibé cette tendance initiale ont eu des difficultés considérables en lecture par la suite » (Orton & Gillingham, 1933, p. 268). Si l'on adhère à l'assertion de Hale et Kuh selon laquelle tous les enfants produisent des inversions à un certain stade de développement, on voit cependant que cet argument est soit indéfendable, soit perd toute valeur. En effet, si l'observation empirique d'Orton et Gillingham est prédictive, les enfants devraient tous finir dyslexiques ! Et si elle est seulement rétrospective, on ne voit pas comment les enfants dyslexiques qu'ils ont vus auraient pu ne pas produire des inversions initialement !

Pour défendre ce lien entre dyslexie et écriture en miroir, Orton s'est également référé aux articles de Fildes (1923) ou Fildes et Myers (1922). Fildes (1923) a notamment établi que l'inversion en miroir se produit à la fois en copiant des formes et en les reproduisant de mémoire. Si cela était vrai pour les lettres, cela renforcerait effectivement l'association entre lecture et écriture puisqu'en copiant des lettres (ou mots) on les lit, un peu antérieurement ou presque simultanément. Mais l'article de Fildes (1923), bien que difficile à comprendre, semble précisément montrer que ce n'est pas vrai pour les lettres, ni pour les chiffres. Son expérience 6, sur l'alphabet et les chiffres 1 à 9, montre la quasi-inexistence des inversions lors de la copie (voir notre analyse plus complète dans la section 4.2). Par la suite la relation entre écriture en miroir et dyslexie ne s'est pas vraiment confirmée non plus. Hécaen (1984), par référence à Ajuriaguerra et al. (1956), constate qu'« on ne note pas de fréquence particulière de l'écriture en miroir chez les dyslexiques » (p. 207). Et Treiman et al. (2014) mettent en garde les éducateurs et les cliniciens contre la prise en compte des erreurs d'inversion dans l'écriture comme signe d'une dyslexie.

La théorie d'Orton, neurologique au point d'enlever leur pouvoir aux pédagogues, a pu être fortement critiquée par ces derniers. Par exemple, St-Pierre et al. (2010) écrivent : « Bien que réfutée depuis longtemps, la conceptualisation d'Orton a eu des impacts certains sur la croyance populaire basée sur l'existence d'une association entre dyslexie et inversion de lettres ou écriture en miroir » (p. 98). Par une sorte de « contre-révolution » (dixit Corballis et Beale, 1993, p. 58), liée à la révolution cognitive et à l'expansion de la neuropsychologie, il est cependant redevenu respectable de chercher des anomalies cérébrales chez les enfants qualifiés de dyslexiques. Aujourd'hui, malgré l'origine essentiellement phonologique de la dyslexie, les chercheurs n'excluent cependant pas que certaines dyslexies soient d'origine visuelle, en se référant à Orton (e.g., Fernandes & Leite, 2017 ; Ramus, 2010) ou non (Vidyasagar & Pammer, 2010).

1.7. La contribution ambiguë de Gertrude Hildreth



Figure 5 : Gertrude Howell Hildreth, 1898-1984. (Photo récupérée à partir de <https://fr.findagrave.com/memorial/114818156/gertrude-howell-hildreth>)

Gertrude Hildreth est une psychologue de l'éducation américaine qui fut, notamment, Présidente de l'*American Psychological Association* (APA), Division de la Psychologie éducative, en 1949 (voir Fig. 5). Dès les années 1930, Hildreth avait pratiqué des tests dans les classes. Dans son article de 1934, elle a testé les élèves des 2^e, 3^e et 4^e années d'école. Le test utilise 25 cartes flash contenant un item comme D, un carré avec une diagonale, S, Z, 24, *bed*, JCE, ..., *four* et *six*. Chaque carte est exposée durant 3 s et, dès qu'elle est enlevée, les élèves doivent copier ce qu'ils ont vu sur une feuille lignée. Les enfants gauchers et droitiers ont pratiquement fait le même nombre d'erreurs d'inversion, et la différence entre les deux est qualifiée d'« insignifiante » (p. 19). Comme la moyenne d'erreur des élèves gauchers est légèrement supérieure à celle des élèves droitiers, j'ai vérifié que la différence n'est pas statistiquement significative.

Dans un article ultérieur, Hildreth (1936) s'intéresse de manière plus générale au développement de l'écriture, notamment du prénom. Elle y souligne aussi, et les illustre, l'inversion de quelques lettres majuscules par des enfants de 5 ans (voir Fig. 6). On retiendra, pour la suite, surtout l'inversion de la lettre J par JOHN (5;0), secondairement celle de N à la fois par HELEN (5;0) et ELINOR (5;8).

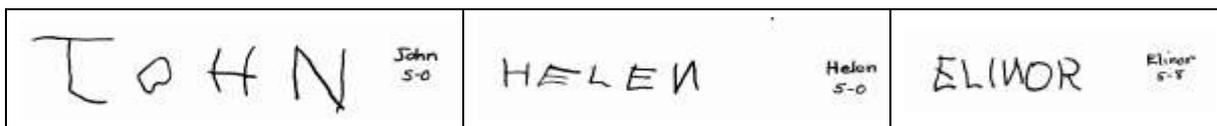


Figure 6 : Les écritures des prénoms par trois enfants (Écritures reproduites à partir de Hildreth, 1936, Fig. 7, p. 297).

L'écriture bi-manuelle, que Critchley (1927) avait mentionnée dans son tableau de l'étiologie de l'écriture en miroir chez les personnes non pathologiques, a été étudiée par Hildreth (1940) sur 103 enfants de 4 à 9 ans 1/2 de milieu socio-économique favorisé. Les enfants devaient reproduire simultanément avec les deux mains une quinzaine de figures des deux côtés d'une ligne verticale. Parmi les figures, il y avait des lettres ou mots (DC, ON) et des chiffres (7) ou nombre (63). Les derniers (DC, ON, 63) sont beaucoup moins inversés que, notamment, le carré qui est observé au cours du tracé puisque, a posteriori, il n'est plus possible de voir s'il est en miroir. En revanche, le chiffre 7 a été reproduit 23 fois en miroir contre 74 fois correctement. Hildreth conclut que « La production en miroir est tout à fait universelle parmi les enfants de 5 ans. Elle semble une performance vraiment naturelle » (p. 313) et que

« les filles ont tendance à légèrement moins produire de réponses en miroir que les garçons » (p. 314).

En 1949, lorsque Hildreth est devenue présidente de la division de la psychologie de l'éducation de la très influente APA, elle publie une série de cinq articles, numérotés I à V, sous le titre général : « Le développement et la formation de la dominance de la main » (Hildreth, 1949a, 1949b, 1949c, 1950a, 1950b). Ce titre général, et encore plus clairement les cinq sous-titres qui incluent, chacun, le concept de latéralité manuelle (*handedness*), attirent l'attention sur le problème de la latéralité. D'ailleurs, le sous-titre du quatrième article (Hildreth, 1950a) associe explicitement la latéralité manuelle à des problèmes développementaux, ce qui peut surprendre car Hildreth (1934) n'avait pas observé de différence entre élèves gauchers et droitiers. Il convient donc de regarder cet article de près, en particulier la section sur l'écriture en miroir.

Hildreth commence par remarquer que, de tous les problèmes d'écriture associés avec une latéralité gauche, une ambidextrie et un développement retardé de la latéralité, l'écriture en miroir est le plus curieux. Elle cite Buchwald (1878), mais, dans les références rassemblées dans le cinquième article (Hildreth, 1950b), le prénom DR (abréviation de Doctor). C'est à la page 69 de cet article que l'on trouve un constat pour le moins curieux. Après un tableau rapportant les observations d'écritures de la main gauche par des élèves allemands, de 7 à 13 ans, à la fin du 19^e siècle par Cahen-Brach (voir Tableau 2), Hildreth écrit dans une phrase formant un paragraphe à elle seule : « La plupart des observateurs trouvent que l'écriture en miroir est plus fréquente chez les garçons que chez les filles, dans une proportion supérieure à trois pour un » (p. 69). Ce constat étonne par sa fausseté : en effet, l'observation de Cahen-Brach montre que 50/327 (= 15.3%) garçons, contre 57/322 (= 17.7%) filles ont écrit en miroir, et donc contredit l'assertion de Hildreth, par ailleurs nullement étayée par ses propres recherches. Mais cette assertion saugrenue de Hildreth, dont on ne peut exclure qu'elle soit due à un problème éditorial, paraît moins gênante que le message général véhiculée par la section immédiatement suivante intitulée « Gaucherie et tendance à l'inversion en miroir ». Dans cette section, ignorant son observation de 1934 d'une absence de différence entre élèves gauchers et droitiers, Hildreth cite encore des observations montrant que ce sont quasi-exclusivement les enfants gauchers qui écrivent en miroir. Parmi ces observations, Carmichael et Cashman (1932) qui ont décrit 7 enfants produisant des écritures en miroir, dont 6 étaient gauchers. Mais Hildreth ne précise pas que ces enfants gauchers avaient entre 9 et 14 ans, alors que l'enfant droitier avait 7 ans et 6 mois. Hildreth mentionne également une observation particulière qui serait due à Gordon (1921) : dans une école où 10 élèves ont écrit en miroir, presque tous étaient gauchers et écrivaient de la main droite. Cependant, dans une note, Gordon signale simplement que, dans une école spéciale (pour déficients mentaux, élèves de 8 à 16 ans), où 31 élèves ont été testés, 10 ont écrit en en miroir. Il n'y précise nullement ni qu'ils étaient gauchers, ni qu'ils écrivaient de la main droite.

Dans les sections suivantes (13 et 14), Hildreth analyse des cas particuliers, dont celui de Corinne, 7 ans. À propos de l'écriture de son prénom (voir Fig. 7), Hildreth remarque qu'il s'agit d'une écriture en miroir complète (i.e., de droite à gauche, avec inversion de toutes les lettres inversables), notamment de la lettre majuscule N. Corinne a écrit son prénom de la main droite mais, et cela illustre bien la confusion qui résulte de la lecture de Hildreth, avant d'écrire de la main droite, elle avait saisi le crayon de la main gauche. En outre, Corinne a aussi écrit son prénom en miroir de la main gauche. Puis, Hildreth semble se focaliser sur des problèmes

que l'on attribue à gaucherie : Gauchers et difficultés d'orthographe (Section 18) et Gauchers et problèmes de lecture (Section 19). Bien qu'à certains moments Hildreth semble suggérer qu'il faudrait distinguer le développement typique des développements atypiques, elle ne le fait pas vraiment. L'ensemble conduit alors à une impression de confusion et à un retour en arrière vers l'assimilation de l'inversion en miroir à un problème de gaucherie. Au demeurant, Hale et Kuh (1901), qui ont fortement affirmé la présence de l'écriture en miroir chez tous les enfants à un certain stade de leur développement, ne sont pas cités, malgré plus de deux cents articles référencés dans Hildreth (1950b).

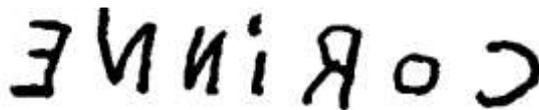
The image shows the name 'CORINNE' written in a child's handwriting, but it is a mirror image of the original text. The letters are reversed and appear as if they were written on a surface and then reflected. The characters are somewhat irregular and show signs of being written by a young child.

Figure 7 : L'écriture du prénom par C., 7 ans, un cas analysé par Hildreth (Écriture reproduite à partir de la Fig. 6 de Hildreth, 1950a, p. 72).

1.8. Que font les psychologues ?

Même lorsqu'une faculté est mal définie, voire impossible à définir, comme l'intelligence, les psychologues construisent des échelles de mesure, le quotient intellectuel (QI) pour mon exemple. Il est vrai que cela leur permet de remédier, humoristiquement, à cette absence de définition : la faculté concernée peut en effet être définie comme étant ce qui est mesuré par leur échelle ! L'écriture en miroir n'a pas échappé à ce désir de disposer d'une échelle de sa mesure. La première de ces échelles, souvent improprement appelées « tests », aurait pu être le test d'inversion gauche-droite de Jordan (*Jordan left-right reversal test*). Elle a été construite afin de standardiser une mesure de l'inversion des symboles (lettres et chiffres) chez l'enfant typique, âgé de 6 à 10 ans (Jordan & Jordan, 1974). Mais, comme les 2500 participants à la standardisation devaient reconnaître (en les barrant) 11 lettres en miroir (ϣ, 2, 1, Я, 3, 8, E, 5, 9, 7, 8) mélangées avec 16 véridiques, et 5 chiffres en miroir (8, 7, 9, 4, 2) mélangés avec 9 véridiques, on voit qu'il ne s'agit pas d'écriture, mais de reconnaissance (ou lecture, distinction) des caractères en miroir. Le complètement de l'échelle de mesure – avec l'ajout des lettres minuscules et de mots contenant une lettre inverse – et son nouvel étalonnage avec 3000 enfants, par Jordan et Jordan (1990), ne remédient nullement à ce problème puisque, la tâche des enfants est restée la même.

Historiquement, le « Reversal Test » (Edfeldt, 1955/1970) est antérieur au test de Jordan. Il a en effet été présenté pour la première fois en 1955, par le psychologue suédois Ake W. Edfeldt dans le Bulletin de recherches de l'Institut d'Éducation de l'Université de Stockholm. Mais, d'une part, il s'agit aussi de reconnaître des figures inversées (et pas seulement des inversions gauche-droite), d'autre part, il s'agit moins d'une échelle de mesure que d'un vrai test. Ce test a surtout servi aux psychologues scolaires pour apprécier la maturité des enfants pour l'apprentissage de la lecture, à un moment où l'Éducation Nationale française avait mis en place un grand nombre de classes spéciales, d'adaptation, d'attente, entre la Grande Section de maternelle (GS) et le Cours Préparatoire (CP), et où la circulaire du 10 octobre 1968 permettait l'admission en CP dès 5 ans.

La seconde échelle, le test de la fréquence d'inversion (RFT : *Reversals Frequency Test*) a été élaborée par Richard Gardner, en 1978, alors qu'il était professeur associé en psychiatrie clinique à l'université Columbia. Comme elle impliquait, quant à elle, vraiment l'écriture des

caractères, je la retiendrai comme la première – et principale comme il apparaîtra par la suite – échelle de mesure du phénomène d'inversion en miroir. Néanmoins, comme depuis un siècle on associait l'inversion des caractères en écriture avec leur reconnaissance erronée en lecture ou dans une tâche de distinction de leur miroir, Gardner a seulement présenté le test d'écriture comme un subtest de production des inversions (*Reversals Execution*) et a inclus deux autres subtests dans son « test ». Au subtest de reconnaissance d'un caractère inversé (*Reversals Recognition*), on présente à l'enfant une collection de nombres et de lettres, dont certains sont présentés en miroir : l'enfant doit barrer tous les items incorrectement orientés. Dans le subtest d'appariement (*Reversals Matching*), chaque item se compose d'un modèle de nombre ou de lettre et est suivi par quatre échantillons du même nombre ou de la même lettre ; l'un des quatre échantillons est correctement orienté comme le modèle, les trois autres ayant subi une inversion ou une rotation : l'enfant doit encercler l'échantillon apparié au modèle. Chaque subtest étant, heureusement, évalué séparément je peux limiter ma présentation du test au subtest de production des inversions en écriture.

Les participants devaient écrire les caractères, sous dictée, isolément et en colonnes. Les caractères sont les 7 chiffres arabes asymétriques et les 17 lettres minuscules (script imprimé). À propos de ces quotités, observons que 1 n'est en général pas asymétrique⁷ pour les américains (USA) et que y minuscule (au contraire de Y majuscule) est asymétrique. Les inversions en miroir sont définies très largement. Elles peuvent en effet consister en images en miroir horizontal (e.g., b pour d), vertical (e.g., p pour b), double (e.g., p pour d, 6 pour 9) et même être obtenues par une rotation de 90° (e.g., b couché, i.e. , pour b). Les enfants à développement typique retenus doivent avoir un QI entre 90 et 110 et avoir au moins produit 8 écritures correctes. Ces critères d'inclusion limitent la généralité de l'échelle de mesure. Notamment du fait qu'un participant qui inverserait tous, ou presque tous les caractères ne serait pas mesuré comme un inverseur patenté (qu'il est assurément). Ce subtest présente d'ailleurs aussi une petite faiblesse relativement au matériel. En effet, dès lors que l'on inclut les chiffres couchés dans la mesure, il eût fallu inclure tous les chiffres, notamment 8 qui est, d'après mon expérience, le chiffre couché que les enfants produisent le plus souvent (∞).

Malgré ces réserves, la quasi-unicité de ce test d'écriture dans la littérature me conduit à présenter son étalonnage pour les 500 enfants (des deux sexes combinés) à développement typique dans le tableau 3. Gardner a présenté les données séparément pour les garçons et les filles. Mais, un contrôle statistique m'a permis de vérifier qu'il n'y avait guère de différence entre les deux sexes, hormis les 28 filles de 5 ans (5;0 à 5;11) qui ont fait marginalement plus d'erreurs que les 25 garçons correspondants [$t(51) = 1.697$, $p = .096$, test bilatéral]. Le tableau 3 montre d'ailleurs un effet plancher dès 7 ans, rendant impossible l'émergence d'une différence significative dans les 8 groupes d'âge supérieur.

⁷ Sauf précision contraire, « asymétrique » est à entendre non symétrique par une symétrie gauche-droite (i.e., par rapport à un axe vertical). Ce point est important car, notamment, 3 est symétrique haut-bas (i.e., par rapport à un axe horizontal).

Tableau 3 : Erreurs d'inversion (sur 16 possibles)⁸ produites par les participants à développement typique de l'étalonnage du *Reversals frequency test* de Gardner [tableau original construit par addition des *Tables 1 et 2* de Gardner, 1978).

Age (ans)	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-Type
5	53	0	13	3.85	2.73
6	59	0	11	2.41	2.24
7	50	0	4	0.42	0.93
8	53	0	1	0.04	0.19
9	52	0	1	0.04	0.20
10	57	0	2	0.05	0.29
11	51	0	2	0.12	0.43
12	50	0	0	0.00	0.00
13	52	0	1	0.02	0.14
14	23	0	0	0.00	0.00

Le tableau 3 montre l'intérêt limité de ce test puisque dès l'âge de 7 ans les enfants à développement typique ne semblent plus guère produire d'inversions en écriture. Mais, en tant que clinicien, Gardner avait certainement besoin d'une échelle de mesure permettant de comparer des enfants à développement atypique avec des normes élaborées avec un échantillon d'enfants à développement typique. Dans ce même manuel d'étalonnage du RFT, Gardner présente d'ailleurs des données produites par des enfants à dysfonctionnement cérébral minimal (MBD : *Minimal Brain Dysfunction*).

Gardner a aussi souligné que les enfants inversent moins les chiffres que les lettres, et que cela est probablement dû au fait que certaines lettres (script d'imprimerie) sont les images en miroir d'autres (e.g., b et d), ou sont proches de l'être (e.g., p et q). Mais ne faut-il pas alors interpréter ces inversions comme des confusions (Fischer & Luxemburger, 2022), plutôt que comme des écritures en miroir ? En outre, pris dans son ensemble, la moyenne d'âge de cet échantillon d'étalonnage est beaucoup plus élevée que celle des enfants à développement typique principalement étudiés dans cet essai.

C'est peut-être l'effet plancher, qui arrive très rapidement dans le développement, qui n'a guère incité les psychologues à poursuivre ou affiner la construction d'une échelle de mesure de l'inversion des caractères en écriture. Seule, à notre connaissance, Janet Richmond dans sa thèse soutenue en 2010, à l'université australienne « Edith Cowan » de Perth, ou dans un poster avec Brown (Richmond & Brown, 2008) a encore proposé un test, ultérieurement appelé *Richmond Reversal Rating* (RRR : cf. Venter et al., 2018). Mais, comme ne le suggère pas le nom du test – *Rating* signifie évaluation, cotation, et pourrait donc porter aussi sur l'écriture – il s'agit, comme pour le test de Jordan et Jordan (1974) ci-avant, d'un jugement (ou reconnaissance, lecture, discrimination) des caractères inversés. Nous ne le commenterons pas davantage, mais remarquerons encore qu'il est lui aussi affecté par un effet plafond puisque, dès la 2^e année d'école, le score, aussi bien moyen que médian, dépasse les 90% du maximum

⁸ Du fait que 8 écritures devaient être correctes, les participants retenus ne pouvaient pas avoir plus de $24-8 = 16$ écritures en miroir.

possible. Précisons que si l'effet plancher est devenu un effet plafond, c'est parce que Venter et al., ont jugé des réponses correctes alors que le tableau 3 reporte des erreurs.

1.9. Que font les éducateurs ?

Les éducateurs, ou les chercheurs en éducation, veulent connaître les difficultés qu'éprouvent les élèves et vérifier si l'enseignement qu'on leur propose permet d'y remédier. Edward Lewis et Hilda Lewis, des collègues d'état de San Jose et San Francisco, ont d'abord remarqué qu'il n'y avait guère d'analyses détaillées des difficultés spécifiques inhérentes à l'écriture manuscrite des lettres majuscules et minuscules (Lewis & Lewis, 1965). Ils ont alors déterminé la difficulté relative des 26x2 = 52 lettres de l'alphabet, et vérifié s'il existe un effet différentiel de l'enseignement. En septembre 1960, avant tout enseignement scolaire, ils ont demandé à 354 élèves en 1^{ère} année d'une école californienne (15 classes) de copier les 52 lettres, puis, en avril 1961, ils ont répété la procédure. Parmi les erreurs de construction des lettres, ils ont notamment analysé les inversions en miroir horizontal (gauche-droite), les inversions en miroir vertical (haut-bas). Ils rapportent les erreurs des deux sessions combinées, ce qui est un peu dommage car les élèves ont dû considérablement progresser d'une session à l'autre. Ils distinguent 11 types d'erreurs, mais les tableaux 4a et 4b ne rapportent les résultats, pour les lettres majuscules et minuscules respectivement, que pour les deux transformations qui nous intéressent plus particulièrement. Une troisième, la rotation, n'a pas été retenue, bien qu'elle soit interprétable comme un miroir double si elle est de 180°, car Lewis et Lewis catégorisent comme rotation toute forme de lettre dont l'angle de rotation (à partir d'une ligne imaginaire verticale traversant son axe) dépasse 15°.

Tableau 4 : Miroirs horizontaux et verticaux (en nombre) produits par 354 élèves californiens de 1^{re} année recopiant les lettres en septembre et avril de l'année scolaire 1960/61 (données extraites de la Table 1, p. 28, de Lewis & Lewis, 1965).

a) Lettres majuscules

Inv.	A	B	C	D	E	F	G	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	U	V	W	Y	Z
Hor.	–	6	5	6	2	2	2	25	2	3	–	47	5	7	3	24	–	18	–	–	–	23
Ver.	1	–	–	–	–	0	10	0	–	1	8	–	0	2	0	–	0	4	5	13	0	–

Note : Les lettres H, I, O et X sont absentes car leur inversion (horizontale et verticale) n'est pas observable.

b) Lettres minuscules

Inv.	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	m	n	p	q	r	s	t	u	v	w	y	z
Hor.	15	24	4	44	7	4	8	6	–	17	1	5	7	13	42	4	25	–	21	–	–	40	31
Ver.	–	4	–	4	4	1	5	0	1	1	0	0	0	1	2	0	–	0	5	2	13	0	–

Note : Les lettres l, o et x sont absentes car leur inversion (horizontale et verticale) n'est pas observable.

À l'école, les enseignants enseignent l'écriture. Lewis et Lewis ont donc rapporté la manière dont les écritures sont enseignées (en Californie, à l'époque), en précisant la suite des traits composant la lettre, ainsi que la direction du trait (e.g., o, minuscule ou majuscule, se trace dans le sens antihoraire). Pour comprendre certaines des écritures en miroir, il faut d'ailleurs recourir à cette description. Par exemple, U (ou u) peut être inversé horizontalement car son écriture possède un trait vertical sur la droite qui descend légèrement plus bas que le trait vertical sur la gauche: . Par ailleurs, Z (ou z) en miroir vertical n'est pas différent de Z (ou z) en miroir horizontal : Lewis et Lewis l'ont alors codé seulement comme miroir horizontal. Comme la présentation combinée des données de début et fin d'année scolaire peut paraître

incohérente avec le projet de vérifier l'impact de l'enseignement, il faut préciser que Lewis et Lewis ont présenté plusieurs autres tableaux. Notamment un tableau comparant les nombres moyens d'erreurs pré- et post-enseignement. Pour les inversions en miroir horizontal, elles ont été de 1.13 avant l'enseignement et de 0.44 après l'enseignement ; pour les inversions en miroir vertical elles ont presque disparu post-enseignement : 0.22 versus 0.015.

Les tableaux 4a et 4b attirent déjà l'attention sur plusieurs points qui seront retrouvés et interprétés plus théoriquement par la suite : (1) les inversions en miroir horizontal ont été beaucoup plus fréquentes ; (2) les inversions horizontales des lettres majuscules peuvent différer nettement de celles de la lettre minuscule correspondante : par exemple, d est inversé 44 fois, alors que D ne l'est que 6 fois ; (3) les lettres d et q, dont les miroirs horizontaux sont les lettres b et p, sont davantage inversées que ces dernières : 44 et 42 fois pour d et q, contre 24 et 13 pour b et p, respectivement ; (4) la lettre la plus inversée verticalement W (ou w) ressemble à la lettre M (ou m) lorsqu'elle est inversée.

L'observation statistique soignée de Lewis et Lewis, dans une école publique d'une banlieue de classe moyenne en Californie, ne concerne cependant que les lettres. Un peu antérieurement, Gesell et ses collaborateurs avaient étudié le développement de l'enfant par une méthode biographiquement-clinique plutôt que statistique. À partir de l'observation d'enfants à New Haven et à la clinique fondée par Gesell, aussi dans une école rurale du Connecticut, Gesell et Ilg (1946/1975) ont noté que, à 5 ans, les enfants inversent surtout 3, 7 et 9 ; à 5 ans 1/2, 3, 4, 7 et 9 ; à 6 ans, 3, 7 et 9 ; à 7 ans, 4, 7 et 9. Hormis, le chiffre 4 qui, curieusement, n'est pas indiqué parmi les chiffres inversés à 5 ans, mais apparaît à 5 ans 1/2, disparaît à 6 ans pour réparaître à 7 ans, les recherches récentes montrent que les observations de Gesell et Ilg semblent toujours interprétables aujourd'hui. Il convient cependant de préciser que la plupart des enfants observés (plus de 50 par groupe d'âge) sont issus de familles dont les conditions sociales ou économiques sont bonnes ou excellentes, et que les 3/4 ont fréquenté une nursery dirigée par la clinique avant d'intégrer une bonne école primaire ; ils représentent donc une communauté américaine prospère (dixit l'introduction de Gesell et Ilg, 1946/1975).

1.10. Interlude

Corballis et Beale (1976) font allusion à la théorie de Robert Fliess, dont le père, qui était ami de Freud, avait dogmatiquement associé bilatéralisme et bisexualité (association non acceptée par Freud). Robert Fliess est devenu psychanalyste et a pu soutenir que la confusion gauche-droite est symptomatique d'une confusion plus profonde entre les impulsions anales et génitales. Corballis et Beale en profitent pour arrêter là leur digression sur la psychanalyse en remarquant cependant encore — mais avions-nous vraiment besoin de leur éclairage ? — que la confusion anale/génitale est plutôt prédictive d'une confusion devant/derrière que gauche/droite ! Cette référence indirecte à Robert Fliess ne me sert ici que d'introduction à cet interlude.

D'abord, dans une approche psychanalytique, Cady (1988) consacre un chapitre à « latéralité, écriture, dessin », dans lequel une section est dévolue à l'écriture en miroir. Cady s'y réfère principalement au cas de Sophia, une enfant de 7 ans qui a des difficultés scolaires dues à une latéralité non encore établie. Sa situation relationnelle paternelle est bloquée puisque le père a laissé à sa femme l'entière responsabilité de la maison. Pour Cady, l'écriture en miroir fait référence à l'espace de la complémentarité imaginaire. Elle décrit une scène de la psychothérapie de Sophia au cours de laquelle celle-ci écrit son nom en miroir et lève la feuille de papier pour que Sylvie Cady aperçoive la transparence. Comme Sylvie Cady est en face de

Sophia, elle s'aperçoit effectivement que le tracé est correct. Cady observe alors que Sophia n'a aucune autre référence que celle de l'image maternelle et que ceci arrange visiblement l'enfant qui utilise la relation duelle spatiale, sans distance, celle de la complémentarité imaginaire.

Pour Cady, de manière générale, « latéralité et écriture se créent en situation triangulaire, mais ce n'est qu'au moment de l'identification œdipienne qu'elles se structurent définitivement » (p. 163). Puis, on lit des affirmations comme « l'écriture en miroir se place entre les deux mains » (p. 169), « la possibilité d'écrire en miroir représente un contact maternel » ou encore « le graphisme en miroir peut être un refuge contre l'écriture-cauchemar due à une élaboration qui fait peur à l'enfant » (p. 170), dont je laisse au lecteur le soin d'imaginer un sens et, très éventuellement, une application.

Gérard Pommier a écrit de nombreux livres. Avant Pommier (1993), il avait traité de: « L'exception féminine / essai sur les impasses de la jouissance » en 1985. Ensuite, de nombreux livres ont suivi : « L'Amour à l'envers » en 1995, « Erotic Anger: A User's Manual » en 2001, « Du bon usage érotique de la colère: et quelques-unes de ses conséquences... » en 2011, « L'ordre sexuel » en 2011. À l'aune de ces titres, celui de son essai de 1993 « Naissance et renaissance de l'écriture » peut paraître un peu fade. Mais c'est néanmoins celui qu'il nous faut discuter ! L'ouvrage est présenté comme « Une étude d'un psychanalyste, ancien élève de Lacan » sur le site d'Amazon⁹. Cette précision, d'une formation lacanienne, peut éviter au lecteur de chercher un sens aux « mathématisations » de l'auteur, auxquelles je me réfère par la suite, car « les mathématiques de Lacan sont si fantaisistes qu'elles ne peuvent jouer aucun rôle fécond dans une analyse psychologique sérieuse » (Sokal & Bricmont, 1997, p. 38).

Dans le chapitre qui nous concerne principalement, « La lettre Méduse. Topologie de l'écriture et refoulement », Pommier termine par un sous-chapitre intitulé « Refoulement et orientation de l'écriture ». Dans la première phrase de ce sous-chapitre, il parle de « dyslexie », et dans la deuxième il l'explique par des inversions de lettres lorsque l'enfant écrit. Par la suite l'indistinction entre une forme particulière d'écriture – l'écriture en miroir – et la dyslexie sera permanente. Le tout premier exemple que fournit l'auteur est un « retournement selon un axe vertical » : Un A est ainsi transformé en ∇ , un U en \cap . Bien qu'une telle transformation puisse aussi être décrite comme une symétrie plane selon un axe horizontal ou un demi-tour autour d'un axe vertical dans l'espace, l'auteur préfère parler de retournement. Possiblement parce que ce dernier mot, « retournement », lui permet ensuite de l'interpréter plus facilement comme un « refoulement », deux mots qui riment richement. Mais il n'y a pas que des retournements. D'autres lettres connaissent des inversions spatiales horizontales : B s'écrira \mathfrak{B} . Les translations spatiales sont courantes pour le groupe p et d, p et q (sic !).

Pommier reprend alors l'explication prépondérante au 20^e siècle par la gaucherie, en l'étayant par des statistiques relatives à la dyslexie (citées de seconde main : Granjon d'après Roudinesco). Il parle aussi de perception en miroir à propos d'Orton, sans citer de source précise, alors qu'Orton, on l'a déjà vu (Section 1.6), pense que c'est un enregistrement mnémotique en miroir qui sert de pattern aux expressions motrices. Il cite aussi Ajuriaguerra, toujours sans référence précise et sans noter que les observations statistiques d'Ajuriaguerra et al. (1956) portent sur des écritures en miroir délibérées et non pas sur des écritures spontanées comme celles que l'on voit dans les écoles : les maîtres demandent rarement aux élèves d'écrire

⁹ https://www.amazon.fr/gp/product/B07K8S5PDT/ref=dbs_a_def_rwt_bibl_vppi_i0 consulté le 04/05/2022.

en miroir et mettent assez systématiquement des points près de la marge gauche pour les en dissuader ! Quoi qu'il en soit, selon Pommier, « il existe un moment où la lettre qui était écrite en miroir, ou à l'envers, ou pour le lecteur situé en face, se remet à l'endroit », moment qui conduit Pommier à s'interroger : « Ce moment de retournement correspond-il au refoulement ? » (p. 328).

Enfin, Pommier explique que le sujet (le garçon) « épouse son père en écrivant *contre* lui » (p. 332). En ce sens, il est compréhensible que l'orientation de son écriture pendant ce temps de féminisation concerne essentiellement les garçons, le sexe féminin n'étant concerné qu'à un moindre degré. Si l'on peut en déduire que les garçons devraient plus fréquemment écrire en miroir que les filles, il faut bien constater que ce résultat n'a jamais été établi clairement, ni dans les statistiques déjà rapportées, ni dans celles à venir dans ce document ! Bien que Pommier ne pouvait pas connaître l'hypothèse d'une origine génétique de l'écriture en miroir de Mathewson (2004, 2007), on peut mentionner que ce dernier propose, totalement aux antipodes d'une prévalence de l'écriture en miroir chez les garçons, un ratio sexuel d'un homme pour 6 femmes !

Pour le reste l'auteur a trouvé un groupe de Klein, une des connaissances mathématiques lacaniennes, dans « les retournements, les inversions dans la forme des lettres et dans la combinatoire, qu'elles soient de rotation, de réflexion ou de translation » (p. 333). Si les miroirs horizontaux, verticaux, et doubles forment effectivement, avec la transformation identique, un groupe de Klein commutatif (voir Fischer & Luxembourg, 2022), on ne voit pas ce que, en fin de section, ce constat peut apporter (même s'il était présenté correctement). Au contraire, on peut redouter que les lecteurs confondent les éléments d'une structure théorique abstraite avec les processus réellement mis en œuvre par les enfants. Rappelons à ce sujet que, par référence au grand psychologue Jean Piaget (e.g., Piaget, 1955), certains enseignants, ou formateurs d'enseignants, ont, dans les années post-1970, fait courir les enfants dans une cour de récréation, configurée en rectangle, le long du Petit côté, du Grand côté et de la Diagonale, tout en leur permettant de rester Immobile. Comme l'ensemble des transformations I, P, G et D, muni de l'opération de composition de deux transformations, forme effectivement un groupe de Klein, ils espéraient ainsi implémenter ce groupe dans le cerveau de leurs élèves. Ce groupe, en vertu de la théorisation de Piaget, devait alors permettre aux élèves d'accéder à tous les raisonnements du stade formel piagétien. Inutile de dire que l'espoir de ces enseignants a été douché.

2. Les caractères sont-ils orientés ?

Dès mes premières recherches sur l'écriture des chiffres, dans de bonnes conditions de validité écologique (Fischer, 2010a, 2010b) ou de contrôle expérimental (Fischer, 2011), il devenait clair que ce sont plutôt les caractères que les participants qui déterminent l'inversion. Cela pousse à approfondir la forme de nos caractères, en particulier les aspects des caractères pouvant interférer avec leur orientation.

2.1. Les lettres regardent à droite !

Kolers (1969) fut certainement l'un des premiers à remarquer que, pour les lettres romanes, le trait vertical majeur se situe généralement sur le bord gauche. Par exemple, B, D, E, F, K, L, M, N, et P, parmi les majuscules, confirment ce constat. Mais, en complément, Kolers a aussi, voire surtout noté que leurs signes distinctifs sont sur leur droite. Tous les alphabets ne sont pas polarisés spatialement de la façon dont l'est l'alphabet romain (e.g., les alphabets cingalais et thaï). Ce choix de la droite pour le signe distinctif, ou plus généralement de la structure trait majeur (vertical) + signes distinctifs d'un côté, ne s'est fait que « tardivement » dans notre alphabet. En remontant aussi loin que possible dans le temps, on voit qu'une telle structure, pour les lettres (majuscules), ne s'est nullement imposée d'emblée. La figure 8 montre que presque aucune lettre ne possédait une telle structure dans l'écriture proto-sinaïtique, la plus ancienne que l'on connaisse et dont on sait, à peu près sûrement, qu'elle se faisait de droite à gauche (cf., Tallet, 2022). Même un millénaire après, dans l'écriture phénicienne, on n'entrevoit pas encore cette structure. Elle semble donc émerger avec le Grec archaïque, notamment pour les lettres B, C, E, K, L, M, N et le futur P.

Mais la surprise est grande lorsqu'on découvre, dans les écritures en Grec archaïque et surtout en Latin ancien, sur la même figure 8, que le signe distinctif attendu à droite, se retrouve à gauche ! À propos de la direction d'écriture du Latin ancien, il faut rappeler que ce dernier a pour origine une région où l'on ne parlait que des langues sémitiques, et donc que l'écriture était vraisemblablement de droite à gauche, avec toutefois une indécision introduite par l'écriture boustrophédon, dont la direction alterne d'une ligne à l'autre (à la manière du bœuf marquant les sillons dans un champ). La figure 8 montre alors que le Latin ancien, à la suite du Grec archaïque, a accentué à la fois le nombre de lettres structurées « trait vertical majeur + signes distinctifs » (même si pour C la structure disparaît) et l'orientation gauche, puisque A, D, F, R viennent se rajouter aux lettres précédentes. Mais, un changement majeur, ayant vraisemblablement influencé l'écriture romaine, intervient vers le IV^e siècle avant J.-C. lorsque la direction d'écriture s'est fixée définitivement de gauche à droite. Et la figure 8 montre alors que les lettres romaines résultantes sont orientées majoritairement à droite. Ce qu'il est important de retenir pour la suite c'est qu'à l'époque (quelques siècles avant J.-C.) où la direction d'écriture s'est inversée, l'orientation des lettres s'est inversée aussi : les lettres antérieurement plutôt orientées vers la gauche (voir le Latin ancien sur Fig. 8) sont devenues majoritairement orientées vers la droite (voir le Romain sur Fig. 8). Dans le Latin moderne, très semblable au Romain, nous avons donc hérité de cette orientation droite de la plupart des lettres majuscules. Notons néanmoins que J (en Latin moderne) et Z semblent faire exception. Nous aurons l'occasion de revenir fréquemment sur ces lettres J – une création médiévale qui est apparue très tardivement – et Z qui semble empruntée au Grec archaïque dans le système alphabétique latin ancien.

Les caractères sont-ils orientés ?

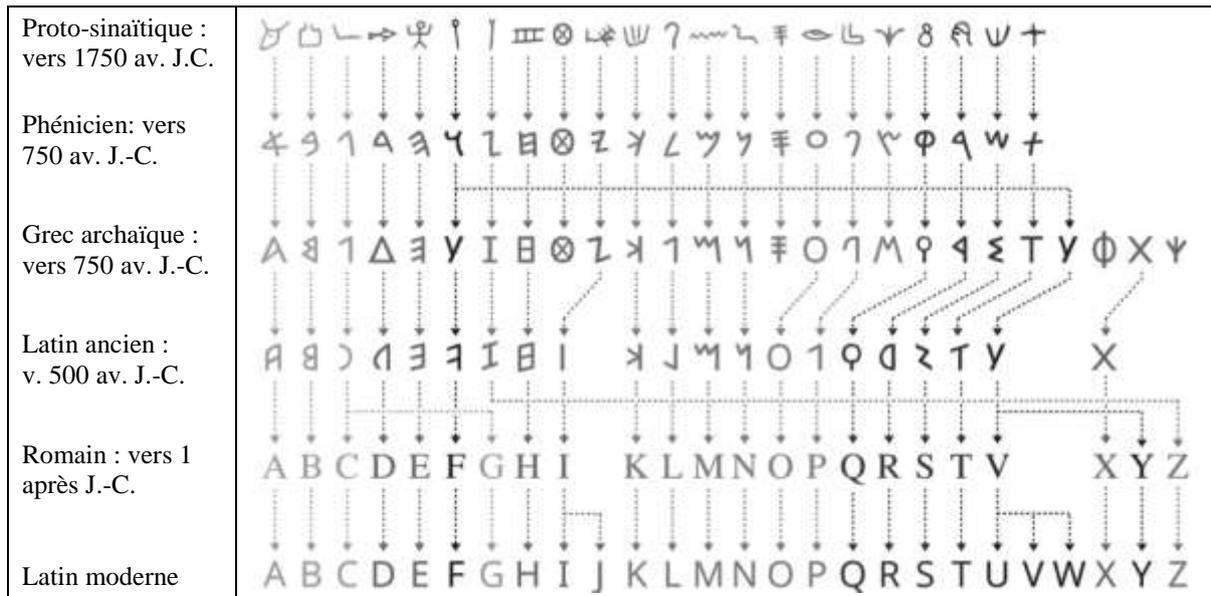


Figure 8 : Évolution de l'alphabet, par Matt Baker (<https://usefulcharts.com/blogs/charts>), avec les traductions de Calvet (2022).

Ce qui s'apparente donc à une mise en conformité de l'orientation des lettres avec la nouvelle et définitive direction gauche-droite de l'écriture est en accord avec une conclusion récente de Miton et Morin (2021). Dans leur analyse computationnelle d'un ensemble de données large et diversifié (plus de 47 000 caractères, provenant de plus de 133 scripts), ils observent en effet que la forme des lettres s'est adaptée à un biais cognitif culturellement induit qui trouve ses racines dans les habitudes motrices et visuelles créées par la direction de l'écriture/lecture. Cependant, en apparence contradiction avec la structuration trait vertical (à gauche) + signe distinctif (à droite) et la simplicité d'un trait vertical, Miton et Morin ont montré aussi que la moitié gauche a plus de chances d'être la plus complexe si elle arrive en premier dans l'écriture comme cela est le cas dans l'alphabet latin. La contradiction pourrait cependant ne pas être réelle car, pour des contraintes informatiques, ils ont coupé mécaniquement les lettres individuelles suivant une verticale égalisant le nombre de pixels de chaque côté. Une lettre comme D devrait donc avoir pour moitié gauche non pas simplement le trait vertical, mais ce trait complété par des petits segments horizontaux en haut et en bas (I), alors que la moitié droite se limiterait à une portion de cercle (J).

Brekle (1997a) a, par référence à l'usage des paléographes, nommé *hasta* le trait vertical d'une lettre (*hasta* signifie bâton en latin), et *coda* des traits ajoutés à la *hasta*. De par cette structuration *hasta* + *coda* nos lettres majuscules contemporaines semblent « regarder » (cf. Brekle, 1997b, qui utilise *blikken* en allemand) vers la droite, c'est-à-dire dans la direction de notre écriture. À propos des lettres C et G, qui n'ont pas vraiment cette structure, Brekle (1997b) suggère qu'elles sont néanmoins « vectorialisées » à droite de par leur origine grecque, où leur ancêtre commun avait la structure *coda* + *hasta* (pour C, voir Fig. 8, troisième lettre de la troisième ligne). Il en résulte qu'une large majorité des lettres majuscules non symétriques regarde vers la droite.

Treiman et Kessler (2011) ont d'abord analysé les écritures contemporaines des lettres à l'aide de ce principe de structuration *hasta* + *coda*. Souvent, au lieu d'utiliser la description *hasta* + *coda* ou *coda* + *hasta*, ces auteurs reprennent la distinction des lettres de type b ou d

déjà présente chez Simner (1984). Ils aboutissent aux catégorisations suivantes : avec les formes de police les plus fréquentes : B, D, E, F, K, L, P, R, b, f, h, k, m, n, p et r sont de type b ; J, d, j, q, u et y sont de type d ; en outre, avec des formes de police moins fréquentes, U, a, g peuvent aussi être vues de type d. Ils ont alors proposé que les enfants, en apprenant statistiquement que les lettres sont orientées à droite, inversent celles qui ne le sont pas, une explication de l'inversion que nous rejeterons dans la section 3.4.

L'orientation visuelle, par cette structure hasta + coda, ne peut être observée que sur les lettres sans axe de symétrie vertical, ce qui exclut A, H, I, M, O, T, U, V, W, et Y. Pour les lettres majuscules, on peut aussi constater qu'un nombre non négligeable de lettres ne la présente pas : C, G, N, Q, S, Z. Et les lettres minuscules qui la présentent sont rares et dépendantes de leur écriture (script, cursive, attachée). Pour, malgré ces difficultés, soutenir et objectiver la pertinence de cette notion de forme visuelle orientée des lettres, Treiman et al. (2014), ont demandé à 33 étudiants de l'université Washington de St Louis (MO) de juger si les 52 lettres (majuscules et minuscules) font face à la gauche, à la droite ou n'ont pas d'orientation. Les étudiants ont jugé, avec les proportions indiquées entre parenthèses, que les lettres minuscules b (.91), c (.94), e (.94), f (1.00), h (.88), k (1.00), n (.58), p (.94), r (1.00), s (.73), et majuscules B (.94), C (1.00), D (.85), E (.97), F (1.00), G (.91), K (.94), L (.91), P (.97), Q (.52), R (1.00), et S (.78) font face à la droite, alors que les lettres minuscules a (.85), d (.94), g (1.00), j (.97), q (.88), y (.91), z (.66), et majuscules J (.97), Z (.55) font face à la gauche (un jugement neutre a été émis le plus fréquemment pour les lettres restantes). Comme on peut le vérifier, ces jugements sont presque parfaitement en accord avec l'hypothèse que la structure hasta + coda induit une forme visuelle orientée vers la droite.

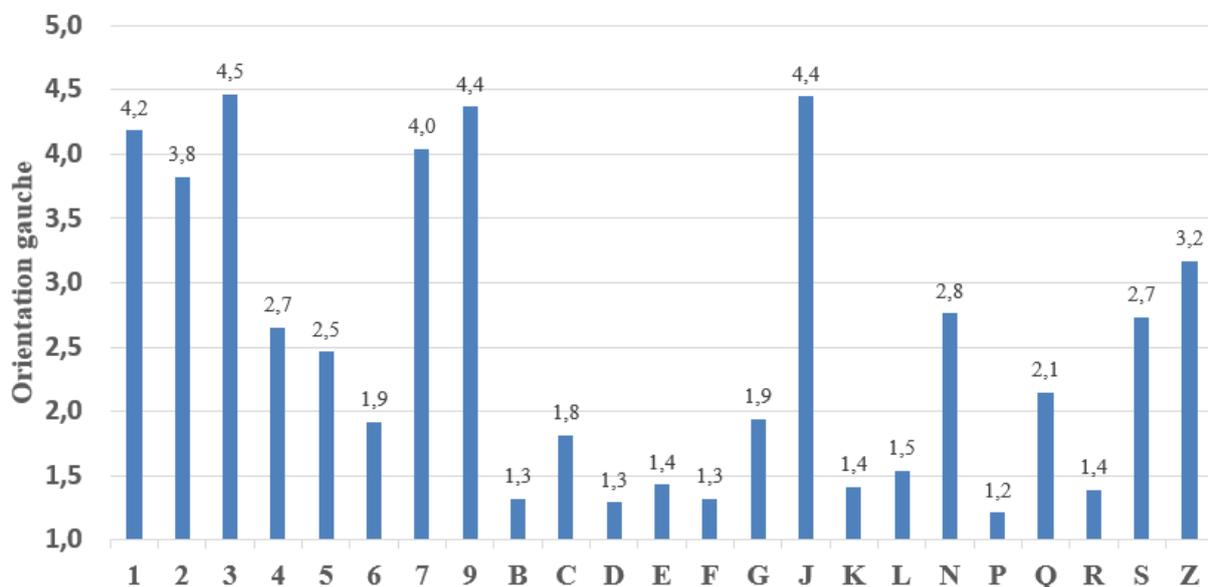


Figure 9 : L'évaluation du degré d'orientation à gauche des caractères asymétriques (verticalement) par des étudiants français de l'Université de Lorraine sur une échelle de 1 (complètement vers la droite) à 5 (complètement vers la gauche). (Données de Fischer, 2018).

J'ai pu vérifier aussi que 142 étudiants français de l'université de Lorraine émettaient quasiment les mêmes jugements d'orientation pour les lettres majuscules asymétriques, les lettres minuscules n'ayant pas été proposées (voir Fig. 9). Notamment, comme dans l'observation de Treiman et Kessler, J, massivement, et Z, légèrement, ont été les seules lettres

majuscules jugées regardant vers la gauche. Avec ces jugements d'orientation nous retrouvons déjà, une première fois et comme annoncé ci-avant, la singularité des lettres majuscules J et Z.

Si l'on écarte une explication de l'inversion des lettres simplement par leur orientation systématiquement à droite par les enfants, comment cette structure hasta + coda peut-elle intervenir ? Nous l'avons vu, le principe de structuration hasta + coda (à droite) confère à la lettre une orientation visuelle droite. Une explication de l'inversion est alors que l'enfant qui trouve le trait vertical visuellement saillant et facile à tracer, va commencer par lui, puis ajouter la coda sur la droite. Une lettre comme q se trouve alors inversée en p (à peu près). Cependant, trois problèmes peuvent se poser à propos de cette stratégie d'écriture. Un premier problème pourrait provenir de la subjectivité de la notion de saillance visuelle : si c'est la boucle de q qui est visuellement saillante, l'enfant va commencer par elle et, en conséquence n'inversera pas q mais p. Pour les deux autres problèmes, il commencera bien par le trait vertical, mais (1) l'apparence visuelle vers la droite peut différer de la direction interne du tracé ou, (2) lorsqu'il écrit de droite à gauche l'apparence visuelle vers la droite s'opposera à la direction de l'écriture. Un enfant risque alors d'inverser une lettre comme D, par exemple, (1) s'il trace les cercles dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, ou bien (2) s'il écrit de droite à gauche en tournant la lettre vers la suivante. Nous verrons que c'est plutôt l'hypothèse (2) qui résiste à l'observation empirique.

2.2. Les chiffres regardent à gauche !

Les nombres et le besoin de compter sont apparus très tôt dans l'humanité. On les situe souvent à plus de 3000 ans avant J.-C., dans la civilisation sumérienne. Mais les premières représentations des nombres (encoches, objets-nombres, parties du corps, ...) ne nous renseignent pas sur la forme des chiffres actuels. Ces derniers, que l'on qualifie d'« arabes », sont vraisemblablement nés en Inde septentrionale, beaucoup plus récemment (Ifrah, 1981). En langue sanskrite, une langue indo-européenne ancienne aujourd'hui utilisée seulement comme une langue liturgique et culturelle, on a par exemple pu retrouver une pièce versifiée dont la numérotation des vers utilisait les chiffres reproduits sur la figure 10.

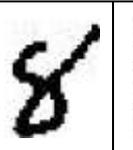
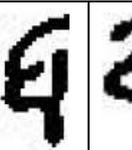
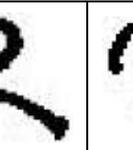
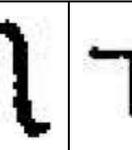
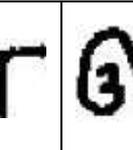
									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Figure 10 : Les 10 chiffres de notre système de numération écrits en langue sanskrite en l'an 875 de notre ère. (Figure construite d'après Ifrah, 1981, p. 463).

Ces chiffres ne présentent pas de structuration de type hasta + coda, ou coda + hasta. Tout au plus peut-on penser qu'ils regardent généralement vers la gauche, notamment 2, 3, 6 et, à un titre moindre 1, 7, 9. Il convient cependant de ne pas attacher trop d'importance à l'analyse de l'orientation de ces écritures car elles peuvent varier en fonction des auteurs qui les rapportent. Par exemple, seuls les chiffres Sanskrit 0, 2, 3 et 4 de Seife (2000/2002) sont identiques à ceux de la figure 10. Sans compter que Seife rapporte aussi des chiffres Indiens (non Sanskrit) qui ressemblent (les 6, 7 et 9 notamment) davantage aux nôtres, actuels. Venons-en donc directement à ces derniers.

Treiman et Kessler (2011) ont analysé leur structuration suivant le principe hasta + coda. Dans le même tableau que pour les lettres, ils indiquent ainsi que 5 est du type b, alors que 4 et 7 seraient du type d avec les formes que l'on trouve dans la plupart des polices de caractères ; si l'on considère des formes moins communes, les chiffres 1 et 9 peuvent aussi être catégorisés dans le type d. Mais on voit bien les limites de telles analyses. Par exemple, pour 4 et 5, la hasta ne s'impose pas vraiment. Primus (2004) a alors tenté d'élaborer des règles heuristiques pour distinguer la hasta (qu'elle préfère appeler « tête » : *head*) de la coda. Par exemple, parmi deux lignes verticales de différentes longueurs, c'est la ligne la plus longue qui constitue la coda, et en cas d'égalité (approximativement) c'est la ligne la plus à gauche. Avec une telle règle, si l'on considère que le trait gauche est souvent presque vertical, le 4 scolaire (4) serait orienté vers la droite, donc de type b. Cet argument, avec le ductus (le sens d'écriture des lettres) tel qu'il est enseigné en France, m'ont conduit à considérer que 4 est orienté vers la droite, de même que 5, mentionné par l'analyse de Treiman et Kessler, et 6, le seul chiffre mentionné par Primus dans cette direction. Pour les chiffres 1, 7 et 9, moyennant une conception large de la verticalité pour les deux derniers, la structure hasta + coda suggère effectivement une orientation vers la gauche. Il n'en demeure pas moins que, pour les chiffres comme pour les lettres, tous les chiffres ne sont pas catégorisables en se basant sur le principe de structuration hasta + coda : les chiffres 2 et 3 échappent à une telle catégorisation.

Ce dernier point m'a poussé à faire juger aussi l'orientation des chiffres, avec les lettres majuscules, par 142 étudiants de l'université de Lorraine (voir Fig. 9). Leurs jugements corroborent quasi-parfaitement la distinction entre les chiffres regardant à droite (4, 5 et 6) et ceux regardant à gauche (1, 2, 3, 7 et 9). Notamment, les chiffres 2 et 3, pour lesquels la distinction hasta + coda ne permettait pas d'orientation, ont été nettement jugés comme orientés à gauche.

2.3. Les quatre écritures de 5

L'écriture du chiffre 5 permet trois inversions gauche-droite différentes. La première est l'inversion totale, c'est-à-dire une écriture en miroir horizontal (voir Fig. 11a). La deuxième consiste à inverser seulement le trait supérieur horizontal, alors que la boucle est correctement orientée (voir Fig. 11b). La troisième consiste à inverser seulement la boucle, alors que le trait supérieur horizontal est correctement orienté (voir Fig. 11c). Comme l'illustre la figure 11, nous avons pu observer les trois types d'inversion dans nos observations de GS de maternelle.



Figure 11 : Différentes écritures de 5 par des enfants dans les observations de Fischer et coll.

Cette question peut sembler un simple détail, ne méritant guère d'être relevé. Et, de fait, je ne connais pas de recherche s'étant préoccupée de la question. Néanmoins, si l'on veut faire des statistiques sur la fréquence relatives d'inversion des chiffres, il faut clairement identifier ces différentes écritures et définir le type d'inversion que l'on retient. Pour discuter les théories neuropsychologiques, comme celle déjà décrite d'Orton (Section 1.6) ou celles à venir de

Les caractères sont-ils orientés ?

Corballis (Section 5.1) ou de Dehaene (Section 5.2), il me semble quasi-impératif de ne considérer que la première inversion (Fig. 11a) comme une écriture en miroir gauche-droite. Faute de l'avoir bien précisé à mes étudiants, qui ont récolté et codé les écritures rapportées dans Fischer (2010a), l'écriture de 5 observée dans cette première recherche, a dû être éliminée dans le tableau synoptique présenté ultérieurement (dans Fischer & Luxembourg, 2018a ; aussi dans la présente figure 34). Instruit par cette expérience, j'ai, dans les recherches suivantes, veillé à ce problème de codage de l'écriture du chiffre 5, en vérifiant en outre systématiquement toutes les écritures codées par les étudiants.

La question des écritures partiellement en miroir peut aussi se poser pour d'autres caractères. Mais les inversions partielles pour d'autres caractères semblent anecdotiques et moins sujettes à des erreurs de codage. Par exemple, le 3 partiellement inversé de la figure 12 (partie droite), ressemble plus à un S, éventuellement à un 2 en miroir, et peut donc difficilement être pris pour un 3 en miroir.

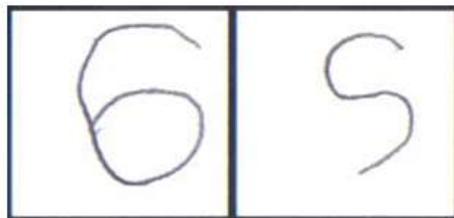


Figure 12 : Une écriture partiellement inversée de 3, précédée par une écriture correcte de 6, produites par une fille de 6 ans et 5 mois, droitère. (Données de Fischer & Tazouti, 2012, Expé. 2).

2.4. Un bilan et une discussion conclusifs

Les évaluations de l'orientation des caractères par les étudiants concernent fondamentalement l'apparence visuelle des caractères statiques. Les processus moteurs de l'écriture, qui sont implicitement évoqués quand une personne adulte observe passivement des lettres (Longcamp et al., 2003), sont certainement moins automatisés chez les enfants. De ce fait, c'est l'apparence visuelle qui pourrait principalement influencer l'écriture. Dans l'optique, d'une étude de cette influence, il est utile de procéder à un bilan synthétique des analyses précédentes quant à l'orientation des caractères asymétriques.

Pour les lettres minuscules, une petite majorité semble orientée à droite (de type b). Pour les lettres majuscules cette orientation droite est beaucoup plus nette. En revanche, pour les chiffres, une majorité semble orientée à gauche. On pourrait donc conclure, en première approximation et avec Primus (2004), que les lettres regardent plutôt à droite, alors que chiffres regardent plutôt à gauche.

Mais les analyses de Brekle (1997a) conduisent aussi, voire surtout, à tenir compte de la dimension cinétique de l'écriture des caractères individuels et de la direction de leur assemblage. En effet, Brekle a énuméré les cinq notions suivantes qu'il est utile de retenir :

- la direction interne en écrivant une lettre (dextrale ou sinistrale), que l'on peut appeler morpho-cinétique ;
- les mouvements dynamiques de la main en écrivant, que l'on peut appeler topo-cinétique ;
- le principe économique dans le processus d'écriture ;

- l'orientation visuelle d'une lettre, vers la gauche ou la droite ;
- le problème d'une collision homographique des lettres qui peuvent devenir trop semblables.

On voit donc que deux composantes fondamentales de l'écriture sont des dimensions cinétiques. Apprendre à écrire, c'est apprendre à concilier morfo-cinétique et topo-cinétique.

Ces deux composantes ont été joliment illustrées par Marine Portex, dans sa thèse, avec, respectivement, l'écriture et le ductus comparatifs de deux mots ou lettres en français et en arabe (voir Fig. 13). Le ductus de la lettre arabe kaf, qui est proche de celui de la lettre française S, montre une des difficultés majeures que l'on rencontre en essayant de catégoriser les caractères selon leur orientation gauche ou droite. En effet, alors que la première boucle de S est ouverte vers la droite, le premier trait est tracé vers la gauche. En outre, le ductus enseigné peut ne pas être le même pour tous les enseignants/parents, et tous les élèves/enfants ne suivent pas scrupuleusement ce qu'on leur enseigne.

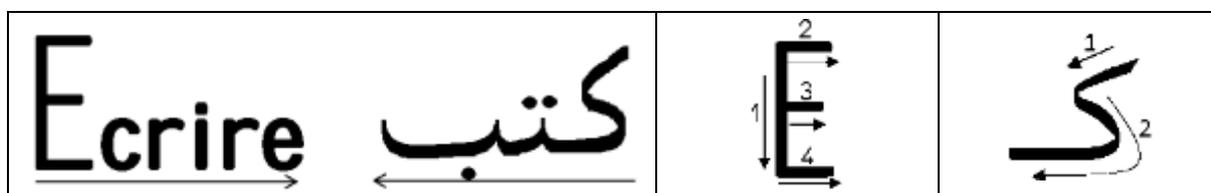


Figure 13 : Comparaison des écritures française et arabe, avec la topo-cinétique (à gauche) des mots « Ecrire » et « kataba », et la morfo-cinétique (à droite) du ductus de leur lettre initiale E et kaf (d'après Portex, 2017).

2.5. Une sorte de réciproque

Alors que notre culture va exercer une influence majeure, déterminante même pour l'inversion des caractères par les enfants, sur l'écriture, un modèle récemment développé par Anne Maass et Caterina Suitner interroge une sorte de réciproque : l'écriture, de la gauche vers la droite ne va-t-elle pas, en retour, influencer notre comportement culturel ? Observons d'abord que, dans leur livre (Maass et al., 2014a), ces autrices regrettaient que « l'écriture en miroir dans les populations non cliniques est sous-étudié », et donc que le présent essai devrait contribuer à remédier à cette lacune. Rapportons maintenant quelques observations empiriques.

Dans l'étude 1 de Maass et al. (2009), une analyse de contenu de 200 images de paires homme-femme (y compris des œuvres d'art, photographies et bandes dessinées) montre que les hommes sont proportionnellement surreprésentés à gauche des femmes, mais seulement pour les couples dans lesquels l'homme est perçu comme plus actif. Dans l'étude 2, les autrices montrent que les gens tendent à dessiner les hommes à gauche des femmes, mais seulement s'ils ont des croyances stéréotypées qui associent les hommes avec plus d'activité. Dans l'étude 3, elles investiguent si les habitudes de scanning dues à la direction de l'écriture sont responsables de ce biais spatial d'action. Elles observent alors une tendance des personnes parlant l'Italien à positionner les groupes actifs (hommes et jeunes) à gauche des groupes moins actifs (femmes et personnes âgées), mais l'inverse chez des personnes parlant l'Arabe qui ont tendance à positionner les groupes les plus actifs sur la droite. Dans leur ensemble, ces résultats suggèrent donc un biais spatial subtil dans la représentation des groupes sociaux qui semble lié aux habitudes d'écriture/lecture déterminées culturellement.

Les caractères sont-ils orientés ?

Dans plusieurs études de Maass, Suitner et coll., les participants se trouvent dans une situation analogue à celle des enfants qui doivent choisir une orientation (qu'ils ne connaissent pas encore) lorsqu'ils écrivent les caractères. La situation des participants les contraint à choisir une orientation, gauche-droite versus droite-gauche, alors que, a priori, rien ne leur impose l'un des deux choix. Par exemple, dans Maass et al. (2014b), des participants de 12 à 19 ans qui maîtrisaient une écriture de droite à gauche (participants irakiens) ou non (participants italiens et malgaches), devaient dessiner un échange de cadeau (dessin à gauche sur la figure 14) ou un acte d'agression (dessin à droite sur la figure 14) entre deux personnes. Les participants irakiens dont les dessins sont reproduits sur la figure 14 ont, à travers leur dessin, plutôt orienté la direction de l'action vers la gauche – la personne A à droite donne le cadeau à celle B à gauche et la personne A à droite insulte celle B à gauche –, alors que les participants italiens et malgaches l'ont plutôt orientée vers la droite.

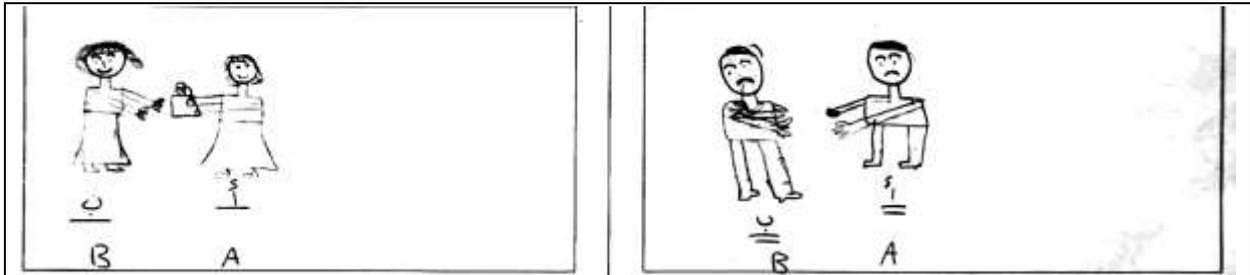


Figure 14 : Dessins de participants irakiens maîtrisant une écriture/lecture de droite à gauche (Figure reproduite à partir de l'Annexe A de Maass et al., 2014b, p. 996).

La théorisation par Suitner et Maass (2016), appelée *Spatial Agency Bias* (SAB), a pu être traduite en français par « biais spatial d'agentisme ». Selon SAB, l'activité humaine est envisagée suivant la direction de script qui prévaut dans un contexte culturel donné, par exemple, de gauche à droite en anglais et de droite à gauche en arabe ou en hébreu. Dans les cultures occidentales, les objets proches sont dessinés à gauche des objets éloignés (Vaid et al., 2011) et les petits nombres sont envisagés à gauche des grands nombres (Dehaene et al., 1993) ; mais ce dernier placement des nombres est peut-être limité à leur propriété ordinale : voir Chan & Wong (2016). Le positionnement spatial d'un objet ou d'une entité dans un affichage horizontal peut apporter des informations pertinentes pour l'appréciation de cette entité par rapport à d'autres dans le même affichage (Von Hecker et al., 2022), et la ligne du temps est imaginée de gauche à droite dans notre culture (Bonato et al., 2012 ; voir Fig. 15). Souvent ces asymétries s'inversent partiellement ou complètement dans les cultures où la langue s'écrit de droite à gauche (Maass et al., 2014a). De manière intéressante pour notre pratique de l'écriture des prénoms (voir Section 6.4), Suitner et al. (2017) soulignent qu'une direction encouragée contextuellement peut facilement annuler les effets des habitudes d'écriture. Par conséquent, une « direction momentanément induite » peut conduire à l'inversion de la règle implicite d'orientation vers la droite. Comme le suggère l'observation précédente (Fig. 14) le biais est une fonction conjointe de deux asymétries interdépendantes, l'une découlant de la direction de script, l'autre de l'ordre sujet-objet.

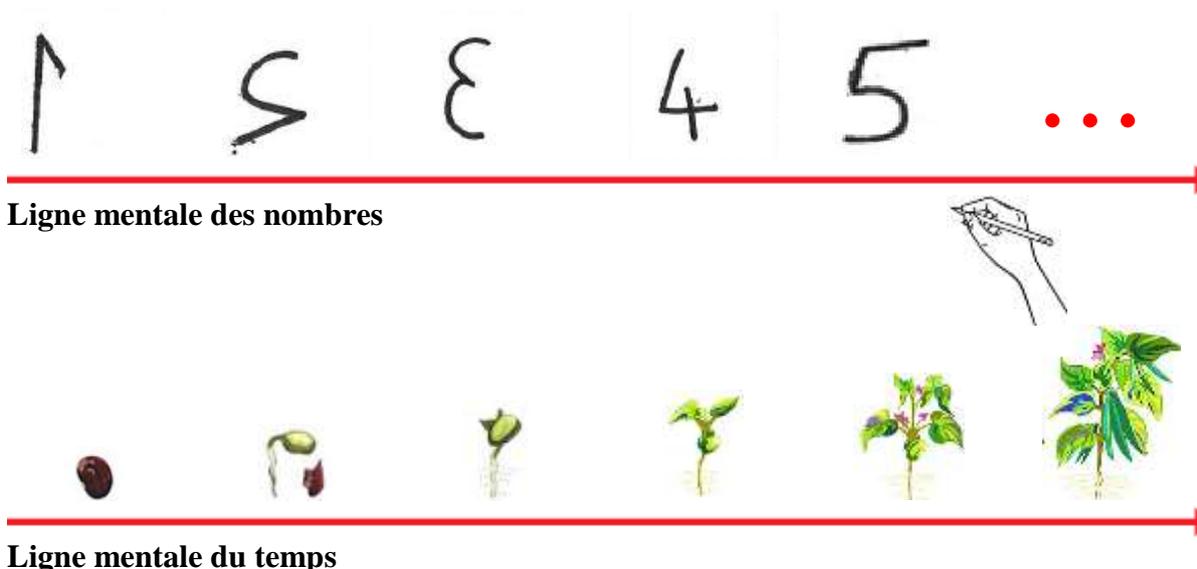


Figure 15 : Une illustration de la communauté des représentations de la ligne numérique et de l'axe du temps. Les chiffres ont été écrits (sous dictée) par une fille droitrière de 5 ans 9 mois dans le cadre de la recherche de Fischer (2011) ; les dessins du développement de la plante sont adaptés de <http://poster.4teachers.org/worksheet/view.php?id=113333>; l'idée de base est due à Bonato et al., (2012).

Cette généralisation du rôle de la direction de l'écriture permet aussi d'observer que les chiffres orientés à gauche le sont dans la direction des plus grandes valeurs. En effet, dans notre système de numération le chiffre a_n au rang n , en partant de la droite avec le rang 0, représente le nombre $a_n * 10^n$. Dans l'écriture $a_n a_{n-1} \dots a_i \dots a_1 a_0$, les chiffres 1, 2, 3, 7 et 9 seront donc tournés vers le côté des plus grands nombres. Par exemple, dans l'écriture de 21, le 1 est tourné vers le 2, qui représente vingt fois plus que lui, ou dans l'écriture 12, le 2 est tourné vers le 1, qui représente cinq fois plus que lui. Assez curieusement, je m'aperçois que je n'ai jamais fait, ni fait faire, ni vu faire ce genre de comparaisons des valeurs représentées par les chiffres d'un nombre.

Il faut toutefois dire que cette influence de l'écriture/lecture sur des comportements variés est souvent de faible intensité et donc pas toujours confirmée statistiquement. Par exemple, Treiman et Allaith (2013) ont observé que des utilisateurs de l'Arabe (à Bahreïn), de la 2^e à la 12^e année d'école, préfèrent, comme des élèves US de 4^e année, les images faisant face à la droite plutôt que celles qui faisaient face à la direction de leur système d'écriture. Certes, la comparaison n'était pas pure, au sens où les élèves bahreïniens de 4^e année ont l'arabe comme langue primaire, mais avaient aussi cinq leçons d'Anglais de 50 min par semaine. Mais elle suggère néanmoins que cette influence de l'écriture/lecture sur la culture peut être labile. Dans l'expérience 2 de Chahboun et al. (2017), les participants espagnols ne sont nullement obligés de préférer les versions droites, la direction de leur écriture, et à s'opposer ainsi aux participants marocains, qui, eux, devraient préférer les versions gauches dans un choix entre une image et son miroir. De même, la culture n'oblige pas un enfant français, en début d'apprentissage de l'écriture, à préférer orienter 3 vers la droite (et donc écrire ε), la direction de l'écriture/lecture dans sa culture. Cette analogie réciproque me permet donc de souligner que la labilité est une propriété fondamentale du choix de l'orientation par les enfants au cours de l'apprentissage de l'écriture.

2.6. Les confirmations fines de la différence entre deux types de caractères

En reprenant la catégorisation, résultant de l'évaluation par les étudiants des caractères regardant vers la gauche (voir Fig. 9), nous pouvons distinguer les ensembles de chiffres $C_g = \{1, 2, 3, 7, 9\}$, qu'ils ont jugés plutôt tournés vers la gauche, et $C_d = \{4, 5, 6\}$, qu'ils ont jugés plutôt tournés vers la droite. De même, nous pouvons distinguer les ensembles de lettres majuscules $L_g = \{J, Z\}$, qu'ils ont jugées plutôt tournées à gauche, et $L_d = \{B, C, D, E, F, G, K, L, N, P, Q, R, S\}$ qu'ils ont jugées plutôt tournées vers la droite. Si, relativement à leur écriture en miroir par les enfants, les chiffres de C_g (ou L_g) diffèrent de ceux de C_d (ou L_d), les enfants inversant les chiffres de C_g (ou de L_g) ne seront pas nécessairement les mêmes que ceux inversant les chiffres de C_d (ou de L_d). Une confirmation de cette dernière hypothèse devrait se traduire par une corrélation négative entre les inversions des deux types C_g et C_d de chiffres. Cette hypothèse peut paraître audacieuse car, pendant plus d'un siècle, et certains encore aujourd'hui, on a essayé d'expliquer l'inversion par des caractéristiques des enfants (e.g., les enfants gauchers, les garçons). Et ce dernier type d'explication devrait conduire à une corrélation positive, les enfants « inverseurs » inversant tous les caractères, de C_g (ou L_g) aussi bien que C_d (ou L_d), alors que les « non-inverseurs » n'en inverseraient aucun. Pourtant, nous avons pu confirmer notre hypothèse audacieuse dans plusieurs de nos recherches.

Dans la recherche sur les chiffres, j'ai déterminé pour chaque élève les taux d'inversion des chiffres de C_g et de C_d (Fischer, 2013a). Même si la corrélation est assez moyenne, elle est bien négative et statistiquement significative avec un effectif de plusieurs centaines de participants réunis avec l'aide de mes étudiantes. En d'autres termes, on peut dire que les enfants qui inversent les chiffres de C_g sont plutôt ceux qui écrivent correctement les chiffres de C_d , et vice versa. Une telle observation empirique jette une pierre – que dis-je, un rocher ! – dans le jardin de ceux qui croyaient, ou continuent à croire, que certains enfants (j'exclus les enfants plus âgés ou à développement non typique) ont une propension (générale) à l'inversion en miroir. L'intérêt de cette observation n'avait pas échappé à l'un des experts du *Journal of Experimental Child Psychology* : il avait écrit qu'elle justifie à elle seule la publication de l'article.

Dans l'étude longitudinale avec Anne-Marie Koch, nous disposons de l'écriture à la fois des lettres et des chiffres, et avons donc pu faire un calcul analogue avec les chiffres et les lettres réunis dans les deux ensembles $CL_g = C_g \cup L_g$ et $CL_d = C_d \cup L_d$. En outre, nous avons la possibilité de dupliquer l'analyse : une fois lorsque les enfants étaient en GS et l'autre fois lorsqu'ils étaient en CP. Les deux analyses ont conforté le résultat précédent puisque, les deux fois la corrélation a été négative, faible à moyenne en intensité, et statistiquement significative (Fischer & Koch, 2016b).

Enfin dans la recherche avec Xavier Thierry en MS, les enfants n'ont écrit les chiffres que de 1 à 5 (Fischer & Thierry, 2021 ; voir aussi Fig. 23). Nous avons donc des sous-ensembles $C'_g = \{1, 2, 3\}$ et $C'_d = \{4, 5\}$ des ensembles C_g et C_d . Avec ces sous-ensembles réduits, une analyse par participant, comme les précédentes, aurait conduit à des pourcentages d'inversions calculés avec seulement respectivement 3 et 2 données. Pour approcher la question de savoir si les chiffres de C'_g diffèrent de ceux de C'_d relativement à leur écriture en miroir par les enfants, nous avons donc préféré suivre une logique différente. Nous avons calculé le coefficient de corrélation point-bisériel de l'inversion de ce chiffre (1 = inversé ou 0 = non inversé), avec le pourcentage d'inversion des autres chiffres (4 données par participant). Comme les chiffres de C'_g sont plus nombreux que ceux de C'_d , si les chiffres de C'_g ont quelque chose en commun

Chapitre 2

qui les différencie des chiffres de C'd relativement à leur écriture en miroir, on doit observer une meilleure corrélation d'un chiffre de C'g avec l'ensemble des autres chiffres. Les corrélations obtenues pour 1, 2, 3, 4 et 5, à savoir, respectivement, .41, .39, .43, .21 et .16 vérifient effectivement cette prédiction.

La conséquence de ces analyses est que les caractères de CLg et de CLd ont bien, intra-ensemble, quelque chose en commun dans leur influence sur leur inversion par les enfants. On peut alors rappeler que les étudiants les ont évalués, respectivement, tournés vers la gauche et vers la droite, et que l'analyse de leur orientation, en tenant compte de leur structure et de la dynamique ou morpho-cinétique de leur écriture s'accorde avec cette évaluation. Cette caractéristique commune pourrait être leur opposition (ceux de CLg) ou non (ceux CLd) à la direction ou topo-cinétique de l'écriture dans notre culture. Nous verrons longuement dans la section 6.1, que ce sont les caractères de CLg, c'est-à-dire orientés vers la gauche, donc contraire à la direction normale de notre écriture/lecture, qui sont le plus inversés.

3. Des hypothèses théoriques avortées

3.1. Le franchissement de la ligne médiane

Le franchissement de la ligne médiane est, encore aujourd'hui, présenté comme un élément clé du développement des compétences de pré-écriture et de pré-lecture et constitue un aspect important du développement de l'enfant (e.g., <https://empoweredparents.co/crossing-the-midline/>). Dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, il a généré quelques recherches empiriques sur des enfants commettant de manière persistante des erreurs d'inversion. En théorie, le problème se pose effectivement puisque, dans l'écriture, la ligne médiane du corps peut être franchie, en tout cas chez les enfants bien (i.e., conventionnellement) assis devant leur table ou bureau. La pertinence du problème semble cependant atténuée ou modifiée par le fait que beaucoup de parents contemporains et d'enseignants (notamment en maternelle) n'insistent pas trop sur la position du corps de l'enfant par rapport à celle du support d'écriture. Également, en traversant la ligne médiane, l'abduction se transforme en adduction, et vice versa : que devient alors l'écriture abductive de la main gauche dans laquelle certains voient l'origine de l'écriture en miroir (voir Section 1.1) ?

Dans la recherche de Chapman et Wedell (1972), la tâche de franchissement de la ligne médiane consistait à tracer, sur un tableau noir, des lignes horizontales et diagonales à partir de la gauche et de la droite, en commençant par le haut et par le bas pour les diagonales. Pour ces tracés, l'enfant devait joindre deux croix qui se trouvaient à deux pieds et six pouces de distance sur le tableau. L'enfant se tenait à un pied (= 0.3408 m = 12 pouces) du tableau, à mi-chemin entre les croix à connecter. Sa performance a été notée à l'aide d'un stencil partagé en zones, son score étant calculé à partir du nombre de zones pour lequel le tracé de la ligne s'écarte des zones acceptables. Les auteurs indiquent que les principaux écarts se sont produits après le franchissement de la médiane. Avec cette tâche, Chapman et Wedell ont comparé un groupe d'enfants de 7 à 8 ans présentant des erreurs d'inversion persistantes avec un groupe apparié de « non-inverseurs ». Outre la tâche de franchissement de la ligne médiane, ces enfants devaient écrire, sous dictée, 10 lettres minuscules inversables, 7 chiffres inversables (pas le 1), trois nombres à deux chiffres et 10 mots inversables (e.g., *god*). Le résultat est en accord avec l'hypothèse d'une difficulté à franchir la ligne médiane pour les « inverseurs ». Les erreurs dans le tracé des diagonales des « inverseurs » excèdent en effet significativement celles des « non-inverseurs ». En outre, les auteurs précisent que les difficultés de ces enfants inverseurs sont spécifiquement liées à l'orientation, et principalement à l'orientation gauche-droite des lettres.

Une étude développementale a cherché à savoir si les enfants trouvent les mouvements qui traversent la ligne médiane du corps réellement difficiles (Schofield, 1976). Elle a porté sur 120 enfants, âgés de 3 à 8 ans, qui faisaient face et copiaient les mouvements des mains d'un modèle. Les enfants ont été répartis en six groupes d'âge, avec 10 filles et 10 garçons dans chaque groupe. L'étude a confirmé l'existence d'un effet d'inhibition latéral croisé. Cet effet se traduit par le fait que les jeunes enfants sont susceptibles de répondre par un mouvement limité au même côté du corps que la main utilisée lorsqu'on leur demande de faire des mouvements de la main qui traversent le corps. Mais la relation de cet effet avec l'âge n'est pas cohérente d'après les résultats de Schofield : Les enfants de 4 ans faisaient presque autant de mouvements croisés que les enfants de 7 et 8 ans, et les enfants de 6 ans faisaient moins de mouvements croisés que tout autre groupe. La réponse de l'étude développementale à la question initiale est

donc plutôt négative. D'ailleurs, l'article se termine par une mise en garde : « à moins que l'effet d'inhibition de la ligne médiane puisse être démontré de manière plus positive dans des contextes contrôlés et entièrement analysés, les mesures d'évaluation et les procédures correctives basées sur son existence supposée devraient être considérées avec prudence » (p. 580). Malheureusement, l'auteur de l'étude ne fait pas référence à Zaslow (1966), une recherche qui avait, une décennie auparavant, précisément testé une méthode de rééducation des erreurs d'inversion chez les enfants basée sur l'orientation corporelle médiane.

La méthode *midline* utilisée dans cette expérience de rééducation de Zaslow découle de considérations théoriques sur les schémas moteurs de la main en ce qui concerne les mouvements d'écriture vers et depuis l'axe vertical du corps. L'auteur a suggéré que certains schémas moteurs primitifs deviennent fixes par rapport à la ligne médiane du corps et peuvent persister indépendamment de l'intention de l'enfant de produire une figure correctement orientée. Le groupe expérimental comprenait 178 enfants (167 sains et 11 cérébro-lésés) sélectionnés par leurs enseignants comme ayant des problèmes d'inversion des chiffres et des lettres (dans la section 6.2, nous analysons individuellement les lettres et chiffres inversés). Une procédure croisée, dans laquelle la position d'écriture normale des participants était modifiée en les forçant à écrire du côté opposé de la ligne médiane du corps, a été utilisée. Cette procédure a permis de corriger les inversions chez 63 % des enfants sains et chez 79 % des enfants atteints de lésions cérébrales lors du premier essai. En outre, dans un groupe témoin de 30 participants sains et sans problème d'inversion, ayant reçu l'instruction de corriger les inversions dans la position d'écriture normale, seuls 13 % ont corrigé leurs inversions. L'auteur a conclu que sa technique est efficace pour corriger un facteur essentiel de la production d'inversions, à savoir les mouvements vers ou depuis la ligne médiane. Malheureusement, dans la situation de test individuel en face à face, seuls 45 % des enfants du groupe expérimental ont inversé des symboles, alors qu'ils avaient été sélectionnés dans leur classe pour leurs problèmes d'inversion. Les statistiques relatives au groupe expérimental ont donc été calculées uniquement sur la base de ces 45% (= 80 enfants), alors que dans le groupe témoin, aucun enfant n'a été éliminé. Par conséquent, le résultat principal de l'expérience – un nombre hautement significatif ($p < .001$ avec un test de chi-deux) d'enfants corrigeant leurs inversions dans le groupe avec la procédure *midline* par rapport au groupe contrôle – repose sur un biais de méthodologie statistique : en recalculant le test de chi-deux sans le biais de sélection, c'est-à-dire en rapportant le nombre d'enfants ayant corrigé leurs inversions aux 178 participants expérimentaux initiaux, la différence significative disparaît au seuil conventionnel de .05.

En conclusion, nous retiendrons que : (1) les limites de l'observation de Chapman et Wedell sont soulignées par les auteurs eux-mêmes : « les performances inférieures du groupe des inverseurs doivent être considérées comme indiquant certaines incapacités liées à l'organisation spatiale du mouvement, dont la nature exacte nécessite une étude plus approfondie » (p. 324) ; (2) le support de l'étude développementale de Schofield en faveur d'un effet d'inhibition latéral croisé est plus que mitigé ; (3) la démonstration expérimentale de l'efficacité d'une procédure de rééducation basée sur la ligne médiane, par Zaslow, est affaiblie par un biais de méthodologie statistique. Tout ceci, ajouté aux réserves sur sa pertinence contemporaine pour l'étude de l'écriture, fait que le franchissement de la ligne médiane ne devrait pas être une variable primaire pouvant expliquer l'écriture spontanée en miroir chez l'enfant typique.

3.2. Une ultime tentative de théorie unifiée

Ce sont Sergio Della Sala, longtemps rédacteur en chef de la revue *Cortex*, et son collègue, Roberto Cubelli, qui sont à l'origine de cette tentative de réunir, dans une même théorie explicative, les productions en miroir des enfants et celles des adultes affectés de certaines pathologies. On se souvient que Critchley (1927) avait déjà réuni, dans un même tableau sur l'étiologie, ces deux groupes de personnes. Mais il n'avait guère poussé le rapprochement plus avant.

Lorsque Della Sala et Cubelli (2007) ont proposé leur théorie de l'apraxie directionnelle (*Directional apraxia*), censée expliquer à la fois les écritures en miroir des enfants à développement typique et des patients adultes, ils avaient déjà procédé à une revue de question sur l'écriture en miroir des adultes pathologiques dans un article avec d'autres (Balfour et al, 2007). Dans cet article, en l'illustrant avec l'écriture de la lettre « F », ils avaient adhéré à l'hypothèse motrice d'Erlenmeyer (1879), certes ancienne mais entretenue durant plus d'un siècle (e.g., Chan & Ross, 1988). En effet, Balfour et al. spéculent que si, avec la main droite, nous avons à produire une ligne verticale et deux segments horizontaux s'éloignant du corps, produire un « F » correct avec la main gauche demande un « mécanisme de transformation ». Ce mécanisme dépendrait de l'attention qui traduit le programme en une ligne verticale et deux segments horizontaux vers le corps. Un faux pas dans ce mécanisme de transformation produira un « F » inversé avec la main gauche.

Dans leur article, le premier dans le *Journal of Neuropsychology* nouvellement créé, Della Sala et Cubelli (2007) proposent un compte rendu unitaire de l'écriture en miroir. Selon eux, celle-ci peut être vue comme une indisponibilité de la représentation de la direction du mouvement approprié, soit parce que la bonne configuration reste à spécifier complètement (les enfants qui apprennent à écrire), soit à cause de son endommagement (lésion cérébrale acquise). Pour cette raison ils proposent d'appeler « apraxie directionnelle » l'absence de l'information directionnelle pertinente pour écrire. Cette conception de l'écriture en miroir comme le symptôme le plus ouvert d'un déficit d'ordre supérieur, très répandu, permet d'y inclure toutes les tâches nécessitant une direction motrice apprise, spécifique. Cela prédit que les scripteurs en miroir devraient aussi avoir des problèmes en distribuant les cartes ou en tournant un robinet ou, ajoutent Della Sala et Cubelli sur le ton de la plaisanterie, en roulant des spaghettis autour d'une fourchette ! En conséquence, l'écriture en miroir doit être pensée comme une forme spécifique d'apraxie affectant la direction d'actions sur-apprises. Mais leur article n'est pas seulement théorique. Della Sala et Cubelli reprennent et analysent en effet l'ensemble des observations sur les adultes pathologiques, et y ajoutent des observations sur des enfants tout-venant.

Les observations sur les adultes pathologiques conduisent à quelques conclusions intéressantes, notamment que la lecture en miroir accompagne rarement l'écriture en miroir. Mais ce sont surtout celles sur les enfants, quasiment identiques à celles de Cubelli et Della Sala (2009), qui nous concernent dans ce livre. Ces observations montrent une petite mais significative baisse de la fréquence des écritures en miroir entre les écoles maternelle et primaire et une plus grande fréquence d'enfants copiant les chiffres en miroir plutôt que les lettres. Pour soutenir leur théorie unitaire, Della Sala et Cubelli énumèrent alors les points communs aux enfants et adultes. Ces deux groupes de personnes :

- produisent des inversions d'écritures dans différentes tâches, y compris l'écriture spontanée et la copie de lettres, mots et chiffres ;
- ont été observés alors qu'ils écrivaient de façon inversée avec des carreaux alphabétiques (*tiles*) ;
- inversent de manière semblable un mot entier, des lettres individuelles dans un mot correctement écrit de gauche à droite et des suites de lettres avec des lettres individuelles correctement orientées ;
- font preuve d'une indépendance entre la difficulté à réaliser des tâches de jugement d'orientation et l'écriture en miroir ;
- discréditent l'association souvent affirmée entre l'écriture en miroir et la manualité gauche : seulement 3 des 18 patients à écriture en miroir du tableau synoptique de Della Sala et Cubelli étaient gauchers ; pour les enfants, il convient toutefois de nuancer, car il y en avait peu (20 enfants gauchers contre 89 droitiers) ;
- présentent un phénomène transitoire, s'effaçant avec le temps ou la pratique.

Mais Della Sala et Cubelli ne sont pas totalement aveuglés par leur théorie. Ils voient bien qu'il y a aussi une différence majeure entre les enfants et les adultes : les enfants inversent les lettres et mots en écrivant avec leur main dominante, alors que la plupart des patients écrivent en miroir avec leur main gauche (non dominante) suite à une lésion cérébrale gauche. Toutefois, cette différence ne leur paraît pas rédhibitoire car Wang (1992) a observé que des enfants chinois droitiers retardés mentaux inversent fréquemment les lettres quand ils écrivent, mais seulement de leur main gauche. Della Sala et Cubelli en concluent que la dissociation de la main chez les patients adultes et les enfants handicapés démontre qu'ils retiennent la connaissance de la bonne direction d'écriture, mais échouent dans son implémentation quand ils utilisent leur main gauche. Cette explication, qui permet à Della Sala et Cubelli de considérer les enfants « apraxiques » comme les patients adultes, pourrait cependant être autre : les enfants, lorsqu'ils ne connaissent pas l'orientation des lettres, peuvent considérer que n'importe quelle orientation peut convenir et choisiront une orientation erronée parce qu'elle est la plus économique (cf., le principe économique de Brekle : voir Section 2.4) et non pas parce qu'ils seraient incapables de produire une orientation correcte. J'ai aussi quelques scrupules à traiter comme un malade (présentant une apraxie) un enfant qui n'aurait pas encore appris/retenu l'orientation des caractères : cela ne revient-il pas à traiter d'aphasique un enfant de quelques mois avec la justification qu'il ne s'exprime pas de manière audible ou compréhensible ! Mais il paraît inutile de critiquer longuement cette théorie de l'apraxie directionnelle car elle n'a pas été vraiment étayée par la suite. Elle a même été rejetée assez directement dans les recherches d'Angelillo et al. (2010) et Kushnir et al. (2013), et indirectement dans la thèse de King (2012) montrant que les enfants (5 à 12 ans) ne discriminent pas les lettres (minuscules script) de leur miroir de la même façon que les adultes (18 à 26 ans).

3.3. Un apprentissage implicite de l'orientation droite

Alors que j'avais déjà dirigé plusieurs mémoires d'étudiants en psychologie sur l'écriture en miroir des chiffres, j'ai proposé à deux étudiantes d'observer l'inversion des lettres majuscules en grande section de maternelle, principalement dans le but de ranger les lettres d'après leur fréquence d'inversion (Fischer, 2010b). Elles revinrent, désolées par leurs observations dans deux classes, car les enfants n'avaient fondamentalement inversé que deux lettres ! Ces lettres sont précisément celles qui ont un statut particulier dans l'évolution de notre alphabet : il s'agit des lettres J – le rajout médiéval – et Z – une intrusion du grec archaïque (voire du phénicien)

– que nous avons déjà rencontrées. Ces rabibochages de notre système alphabétique seraient-ils à l'origine des difficultés de son appropriation par les enfants, tout comme la difficulté engendrée par l'intrusion de la base 20 dans notre système décimal (e.g., quatre-vingt que les enfants écrivent volontiers 420) ? Comme ces lettres, J et Z, au contraire des nombreuses lettres à structure *hasta + coda* (à droite), regardent vers la gauche, une hypothèse simple mais attirante était que les enfants apprennent implicitement que les lettres regardent vers la droite et, lorsqu'ils les écrivent, les font toutes regarder vers la droite, ce qui conduit à inverser les seules lettres J et Z. Les fréquences d'inversion (horizontale), rapportées graphiquement dans Fischer (2011), montrent un pourcentage d'inversion autour de 50% pour J et Z, alors que le pourcentage d'inversion d'aucune autre lettre n'atteint 20%, la plupart de ces derniers pourcentages étant même inférieure à 10% (voir aussi Fig. 35).

Durant les dernières décennies du 20^e siècle, l'apprentissage implicite était un intense sujet de recherche. J'y ai participé un peu avec des recherches sur l'apprentissage implicite d'une grammaire artificielle et d'une prédiction du temps (Fischer, 1997, 2000). L'apprentissage d'une grammaire artificielle, évalué par un jugement de grammaticalité, était notamment vu comme une technique presque optimale pour obtenir un apprentissage implicite (Reber et al., 1991). Cette forme d'apprentissage se caractérise par la détection et la préservation des invariants. Elle se fait par extraction de l'invariance des stimuli de l'environnement à travers maintes occurrences. Or les enfants possèdent de puissants mécanismes d'apprentissage implicite, dès le plus jeune âge (Meltzoff et al., 2009), y compris dans le domaine moteur (Perruchet & Vinter, 2002). Ils pourraient donc extraire, de leur rencontre avec les lettres majuscules, l'idée qu'elles sont tournées vers la droite. L'inversion massive des seules lettres majuscules non orientées vers la droite étayait donc une hypothèse d'apprentissage implicite de l'orientation droite de ces dernières et d'une application systématique de cette orientation.

L'hypothèse qu'un biais implicite pourrait être à l'origine des inversions de caractères par les enfants, s'ajuste aussi à la phylogenèse de la notion de biais implicite telle que la décrit McNutt (2016). Selon cet auteur, les préjugés implicites sont inscrits dans l'ADN humain et nous les avons tous. Le biais implicite était en effet la sténographie qui permettait à nos lointains ancêtres de prendre des décisions (ami ou ennemi ?) en une fraction de seconde sur la base d'informations incomplètes. Il procurait un avantage en termes de temps de réaction qui pouvait signifier la vie ou la mort. Les préjugés implicites sont, par définition, subconscients, ce qui en fait un problème facile à surmonter ou à ne pas réaliser pour l'enfant. Les chercheurs qui ont effectivement observé des enfants l'ont souligné en divers termes. Lévy (1935) notamment, à propos des chiffres 4 et 3, écrivait que l'image renversée d'un signe graphique déjà connu ne choque pas beaucoup la plupart des enfants et, tout en le reproduisant sous sa forme renversée, ils l'appellent toujours de son nom primitif. Il poursuit « Demandez subitement à toute une classe, même de la deuxième année: 'Qu'est-ce que c'est ?' - en leur montrant un de ces trois derniers signes (**4**, **3** et **ε**), et on vous répondra sans broncher: 4, E, 3. » (p. 448). Moi-même, à certains moments, j'ai pu parler de « *bootstrapping* ». Le terme « *bootstrap* », utilisé comme un verbe, signifie s'aider soi-même, souvent par des moyens improvisés, et, utilisé comme un adjectif, peut qualifier un processus qui est auto-initié ou auto-entretenu, et entrepris ou accompli avec une aide extérieure minimale. Et le résultat de ce *bootstrapping*, fut-il en miroir, ne choque nullement les enfants. Je reste marqué par une de mes observations dans une classe

de GS où je testais les élèves par groupes de 4. Dans la salle attenante à la salle de classe, j'avais disposé 4 petites tables/chaises en carré, bien espacées. Pour éviter au maximum tout copiage, je me plaçais au centre du carré. Lorsque j'ai donné pour consigne « Écrivez un trois ! », j'ai vu, presque dans la seconde d'après, surgir quatre **Ƶ** ! En tant que chercheur j'étais ravi d'avoir vécu une telle expérience, mais la maîtresse, que j'admire car elle gérait une classe de plus de 30 élèves, avait la mine un peu défaite quand je lui ai dit que plus de 80% de ses élèves avaient écrit 3 en miroir. Avec la formule consacrée dans l'Éducation Nationale, elle commenta : « Je croyais que c'était acquis ! ». Pourquoi alors abandonner cette explication de l'écriture en miroir basée sur l'apprentissage implicite que les lettres seraient toutes orientées vers la droite ?

Une première réserve relative à une telle explication aurait pu provenir de l'observation empirique de la fréquence d'inversion de J et Z. En effet, les lettres inversées J et Z sont aussi des lettres peu fréquentes. Les données de l'étude expérimentale de McIntosh et al. (2018a), bien qu'elles concernent des caractères artificiels (mais ressemblant à des lettres), ont permis de lever une telle objection. McIntosh et al. ont enseigné à 43 enfants écossais de l'école primaire (âgés de 4.8 à 5.8 ans) quatre caractères artificiels ressemblant à des lettres, dont deux étaient orientés vers la gauche et deux vers la droite. Les caractères étaient nouveaux et n'étaient donc pas soumis à des effets d'exposition préalable comme peuvent l'être les lettres ou les chiffres. Des groupes d'enfants ont été assignés à des jeux de caractères identiques mais inversés en miroir. Après l'apprentissage, les auteurs ont établi que les enfants sont trois fois plus susceptibles d'écrire en miroir un caractère lorsqu'ils l'ont appris dans un format orienté vers la gauche, que d'écrire en miroir un caractère lorsqu'ils l'ont appris dans un format orienté vers la droite. La moindre fréquence des lettres J et Z ne semble donc pas l'explication essentielle de leur inversion.

Une deuxième réserve provient du fait que, jusqu'à présent, on s'est limité aux lettres majuscules. Mais les enfants sont aussi exposés aux écritures des lettres minuscules et des chiffres. Les lettres minuscules n'étaient guère cette seconde réserve. Elles sont certes un peu moins fréquemment orientées vers la droite (d, g, j, q, y sont orientées vers la gauche) mais pourraient quand même contribuer à l'apprentissage implicite de l'orientation vers la droite. En revanche, sur les huit chiffres asymétriques (verticalement), une majorité – les cinq de l'ensemble $C_g = \{1, 2, 3, 7, 9\}$ – est plutôt orientée à gauche ce qui devrait nuire considérablement à, voire empêcher l'apprentissage implicite d'une orientation des caractères vers la droite.

Une troisième réserve, provient d'une étude fine du mécanisme d'apprentissage implicite due à Branigan et Messenger (2016). L'hypothèse selon laquelle les enfants voient beaucoup de lettres orientées à droite et généralisent, par induction, que toutes les lettres sont orientées à droite est certes plausible et compatible avec le raisonnement de l'enfant. Mais l'expérience de Branigan et Messenger met en évidence un apprentissage implicite plutôt basé sur l'erreur et conduit à nous méfier de la simplicité convaincante d'une telle hypothèse. En effet, dans cette expérience, les enfants, de 4 ans 2 mois en moyenne, ont décrit des événements transitifs (e.g., Un chien pousse un pompier), précédés immédiatement par une description par l'expérimentateur sous forme soit active (e.g., Le mouton soulève la sorcière), soit passive (La sorcière est soulevée par le mouton), dans deux jeux d'association d'images, organisés à une semaine d'intervalle. La démonstration d'une facilitation immédiate pour la structure passive étaye un mécanisme d'apprentissage basé sur l'erreur. Comme les enfants étaient exposés de manière égale aux formes actives et passives les auteurs y voient une confirmation de

l'hypothèse selon laquelle l'apprentissage est basé sur l'erreur de prédiction : chaque occurrence de la forme passive peu fréquente (donc inattendue) entraîne un ajustement important du système de connaissances implicites, alors que chaque occurrence d'une forme active très fréquente a peu d'effet. On peut alors se demander si les lettres J et Z, ajoutées à toutes les lettres symétriques, qui ne confirment pas l'orientation à droite, ne seraient pas un frein puissant à l'apprentissage implicite de cette dernière.

Ces réserves peuvent paraître légères, voire non pertinentes pour la première. Mais les réserves sur l'apprentissage statistique de la section suivante, plus profondes et même réhabilitatrices, s'appliquent aussi, pour l'essentiel, à l'apprentissage implicite de l'orientation droite comme explication de l'inversion. L'abandon de cette dernière est donc justifié.

3.4. L'apprentissage statistique de l'orientation droite

L'apprentissage statistique consiste à détecter des informations distribuées et à découvrir des modèles sous-jacents. En première approche, il peut être considéré comme une forme d'apprentissage implicite. Pour des nuances, je peux renvoyer à Bertels et al. (2012) et Perruchet et Pacton (2006); pour une discussion de sa validité, à Erickson et Thiessen (2015), et de sa relation avec un apprentissage explicite à Fischer (2000), Pavlidou et Bogaerts (2019) et Spencer et al. (2015).

Parmi les résultats des nombreuses études sur l'apprentissage statistique, notons que de puissantes capacités d'apprentissage statistique, en tout cas pour le langage entendu, ont été observées par Saffran et al. (1996) à l'âge de 8 mois. En outre, il a été montré récemment que l'apprentissage statistique peut impliquer l'attention involontaire de manière paradoxale (Schneider et al., 2022). Alors que l'adaptation neuronale à l'information distributionnelle locale et transitoire est automatique, le calcul de l'information distributionnelle globale sur un flux continu de stimuli peut impliquer un changement involontaire de l'attention, un processus probablement déployé par les apprenants statistiques les plus performants. La modélisation mathématique nécessite toutefois de préciser quantitativement le matériel qui sous-tend l'apprentissage.

Dans le cas de l'écriture, correcte ou en miroir, l'hypothèse d'un apprentissage statistique affirme que les enfants observent, statistiquement, que les lettres regardent vers la droite et, ensuite, les orientent toutes vers la droite. Cette hypothèse ne diffère guère de celle relative à l'apprentissage implicite. Simplement, une modélisation mathématique nécessite des précisions statistiques sur le matériel. C'est peut-être Simner (1984) qui fut le premier à expliquer l'inversion des lettres orientés à gauche par un tel apprentissage statistique. Mais, tout comme Mr Jourdain qui faisait de la prose sans le savoir (dans "Le bourgeois gentilhomme" de Molière), il a décrit ce dernier sans le nommer. Il remarque en effet que dans les séries alphanumériques anglaises il y a plus de lettres et de chiffres qui font face à la droite. Il indique que les lettres faisant face à la droite sont plus nombreuses dans un rapport de deux contre une. Notons – c'est l'une des faiblesses de cette théorie – que Simner se garde bien de préciser ce rapport (en défaveur de l'orientation vers la droite) pour les chiffres. Simner propose alors que les enfants prêtent attention à l'orientation lorsqu'ils scannent les caractères alphanumériques et qu'au cours du scannage, ils prennent conscience de l'abondance bien plus grande de lettres orientées vers la droite. Une version spéculative de l'apprentissage statistique, qui implique peut-être davantage la conscience, a aussi été évoquée par Simner, puis Lane (1988) et Richmond (2010). Cette dernière indique, par exemple, à propos des lettres 'd' et 'q' que, "si

un enfant spéculer sur ses chances de réponse correcte, il choisira naturellement de mettre le trait distinctif à droite, ce qui entraînera l'inversion des lettres tournées vers la gauche" (p. 56).

Cette théorie de l'apprentissage statistique a ensuite été défendue par Treiman et coll. (Treiman & Kessler, 2011 ; Treiman et al., 2014). Cette hypothèse de l'apprentissage statistique est très proche, voire se confond avec l'hypothèse de l'apprentissage implicite car on ne voit pas comment les enfants pourraient observer implicitement l'orientation à droite si les lettres regardant vers la droite n'étaient pas plus nombreuses que celles regardant vers la gauche. Ces deux apprentissages ont leurs propres théoriciens, mais le « bébé statisticien » (titre du cours 2013 de Stanislas Dehaene au Collège de France) est probablement plus attirant que le « bébé apprenant implicite » ! Je préfère toutefois la qualification implicite car elle sous-entend qu'il existe un apprentissage (explicite) autre et, surtout, meilleur car l'apprentissage implicite peut avoir des ratés. Les psychologues ou psycholinguistes anglais ont ainsi beaucoup étudié le développement du passé des verbes irréguliers, les enfants qui disent *goed*, *breaked* au lieu de *went*, *broke*, par exemple. La qualification « implicite » de l'apprentissage permet alors d'y inclure des généralisations pseudo-empiriques qui n'ont pas cours en mathématiques (Fischer, 2013b) et qu'un statisticien ne devrait donc pas faire.

Pourquoi ai-je définitivement abandonné cette hypothèse d'apprentissage statistique ? Je ne reviens pas sur mes deux réserves relatives à l'apprentissage implicite mais qui s'appliquent aussi à l'apprentissage statistique dès lors que ce dernier est vu comme une forme d'apprentissage implicite. Quelle que soit son appellation, statistique ou implicite, cette forme d'apprentissage, si on veut y voir l'origine des inversions (en miroir horizontales) dans les écritures des enfants, conduit à une objection majeure : lorsque les enfants écrivent de la droite vers la gauche, ils n'inversent pas en général les lettres orientées à gauche mais, au contraire, celles orientées à droite (voir Section 6.4). Le caractère décisif de cette objection n'a pas échappé à Portex (2017) et à Meletis (2020). Ce dernier a notamment souligné, dans l'évolution de mes écrits, le passage d'une règle d'écriture (ou mieux : d'orientation) vers la droite à une règle d'orientation dans la direction de l'écriture. Cette évolution me semble effectivement importante. Certes, une règle d'orientation à droite semble valide dans notre culture, et dans les cultures occidentales plus généralement, mais elle n'attire pas l'attention sur ce qui est important, à savoir la direction de l'écriture (et non pas la droite, ou la gauche dans d'autres cultures). Il est cependant utile de préciser que cet abandon ne concerne pas l'apprentissage statistique lui-même, mais sa capacité à expliquer l'inversion des caractères par les enfants. Dans le domaine du développement de la littératie l'apprentissage peut, par ailleurs, jouer un rôle important. Yin et McBride (2015) montrent par exemple que les jeunes enfants chinois ont détecté des régularités dans le chinois écrit avant de recevoir un enseignement formel à ce sujet et qu'il peut résulter d'un apprentissage statistique précoce.

3.5. Un amorçage par l'écriture précédente

Dans l'amorçage, l'écriture du caractère précédent facilite l'occurrence de certaines conduites chez le scripteur, en provoquant une « mise sous tension » des réseaux neuronaux associés au mouvement (cf., Desmurget, 2006, p. 23). Il est ainsi possible qu'un amorçage moteur, dû à l'écriture du 6 précédent, soit à l'origine de la boucle supérieure du 3, incorrectement orientée, de la figure 12. Plusieurs examens d'écritures de séries de caractères, rassemblées dans la figure 16, encouragent aussi cette hypothèse.

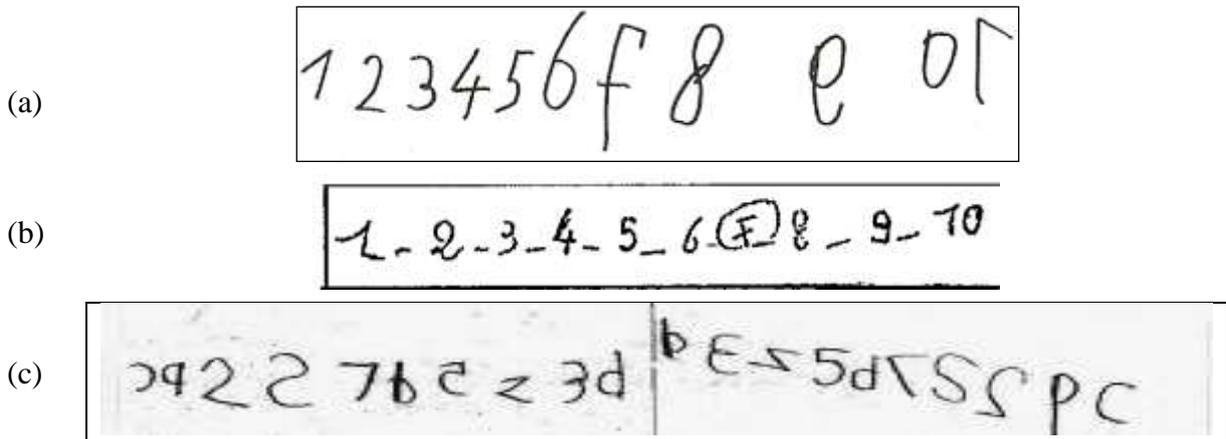


Figure 16 : Séries de caractères écrites (a) par un écolier gaucher de première année (reproduite à partir de Lebrun, 1990, Fig. 2, p. 178), (b) par un garçon gaucher de 9 ans qui ne sait pas lire : le 7 écrit en miroir a été entouré (reproduite partiellement à partir de Meljac, 1994, p. 168), (c) par Tenneson (reproduite partiellement à partir de Mather, 2012, Fig. 1, p. 175).

Les écritures de la suite des premiers nombres reproduites sur les figures 16a et 16b, montrent que les deux élèves concernés ont écrit le 7 vers la droite, en miroir. Or le 7 vient immédiatement après le 6, le chiffre le plus clairement orienté vers la droite. Le premier élève a ensuite systématiquement inversé les chiffres inversables, alors que le deuxième a repris la bonne orientation après le 8. Si l'on voit dans cette illustration une confirmation que l'écriture en miroir concerne principalement les enfants gauchers, je peux répéter que durant plus d'un siècle on a reproduit des écritures en miroir quasi-exclusivement d'élèves gauchers et qu'il n'est donc pas étonnant que l'on retrouve une sur-représentation d'écritures en miroir par des enfants gauchers. En outre, l'écriture du second élève, plus âgé que les enfants à développement typique dont nous discutons principalement dans cet essai, sera ultérieurement interprétée comme une confusion (avec la lettre F) plutôt que comme une inversion. Les troisièmes écritures, reproduites sur la figure 16c, sont celles de Tenneson un élève canadien de 1^{ère} année d'école testé par Mather (2012). Cet élève était encouragé à écrire la série b, 3, z, 5, d, 7, s, 2, p, c, en majuscules ou minuscules, en partant une fois de la droite et une fois de la gauche d'un trait médian. Ses écritures illustrent une possibilité d'amorçage en plusieurs passages, notamment l'écriture de 2 après S. Les boucles, en général initiales, du 2 et du S sont quasiment identiques à condition d'inverser l'un des deux caractères. Ainsi, lorsqu'il suit un S correct (partie droite de la figure 16c), le 2 pourrait être amorcé de manière trompeuse et, de ce fait, inversé; mais, lorsqu'il suit un S inversé (partie gauche de la figure 16c), il pourrait être amorcé favorablement et, de ce fait, écrit correctement.

Dans l'une de mes séries que j'avais dictée à 356 enfants de 5 à 6 ans, ces derniers devaient écrire normalement, c'est-à-dire de la gauche vers la droite, une série où 2 suivait S. J'ai alors observé quantité soit de **SS**, soit de **22**. La figure 17 en reproduit quelques-uns.

Des hypothèses théoriques avortées

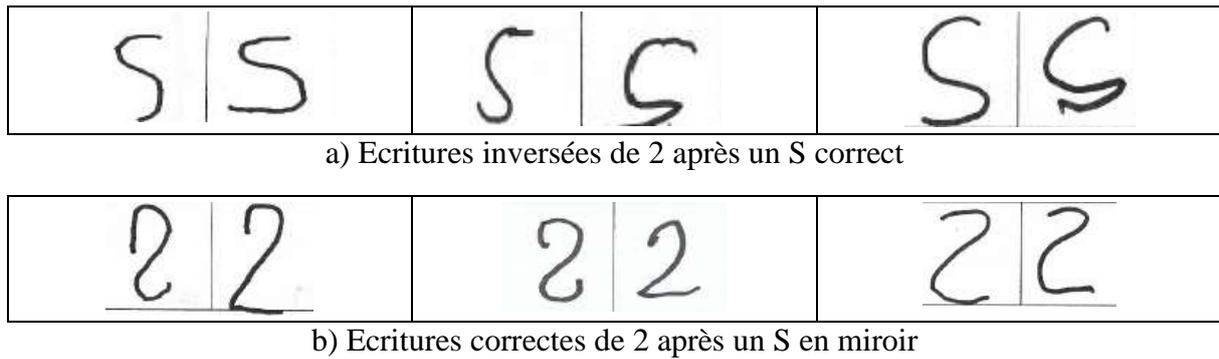


Figure 17 : L'écriture de 2 après S dans la série dictée : R, E, 3, D, 8, 6, J, S, 2, 9, Z (données de Fischer & Tazouti, 2012, Expé. 2).

Mais les écritures de Tenneson s'expliquent aussi si l'on fait l'hypothèse qu'il oriente les lettres dans la direction de l'écriture. Dans la série de droite, c'est-à-dire quand il a écrit vers la droite, toutes les caractères orientés à droite sont écrits correctement (b, 5, s, p, c), et tous ceux orientés à gauche sont inversés (3, z, 7, 2), sauf d. Dans la série de gauche, c'est-à-dire quand il a écrit vers la gauche, tous les caractères orientés à gauche sont écrits correctement (3, z, 7, 2), sauf d, et tous les caractères orientés à droite sont inversés (b, 5, s, p, c). De manière très spéculative, je propose que l'exception de d soit due à la présence de b en début de série : Tenneson aurait simplement évité de reproduire la même écriture. Cette possibilité d'expliquer la quasi-totalité des inversions par une règle d'orientation des caractères dans la direction de l'écriture justifie (en partie) mon abandon d'une explication par l'amorçage moteur.

Un résultat statistique secondaire étayait aussi la possibilité d'un amorçage moteur de l'écriture un chiffre par l'écriture précédente. En GS, j'avais en effet observé que 67.50 % des enfants qui ont écrit 6 en miroir ont écrit 3 correctement immédiatement après, contre seulement 52.25 % de ceux qui ont écrit 6 correctement (Fischer, 2010a). Cette observation, marginalement significative, était étonnante car on s'attendrait plutôt à ce qu'un enfant qui a tendance à inverser 6 a plus de chance d'inverser aussi 3 qu'un enfant qui ne manifeste aucune tendance à inverser 6. Mais, d'un point de vue moteur, elle était plausible car le geste moteur spécifique impliqué dans l'écriture de 6 (grande boucle ouverte vers la droite) pourrait avoir favorisé la mauvaise orientation des boucles du 3 suivant, alors que le geste moteur spécifique impliqué dans l'écriture en miroir de 6 (grande boucle ouverte vers la gauche), pourrait avoir favorisé la bonne orientation des boucles du 3 suivant. Mais, à l'instar de l'explication des inversions de Tenneson, on peut supposer qu'un enfant qui écrit 6 en miroir n'applique pas la règle d'orientation vers la droite et donc n'inversera pas 3 (à cause de cette règle en tout cas), alors qu'un enfant qui écrit 6 correctement est susceptible d'utiliser la règle d'orientation vers la droite et donc pourra inverser 3 (à cause de cette règle).

Cette hypothèse m'a conduit à étudier systématiquement la relation entre l'inversion d'un chiffre et le statut – correct ou en miroir – de l'écriture du chiffre précédent sur 367 enfants de GS (Fischer, 2013a). Les résultats semblaient, au premier abord, nettement confirmer l'hypothèse d'amorçage. Notamment, après un 6 écrit correctement, les enfants ont inversé le 3 suivant dans 68.4% des cas, alors que, après un 6 écrit en miroir, ils n'ont inversé le 3 suivant

que dans 17.8% des cas. Ce résultat ne signifie cependant pas que l'amorçage direct du chiffre précédent est la seule cause de l'inversion du chiffre actuel.

D'abord, empiriquement, j'ai observé que lorsqu'il n'y a pas de chiffre immédiatement avant le chiffre à écrire (au début de la série : les enfants répondaient à 4 séries de 10 chiffres), la fréquence d'inversion est aussi élevée que dans l'ensemble de l'échantillon d'écritures. Ensuite, et surtout, un problème méthodologique empêche une interprétation directement causale de l'influence de l'écriture précédente. En effet, le fait qu'un enfant soit inclus ou non dans le groupe des enfants ayant inversé l'écriture du chiffre précédent, est le résultat de toutes ses écritures précédentes (y compris passées, hors expérience), voire plus généralement de son état au moment d'écrire. Par conséquent, les enfants qui ont écrit 6 (par exemple) en miroir peuvent avoir quelque chose d'autre en commun qui les différencie des enfants qui ont écrit 6 correctement. Ce « quelque chose en commun » peut être la force de représentation ou d'activation d'une règle implicite d'orientation vers la droite, dans la direction de l'écriture. Ainsi, ce n'est pas nécessairement l'écriture précédente de 6 qui expliquerait l'inversion ou non du 3 suivant : si l'enfant a une règle d'orientation vers la droite fortement activée (je répète, car c'est important: non nécessairement, voire pas du tout, par la seule écriture précédente) dans sa mémoire implicite à long terme, il écrira 3 en miroir quelle que soit l'écriture du caractère précédent.

Cette dernière explication convient à l'ensemble des inversions observées, analysées en fonction de l'écriture précédente, dans cette recherche (Fischer, 2013a). Par exemple, après 2 écrit correctement, 12.7% seulement des enfants ont inversé le 7 suivant, alors que, après 2 écrit en miroir, 80.5% des enfants ont inversé le 7 suivant. Ce résultat n'est pas étonnant lorsqu'on sait, comme nous l'avons vu, que 2 et 7 regardent tous deux vers la gauche : un enfant, qui n'aurait pas encore mémorisé la bonne écriture en mémoire explicite et appliquerait une règle d'orientation vers la droite, règle fortement activée dans sa mémoire implicite, écrira les deux chiffres en miroir. Inversement, si un tel enfant n'a pas de règle d'orientation vers la droite fortement activée (voire s'il a une règle d'orientation vers la gauche fortement activée), aura de bonnes chances d'écrire correctement ces deux chiffres. Cette explication convient aussi pour une observation particulière rapportée dans Fischer (2011, Table 1). Dans cette recherche, les enfants de 5/6 ans devaient écrire 3 précédé par B. Or B contient quasiment le chiffre 3 comme coda, à droite, et un trait vertical comme hasta, à gauche. Comme B a été correctement orienté par plus de 95% des enfants, le chiffre 3 suivant aurait pu bénéficier d'un amorçage favorable. Mais il n'en est rien. Plus de 65% des enfants qui avaient orienté correctement B ont néanmoins inversé 3, alors que moins de 10% des rares enfants qui avaient écrit B en miroir, et auraient donc pu être victimes d'un amorçage biaisant, l'ont inversé !

En conclusion, je n'adhère plus guère à cette hypothèse de l'amorçage direct par l'écriture juste précédente, même si je ne rejette pas totalement l'idée d'amorçages moteurs, comme les amorçages trompeurs de 3 par 6, ou de 2 par S, que j'ai décrits précédemment. Plus généralement, cette mise en retrait de l'amorçage moteur complète bien la thèse, soutenue et argumentée par ailleurs, selon laquelle la composante motrice de l'écriture n'est pas fondamentale pour l'explication causale de l'inversion en miroir des caractères.

Comme il faut toujours tirer des leçons positives de ses erreurs, j'insiste encore sur ce problème méthodologique général qui survient dès que l'on crée des sous-groupes à partir de l'observation en cours, à la différence de sous-groupes créés antérieurement à l'observation

(e.g., en fonction du sexe ou de la catégorie socio-économique). Ce problème est omniprésent dans la littérature scientifique. Avec la pandémie de Coronavirus, on a pu le retrouver dans la recherche sur la chloroquine de Mehra et al. (2020). Cette recherche a défrayé la chronique et emballé les journalistes et politiques, pour être finalement retirée par la revue *The Lancet* qui l'avait publiée. Je ne parle pas ici de la possible fabrication des données par la société *Surgisphere* qui serait tellement grotesque qu'il n'y a pas lieu d'en discuter. Je parle de la méthodologie de l'analyse des données mise en œuvre par les auteurs. Ces derniers présentaient, en termes de survivants et non survivants, les résultats de quatre types de traitement : (1) la chloroquine seule, (2) la chloroquine avec macrolide, (3) l'hydroxychloroquine seule, ou (4) l'hydroxychloroquine avec macrolide. Le biais méthodologique provient ici du fait que les patients non nullement été assignés aléatoirement aux différents traitements. Au contraire, il y a lieu de penser que les malades assignés à un type de traitement avaient déjà « quelque chose en commun ». Par exemple, le fait d'avoir (en moyenne) une forme plus grave de la maladie, avant cette assignation à un type de traitement. Ce n'est donc pas nécessairement parce qu'on leur a administré un certain type de traitement qu'ils sont décédés plus (ou moins) fréquemment mais possiblement parce qu'ils étaient davantage (ou moins) malades avant le traitement ! Il est étonnant que les « experts » d'une revue médicale de grande réputation – *The Lancet* – à défaut de voir que les données étaient erronées ou trafiquées, n'aient pas vu cette erreur méthodologique. Une fois que *The Lancet* avait exprimé sa préoccupation à propos de la recherche de Mehra et al., j'étais curieux de voir si d'autres experts, interrogés par le *ScienceMediaCenter*, ont vu cette grossière erreur. Sur les cinq experts (exclusivement anglais) interrogés, un seul – Martin Landray, Professeur de médecine et d'épidémiologie au *Nuffield Department of Population Health* de l'Université d'Oxford – a souligné, sans plus, l'erreur méthodologique : « Les patients qui reçoivent un médicament particulier (dans ce cas, l'hydroxychloroquine) sont différents de ceux qui n'en reçoivent pas »¹⁰.

¹⁰ <https://www.sciencemediacentre.org/expert-reaction-to-expression-of-concern-on-study-on-hydroxychloroquine-and-chloroquine-in-covid-19-patients/> (Retrouvé le 21 Juin 2020).

4. Quelques mises au point salutaires !

4.1. L'attention n'est pas le problème

Une explication de l'inversion des caractères, notamment d'un caractère isolé, qui vient presque immédiatement à l'esprit est celle par l'inattention. Parmi les réflexions sur les causes de l'écriture en miroir, l'attention a effectivement été présentée, dès 1893, comme la cause principale par Treitel (cité d'après Lochte, 1896). Pour Heller (1904), lorsqu'un enfant répète de la main gauche les mouvements d'écriture qu'il a appris de la main droite, dans le sens d'une écriture en miroir, il faut considérer cela uniquement comme une preuve qu'il n'offre pas de résistance à la tendance initiale de répétition symétrique des mouvements d'écriture de la main droite. Pour résister à cette tendance, il faut un degré d'attention plus élevé que les jeunes écoliers normaux n'ont pas encore. Fuller (1916) a essayé d'induire ce qu'il appelle une abstraction, mais que l'on peut considérer comme un détournement de l'attention, par l'arithmétique mentale ou le visionnement de cristaux. Ce détournement expérimental a provoqué 30% d'écritures en miroir immédiates (sur les 90 écritures exploitables) de la main gauche chez 15 personnes adultes normales. De telles observations prédisent une augmentation de l'écriture en miroir lorsque l'attention est affaiblie. Mais on notera aussi que si elles s'intègrent parfaitement dans le tsunami d'écritures de la main gauche (voir Section 1.2), elles ne nous renseignent pas spécifiquement sur le rôle de l'attention chez des enfants typiques écrivant avec leur main usuelle.

Beaucoup plus récemment Levy et Young (2016) ont étudié rétrospectivement l'inversion des lettres sur plus d'un millier d'enfants susceptibles de présenter un trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH ; en anglais : *attention deficit hyperactivity disorder*, ADHD), un concept entré dans le Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux en 1994. Ils ont noté l'âge maximum auquel des inversions s'étaient encore manifestées, ainsi que la latéralité des enfants, et ont mesuré leur temps de réponse à une tâche de repérage (ou non) d'une lettre parmi 20 autres. Ils ont obtenu, à la fois pour les garçons (beaucoup plus nombreux) et les filles, un effet significatif de l'âge d'inversion, mais pas de la latéralité. Il est cependant essentiel de voir que l'inversion des caractères qu'ils ont relevée est une « inversion statique » – on est proche de l'oxymore ! – qui concerne l'inversion des seules lettres dont le miroir horizontal est une lettre: b et d, p et q (Furness, 1956). La manière dont l'âge maximum d'inversion a été déterminé, à savoir par le reportage des mères à qui l'on donnait l'exemple de l'inversion de b et d, et l'âge lui-même – la plupart des enfants avaient plus de 6 ans – incitent à penser que l'inversion statique serait mieux désignée par le terme de confusion (voir Fischer & Luxembourger, 2022). En tout cas, l'inversion examinée n'est pas une inversion au cours de l'écriture.

Nous avons examiné l'impact de l'attention dans une première recherche impliquant un grand nombre d'enfants à développement typique. Ce nombre devait être substantiel car on sait, en statistiques, que l'absence d'effet avec un effectif restreint ne démontre pas grand-chose. Avec mes étudiants de Master en psychologie, nous avons donc testé plusieurs centaines d'élèves dans deux conditions expérimentales : dans l'une l'attention pouvait être concentrée sur l'écriture (condition d'attention totale), dans l'autre elle devait être partagée avec une autre activité intellectuelle (condition d'attention affaiblie). Notre hypothèse était que cette dernière, augmenterait le pourcentage d'écriture en miroir. En 1^{ère} année d'école (CP), nous avons fait

Quelques mises au point salutaires !

écrire les neuf chiffres (tous sauf 0, le chiffre symétrique 8 n'étant pas pris en compte dans les analyses) dans un quadrillage de 3 sur 3. Dans la condition d'attention totale, les enfants devaient simplement écrire, sous dictée et non dans leur ordre naturel, dans les cases successives. Dans la condition d'attention affaiblie, ils devaient écrire les chiffres en résultat d'un calcul. Par exemple, pour l'écriture de 7, il était demandé d'écrire le résultat de $5+2$.

En grande section de maternelle (GS), la condition d'attention totale était identique à celle en cours préparatoire (CP). Dans la condition d'attention affaiblie, les enfants devaient écrire les chiffres dans une case précise d'un tableau à double entrée indiquée par ses entêtes de ligne et de colonne par l'expérimentateur. Ce dernier demandait, par exemple, d'écrire 7 dans la case de la fleur rouge (voir Fig. 18).

Le tableau est un quadrillage 3x3. Les entêtes de colonne sont : une maison grise, une étoile grise, et une fleur grise. Les entêtes de ligne sont : un cercle jaune, un cercle vert, et un cercle rouge.

Figure 18 : Le tableau à double entrée utilisé en GS pour l'écriture des chiffres dans une condition d'attention affaiblie (par rapport à la simple écriture dans un quadrillage), utilisé dans la recherche de Fischer (2010a).

Notre hypothèse de départ ne s'est nullement confirmée : aucune différence significative entre ces deux conditions dans les pourcentages d'écriture en miroir n'a été observée. En GS, les enfants ont même produit légèrement moins d'inversions dans la condition d'attention affaiblie ! Pourquoi une prédiction de bon sens, à savoir qu'une tâche dans laquelle l'enfant ne pas allouer la totalité de ses ressources attentionnelles à l'écriture devrait augmenter les erreurs d'inversion, ne s'est-elle pas confirmée ? Le résultat de notre comparaison a alors contribué à entretenir le mystère dont on a souvent entouré l'écriture en miroir, un mystère non totalement usurpé puisque l'enfant produit des écritures que personne ne lui a jamais apprises et qu'il ne peut guère avoir vues.

4.2. La recopie et l'écriture de mémoire sont deux tâches différentes

Au début de l'apprentissage de l'écriture, les enfants traitent les lettres et les chiffres arabes comme des images. D'ailleurs, à l'âge de 5 ans, l'aire cérébrale de la forme visuelle des mots (*Visual Word Form Area* : VWFA)¹¹ montre des réponses identiques pour les lettres et les chiffres, bien que les visages et les lettres y soient déjà dissociés (Hannagan et al., 2015).

¹¹ Je me contente dans ce texte du concept de VWFA, bien que l'on ait pu distinguer aussi des aires de la forme des lettres (Thesen et al., 2012) et de la forme des nombres (voir la méta-analyse de Yeo et al., 2017, et, postérieurement, Grotheer et al., 2018; Vatansever et al., 2020). Ces dernières aires peuvent sembler plus adaptées à une réflexion sur l'écriture des caractères, mais leurs existence et définition, a fortiori leur développement, me paraissent insuffisamment bien établis pour m'y référer.

Également, les recherches de Bulthé et al. (2014, 2015) montrent il n'y a pas de chevauchement d'activités entre les chiffres arabes et les collections points qu'ils peuvent représenter dans le sulcus intrapariétal de l'adulte (*intraparietal sulcus* : IPS), une région cérébrale qui a souvent été proposée comme la zone centrale pour une représentation abstraite de la quantité numérique. De tels résultats incitent à traiter les chiffres arabes à l'instar d'une cognition d'image ou d'objet. Sur des enfants de 7 ans ou plus Fastame (2020) a en outre montré que les processus simultanément actifs de la mémoire de travail visuelle/spatiale jouent un rôle différent dans la conduite de la copie d'un motif géométrique que dans celle de son dessin à partir de la mémoire. Mais cela ne semble pas au cœur de notre problème d'inversion. Pas tellement à cause de l'âge des participants, mais du fait que, en copie, les enfants peuvent reproduire l'orientation correcte (puisque'elle est devant eux), alors que, de mémoire, ils ne peuvent pas reproduire l'orientation correcte (puisque'elle n'y est pas : voir la suite).

Lucy Fildes (1923) fut l'une des premières chercheuses à vérifier si les enfants font aussi des inversions en copiant simplement des caractères. Mais, d'abord, dans l'expérience 5 de sa recherche, elle a étudié la question avec des formes. Ensuite, dans son expérience 6, elle a comparé une écriture par copie, versus de mémoire, des chiffres et des lettres. Son résultat est d'une rare netteté : les 32 enfants, entre 6 et 7 ans d'âge, à développement typique, n'ont fait qu'1 et 0 erreur d'orientation en copiant les lettres et les chiffres, respectivement, contre 22 et 4 en reproduction libre (Fildes a dénommé ainsi son entête de colonne, mais parle bien d'écriture « de mémoire » dans le texte). Les 25 enfants déficients, du même âge, qui leurs sont comparés n'en ont d'ailleurs pas fait plus en copie, et même moins en écriture de mémoire. Fildes explique cette curieuse dernière observation par le fait qu'ils n'avaient pas le stade de familiarité incomplète associé aux erreurs d'orientation. Mais Fildes ne met pas en valeur la différence entre copie et écriture de mémoire des caractères (Expé. 6). En fait, Fildes semble même regretter cette réussite des élèves lors de la copie : elle note qu'ils ont copié l'ensemble des lettres de l'alphabet et des chiffres tels qu'ils étaient présentés et que « l'on peut douter du fait qu'ils ont réellement compris ce qu'ils avaient à faire » (p. 65), ignorant ou oubliant par là-même que sa propre consigne ne demandait rien d'autre que de copier ! En conséquence, elle préfère souligner que les erreurs d'orientation se produisent à la fois dans la copie des formes et dans leur reproduction de mémoire (Expé. 5). Il est donc moins étonnant qu'Orton ait été induit en erreur par sa lecture de Fildes (voir Section 1.6), d'autant que cela confortait sa théorie selon laquelle la lecture et l'écriture relèvent du même processus d'inversion.

Orton (1925), nous venons de le revoir, s'était largement référé aux recherches de Fildes. Mais, par la suite, de nombreux chercheurs ont « oublié » cette recherche de Fildes qui montre une différence majeure entre copie et écriture de mémoire des caractères, rendant ainsi leurs mixtures de copies et d'écritures de mémoire difficilement interprétables. Nous-même, sans référence à cette recherche de Fildes mais plutôt parce que les enfants de MS n'étaient pas encore tous capables d'écrire les chiffres de mémoire, avons comparé des enfants de GS écrivant les chiffres de mémoire avec des enfants de MS les copiant d'après un modèle. Le résultat m'a surpris à un moment où je n'avais pas encore intégré l'observation de Fildes : les enfants de MS produisaient moins d'erreur d'orientation que ceux de GS ! Mais les études en MS et GS n'avaient pas été planifiées pour une comparaison et n'impliquaient pas les mêmes enfants. Pour remédier à ce problème, nous avons inclus, Youssef Tazouti et moi, dans un test plus général de niveau en fin de GS, une épreuve où les mêmes élèves copiaient et écrivaient de mémoire des lettres et chiffres. Pour des raisons de durée du test, seules 8 lettres majuscules ont été incluses dans le test, et une moitié environ des élèves recopiait ces lettres et écrivait de

Quelques mises au point salutaires !

mémoire les chiffres, alors que l'autre moitié écrivait de mémoire les chiffres et recopiait les lettres. À ce moment, j'étais surtout intéressé par la corrélation entre les deux types d'écriture : les enfants inversaient-ils préférentiellement les mêmes caractères (e.g., le chiffre 3, la lettre J) en recopie qu'en écriture de mémoire ? Un jour des grandes vacances, dont j'ai profité pour analyser les résultats du test pratiqué en fin d'année scolaire, je fus extrêmement déçu du résultat car le calcul du coefficient de corrélation n'avait guère de sens : les élèves n'avaient pratiquement pas fait d'erreurs lors de la recopie !

Simner (1984) avait étudié l'écriture de 40 caractères par des enfants droitiers de trois groupes d'âge de 4.9, 5.8, et 6.7 ans en moyenne. Il s'agit d'une écriture, certes de mémoire, mais après une exposition du caractère de 2.5 s, c'est-à-dire avec une tâche beaucoup plus proche de la copie que notre tâche d'écriture sous dictée. Nous ne sommes donc pas étonnés par les pourcentages d'inversion extrêmement faibles, 5%, 2% et 0% respectivement, qu'il a obtenus. Non seulement les enfants ne font guère d'erreurs d'inversion en copiant, mais la recherche de Maldarelli et al. (2015), à l'aide d'une technologie de suivi oculaire, a montré que le processus de coordination visuo-motrice des enfants de maternelle était aussi efficace que celui des adultes lors de la copie de lettres individuelles.

Trop d'enfants (tout-venant), en MS, n'ayant pas encore mémorisé l'écriture des caractères, il est difficile, voire impossible, d'y étudier statistiquement les inversions lors de l'écriture de mémoire. Cela nous a conduit, dans l'étude longitudinale qu'Anne-Marie Koch planifiait pour sa thèse, à faire copier, malgré la facilité prédite, par les enfants de MS d'une circonscription scolaire non favorisée d'un point de vue socio-économique, les mêmes caractères (chiffres et lettres majuscules) qu'ils allaient ensuite écrire de mémoire en GS et à nouveau en CP. Le résultat prédit s'est confirmé : Les enfants ont produit beaucoup moins d'images en miroir des caractères en MS (environ 3%) qu'en GS (environ 21%); le nombre d'enfants ayant produit au moins un caractère en miroir était significativement plus faible en MS (76 sur 166, soit 46%) qu'en GS (154 sur 166, soit 93%).

4.3. Un problème de mémoire et non de perception

Les observations précédentes – la quasi-absence d'inversion lors de la copie de modèles et l'augmentation des inversions quand les enfants commencent à mémoriser les écritures – constituent un argument fort et presque suffisant pour affirmer que les enfants perçoivent bien visuellement les caractères (sauf déficience visuelle évidemment). Néanmoins, ces observations gagnent à être insérées dans un cadre plus général. L'importance de la distinction entre perception et mémoire a notamment été mise en évidence dans le domaine du traitement des visages. Une comparaison du taux de développement de la discrimination versus la mémoire des visages (adultes, humains), par rapport à d'autres stimuli, de 5 ans à l'âge adulte, montre ainsi une dissociation claire entre mémoire et perception (Weigelt et al., 2014).

Il y a un demi-siècle les observations de Ray et Joan Over (1967) avaient déjà attiré l'attention sur cette dissociation. Over et Over ont testé des enfants de 4 et 6 ans dans deux conditions : l'une de détection, l'autre de reconnaissance. Dans la condition détection, deux plaques, avec respectivement les obliques / et \, étaient présentée en dessous d'une troisième plaque, avec soit l'oblique /, soit l'oblique \, et désignée comme la bonne. L'enfant devait choisir la bonne entre les deux plaques en dessous. Dans la condition reconnaissance on présentait seulement les deux plaques avec les obliques / et \, la tâche de l'enfant étant de désigner la bonne. Dans cette seconde condition, c'est le feedback de l'expérimentateur qui

devait permettre à l'enfant de reconnaître la bonne oblique dans les essais suivants. Les résultats montrent que 13 enfants de 4 ans (sur 16) et 4 enfants de 6 ans (sur 16) ont échoué dans la condition Reconnaissance, alors que seulement 4 enfants de 4 ans ont échoué dans la condition Détection (aucun de 6 ans). Ray Over (1967), dans un article de la revue *Nature* référant à cette recherche, commente : « L'enfant perçoit que les obliques en miroir ont une orientation différente, mais il semble incapable de se rappeler d'un essai à l'autre quel est la 'bonne' oblique » (p. 1272). C'est vraisemblablement ce qui se passe aussi pour les caractères : l'enfant distingue bien N de И mais est incapable de se rappeler qu'elle est la bonne écriture de N, sauf si on lui donne un moyen mnémotechnique comme semblent le faire beaucoup d'enseignants : « on monte, on descend et on remonte ».

Sur la base d'autres observations, Bryant (1969, 1973) a certes interprété différemment ce résultat d'Over et Over. Bryant a notamment montré que deux obliques non en miroir sont tout aussi confondues que deux obliques en miroir par des enfants de 4 à 7 ans. Cependant, dans son expérience 1, Bryant (1969) a montré que des enfants, de 5 ans 3 mois en moyenne, réussissent à choisir la ligne oblique, appariée à une ligne oblique (45°), lorsqu'on leur présente simultanément la ligne oblique et que le choix est entre la ligne oblique et son miroir, mais qu'ils répondent au hasard quand le choix est proposé 5 s après. À propos, notamment, de ces réussites à la comparaison simultanée et échecs à la comparaison délayée, Corballis et Zalik (1977) ont conclu que ce qui est clair, à propos des résultats de Bryant, « c'est que la difficulté de discriminer des images d'obliques en miroir est un problème de mémoire plutôt que de perception » (p. 516). Même les bébés (âgés de 3 à 4 mois) semblent capables de distinguer les différences d'orientation, bien qu'ils aient tendance à considérer les images en miroir comme des stimuli équivalents (Bornstein et al., 1978).

Par la suite, certains auteurs n'ont pas manqué de souligner cette différence entre la perception et la reconnaissance en mémoire. Nous pensons notamment à Corballis et Dehaene, dont nous analysons plus longuement les théories dans les sections 5.1 et 5.2, mais aussi à Lachmann et Geyer (2003) qui écrivaient, avec force, que « la généralisation de l'image-mémoire décrit un effet de la formation de la mémoire et non de la perception » (p. 57). C'est en effet vraisemblablement le processus de généralisation en miroir (voir le chapitre 5) qui explique la non-reconnaissance de la « bonne » oblique dans l'observation d'Over et Over (1967).

Un soutien indirect récent à l'hypothèse que la confusion se produit dans la mémoire, plutôt que pendant la perception visuelle, provient des données originales de Gregory et al. (2011). Ces chercheurs ont demandé à leurs participants – des enfants de 4 ans, 6 ans et des adultes – de faire correspondre des objets ayant des orientations différentes à un objet cible. Les trois types d'erreurs commises par les participants sont illustrés avec l'exemple d'une clé dans la figure 19.

Quelques mises au point salutaires !

			
A : stimulus cible	B : erreur SAPO (symétrie / axe principal de l'objet)	C : erreur SEAV (symétrie extrinsèque / axe vertical)	D : erreur SEAH (symétrie extrinsèque / axe horizontal)

Figure 19 : Trois types d'erreurs d'appariement produites par les participants à la recherche de Gregory et al. (2011).

Les données permettent de tester l'hypothèse d'une origine mnésique, plutôt que perceptive, de la confusion entre une image et son image miroir horizontal (symétrique par rapport à un axe vertical). Pour ce faire, nous comparons les résultats des expériences 1 et 2 de Gregory et al.. Dans l'expérience 1, la tâche de correspondance d'orientation imposait des exigences minimales à la mémoire. À chaque essai, une image cible était présentée et restait visible pendant que l'enfant essayait de trouver l'image ayant la même orientation dans un tableau à choix forcé. Dans l'expérience 2, les exigences de la tâche en matière de mémoire ont été augmentées en supprimant le stimulus cible à chaque essai avant de présenter le tableau de test à choix forcé. Une conséquence hypothétique de cette différence entre les tâches, et de l'hypothèse de l'origine mnésique de la confusion des images miroir, est que la tâche moins mnésique de l'expérience 1 génèrera une proportion moindre d'erreurs SEAV (miroir horizontal avec notre dénomination usuelle) que la tâche plus mnésique de l'expérience 2. L'analyse restreinte aux stimuli obliques (comme celui de la figure 19) montre effectivement que le rapport entre le nombre d'erreurs SEAV et le nombre d'erreurs SAPO est significativement inférieur dans l'expérience 1 à celui dans l'expérience 2.

Le fait que l'inversion en miroir n'est pas un phénomène perceptif a aussi été mis en évidence sur des personnes adultes. Kolinsky et al. (2011) ont pu comparer des adultes illettrés, ex-illettrés et normalement scolarisés, tous de langue maternelle portugaise. Les participants illettrés et ex-illettrés n'ont jamais été scolarisés dans leur enfance, pour des raisons socio-économiques, à l'exception de quelques participants. Aucun participant illettré n'était capable de lire des mots simples, la plupart étaient incapables de signer leur propre nom. Les participants ex-illettrés ont appris à lire et à écrire dans des cours d'alphabétisation pour adultes auxquels ils participaient sous la pression de leur environnement (par exemple, lors de l'enrôlement dans l'armée ou parce que leur employeur l'a exigé). Comme les personnes illettrées, ils travaillaient comme ouvriers agricoles, cordonniers, maçons ou femmes de ménage, les autres étant retraités ou sans emploi. Le constat de Kolinsky et al. est clair : Les individus scolarisés (i.e., lecteurs) divergent des individus illettrés en ce qui concerne l'énantiomorphie – la capacité à discriminer les images miroir latérales – à un niveau de

représentation post-perceptif, plus tardif, et suggèrent par conséquent que la déficience en énantiomorphie n'est pas un problème de codage des entrées.

4.4. Les formes des caractères sont mémorisées précocement

Il est important, car jusqu'à présent la question n'a pas été abordée, de rappeler que pour inverser les caractères, les enfants doivent déjà avoir mémorisé la forme des caractères (sans leur orientation). Par exemple, que 3 est formé de deux boucles, l'une au-dessus de l'autre. Une telle mémorisation des formes est-elle dans les cordes d'un enfant de 4 ou 5 ans ?

Le psychologue allemand William Stern, davantage connu pour avoir eu l'idée de rapporter l'âge mental à l'âge chronologique, ce qui a donné le quotient mental et, plus tard, le quotient intellectuel, considérait l'appréhension de la forme comme un comportement quasiment inné. Downey (1914) cite, en anglais, un de ses articles allemands dans lequel il écrivait: « Il existe une perception de la forme avec une apparente indifférence pour la position qui semble indiquer que la perception de la position est issue de l'expérience, alors que la forme semble innée (*nativistically*) » (p. 417). Stern (1927), en allemand cette fois-ci, écrivait : « Le comportement normal dans la vie naturelle implique sans aucun doute que le petit enfant ne prête que très peu d'attention à la couleur lorsqu'il reconnaît des objets, alors qu'il identifie immédiatement une forme caractéristique, quelle que soit la différence de couleur » (p. 372) et précise, en note, que d'autres spécialistes du développement de l'enfant sont convaincus de la prééminence de la forme. Dans la figure 20, je rapporte l'une des expériences résumée par Stern, dont le matériel se rapproche des caractères d'écriture. Les 851 enfants devaient d'abord identifier les deux images identiques dans les deux groupes de 2 du dessus ; puis ils devaient retrouver cette image identique, qui ressemble à un trois en miroir dans cet exemple, parmi les 10 présentées en dessous sur la figure 20. Malgré la complexité de la tâche, les réussites se sont considérablement accrues entre 4 et 5 ans, en passant de 7% à 25%.

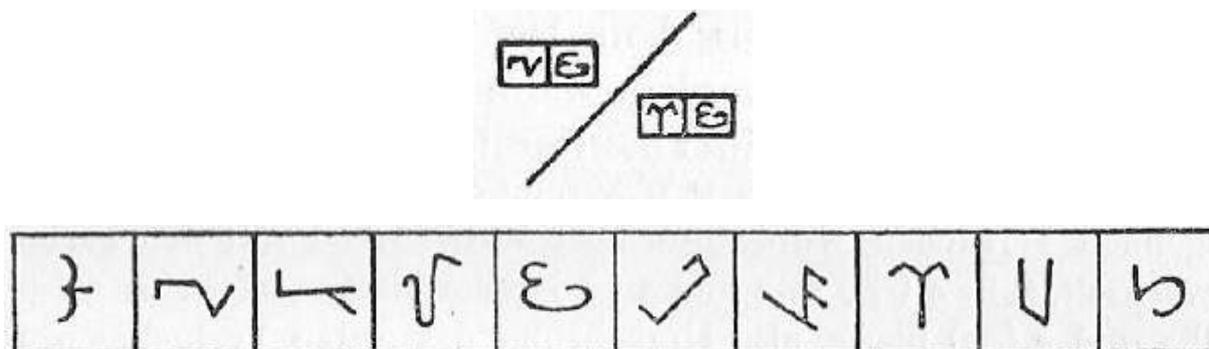


Figure 20 : Matériel d'une expérience d'identification d'un graphisme rapportée par Stern (1927, p. 375).

La forme, comme dimension préférée du très jeune enfant, a été confirmée dans l'expérience de Brian et Goodenough (1929). Ces derniers ont testé 474 participants, dont l'âge allait de moins de 2 ans à l'âge adulte, avec une tâche d'appariement de solides ou de surfaces géométriques de différentes couleurs. L'appariement pouvait se faire soit selon la forme, soit selon la couleur, mais jamais selon les deux simultanément. Les enfants en dessous de trois ans ont une tendance vraiment marquée à appairer selon la forme plutôt que selon la couleur. La couleur est préférée à la forme par chaque groupe d'âge d'une demi-année entre 3 et 6 ans. À l'âge de 6 ans, la forme redevient le facteur prédominant dans cette situation, et la proportion

Quelques mises au point salutaires !

de choix de la forme comparativement à la couleur s'accroît continûment de l'âge de 6 ans à l'âge adulte. Entre 2 ans et 2 ans 1/2 les choix sur la base de la forme (84%) dominent très largement ceux sur la base de la couleur (16%). Si on ne regarde que les surfaces, cette préférence est encore plus impressionnante : 97.7% des choix entre 2 ans et 2 ans 1/2 portent sur la forme contre 2.3% seulement qui vont à la couleur !

J'ai pu vérifier, à un âge où les enfants semblent davantage attirés par la couleur, que la forme reste un critère non totalement négligé (Fischer, 2004). Dans une tâche de tri libre, l'enfant devait mettre ensemble les cartes (voir Fig. 21) qui vont bien ensemble (selon lui). À tous les âges testés, 4 ans, 4 ans ½, 5ans et 5 ans ½, au moins un quart des enfants a marqué une préférence pour la forme, malgré l'attrait de la couleur et celui du nombre (ou de la longueur) pour les petites collections de moins de quatre éléments. À propos de l'indistinction du nombre et de la longueur dans cette observation, il est intéressant de préciser que si ces deux grandeurs sont mises en concurrence, les enfants âgés de 2 ans 2 mois à 6 ans ont préféré le nombre dans l'expérience récente de Sokolowski et al. (2022).

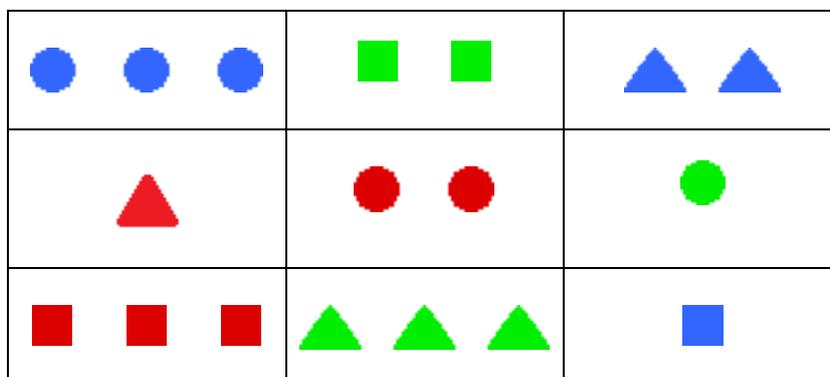


Figure 21 : Les 9 cartes, représentant les petites collections, à trier (critère libre) dans Fischer (2004) ; les grandes collections étaient analogues mais contenaient 4 à 6 éléments (toujours alignés et régulièrement espacés).

Même si nous ne pouvons analyser systématiquement les recherches sur la reconnaissance des formes, le point de vue de Stern sur sa quasi-innécité, le choix prépondérant de la forme par les enfants de 2 ans dans l'expérience de Brian et Goodenough, et un certain maintien de l'attrait pour la forme à 4 ou 5 ans alors que la couleur semble exercer un attrait majeur, nous paraissent suffisants pour suggérer que les enfants typiques de 5 ans devraient avoir mémorisé la forme des caractères (au moins sans orientation). D'autant que – Stern avait déjà insisté sur ce point – cet intérêt pour les formes est stimulé lorsque le matériel est signifiant pour les enfants. Et les lettres, qui servent à écrire le prénom, ou les chiffres qui peuvent servir à identifier la maison ou l'étage de l'appartement, ont, à l'évidence, une grande signification pour les enfants. Par ailleurs, le développement de leurs capacités motrices, étayé par l'enseignement scolaire ou familial, devrait alors leur permettre une production du tracé sur papier de ces formes si l'on n'est pas trop exigeant. Nous ne l'avons jamais été dans tous nos codages des écritures. Parmi les chiffres, quand ils les écrivaient sous mes yeux, j'ai surtout retenu le chiffre 8 que les enfants de 5 ans avaient encore quelque mal à tracer : certains

commentaient « je fais juste deux ronds », ou « celui-là je l'ai pas bien réussi » ; voir aussi la figure 56.

L'une des conséquences non triviale de la nécessité de mémoriser les formes des caractères (sans nécessairement mémoriser leur orientation) devrait être que ce ne sont pas les élèves scolairement les moins performants qui produisent le plus d'inversions. Cela d'autant que l'écriture exige, en supplément de la simple mémorisation, une reproduction tracée de la forme. Bien entendu, comme il s'agit d'un apprentissage, ce ne sont pas non plus les élèves les plus performants qui devraient produire le plus d'inversions ! Ainsi, la corrélation entre la performance scolaire et la production des inversions devrait se situer à un niveau intermédiaire. Deux études au moins confirment cette hypothèse.

Johansson (2005), dans son expérience 1, a testé 161 élèves suédois de dernière année d'école maternelle (6 ans), en début d'année scolaire. L'élève recevait une feuille de papier et un stylo et devait écrire les chiffres qu'il connaît. Les réponses ont été codées en quatre catégories: chiffres correctement écrits, chiffres inversés en miroir horizontal, chiffres omis et chiffres illisibles. Ces mêmes élèves ont aussi été soumis à des additions (1+4, 3+4, 5+7) et des soustractions (5-4, 8-3, 13-6), toujours présentées sous forme de petits problèmes verbaux. La corrélation entre la performance arithmétique et le niveau d'écriture des chiffres s'est avérée positive avec les écritures correctes ($r = 0.22$), positive mais légèrement moindre avec les écritures inversées ($r = .17$), et négative avec les chiffres omis ($r = -0.21$).

Nous avons également obtenu une telle corrélation intermédiaire pour les écritures en miroir (Fischer & Tazouti, 2012, Expé. 1a). Dans cette expérience, 296 élèves de GS maternelle devaient écrire, sous dictée, 8 caractères (chiffres ou lettres majuscules non symétriques), et étaient par ailleurs soumis à une batterie d'épreuves évaluant leur performance scolaire. La corrélation de cette dernière avec le niveau d'écriture de mémoire des caractères suit l'ordre prédit : elle est positive avec le pourcentage d'écritures correctes ($r_s = 0.324$), positive mais plus faible avec le pourcentage d'écritures inversées ($r_s = 0.145$) et négative avec le pourcentage des autres écritures ($r_s = -0.448$)¹².

Mais la connaissance précoce de la forme, fut-elle sans l'orientation, se heurte à un obstacle de taille : mémoriser une image rigide ne serait guère efficace car la taille et la forme des caractères n'est pas fixée (pour les caractères d'imprimerie) et change inter- et intra-scripteur. Il est donc probable qu'une conceptualisation (Schubert, 2017) ou une représentation allographique (Rothlein & Rapp, 2017) du caractère soit mémorisée. Teresa Schubert donne une description systématique de tous les chiffres et lettres majuscules. De telles conceptualisations de caractères (par exemple, 3 est formé de deux demi-cercles identiques superposés; 8 est formé de deux cercles identiques superposés) sont abstraites, c'est-à-dire invariantes par rapport à des propriétés telles que la taille, la position absolue et l'épaisseur du trait. Elles reflètent donc des caractéristiques indispensables de la forme du caractère. Ces représentations de caractères, qu'elles soient qualifiées d'allographiques ou non, résolvent donc le problème de la confrontation du cerveau avec d'innombrables variantes de polices pour un caractère donné en permettant son identification même lorsque ses écritures diffèrent. Pour cette identification, Pelli et al. (2006) ont constaté que ce ne sont pas des modèles de lettres entières

¹² Nous notons r_s le coefficient de corrélation par rangs de Spearman.

qui sont utilisés, mais que l'identification d'une lettre se fait par la détection d'environ 7 caractéristiques visuelles.

Enfin, si les enfants veulent orienter les caractères dans la direction de l'écriture, ils doivent connaître cette dernière en plus de la forme. Il ne nous semble toutefois pas nécessaire de consacrer une longue section spéciale à l'apprentissage implicite par les enfants de la direction de l'écriture/lecture dans leur culture. En effet, les jeunes enfants surprennent par leurs connaissances au sujet des caractéristiques visuelles de l'écriture, notamment celles relatives à leur prénom (Treiman et al., 2007). Il est vrai que certains parents enseignent l'écriture du prénom quasi-explicitement: pour un bel exemple, voir Treiman et al.. En outre, la lecture de livres d'images par les parents, éducateurs et enseignants peut expliquer facilement cet apprentissage de la direction (Göbel et al., 2018); les programmes télé et logiciels, que je connais mal, probablement aussi. Les travaux de Goldstein et al. (2016) montrent par exemple que les parents lisent des livres de comptage et des livres non numériques à leurs enfants, même à l'âge préverbal (5 à 10 mois) ! Et ceux de McCrink et al. (2017) montrent que le comptage effectué par les gardes (*caregiver*) d'enfants peut favoriser la représentation spatiale de gauche à droite même chez les tout-petits (24 à 47 mois). Au début des années 1990, en France, Gombert et Fayol (1992) avaient d'ailleurs déjà relevé la capacité précoce (dès l'âge de 3 ans pour certains participants) de produire des graphiques présentant certaines des caractéristiques de l'écriture, dont la direction gauche-droite.

4.5. Le primat de la modalité visuelle dans l'apprentissage initial de l'écriture

Le but de cette section n'est pas de discuter de manière directe la pertinence d'une explication motrice de l'écriture en miroir. À la suite d'Erlenmeyer (voir Section 1.1), à qui l'on attribue la paternité d'une telle explication, cette dernière versus une explication perceptive, a continué à être discutée (e.g., Lebrun et al., 1989 ; McIntosh & Della Sala, 2012 ; Schott, 2007). Un argument majeur en faveur de l'explication motrice est que les personnes qui écrivent facilement en miroir ne lisent pas plus facilement en miroir. Ce pattern peut effectivement être expliqué par le fait que la première activité relèverait d'une représentation motrice alors que la seconde relèverait d'une représentation visuelle. Il est amusant de voir que cet argument est, encore plus facilement (si la comparaison a un sens !), accommodé par notre théorie puisque nous soutiendrons que l'inversion en écriture n'a rien à voir avec celle en lecture (voir Section 8.2).

Notre but, dans cette section, est d'affirmer que le début de l'apprentissage de l'écriture implique fondamentalement la modalité visuelle. Cela a pour conséquence de secondariser l'explication motrice au sens où elle dépend d'une représentation visuelle préalable. Notre affirmation doit évidemment excepter les enfants aveugles. Mais les enfants aveugles congénitaux ne doivent guère écrire manuellement les caractères, même s'ils peuvent avoir une représentation de la forme probablement dans le cortex occipito-temporal. En effet, ce dernier ne représente pas seulement les objets visuellement, ce qui nécessite une expérience visuelle, mais les représente également non visuellement, ce qui reflète la connaissance de la forme des objets indépendamment de la modalité par laquelle cette connaissance a été acquise (Peelen et al., 2014).

La raison de cette forte implication de la modalité visuelle est à la fois générale et spécifique. Elle est générale, à cause de la dominance visuelle chez l'être humain, en particulier lorsque la vision est comparée au toucher et à la proprioception (Gullaud & Vinter, 1998; Posner

et al., 1976 ; Rock & Victor, 1964). La théorie de Rock suggère même que la vision fournit directement des informations spatiales mais que le toucher ne fournit de telles informations que par le biais de son association apprise avec la vision (Rock cité d'après Posner et al., 1976). Elle est spécifique en ce qui concerne le processus d'apprentissage. Presque tous les enfants, lorsqu'ils apprennent à écrire leur premier mot – souvent leur prénom – le copient d'abord sur un modèle. Il en va de même pour l'apprentissage de l'écriture des lettres et des chiffres : aucun enseignant, ni aucun parent, n'enseigne l'écriture d'une lettre ou d'un chiffre sans montrer comment faire et sans montrer le produit final. Plus généralement, les psychologues du développement et les enseignants ont souvent noté que le programme moteur de l'écriture des lettres prend de nombreuses années avant d'être opérationnel. Dans une revue générale sur l'acquisition de l'écriture, il est souligné que ce n'est certainement pas avant 10 ans que l'écriture est automatisée (Séraphin-Thibon et al., 2018). Avant l'automatisation l'enfant utilise massivement des informations sensorielles pertinentes, notamment visuelles (Chartrel & Vinter, 2004). En conséquence, il n'est pas étonnant que l'examen longitudinal, de la troisième à la sixième année, d'élèves américains par Kim et al. (2018), suggère que les relations entre la lecture et l'écriture pourraient être unidirectionnelles de la lecture vers l'écriture.

Par ailleurs, les données de Vinter et Chartrel (2008) sur des enfants de 4 à 6 ans montrent qu'il y a un délai d'environ 1 an entre les reconnaissances visuelle et proprioceptive des lettres cursives. Il est donc peu probable que la proprioception soit à l'origine de la reconnaissance visuelle des lettres. Liliane Lurçat, dont le mari François Lurçat (1927-2012) était physicien, a beaucoup décrit, en termes de physique ou de géométrie, le développement des mouvements kinesthésiques de l'écriture chez l'enfant. Elle n'en rapporte pas moins que sa fille, Hélène, à 4 ans, recopiait tout (e.g., les inscriptions sur le taille-crayon ou le crayon) et, surtout, lui réclamait, des modèles (Lurçat, 1979). En copiant des lettres, ou des graphismes, Hélène ajustait certainement ses mouvements de la main à sa perception visuelle et ne devait donc pas avoir de problème particulier avec l'orientation. Dans la phase où l'enfant passe de la copie à l'écriture de mémoire, et où il utilise souvent les deux procédures, en fonction des contraintes, il est alors vraisemblable qu'il va utiliser la même stratégie. En conséquence, lorsqu'il ne voit pas la lettre à écrire, il va essayer de l'imaginer visuellement. Manque de chance, en mémoire, l'orientation de la lettre a disparu (voir Section 5.3) et alors, pour l'écrire, il est obligé d'en improviser une.

Ainsi, au cours du processus d'apprentissage, le contrôle visuel semble utilisé de manière significative au début, et ne diminue que progressivement laissant place à un contrôle plus automatique et à un changement d'équilibre entre le contrôle visuel et proprioceptif (Danna & Velay, 2015). Le constat de McIntosh et al. (2018a, étude 1) de taux d'écriture en miroir étroitement similaires avec la main dominante et avec la main non dominante, chez 44 enfants écossais âgés de 4 ans ½ à 10 ans, suggère que le schéma moteur adulte n'est guère possible tant que les orientations des lettres ne sont pas acquises de manière sécurisée. En fin de compte, le constat de Scordella et al. (2015): « Nous n'avons trouvé aucune relation entre la coordination motrice et les compétences en écriture manuelle, alors que les compétences visuo-spatiales (mesurées par une tâche visuelle constructive) étaient liées aux deux », établi sur des enfants de 7 à 10 ans, qui peut, a priori, sembler trop radical, le paraît beaucoup moins.

4.6. Le primat des inversions gauche-droite

En général, la détection de la symétrie par rapport à un axe vertical est plus rapide et plus efficace comparativement à la détection de la symétrie le long d'une autre orientation

(Wagemans, 1995). Il est possible que ce constat s'explique par la généralisation en miroir qui ne concerne que la symétrie par rapport à un axe vertical. En effet, c'est cette généralisation en miroir qui est responsable de la non-mémorisation de l'orientation gauche-droite des caractères par les enfants (voir Section 5.3). S'il n'existe pas dans le cerveau de symétrisation par rapport à un axe horizontal analogue à la symétrisation par rapport à un axe vertical en mémoire, ce que suggère l'évolution (cf., le tigre couché sur le dos de la section 4.11 suivante), on s'attend donc à beaucoup plus d'inversions gauche-droite que d'inversions haut-bas.

Quels que soient les caractères examinés, on a effectivement constaté que les inversions gauche-droite (miroir horizontal) sont beaucoup plus fréquentes que les inversions haut-bas (miroir vertical) ou les inversions doubles qui correspondent à une rotation plane de 180° par laquelle 6 par exemple est transformé en 9 (et vice versa). Je donne une référence pour chaque type de caractères (chiffres, lettres minuscules et majuscules).

Pour les chiffres, Fischer (2013a) rapporte 111 inversions haut-bas, 110 inversions doubles, comparativement à 3049 inversions gauche-droite. Pour les lettres minuscules, les données de Torres et al. (2021), telles qu'analysées par Fischer et Luxembourger (2021, Tableau 2), indiquent 14 inversions haut-bas, 10 inversions doubles, comparativement à 537 inversions gauche-droite. Enfin, pour les lettres majuscules et bien que les inversions gauche-droite soient peu fréquentes (hormis pour J et Z), les inversions haut-bas et doubles le sont encore beaucoup moins. Dans les données originelles de Fischer et Koch (2016b) en GS, nous n'en avons dénombré que 5, comparativement à 332 inversions gauche-droite. D'ailleurs, s'agit-il vraiment d'inversions ? En effet, trois de ces inversions résultent des mauvais positionnement et orientation de l'appendice de Q (vers le haut), ce qui donne une inversion haut-bas du Q véridique.

Pour les tâches de reconnaissance on semble d'ailleurs observer le même phénomène. Uehara (2013) a observé les inversions d'images signifiantes pour les enfants à trois niveaux d'âge. Si l'on considère que les lettres ou chiffres peuvent être vus comme des images signifiantes, il est pertinent de rapporter que les enfants ont fait significativement et assez nettement plus d'erreurs d'inversion gauche-droite que bas-haut : 31.0% vs 13.3% à 4 ans, 16.1% vs 6.8% à 5 ans, et 16.0% vs. 3.6% à 6 ans. Ahr et al. (2017), par une méthode indirecte, ont en outre suggéré que les erreurs horizontales sont plus répandues que les verticales chez des lecteurs adultes.

Toutes ces données, notamment celle directement obtenues par l'écriture des caractères par les enfants, concourent à affirmer que les inversions par les enfants de 4 à 7 ans sont essentiellement des inversions gauche-droite. Il est vrai que, dans nos propres observations, nous n'avions pas inclus M qui est l'une des lettres les plus inversées verticalement. Mais, ici comme ailleurs, on peut se demander s'il s'agit vraiment d'une inversion et non pas simplement d'une confusion avec W.

4.7. Les chiffres sont meilleurs que les lettres

Nos observations ont maintes fois permis de vérifier que les chiffres sont, en moyenne, plus inversés que les lettres majuscules. L'observation récente de Göbel et al. (2019) l'a encore confirmé, bien que seulement 9 lettres aient été testées (il manquait notamment z). L'étude des inversions en miroir nécessitant que les enfants en produisent, c'est là un argument en faveur du choix des chiffres, plutôt que des lettres, comme matériel d'étude. En outre, les lettres majuscules soit sont symétriques pour 11 d'entre elles (A, H, I, M, O, T, U, V, W, X, Y), soit,

pour le restant, sont presque toutes orientées vers la droite (B, C, D, E, F, G, K, L, N, P, Q, R, S). Elles ne sont donc pas optimales pour étudier la différence de fréquence d'inversion des lettres orientées vers la droite vs. gauche. Certes les lettres minuscules orientées à gauche sont plus nombreuses. Mais elles présentent elles aussi certains inconvénients :

- L'orientation de certaines lettres minuscules est souvent difficile à définir, d'autant qu'elles peuvent être écrites en script imprimé (e.g., a), scolaire (e.g., a), voire en attaché (l'écriture parfaitement symétrique de o devient alors \bigcirc , i.e., orientée à droite).
- Les majuscules correspondantes sont différentes et peuvent avoir des orientations différentes (e.g., d et D, g et G, q et Q) ou être symétriques (A, H, T, Y), et donc le codage devient difficile quand un enfant introduit des écritures en majuscules à la place des minuscules, comme c'est le cas dans la récente recherche de Torres et al. (2021), dans laquelle les enfants brésiliens de première année d'école devaient écrire des lettres minuscules.
- Plusieurs lettres ont des miroirs qui sont d'autres lettres existantes : b en miroir horizontal, vertical et double donne, respectivement, d, p et q. De même, d donne b, q et p ; p donne q, b et d ; q donne p, d et b. De ce fait on ne peut pas distinguer une simple confusion d'une écriture en miroir, ce qui est gênant si l'objectif est l'étude de l'écriture en miroir.

En France, l'écriture des lettres minuscules est en général enseignée plus tardivement que celles des lettres majuscules et chiffres. Elle s'adresse donc à des enfants en moyenne plus âgés, qui les apprennent plus rapidement, rendant les inversions plus difficiles à observer car moins fréquentes. Ainsi, pour les étudier, Portex et al. (2018) ont dû procéder à un apprentissage préalable avec des élèves français, alors que McIntosh et al. (2018b), des chercheurs écossais, ont eu recours à des élèves irlandais, car en Irlande (Eire) les lettres minuscules sont enseignées dès le début de l'apprentissage de l'écriture.

En revanche, les chiffres semblent mieux adaptés à l'étude de l'inversion. Certes, ils n'y en a que 10, dont deux (0 et 8) sont symétriques (gauche-droite). Mais il en reste néanmoins cinq qui « regardent » clairement à gauche (1, 2, 3, 7, 9) et trois autres (4, 5, 6) où l'on peut recourir aux cinétiques de l'écriture (pour 4), à des analyses psycholinguistiques (notamment pour 5 : voir Fischer, 2013a) ou, mieux, au jugement des étudiants (voir Fig. 9), pour les catégoriser orientés à droite.

Comme nous réunissons parfois les données sur les chiffres et les lettres, il est cependant important de remarquer que leurs développements ne sont pas complètement dissociés. L'étude de Yamagata (2007) a montré que les processus de développement de chaque système passaient par des phases communes. Yamagata a conclu qu'il semble que, bien que les enfants avant 4 ans produisent le dessin et l'écriture dans un domaine spécifique, dans l'ensemble l'activité de représentation en tant que système symbolique se développe dans un domaine général.

4.8. L'écriture en miroir est un phénomène transitoire

Dès nos premières recherches nous avons vu le déclin rapide, entre la GS de maternelle et le CP de l'école élémentaire, de l'écriture en miroir de l'enfant typique. En moyenne, nous avons obtenu plus de 30% d'écriture en miroir des chiffres en GS, et moins de 5% au CP (Fischer, 2010a). L'étude longitudinale de Fischer et Koch (2016b) a aussi montré cette baisse rapide : les pourcentages comparables sont 21% en GS et 9% en CP. La chute est certes moins nette,

mais il faut tenir compte du fait que, dans cette seconde recherche, c'est l'écriture des caractères (chiffres et lettres majuscules) qui a été testée et cela dans un milieu socio-culturel moins favorisé (ce qui peut avoir comme conséquence que l'écriture en miroir perdure un peu plus longtemps). L'observation de Göbel et al. (2019 ; voir aussi la section 6.2) indique une chute du pourcentage des enfants qui ont inversé au moins un des chiffres de 84.5% à 48% de l'année d'avant la 1^{ère} année d'école à cette dernière.

Ce caractère transitoire et bref de l'écriture en miroir explique certainement le peu d'intérêt qu'y portent les enseignants (sauf lorsque les inversions persistent, c'est-à-dire ne sont plus transitoires !) et les psychologues. Le seul vrai test élaboré par ces derniers (voir Section 1.8, Tableau 3 en particulier) confirme d'ailleurs l'inintérêt d'une observation systématique au-delà de 7 ans. Dans nombre d'observations qui ne confirment pas vraiment les nôtres, il suffit de regarder l'âge des enfants qui s'avère alors inapproprié pour observer un nombre suffisant d'inversions. Une autre conséquence possible de ce caractère transitoire est que les inversions observées sur des enfants plus âgés ne sont plus nécessairement de même nature. Nous verrons, dans la section 8.3, qu'il peut s'agir de confusions.

4.9. Un épilogue : la gaucherie n'a rien à voir avec l'inversion !

Par précaution, je préfère commencer par rappeler que je discute principalement, et exclusivement dans cette section, de l'inversion des caractères par les enfants de 4 à 7 ans à développement typique. Par ailleurs, je sais évidemment que, même parmi ces derniers, les enfants gauchers peuvent avoir des difficultés à s'adapter à un monde conçu pour les droitiers. En ce qui concerne ce dernier point, quelques efforts matériels ont certes déjà été faits (e.g., ciseaux pour gaucher), mais la difficulté pratique d'une écriture de la main gauche demeure. En effet, en écrivant de la gauche vers la droite avec une tenue classique du crayon, la main recouvre immédiatement ce que l'on vient d'écrire. Mais, dans mon approche théorique, ce problème des enfants gauchers est éclipsé par leur problème, commun avec les enfants droitiers, à savoir orienter les caractères dans une direction précise qu'ils ne connaissent pas (car effacé en mémoire par le mécanisme de généralisation en miroir : voir Section 5.3).

Cette hypothèse théorique d'absence de différence dans les inversions de caractères entre les enfants écrivant de la main gauche et ceux écrivant de la main droite a été largement confirmée empiriquement. Les enfants gauchers, qui sont de l'ordre des 10% dans la population, sont, de ce fait, rares dans les classes. Cela a conduit Anne-Marie Koch, dans une circonscription dans laquelle elle opérait en tant que psychologue scolaire, à s'intéresser à tous les élèves de GS, dont les enseignants lui signalaient qu'ils écrivent de la main gauche, durant trois années consécutives. Cela lui a permis de constituer un échantillon de 59 enfants écrivant de la main gauche. Dans Fischer et Koch (2016a), nous les avons comparés à 59 enfants écrivant de la main droite et appariés pour l'âge et l'école. Le résultat de la comparaison, rapporté dans la figure 22 est sans ambiguïté. Non seulement les enfants écrivant de la main gauche n'inversent guère plus les caractères, mais leurs fréquences d'inversion des caractères individuels sont quasiment identiques à ceux des enfants écrivant de la main droite. Dans la même recherche, les enfants écrivaient aussi leur prénom. Nous n'avons pas non plus observé d'effet de la main d'écriture sur la fréquence des inversions de ces écritures du prénom.

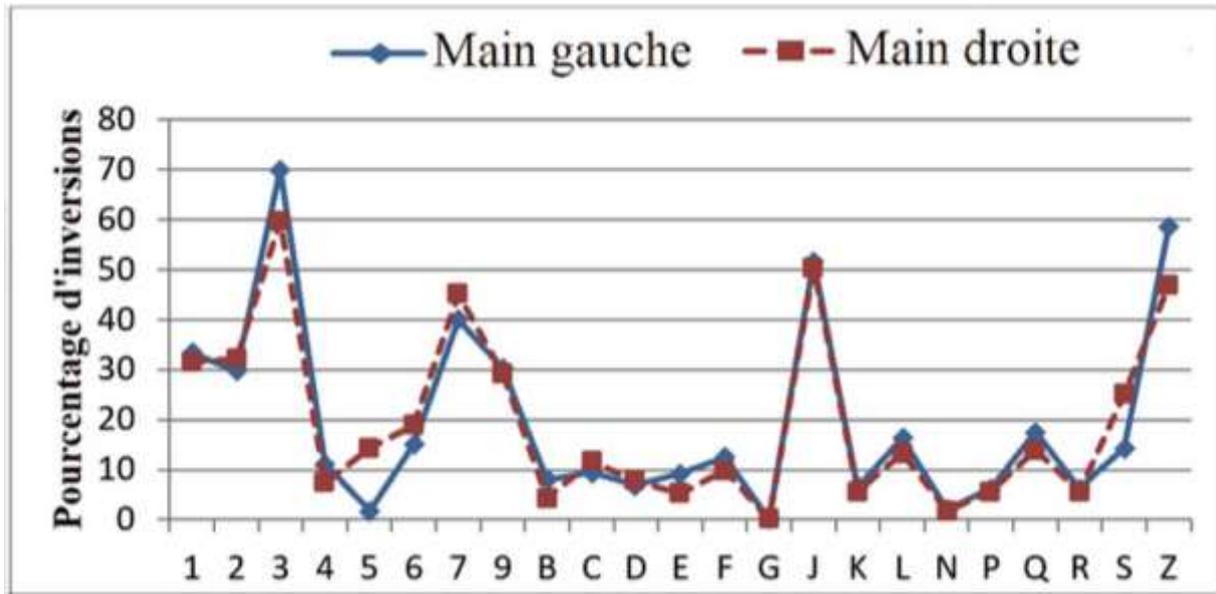


Figure 22 : Pourcentage d'inversion des caractères en fonction du caractère et de la main d'écriture usuelle de l'enfant. (Données de Fischer & Koch, 2016a).

Par la suite, l'Étude longitudinale française depuis l'enfance (Elfe) nous a offert une autre occasion d'éprouver notre hypothèse sur un matériel restreint à l'écriture des chiffres de 1 à 5 en MS. La recherche Elfe a recruté, à leur naissance en 2011, plus de 18 000 enfants dans diverses maternités en France métropolitaine, avec l'objectif de suivre leur développement jusqu'à l'âge adulte (Charles et al., 2020). À l'âge de 3 ans ½, la main de dessin de l'enfant a été observée. En MS, à l'âge de 4 ans 10 mois en moyenne, ces enfants devaient écrire le nombre de canards dans les cases positionnées en dessous (voir Fig. 23). Les enseignants, qui codaient les réponses des élèves ont indiqué les écritures en miroir et nous ont permis de comparer 466 enfants, présumés avoir écrit avec la main gauche, à 3531 enfants, présumés avoir écrit avec la main droite (présumés car la main de d'écriture a été déterminée sur la base d'une observation de plus d'une année antérieure). En dépit de la puissance statistique du test, aucune différence significative n'a été observée, les pourcentages d'inversion dans les deux groupes étant quasiment identiques.

Quelques mises au point salutaires !

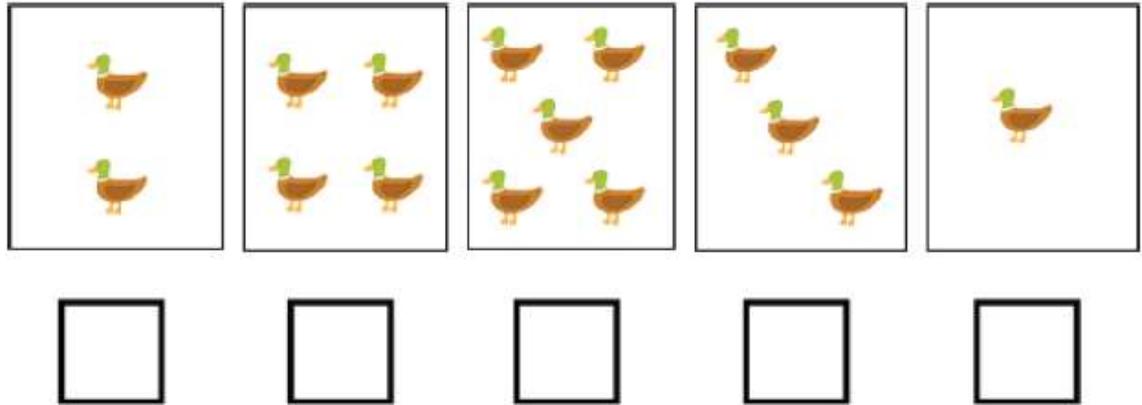


Figure 23 : Le test d'écriture du nombre de canards dans l'évaluation en MS de Fischer et Thierry (2021).

D'un point de vue plus général, notre résultat s'ajuste bien à l'observation neurophysiologique de Gonzalez et al. (2006). Ces derniers ont en effet montré que les mécanismes visuo-moteurs encapsulés dans l'hémisphère gauche jouent un rôle crucial dans le contrôle visuel de l'action et que cette spécialisation hémisphérique a évolué indépendamment de la main. Également, les observations de Goffin et al. (2019) selon lesquelles l'écriture manuscrite ne joue aucun rôle dans la latéralisation du traitement symbolique des nombres dans le cerveau, sont moins étonnantes. Ces dernières ne sont certes pas directement en rapport avec notre problème d'inversion, mais étayent l'idée générale que l'effet de la main d'écriture peut être éclipsé par des problèmes plus profonds.

En conclusion, l'absence de différence dans les inversions des caractères, qui était déjà apparue dans plusieurs recherches au 20^{ème} siècle avec des écritures non purement de mémoire (Hildreth, 1934 ; Simner, 1984), a été amplement confirmée par nos recherches. Cette absence de différence est d'autant plus remarquable que l'on pourrait croire que la tendance (biais) vers la droite devrait être plus marquée pour les enfants gauchers que pour les droitiers car ils sont obligés de fournir un plus grand effort pour écrire de gauche à droite. Mais Suitner et al. (2017) expliquent fort opportunément que cela n'est vrai que si la tendance vers la droite est reliée aux expériences sensori-motrices. Or, nous l'avons vu dans la section 4.5, elle est surtout reliée à l'expérience visuelle dont on peut arguer qu'elle est similaire pour les enfants gauchers et droitiers.

4.10. Inversion versus confusion

Étant donné la similarité physique (SP) de certains caractères, le risque d'interférence ou de confusion en mémoire déclarative est omniprésent, d'autant que les variantes d'écritures des caractères sont nombreuses. Cohen (2009) a proposé un indice de similarité physique (SP) qui se calcule à partir d'un cadran digital de 7 segments : $SP = \frac{\text{nombre de traits communs}}{\text{nombre de traits différents}}$. La figure 24 montre qu'avec un tel indice, étendu à certaines lettres, le chiffre 6 est parfaitement similaire à la lettre minuscule b, au point que l'indice est incalculable (SP = 5/0), ou que le chiffre 9 est parfaitement similaire non pas avec la lettre minuscule e (SP = 5/2), mais avec son inverse non représenté sur la figure (SP = 6/0).

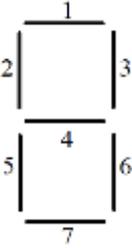
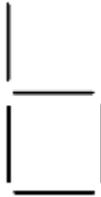
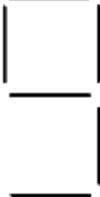
				
Cadran digital	Chiffre 6	Lettre 'b'	Chiffre 9	Lettre 'e'

Figure 24 : L' « écriture » de quelques caractères sur un cadran digital.

L'intérêt d'un tel indice est d'attirer l'attention sur une similarité physique susceptible de provoquer des confusions en mémoire déclarative. Mais cet intérêt est considérablement réduit par la représentation parfois caricaturale des caractères, notamment du fait de la non-prise en compte des courbes omniprésentes dans les écritures manuelles, secondairement du fait de sa non-définition pour des caractères parfaitement similaires. Néanmoins, à un âge plus avancé que celui des enfants typiquement inverseurs entre 4 et 6 ans, de telles confusions peuvent expliquer certaines « inversions ».

Terepocki et al. (2002) ont émis hypothèse selon laquelle les erreurs d'orientation des lettres non réversibles pourraient refléter des processus différents de ceux reliés aux erreurs d'orientation de lettres réversibles. Ce processus différent – la confusion – touche principalement les caractères réversibles, c'est-à-dire des caractères dont une orientation erronée est un caractère réel. Si l'on inclut les inversions haut-bas et les rotations dans les erreurs d'orientation, les lettres réversibles sont principalement les lettres minuscules b, d, g, p, et q, la lettre majuscule J approximativement miroir de L, et également u inversé en n ou Z transformé en N par une rotation de 90°. Le tableau 5 de Terepocki et al. montre alors que toutes les erreurs d'orientation, observées sur des enfants de 10 ans, concernent les lettres réversibles.

Quelques mises au point salutaires !

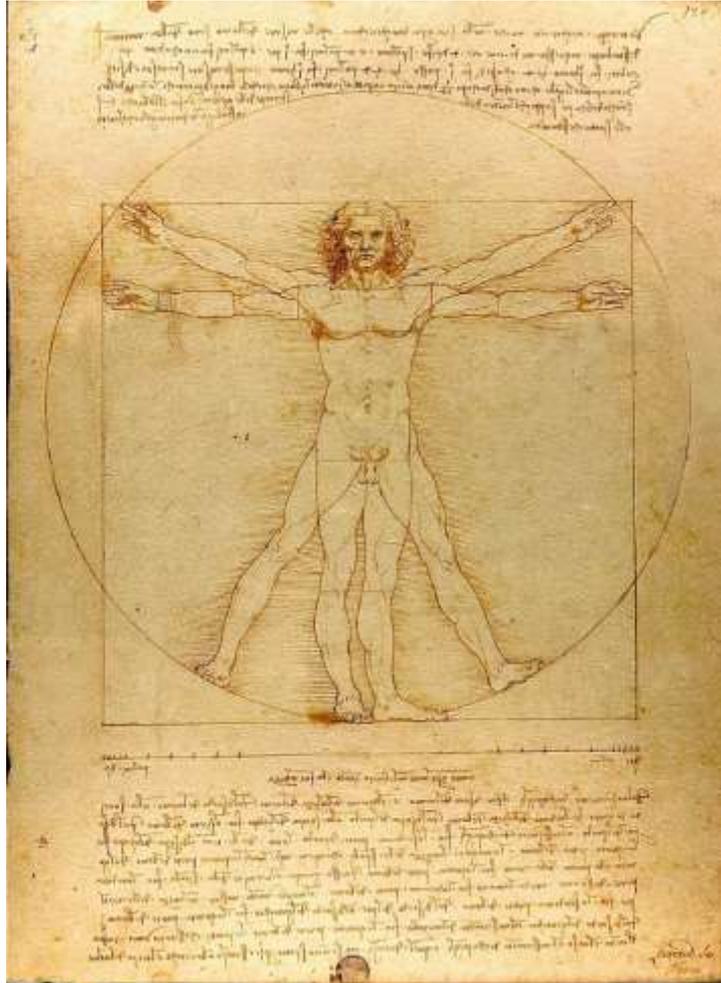


Figure 25 : Célèbre Homme de Vitruve réalisé de la main de Léonard de Vinci aux alentours de 1492 : les abondantes annotations sont écrites en miroir (mais pas la signature).

Traditionnellement, les auteurs utilisent deux termes ou processus pour décrire la transformation apparente, notamment de b en d (et vice-versa) : l'inversion (e.g., Frith, 1971) et la confusion (e.g., Davidson, 1935), et parfois les deux (e.g., Liberman et al., 1971). Pourtant, dans la langue vernaculaire, la différence entre la confusion et l'inversion est assez clairement délimitée. La confusion conduit à un état d'égarement, d'incompréhension ou de chaos. Ainsi, la confusion a une connotation négative même si elle peut accompagner un état de déséquilibre cognitif qui peut être bénéfique à l'apprentissage (D'Mello et al., 2014). Au contraire, l'inversion a une connotation plutôt positive. Chez les adultes, c'est peu de dire que les annotations inversées ajoutées à ses croquis par Léonard de Vinci ne les ont pas dévalorisés (voir Fig. 25). Chez les enfants, les écritures inversées sont souvent précises et nettes comme le montrent plusieurs d'entre elles reproduites dans ce document. Lorsqu'elles sont en minuscules, attachées, elles sont souvent jolies et de même qualité que les écritures de gauche à droite : voir la figure 26. En outre, elles reflètent une forme de créativité car les enfants écrivent leur prénom comme probablement personne ne leur a montré ou appris.

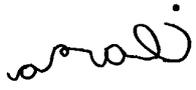
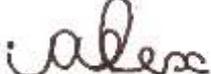
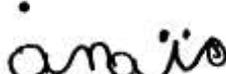
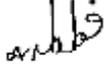
Point à gauche (de la verticale)	Point à droite (de la verticale)
	
	
	
	
	
	
	

Figure 26 : Quelques écritures d'enfants en minuscules attachées. Ces écritures, dans les deux conditions – point à gauche et point à droite (voir Section 6.4) – ont été produites à des moments différents (donc sans que l'enfant voie l'autre écriture) et rassemblées a posteriori.

Les confusions possibles, si l'on considère l'ensemble des lettres (minuscules et majuscules) et leurs miroirs, sont potentiellement nombreuses. Dans la section 8.3, nous en précisons quelques-unes qui semblent réelles, notamment dans le développement atypique. Certains auteurs, parfois, en rajoutent : j'ai ainsi découvert dans une de mes lectures que si la boucle initiale du 2 est démarrée un peu trop en bas, le 2 peut se confondre avec un Q !

Pourquoi les lettres non réversibles ne conduisent-elles pas, ou moins, à de telles confusions ? La raison évidente est que les lettres non réversibles inversées, qui n'existent pas dans l'alphabet, ne sont pas renforcées par la lecture. Dans la section 8.2, nous verrons que cette distinction est cruciale car les enfants qui inversent les chiffres ne sont pas principalement ceux qui confondent b et d !

4.11. Les adultes aussi !

Les humains se sont adaptés au monde tel qu'il existait il y a plus de 30 000 ans. Il est désormais pleinement admis que nous naissons dotés de programmes perceptifs et comportementaux qui étaient adaptatifs pour nos premiers ancêtres et qui affectent encore notre comportement, notre traitement de l'information et notre fonctionnement émotionnel (Stern, 2015). Cette adaptation a pu conduire à l'ignorance de l'information d'orientation gauche-droite. L'exemple, d'un tigre (ou autre animal dangereux) vu du profil gauche mais dont il faut tout autant se méfier même s'il est vu du profil droit (alors que couché sur le dos il semble moins dangereux) a souvent été repris (e.g., Rollenhagen & Olson, 2000). Cela peut expliquer notre faculté de généralisation en

Quelques mises au point salutaires !

miroir horizontal (gauche-droite) principalement, plutôt qu'en miroir vertical (haut-bas). La performance des enfants de 7/8 ans au célèbre test piagétien des trois montagnes (Bideaud et al., 1993 ; Piaget & Inhelder, 1947/1969), dans lequel les enfants doivent dessiner les 3 montagnes (ou choisir sur des dessins préparés) telles que l'expérimentateur en face d'eux les voit, en est peut-être encore une trace. En effet, les enfants prennent conscience que ce qu'ils voient devant est vu derrière par l'expérimentateur, souvent avant de se rendre compte que ce qu'ils voient à gauche est vu à droite par l'expérimentateur. Cela apparaît aussi, et même plus directement, dans une expérience de Dillon et Spelke (2015). Dans cette dernière, on a montré l'image d'une pièce (ou d'un objet) à des enfants de 4 ans en leur demandant de placer un jouet à un endroit de la pièce (ou de l'objet) indiqué par un point sur l'image. Les enfants n'ont pas tenu compte de l'information directionnelle, tout comme ils n'en tiennent pas compte lorsqu'ils confondent les objets et les formes avec leur image miroir. Une telle prise en compte séparément de la forme et de l'orientation est rendue possible par la dissociation fonctionnelle et spatiale dans les systèmes cérébraux codant la forme et l'orientation des objets (Dillon et al., 2014).

Mais cette ignorance de l'information sur l'orientation n'affecte pas que les enfants. Alors que l'essentiel de ce document et de nos travaux sont consacrés au problème de l'inversion en miroir par les enfants de 4 à 7 ans à développement typique, nous avons conçu aussi un quizz, proposé à des participants à différentes fêtes de la science, semaine du cerveau ou autre nuit des chercheurs. Dehaene (2007) a inversé l'image de « La Joconde » et deux gravures de pièces de monnaie pour suggérer qu'elles nous sont quand même familières. Notre quizz présentait plus systématiquement 12 paires d'images (une correcte, l'autre en miroir), dans lesquelles il fallait distinguer l'image correcte, et 12 images pour lesquelles il fallait reconnaître si elle est correcte ou non (une image est soit correcte, soit en miroir). Le but de ce quizz était de montrer que même les adultes ne retiennent pas toujours l'orientation gauche-droite des images communes. Une telle rétention leur permettrait de savoir que sur le panneau de signalisation d'une aire de repos le sapin est à droite de la table et que l'image du panneau de signalisation du passage piétons a été inversée (voir Fig. 27).

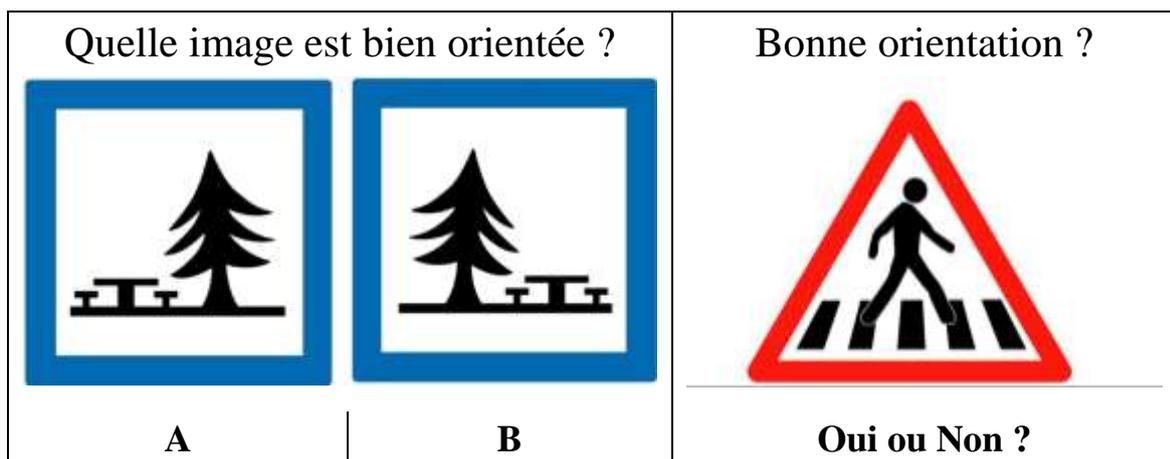


Figure 27 : Distinguer une image commune de son miroir (à gauche) et reconnaître si une image est bien orientée (à droite).

Or les participants étaient loin de répondre correctement à beaucoup de nos images qui concernaient des tableaux, des logos commerciaux, ou encore des panneaux routiers. À propos de ces derniers, nous avons même obtenu un pourcentage de réponses correctes, sur plusieurs centaines de participants, qui est en dessous de réponses au hasard (= 50%) pour les deux

Chapitre 4

panneaux de la figure 27. Ce dernier résultat est d'autant plus impressionnant que la plupart de ces participants étaient adultes et possédaient vraisemblablement le permis de conduire ! Ces observations n'étaient certes pas bien contrôlées expérimentalement mais sont d'autant plus convaincantes que les participants n'étaient pas obligés de restituer le résultat de leur quizz, ce qui a dû favoriser une restitution par les participants qui pensaient avoir bien réussi. Elles confirment ainsi que même les adultes ne retiennent pas toujours l'orientation gauche-droite d'images communes bien qu'ils les aient certainement vues maintes fois.

5. Les avancées en neuropsychologie

5.1. L'œuvre pionnière de Michael Corballis

Michael Corballis était né (il est décédé en novembre 2021 à 85 ans) en Nouvelle-Zélande, où il a aussi accompli une grande partie de sa carrière universitaire comme professeur de psychologie à l'université d'Auckland. Il a cependant soutenu sa thèse au Canada, à l'université McGill (Montréal). Cela lui a permis d'y enseigner les statistiques, notamment à Steve Pinker, et de collaborer par la suite avec Justine Sergent. Ces précisions ne sont pas seulement anecdotiques. Sa théorie initiale d'une double représentation dans les hémisphères cérébraux, comme celle d'Orton, peut en effet paraître audacieuse, ou simplement adaptée à l'air du temps. N'oublions pas que la spécialisation hémisphérique a été un sujet d'étude prééminent du 20^e siècle, à son apogée avec le prix Nobel de médecine de Roger Sperry (Sperry, 1982, est la reproduction de la conférence donnée par ce dernier lors de la réception du prix, en décembre 1981 à Stockholm). On peut alors s'interroger sur le caractère aventuriste ou opportuniste de l'auteur. Dehaene (2007), qui présente/discute longuement la théorie de Corballis, ne la rejette pas aussi clairement qu'il rejette l'hypothèse d'Orton. Mon enquête sommaire autour du personnage m'a alors permis de noter que Pinker, un neuroscientifique américain connu notamment pour son livre « L'instinct du langage » (titre de la traduction française) le décrit comme « urbain, charmant, spirituel, irrévérencieux »¹³. Ma familiarité avec le domaine – l'appréhension du nombre – de la recherche de Corballis et Sergent (1992) m'a permis de voir qu'elle n'était pas un modèle de rigueur, cela avant même les – et sans considération des – accusations qui ont émaillé la fin de vie tragique de sa co-autrice Justine Sergent. Cela dit, l'hommage posthume de Catani (2022) à Michael Corballis rapporte plusieurs anecdotes qui montrent un homme plein d'humanité. C'est aussi mon expérience puisque'il m'avait même proposé de chercher un financement pour l'article finalement paru sous Fischer et Luxembourger (2018b). Mais l'humanité n'empêche pas une certaine audace. Et, à mon avis, il en faut quand on voit des mots, et leurs miroirs, tels que Corballis les a représentés dans les hémisphères cérébraux (voir Fig. 28).

¹³ Cf. son blog : <https://twitter.com/sapinker/status/1461526854247104515>, consulté le 20/05/2022.

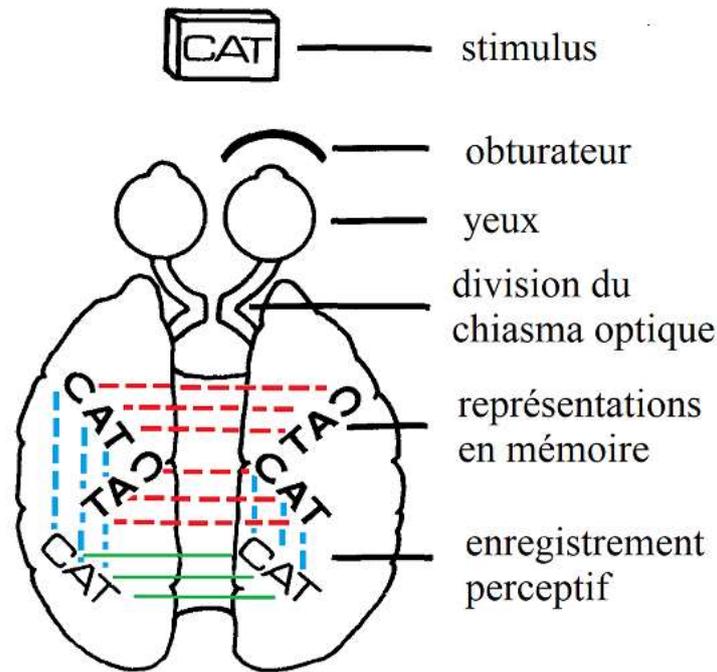


Figure 28 : La représentation schématisée des mots dans les hémisphères cérébraux, que j'ai colorisée (voir les explications dans le texte) et traduite (sauf CAT) à partir de la Fig. 3 originelle de Corballis (1974, p. 30).

Corballis s'est intéressé durant plus de 50 ans à cette question de l'inversion en miroir. Je ne reviens pas sur ses premiers travaux, avec Ivan Beale, sur les pigeons, faisant suite à ceux de Nancy Mello et de John Noble (sur les singes), car ils sont difficiles et résumés/discutés par Dehaene (2007, p. 366 et ss). Dans son livre, co-écrit avec Beale (Corballis & Beale, 1976), Corballis reprend la schématisation qu'il avait déjà proposée dans Corballis (1974). Sur cette schématisation, Corballis a obturé l'œil droit et fendu le chiasma optique pour comparaison avec l'expérience de Noble sur les singes. De la sorte, le mot « CAT » devrait quasi-exclusivement parvenir au cortex visuel gauche¹⁴, mais je ne suis pas sûr qu'un humain ainsi traité arriverait encore à beaucoup lire ! Ensuite, il est correctement transféré dans le cortex visuel droit (traits continus **verts**) et, intra-hémisphère, en mémoire à partir des deux représentations dans le cortex visuel perceptif (traits discontinus **bleus**, discontinus pour montrer qu'il peut y avoir une transformation, autre qu'une inversion). Enfin, les deux représentations résultantes, qui sont toujours correctement orientées, sont inversées par le transfert inter-hémisphérique (traits discontinus **rouges**). Notons que le transfert visualisé par le trait discontinu bleu pourrait produire une représentation plus abstraite, une idée que Corballis retient à propos de la théorie de Sutherland N.S. qu'il discute avec Beale (pp. 47-50 ; voir aussi la suite). Notons également que l'on trouve déjà, et en cela l'article de 1974 puis le livre de 1976 étaient d'avant-garde, la notion et le mot de généralisation (en miroir), dont le transfert inter-hémisphérique serait le mécanisme.

Corballis a ensuite soutenu, jusqu'au bout de sa vie, cette double représentation des caractères initialement proposée par Orton (voir Section 1.6). Mais Corballis s'est opposé à l'idée que l'orientation du stimulus serait simplement véridique dans un hémisphère et inversée

¹⁴ Normalement, l'input visuel est transmis correctement aux deux hémisphères. Ce n'est qu'ensuite que l'image est transmise à l'autre hémisphère et y conduit à une représentation en miroir.

dans l'autre. Dans les échanges que nous avons pu avoir, il a insisté sur le fait que l'inversion se produit pendant le transfert inter-hémisphérique, de sorte que chaque hémisphère pourrait porter à la fois des représentations véridique et inversée. Compte tenu de la prédominance de l'hémisphère gauche, la version véridique pourrait être plus forte dans l'hémisphère gauche, ce qui entraînerait un renforcement de la version inversée dans l'autre hémisphère. Mais, précisait-il, l'idée que les représentations sont simplement inversées entre les hémisphères est trop simple, et la version d'Orton sur la façon dont cela a pu se produire n'a pas de sens.

Devant l'inversion massive de l'écriture de certains caractères (J, Z, 3) et la quasi-inexistence de l'inversion d'autres caractères (C, D, 4), dont Corballis avait connaissance, il a simplement invoqué un facteur culturel. Mais notre cerveau s'est probablement adapté à la lecture/écriture (Dehaene, 2007), une invention culturelle récente. Sur ce point, la section 2.1 ne doit pas induire en erreur : le commun des mortels ne devait guère écrire à l'ère proto-sinaïque ! Cette invasion, partielle ou totale, du cerveau par un objet culturel nouveau ne peut pas être vue comme un simple ajout à un cerveau biologique, invariable au cours du temps et dont la culture modifierait simplement les performances. Les observations sur les pigeons, qui sont les premières recherches de Corballis, l'ont peut-être conduit à sous-estimer l'importance de la culture, que Jerome Bruner soulignait, à l'époque, avec sa célèbre affirmation « sans culture il n'y a pas d'intelligence » (*"culture-free" means "intelligence-free"* : cf. Greenfield & Bruner, 1966, p. 90). Plus récemment, Erich Kandel, prix Nobel de physiologie en 2000, a apporté un démenti sévère à ceux qui croient encore que les gènes seuls déterminent le comportement : « ils répondent également à une stimulation environnementale comme l'apprentissage » remarque Kandel (2006/2007, p. 284).

En préalable à leur proposition théorique, Corballis et Beale (1976) avaient, comme il se doit dans une approche scientifique, décrit l'approche d'autres théoriciens. Celle de Sutherland N.S., déjà notée, est importante pour la suite car ce dernier a proposé que ce sont les descriptions abstraites qui forment la base de la reconnaissance et de la généralisation. En particulier, il a suggéré une description qui ne distingue pas une forme de son image en miroir horizontal, mais qui la distingue de son image en miroir vertical. On peut ainsi penser que b est confondu avec d car ces deux lettres minuscules sont formées d'une boucle et d'un trait vertical qui dépasse la boucle, mais pas avec p car pour cette dernière lettre le trait vertical ne dépasse pas la boucle (il est même en dessous comme pour q, lettre avec laquelle p risque d'être confondu).

Dans son article le plus récent sur le sujet, que nous avons commenté de manière non critique (Fischer & Luxembourg, 2018b), Corballis (2018) réexplique que si les commissures relient des points en miroir dans les deux hémisphères (connexions homotopiques), l'activation dans l'hémisphère émetteur serait reflétée dans l'hémisphère récepteur, qui enregistrerait donc l'information comme si elle était inversée gauche-droite. Ceci était déjà le processus d'inversion décrit, appelé inversion inter-hémisphérique en miroir de l'image, par Corballis et Beale (1970). Corballis insiste, comme nous (voir Section 4.3), sur la différence entre perception et mémoire et sur la présence de l'information sur l'orientation à un stade initial du traitement de l'information visuelle. Mais alors, ces connexions homotopiques deviennent gênantes : elles nous empêcheraient aussi de percevoir correctement les images ! Ceci n'étant pas le cas, Corballis invoque l'existence connexions hétérotopiques entre les cortex visuels (voir Fig. 29), mises en évidence chez la souris par Chovsepian et al. (2017) et destinées à maintenir la continuité perceptive lorsque qu'on traverse la ligne médiane (voir Section 3.1). Mais ce sont

là des complications qui rendent difficile à la fois la compréhension et l'utilisabilité de la théorie. D'autant que Corballis (1974), par référence à Sperry (futur prix Nobel de médecine), avait lui-même souligné que les aires visuelles ne sont pas homotopiques.

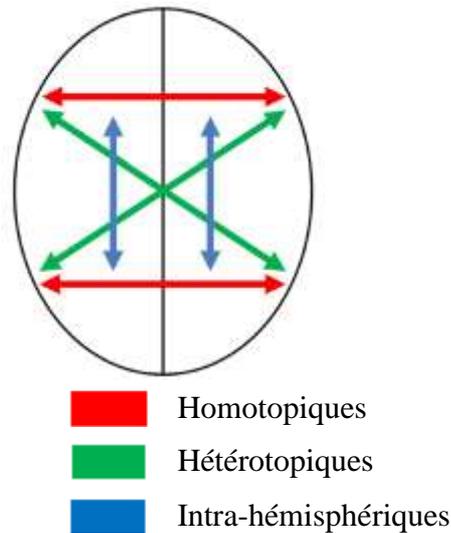


Figure 29 : Les trois types de connexions neuronales schématisés par Corballis (2018).

Alors que Corballis (et d'autres) avait surtout insisté sur la commissure antérieure comme support du transfert inter-hémisphérique, il souligne aussi, en 2018, que la commissure hippocampique pourrait jouer un rôle dans la symétrisation des circuits de la mémoire. Cette suggestion est intéressante car l'hippocampe est fondamentalement impliqué dans la mémoire déclarative (la mémoire des faits : voir Fischer, 1992) et c'est un fait que « trois » s'écrit 3 (et non pas ε) comme je l'avais déjà souligné dans Fischer (1999).

5.2. La contribution de Stanislas Dehaene (2007)

Le livre de Stanislas Dehaene sur la lecture a connu une diffusion mondiale, grâce – entre autres : le contenu et son traitement y ont évidemment aussi contribué ! – au prestige de l'auteur, professeur au Collège de France, et à sa traduction en anglais (Dehaene, 2009/2010). Il y qualifie l'idée d'Orton, selon laquelle une lettre comme « p » serait représentée correctement dans un hémisphère cérébral et en miroir dans l'autre d' « erreur fondamentale » (p. 356). Il est beaucoup moins sévère avec le modèle de Corballis et Beale (1976) qui, pourtant, a postulé aussi cette représentation double (voir Fig. 28). Cela tient en partie au fait que ces derniers ont écarté l'idée que l'inversion au cours du transfert inter-hémisphérique était un processus perceptif, ce qui n'apparaît pas aussi clairement dans le modèle d'Orton (voir cependant mes citations d'Orton dans la section 1.6). Ce traitement de l'inversion, comme un processus mnésique et non pas perceptif, le rend biologiquement plus plausible. Dans Fischer et Luxembourger (2021), nous indiquons d'ailleurs quelques références neurobiologiques montrant, que dans les premières millisecondes du traitement de l'information dans le cortex visuel, l'orientation des objets est perçue correctement. On peut y rajouter l'impressionnante observation de Yamazaki et Lioumis (2022). Ces derniers ont étudié le phénomène de résonance stochastique (SR) au niveau du cortex visuel précoce pendant la discrimination de l'orientation des figures en utilisant la stimulation magnétique transcrânienne. Ce n'est pas tellement la méthode d'observation – que je ne comprends pas profondément ! – que je veux qualifier d'impressionnante, mais son résultat. Yamazaki et Lioumis ont en effet constaté qu'un

phénomène de type SR peut être produit en stimulant le cortex visuel précoce (V1/V2) à environ 60 ms après la présentation de stimuli visuels.

Non seulement Dehaene ne rejette pas le modèle de Corballis, mais il l'utilise pour illustrer, par un exemple, le problème créé par la symétrisation inter-hémisphérique en lecture. Il qualifie cet exemple de « concret », mais sa concrétude risque d'être mise à mal par des enfants qui bougent fréquemment et rapidement leur tête ! J'adapte ici l'exemple à l'écriture puisque tel est mon sujet. L'enfant qui voit b dans son champ visuel droit, aura une représentation véridique dans son hémisphère gauche (à cause du croisement des fibres provenant de la rétine nasale dans le chiasma optique), mais une représentation en miroir dans son hémisphère droit (par le transfert intra-hémisphérique). L'enseignant lui aura appris que cette lettre se dit [bé]. Lorsque, le lendemain, on demandera à cet enfant d'écrire de mémoire un [bé], il peut tomber sur la représentation en miroir et produire une écriture inversée de b, c'est-à-dire d. Nous verrons, le plus clairement dans le chapitre de conclusion, pourquoi mon adaptation à l'écriture n'est peut-être pas heureuse. Mais revenons au livre de Dehaene. Comment le cerveau va-t-il gérer, selon lui, ce problème de symétrisation, un problème gênant car en fin de compte il faudra bien que les élèves identifient correctement b et d (notamment) ?

La distinction, largement confirmée au début des années 1980, de deux voies du traitement de l'information visuelle (Goodale & Milner, 1992 ; Ungerleider & Mishkin, 1982 ; en français, Mishkin & Appenzeller, 1987), permet à Dehaene de suggérer que ce serait un apport de la voie dorsale qui pourrait servir à distinguer une image de son miroir. Rappelons en effet que dans la voie dorsale, qui se projette du cortex strié vers la région pariétale postérieure, les neurones analysent les relations spatiales entre les diverses composantes du champ visuel. D'autre part, dans la voie ventrale, qui se projette du cortex strié vers le cortex inféro-temporal, les neurones réagissent à des caractéristiques simples et limitées (identité, forme, couleur). Mais Dehaene précise – et cela est fondamental ici – que ces neurones de la voie ventrale s'intéressent peu à l'orientation.

La voie dorsale, du fait qu'elle reconnaît et différencie une boucle à droite d'un trait vertical (comme pour b) de celle d'une boucle à gauche d'un trait vertical (comme pour d), est bien adaptée à la lecture. Elle est aussi adaptée à l'écriture puisqu'elle dessert les actions guidées visuellement vers les objets (Goodale & Milner, 1992)¹⁵. Elle permet donc de compléter le travail de la voie ventrale, occipito-temporale, à qui Dehaene attribue la généralisation en miroir. Cela pourrait se faire par l'assignation de « détecteurs neuronaux spécialisés qui ne généralisent plus en miroir » (p. 377). Mais, par la suite, Dehaene fait aussi jouer un rôle à l'apprentissage moteur dans cette mémorisation de l'orientation. À la fois l'idée d'assignation de détecteurs et le possible apprentissage moteur, me semblent toutefois contradictoires avec la notion de « désapprentissage » de la symétrisation, utilisée par Dehaene. Ces processus sont difficiles à envisager aussi si l'on tient compte des quatre représentations d'une lettre que le transfert inter-hémisphérique, postulé par Corballis, risque d'avoir créées (voir Fig. 28 : dans la version simplifiée qu'en donne Dehaene, il n'y en a que deux). Observons que cette notion de « désapprentissage » est davantage compatible avec celle d'inhibition (Ahr et al., 2016 ;

¹⁵ On pourrait m'objecter que, lorsque les enfants écrivent de mémoire, leur écriture n'est pas guidée visuellement. Mais les jeunes enfants, dont le geste moteur n'est pas automatisé, peuvent produire leurs actions à partir d'une image mentale (visuelle).

Borst et al., 2015 ; Brault-Foisy et al., 2017; Torres et al., 2021) mais donne froid au dos à tout pédagogue constructiviste.

Dans la théorisation de Dehaene ce désapprentissage permet cependant aux neurones de la voie occipito-temporale d'être parfaitement autonomes pour la reconnaissance des lettres. Une expertise peut alors se construire pour les groupes de lettres uniquement dans l'hémisphère gauche. Les lettres « continuent à être traitées comme n'importe quelle autre forme visuelle, et donc à être symétrisées – mais cette image en miroir n'est plus exploitée par la lecture normale, qui a appris à s'en détacher » (p. 383-4). Cette description du devenir des miroirs d'image renforce mes réserves précédentes sur la notion de désapprentissage de la symétrisation, Cette dernière apparaît ici contournée plutôt que désapprise.

Du point de vue de l'évolution, Dehaene conforte sa théorie du recyclage neuronal en remarquant que « l'écriture a conduit l'humanité à découvrir un moyen inédit de convertir une partie de son cortex visuel en un instrument linguistique » (p. 393). Mais les systèmes neuronaux qui nous permettent d'apprendre sont imparfaits. En nous inspirant de Dehaene, nous pouvons donc voir dans l'écriture en miroir des enfants – l'objet de ce document – un stigmate de l'évolution de ces systèmes qui ne pouvait pas prévoir qu'ils seraient un jour recyclés pour la lecture/écriture.

5.3. Les modélisations cérébrales

5.3.1. L'orientation disparaît de patch en patch

Les progrès technologiques dans l'étude du cerveau, notamment l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), permettent-ils de « voir » le traitement des images dans le cerveau, en particulier leur symétrisation ? Plusieurs recherches se sont lancées dans une entreprise qui est loin d'être simple, notamment lorsqu'elle porte sur des humains, des enfants a fortiori. C'est pourquoi j'ai d'abord retenu une recherche sur des animaux, des singes macaques en l'occurrence, de Freiwald et Tsao (2010).

Freiwald et Tsao ont étudié le réseau de traitement des faces du singe macaque. Il consiste en six régions interconnectées sélectives pour les faces (voir Fig. 30). Ces régions ont été enregistrées à partir des deux pièces (*patches*) intermédiaires (ML et MF) et deux pièces antérieures (AL et AM). Un schéma didactique permet de suivre leur modélisation sophistiquée.

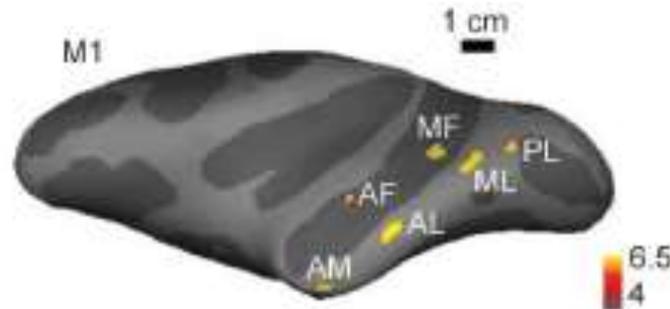


Figure 30 : Hémisphère gauche de macaque « gonflé » montrant six régions dans le lobe temporal d'un singe M1 qui répondaient significativement plus aux faces qu'aux objets dans les expériences d'IRMf (PL : *posterior lateral*; ML : *middle lateral* ; MF, *middle fundus* ; AF : *anterior fundus*; AL : *anterior lateral* ; AM : *anterior medial* ; l'échelle de couleur correspond au niveau de significativité statistique). Reproduit à partir de Freiwald et Tsao, 2010, Fig. 1A, p. 846).

La transformation de la représentation des faces de ML/MF à AL produit *de novo* une nouvelle propriété surprenante en AL, non trouvée dans ML/MF : l'orientation symétrique en miroir de la tête y produit une activation similaire à celle de l'orientation originelle. L'émergence de cette propriété montre qu'une invariance partielle, relativement à l'orientation de la tête s'est développée. Les neurones dans AM, la pièce de la face la plus antérieure, réalisent une invariance presque totale qui permet certainement au singe de reconnaître un visage quelle que soit l'orientation de ce dernier. Même si des cellules inféro-temporales, à réglage pour la symétrie en miroir, ont été rapportées antérieurement (Rollenhagen & Olson, 2000), c'est la première fois que l'on a montré que de telles cellules sont agglomérées dans un nœud intermédiaire d'un réseau de traitement de la forme.

Une recherche comme celle de Freiwald et Tsao présente deux inconvénients majeurs pour la compréhension de processus humains de lecture/écriture. D'une part, elle ne peut porter que sur un matériel significatif pour des singes – les faces en l'occurrence —, d'autre part elle soulève la question du degré de similarité du cerveau des singes et de celui des humains. Freiwald et Tsao ont fourni quelques garanties sur le dernier point (Tsao et al., 2008) ; ces garanties ont été renforcées par une recherche de Rajalingham et al. (2015) qui montre que les singes rhésus et les humains ont une représentation neuronale commune de la forme qui supporte directement la perception des objets. Par ailleurs, la recherche de Kietzmann et al. (2015) a bien porté sur des humains. Mais leurs résultats, qui « étayent les modèles soulignant le rôle de la transmission inter-hémisphérique dans la formation de la perception, invariante selon le point de vue, du visage » (p. 16398) ne s'appliquent guère au traitement des caractères (lettres et chiffres).

5.3.2. *L'orientation a disparu dans le sulcus fusiforme postérieur*

Dilks et al. (2011) ont étudié des humains adultes dans une expérience IRMf d'adaptation. Ils commencent par remarquer que si le cortex sélectif pour les objets peut confondre une image et son miroir, il ne devrait pas en être de même du cortex sélectif pour les scènes, car le traitement d'une scène change si on l'inverse en miroir. Avec des images comme celles de la figure 31, ils observent, comme prédit, une tolérance aux inversions en miroir dans une région sélective pour les objets – le sulcus fusiforme postérieur.

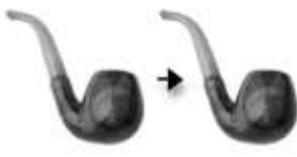
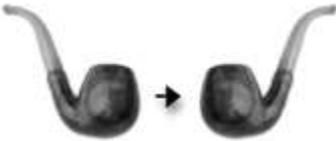
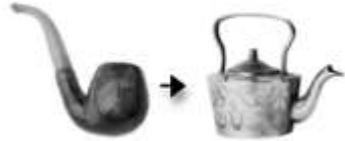
Condition	Objet
Identiques	
En miroir	
Différentes	

Figure 31 : Exemple de paires d’images d’objets utilisées dans la recherche de Dilks et al. (Figure construite à partir de Dilks et al., 2011, Fig. 1, p. 11306).

Cependant, une région sélective pour l’objet plus postérieure (que l’on suppose donc antérieure dans le traitement) – le sulcus occipital latéral – a montré une sensibilité aux inversions en miroir, suggérant que l’information sur l’orientation qui distingue une image de son miroir y est présente. Bien que difficile à comprendre dans son ensemble, cette recherche suggère quand même que l’information sur l’orientation gauche-droite d’un objet n’existe pas dans le sulcus fusiforme postérieur, mais qu’elle est présente dans un stade antérieur de la hiérarchie du traitement de l’information visuelle de l’objet. Elle aurait donc disparu !

5.3.3. La voie dorsale au secours de la voie ventrale

Il existe un consensus croissant selon lequel les processus basés sur l’attention/dorsale et la reconnaissance/ventrale ne doivent pas être regardés comme séparés, mais plutôt comme des fonctions complémentaires (e.g., Boros et al., 2016 ; Reilhac et al., 2013; Vidyasagar & Pammer, 2010 ; Zhou et al., 2016). Fernandes et al. (2016) ont soumis des élèves de première année et des enfants d’âge préscolaire à deux tâches d’appariement, l’une basée sur l’orientation, l’autre sur la forme. Ils ont constaté que la performance dans les deux tâches était associée à des capacités visuo-spatiales connues pour être liées au fonctionnement du courant dorsal uniquement pour les élèves de première année. Il semble ainsi que l’acquisition de la littératie rehausse l’échange entre les deux voies visuelles.

Après que Thiebaut de Schotten et al. (2014) ont observé que l’acquisition de la littératie est associée à un renforcement des connexions temporo-pariétales gauches, Moulton et al. (2019) ont exploré directement, longitudinalement, sur dix enfants à 6 et 7 ans, la connectivité structurelle de l’VWFA (voir Note 11) émergente en début d’apprentissage de la lecture. Ils ont notamment conclu que les connexions les plus spécifiques de l’VWFA ventrale se sont faites avec le cortex pariétal postérieur dorsal. En outre, les changements microstructuraux suggèrent que la localisation de l’VWFA dépend de sa connectivité avec des régions distantes, en particulier la région pariétale inférieure gauche. Cette dernière pourrait jouer un rôle crucial dans les représentations du champ visuel et la dynamique des mouvements oculaires, en plus

de contrôler l'attention dans la lecture lettre par lettre et de lever l'ambiguïté des lettres miroirs au cours des premières étapes de l'apprentissage de la lecture.

Mais si la voie ventrale, qui incorpore l'VWFA, peut reconnaître des chaînes de lettres elle ne peut pas coder précisément la localisation de ces lettres. Cette dernière insuffisance ne peut pas être tenue pour responsable de l'inversion des caractères individuels. Elle peut seulement conduire à l'une des deux expressions de l'écriture en miroir, à savoir l'inversion de lettres dans un mot (e.g., en anglais *saw* à la place *was*) ou des chiffres dans un nombre (e.g., $5+7 = 21$). De manière hypothétique, la route dorsale rapide fournirait un feedback à V1 et à VWFA au sujet de l'endroit où l'attention doit être portée afin de spécifier leur ordre dans un mot. Mais, pour tenter d'avancer dans la compréhension de l'inversion des caractères isolés, c'est la notion de représentation intermédiaire centrée sur la forme ou l'objet (Vannuscorps et al., 2021) que nous allons principalement développer. L'observation détaillée d'une jeune fille – Davida – y a largement contribué.

Davida est une jeune femme droitrière, athlétique et très coopérative. Elle était âgée de 15 ans lorsque cette étude a commencé en octobre 2016 et de 17 ans lorsqu'elle s'est terminée en mars 2019. Aucun autre antécédent médical, neuropsychologique, neurologique, psychiatrique ou ophtalmologique n'a été remarqué chez Davida. Bien que l'examen de sa vision et de son audition ait aussi conduit à des résultats dans les normes, elle a eu des difficultés en lecture à partir de la deuxième année d'école. Elle percevait, entre autres, des régions délimitées de l'espace en 2D ('formes'), définies par des bords nets de contraste moyen à élevé, comme reflétées sur leurs propres axes. En revanche, sa perception des formes 3D, fortement floues ou à très faible contraste, et des stimuli émergeant d'une collection de formes, est intacte. Une telle particularité de la perception devait lui faire percevoir b comme d et p comme q (et vice versa). Parmi les nombreux tests auxquels Davida a été soumise, figurait un test d'écriture de mémoire. Elle devait écrire, sous dictée, une série de 15 lettres et 15 mots (voir Fig. 32).

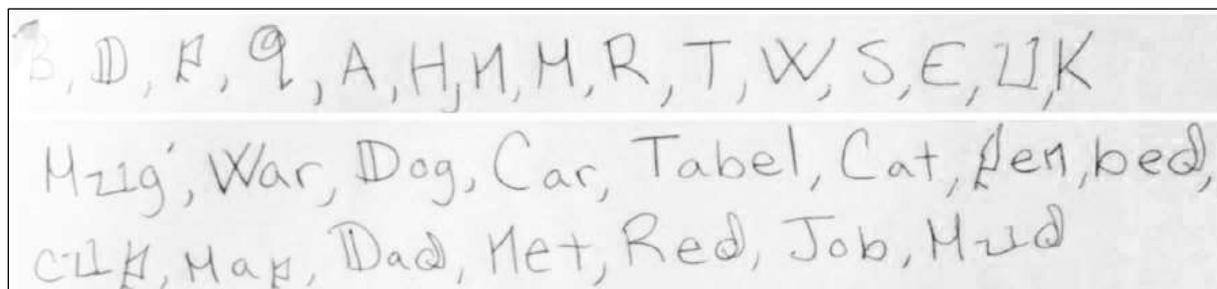


Figure 32 : Les écritures idiosyncrasiques des lettres d et p (inventées par Davida) permettant de différencier d et b ou p et q si on n'a pas surmonté la généralisation en miroir. (Reproduite à partir de la figure S8 de Vannuscorps et al., 2021).

Elle n'a commis qu'une seule erreur, consistant à inverser les deux dernières lettres du mot « table » (*tabel*). Mais ce qui est surtout intéressant, c'est qu'elle a utilisé une police personnelle dans laquelle les lettres sensibles à l'orientation se voient attribuer des formes différentes. Cette police personnelle consiste à doubler la hasta (trait vertical) du d (minuscule ou majuscule) et remplacer la coda (demi-cercle) de p (minuscule ou majuscule) par une sorte de triangle non fermé. On voit l'efficacité d'une telle stratégie : pour quelqu'un qui retient que b ou p est constitué par une boucle et un trait accolé qui la dépasse (au-dessus ou en dessous) sans retenir que la boucle est à gauche ou à droite, la confusion est inévitable (y compris en

relecture de ses propres écritures). En revanche, la police personnelle de Davida rend b ou p clairement distinguables de d ou q. À son propos, elle a d'ailleurs déclaré aux expérimentateurs l'avoir développée pour être capable de lire ses propres écrits.

Freud et Ahsan (2022) se sont immédiatement appuyés sur cette observation de Davida pour suggérer que son déficit spécifique pouvait être le résultat d'un flux d'informations dorsal à ventral déficient. Cette redéfinition du rôle traditionnel de la voie dorsale fait d'ailleurs l'objet de plus en plus d'articles (Gurariy et al., 2022). Dans la section 5.2, nous avons déjà présenté ces deux voies – ventrale et dorsale – du traitement de l'information visuelle. Leur distinction est parfois doublée par celle des systèmes parvo-cellulaire (voie ventrale) et magno-cellulaire (voie dorsale), dont il est intéressant de rappeler qu'elle fut – voire est toujours – une théorie explicative de la dyslexie (Livingstone et al., 1991). Freud et Ahsan remarquent alors que la voie dorsale reçoit la majeure partie de ses entrées des systèmes magnocellulaire et koniocellulaire (konio en grec peut signifier poussière : ce sont des neurones dotés d'un petit corps cellulaire). Bien qu'ils reconnaissent que cette séparation est relative plutôt que binaire, Freud et Ahsan soutiennent l'hypothèse selon laquelle différentes régions corticales pourraient être impliquées dans les calculs des représentations intermédiaires centrées sur l'objet. En particulier, il est plausible que la voie dorsale calcule ses représentations sur la base des entrées magnocellulaires, tandis que la voie ventrale les calcule sur la base des entrées parvocellulaires. Freud et Ahsan annoncent alors la modélisation d'Ayzenberg et Behrmann (2022) que je vais maintenant commenter longuement car elle complète remarquablement cette partie : après avoir vu comment, de patch en patch, l'information sur l'orientation disparaît (Section 5.3.1), puis constaté qu'elle a bien disparu dans le sulcus fusiforme postérieur (Section 5.3.2), je suis obligé, car in fine la quasi-totalité des élèves arrive à écrire/lire sans inverser b et d (entre autres), de suggérer comment elle pourrait être restaurée.

On savait déjà que les régions dorsales sont sensibles à de nombreuses propriétés spatiales, entre autres, l'orientation. Ayzenberg et Behrmann testent si la voie visuelle dorsale représente les relations entre les éléments constitutifs d'un objet et si cette information peut soutenir les processus de reconnaissance des objets dans la voie ventrale sur 12 (conformément au pré-enregistrement), voire 18, participants. Pour ce faire, ils analysent la connectivité fonctionnelle, en fonction de la tâche, pour voir si les régions d'intérêt (ROI : *Regions Of Interest*) dorsales sensibles aux relations entre les parties sont corrélées aux régions ventrales. Mais établir une corrélation ne suffit pas. Il est essentiel de tester, en complément, la direction de ces interactions et, plus précisément, de déterminer si le cortex dorsal prédit la réponse du cortex ventral, plutôt que l'inverse. Temporellement, cela conduit à vérifier si le codage des relations entre les parties dans les ROIs dorsales précède le traitement des objets dans les ROIs ventrales.

Dans leur expérience 1, Ayzenberg et Behrmann localisent d'abord des relations partielles centrées sur l'objet dans la voie dorsale. Ils en identifient dans les sulci intrapariétaux (IPS : *intraparietal sulcus*) postérieur (pIPS) et antérieur (aIPS) dans l'hémisphère droit (dpIPS, daIPS) de chaque participant et chez 10 des 12 participants dans l'hémisphère gauche (gpIPS, gaIPS). Mais une analyse pour l'ensemble des participants ne conduit à des groupes de neurones significatifs que dans l'hémisphère droit et des analyses supplémentaires suggèrent que les relations partielles centrées sur l'objet sont représentées plus fortement dans les régions pariétales de l'hémisphère droit que dans celles de l'hémisphère gauche. Ayzenberg et Behrmann ont aussi déterminé des ROIs des relations allocentriques pour chaque individu. Ces

ROIs sont les voxels qui répondent davantage à la condition de distance qu'à celle de luminosité. Cela leur permet de suggérer que la voie dorsale représente des relations de parties centrées sur l'objet, et que cette représentation est indépendante des relations spatiales allocentriques représentées par la voie ventrale (aussi des autres propriétés de l'objet). L'étude de la connectivité des ROIs de l'IPS avec une région ventrale (LOC : *Lateral Occipital Complex*) a alors révélé une connectivité significative entre les dpIPS et daIPS avec les régions bilatérales de la voie ventrale. Dans leur ensemble, ces résultats suggèrent donc que les régions dorsales impliquées dans le calcul des relations partielles centrées sur l'objet, en particulier dans l'hémisphère droit, sont préférentiellement connectées au flux ventral pour étayer la reconnaissance des objets. Or Behrmann et al. (2006) ont rapporté antérieurement que les patients présentant des lésions du LOC et des déficits de reconnaissance d'objets étaient affaiblis dans la perception des relations entre les parties. Cela suggère un locus ventral pour les relations centrées sur les objets contraire à celui prédit. Il devenait essentiel de tester si la connexion entre l'IPS et le LOC est dirigée dans le sens dorsal → ventral.

Pour ce dernier test Ayzenberg et Behrmann utilisent une méthode dont la logique est, dans ses grandes lignes, relativement simple à comprendre. D'abord, ils calculent une statistique Fdv associée à l'effet dorsal → ventral et une statistique Fvd associée à l'effet ventral → dorsal (statistique F de Fisher). Si le sens est bien, comme prédit, dorsal → ventral, Fdv devrait être supérieure à Fvd, c'est-à-dire $Fdv - Fvd > 0$, pour chaque participant. Ensuite, ils montrent avec une autre statistique classique (Wilcoxon) que ces différences sont bien supérieures à 0 significativement. En outre, d'un point de vue temporel, Ayzenberg et Behrmann soulignent, par référence à la figure 2 de Regev et al. (2018), que leur résultat est compatible avec les recherches montrant que les informations sur les objets visuels atteignent le cortex pariétal postérieur entre 100 et 200 ms plus tôt que les régions ventrales¹⁶. Ils mentionnent aussi des recherches montrant que les propriétés topologiques des objets ne peuvent être représentées dans la voie ventrale que par des connexions top-down, un autre argument en faveur d'un flux dorsal → ventral.

Dans l'expérience 2, Ayzenberg et Behrmann montrent que les régions de l'IPS postérieur droit impliquées dans le calcul des relations entre les parties centrées sur l'objet peuvent soutenir la catégorisation des exemplaires d'objets. Un tel résultat paraît intéressant pour surmonter le problème de la grande variété des polices de caractères et, encore pire, des écritures individuelles. Les résultats confirment que le traitement des objets dans le cortex dorsal précède et prédit le traitement des objets dans le cortex ventral. La reconnaissance des caractères ou des mots étant fondamentalement une fonction de l'hémisphère gauche, il est important de noter aussi que le pIPS présente une connectivité effective significative avec le LOC gauche. Ceci est cohérent avec l'hypothèse selon laquelle le pIPS propage les informations sur les relations entre les parties vers la voie ventrale pour une telle reconnaissance.

Dans la discussion, Ayzenberg et Behrmann rappellent la plausibilité temporelle de leurs résultats, leur accord avec les processus top-down et soulignent encore que des études ont également montré que l'inactivation temporaire des régions pariétales postérieures altère le traitement ventral des objets. Ils en concluent que leurs résultats, combinés à ces études,

¹⁶ La référence me semble optimiste (en faveur de la théorie !). Par exemple, Foxe et Simpson (2002) indiquent une antériorité de l'info dans le lobe pariétal par rapport au lobe temporal de l'ordre de 10 ms, mais une antériorité quand même.

suggèrent un rôle causal pour le cortex dorsal dans le traitement ventral des objets, dans lequel le cortex dorsal transmet des informations sur les objets à la voie ventrale pour étayer la reconnaissance des objets. Ce rôle du cortex dorsal semble en outre plus important pour l'écriture que pour la lecture. En effet, en comparant les zones cérébrales essentielles à la lecture et à l'écriture chez 111 patients victimes d'un AVC, Baldo et al. (2018) ont constaté que l'écriture est principalement associée au cortex pariétal inférieur gauche et la lecture au cortex occipito-temporal ventral gauche. En soulignant l'apport de la voie dorsale à la voie ventrale, à laquelle nous nous étions limités (Fischer & Koch, 2014), nous pensons mieux décrire et comprendre le réseau plus large qui soutient la reconnaissance et l'écriture des caractères, et les contributions relatives de chaque voie.

Une facette possiblement intéressante dans le cadre d'une discussion des théories d'Orton (Section 1.6) et de Corballis (Section 5.1) est que les résultats d'Ayzenberg et Behrmann diffèrent selon l'hémisphère. Plus précisément, le codage des relations entre les parties centrées sur l'objet est plus fort dans l'hémisphère droit dans presque toutes les analyses. Ce résultat reflète l'effet classique de préséance globale de l'hémisphère droit dans lequel les propriétés globales de la forme sont le plus souvent représentées, alors que les propriétés locales de la forme sont représentées dans l'hémisphère gauche. Il convient toutefois de faire attention à la particularité de cet effet pour des lettres, particularité que Lachmann et al. (2014) ont établie avec des participants les adultes.

5.4. Quel mécanisme de transmission de la voie dorsale vers la voie ventrale ?

J'ai décrit, par référence à la modélisation d'Ayzenberg et Behrmann (2022), la nature de l'information – les relations des parties centrées sur l'objet – qui pouvait être transmise de la voie dorsale vers la voie ventrale. Dans le cas de l'écriture, une telle transmission pourrait se faire vers une aire putative liée aux graphèmes, partiellement dissociée dans VWFA. Bouhali et al. (2019) ont en effet montré que cette dernière est connectée fonctionnellement aux aires pariétales dorsales impliquées dans la lecture lettre par lettre.

Une fois que cette transmission dorsale → ventrale est admise, surgit la question de son mécanisme et, d'un point de vue développemental, de son caractère transitoire ou non. Sur ce dernier point, les données de Chang et al. (2015), suggérant un réglage visuel précoce sur des formes visuelles importantes comme les lettres, sont compatibles avec un caractère non transitoire. En revanche, les résultats de Hutchison et Gallivan (2018) précisent que le couplage fonctionnel des zones OTC (*Occipito-Temporal Cortex*) ventro-latérales aux structures pariétales dorsales et ventro-médianes est flexible et dépendant de la tâche. Cela suggère que les régions du cortex occipital latéral, en particulier, pourraient jouer un rôle non définitivement fixé dans la médiation des interactions entre les voies dorsales et ventrales.

Une hypothèse, théoriquement séduisante, est que ce mécanisme pourrait être une inhibition de la généralisation en miroir (Brault-Foisy et al., 2017; Ahr et al., 2016, 2017 ; Borst et al., 2015). En effet, si l'orientation des caractères est présente au début du traitement visuel, il suffirait d'inhiber la généralisation pour récupérer l'orientation originelle dans la suite du traitement. Comme l'apprentissage de la lecture augmente la discrimination en miroir dès les 100-150 premières ms (Pegado et al., 2014), l'inhibition aurait certainement l'avantage de permettre une rapide suppression de la généralisation en miroir. Perea et al. (2011) ont observé une telle inhibition pour les lettres réversibles (i.e., dont l'écriture inversée correspond à une lettre existante) sur des élèves de 4^{ème} année d'école. Mais dans d'autres domaines – celui de

l'interférence entre les théories naïves et scientifiques – où le même type d'argument peut être avancé, l'inhibition a pu être rejetée (Stricker et al., 2021).

Harrison et Strother (2018) ont repris assez complètement la méthodologie de priming négatif d'Ahr et al. sur des adultes, avec les mêmes lettres d'amorçage et avec des cibles qui sont des images d'animaux. Mais, alors que la présentation des amorces est centrale, celle des cibles peut être latéralisée (Expé. 1) ou non (Expé. 2). Cela leur permet de préciser que leurs résultats montrent qu'une inhibition active de la généralisation en miroir se produit dans les deux hémisphères, et qu'elle est reliée à – mais distincte de – l'avantage hémisphérique droit pour reconnaître que des objets en miroir ou répétés (translatés) sont les mêmes. Ils notent cependant que d'autres études suggèrent que l'inhibition de la généralisation en miroir durant la reconnaissance de lettres et de mots est automatique et se produit avec des mécanismes neuronaux recyclés dans le cortex occipito-temporal gauche (Dehaene et al., 2010 ; Pegado et al., 2011).

Cette proposition d'inhibition de la généralisation en miroir a été étayée par une recherche de Song et al. (2017). Ces derniers ont constaté que le niveau de GABA pariétal était corrélé avec l'ampleur de l'illusion de taille mais pas avec l'ampleur de l'illusion d'orientation ou de luminosité et, en revanche, le niveau de GABA occipital était corrélé avec l'ampleur de l'illusion d'orientation mais pas avec l'ampleur de l'illusion de taille ou de luminosité. Comme un niveau de GABA plus élevé est associé à une meilleure capacité de discrimination visuelle et à une moindre sensibilité à la distraction, le neurotransmetteur inhibiteur GABA pourrait être l'agent de l'inhibition de la généralisation en miroir.

Elle est aussi plausible eu égard aux modélisations neuroscientifiques contemporaines de l'attention ou, plus généralement, avec l'affirmation centrale de Walbrin et Almeida (2021) selon laquelle les calculs locaux sont influencés par la connectivité avec les zones cérébrales distales et, vraisemblablement, par les calculs effectués dans ces zones. Dans la section 4.1 nous avons utilisé un concept naïf d'attention, voire douteux pour notre interprétation de l'expérience de Fuller. Dans leur revue sur les réseaux attentionnels, Mengotti et al. (2020) écrivent qu'« il existe maintenant des preuves considérables que l'amélioration de l'attention repose sur la modulation des zones sensorielles par l'IPS et le FEF (champs oculaires frontaux) via des connexions en retour » et que, « à la fois l'IPS et le FEF modulent l'activité dans le cortex visuel » (p. 208). En se référant à la modélisation causale dynamique de Vossel et al. (2012), ils décrivent une attention basée sur les caractéristiques : c'est la capacité à renforcer la représentation d'une caractéristique spécifique dans l'ensemble du champ visuel pour détecter un stimulus. Ils indiquent que cette caractéristique spécifique pourrait être l'orientation. Elle implique fondamentalement l'IPS antérieur bilatéral, et différentes régions du cortex pariétal gauche. Elle se distingue ainsi de la dominance de l'hémisphère droit pour l'attention spatiale.

Xingliang et Houde (2021), deux auteurs chinois, ont tenté une synthèse difficile. Ils présentent l'inhibition de la généralisation comme un processus quasi-unique pour remédier à l'inversion en miroir. Malheureusement, cette synthèse est difficile à lire (en chinois, seul l'abstract est en anglais), peu critique et pas toujours pertinente. Notamment, lorsque les auteurs émettent l'hypothèse que la généralisation en miroir est une explication plus importante que la direction culturelle de l'écriture, alors que les deux se succèdent et se complètent.

5.5. Quelques observations neuroscientifiques sur des adultes

Comme déjà souligné, les observations en neuroscience sur les enfants, principalement concernés par ce travail, sont rares pour la double raison que les techniques mises en œuvre doivent être totalement non invasives, et que les études de lésions sont (heureusement, faute de participants) quasiment impossibles. Plusieurs recherches sur des personnes adultes ont en revanche étudié les réactions de ces dernières à des stimuli, notamment des caractères alphanumériques, inversés en miroir.

Alivisatos et Petrides (1997) ont mesuré le débit sanguin régional cérébral avec la tomographie par émission de positons pendant une tâche dans laquelle les participants (10 hommes adultes droitiers) devaient distinguer entre les images normales et les images miroir de stimuli alphanumériques présentés dans le sens vertical. Plus précisément, G, F, R devaient être distingués de G , F , R et 2, 5, 7 de 2 , 5 , 7 . Par rapport à la tâche de contrôle, ils ont observé des augmentations significatives du débit dans le cortex pariétal postéro-supérieur droit et le cortex pariétal inférieur gauche.

Une analyse des lésions a permis à Martinaud et al. (2016) d'étudier la discrimination des stimuli en miroir (voir Fig. 33). Leurs données suggèrent que la voie dorsale visuelle droite est essentielle pour la perception précise de stimuli en miroir ou ayant subi une rotation. Mais le processus cognitif sélectif et un réseau anatomique sous-tendant notre capacité à discriminer entre images en miroir est différent du processus de discrimination entre images ayant subi une rotation.

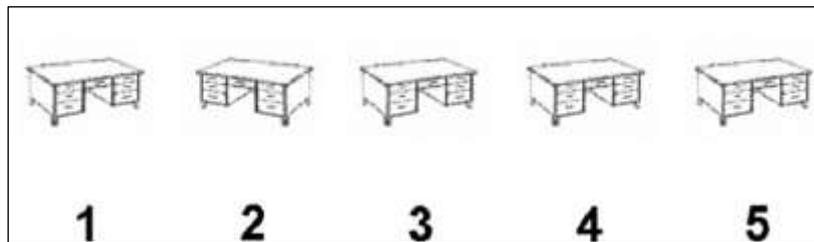


Figure 33 : Un exemple de stimuli en miroir dans l'observation de Martinaud et al. (2016). Les patients devaient indiquer le numéro de l'image qui n'est pas dans la même direction que les autres.

L'étude des potentiels liés à un événement (ERP : *Event Related Potentials*) ou stimulus, par des techniques électro-encéphalographiques, a permis à Carreiras et al. (2013) de confirmer que la composante initiale (vers 150 ms) de l'activité électrique correspond à la forme visuelle des lettres, et qu'une composante ultérieure (vers 300 ms) correspond à une forme plus abstraite. En étudiant plus précisément la composante liée à la forme visuelle, toujours par ERP, une sensibilité à l'orientation a pu être observée autour de 100-140 ms, ainsi qu'une réponse d'amplitude plus grande pour les lettres inversées que pour les lettres normales (Milivojevic et al., 2011; King, 2012).

On peut conclure qu'une certaine spécificité des images en miroir demeure à l'âge adulte, et que leur reconnaissance ou discrimination semble toujours solliciter la voie dorsale. Toutefois, ces recherches, outre qu'elles portent sur des adultes, ne portent pas sur l'écriture, mais sur la reconnaissance ou l'identification des images inversées, des tâches dont nous verrons qu'elles n'ont peut-être pas grand-chose en commun avec l'écriture (Section 8.1). La raison de cette absence d'observation sur l'écriture (ou le dessin) est certainement

Chapitre 5

méthodologique : les inversions en écriture/dessin par les adultes seraient rares (donc difficiles à analyser statistiquement !) et sont plus difficiles à évaluer objectivement que des réponses de reconnaissance ou de discrimination, souvent binaires ou, à tout le moins, avec un nombre limité de choix de réponse.

6. Le mystère éclairci

6.1. Les caractères se différencient par leur fréquence d'inversion

Comme nous l'avons mis en évidence dans la section 1.9, les éducateurs avaient bien vu, vers le milieu du 20^e siècle, que les caractères ne sont pas inversés aussi fréquemment les uns que les autres. Simner (1984), vers la fin du siècle, avait observé l'inversion préférentielle des lettres de type d comparativement à celles de type b. Ce résultat général, d'une différence de la fréquence d'inversion en fonction des caractères, était donc clairement apparu avant la fin du 20^e siècle. Mais, la recherche de Simner n'avait pas étayé les prédictions sur l'inversion due à la gaucherie et arrivait à un moment où le tsunami de ses études ne s'était pas encore complètement calmé (voir Section 1.4). Comme l'ont noté Treiman et Kessler (2011), cela peut expliquer pourquoi les travaux de Simner n'ont pas eu beaucoup d'impact.

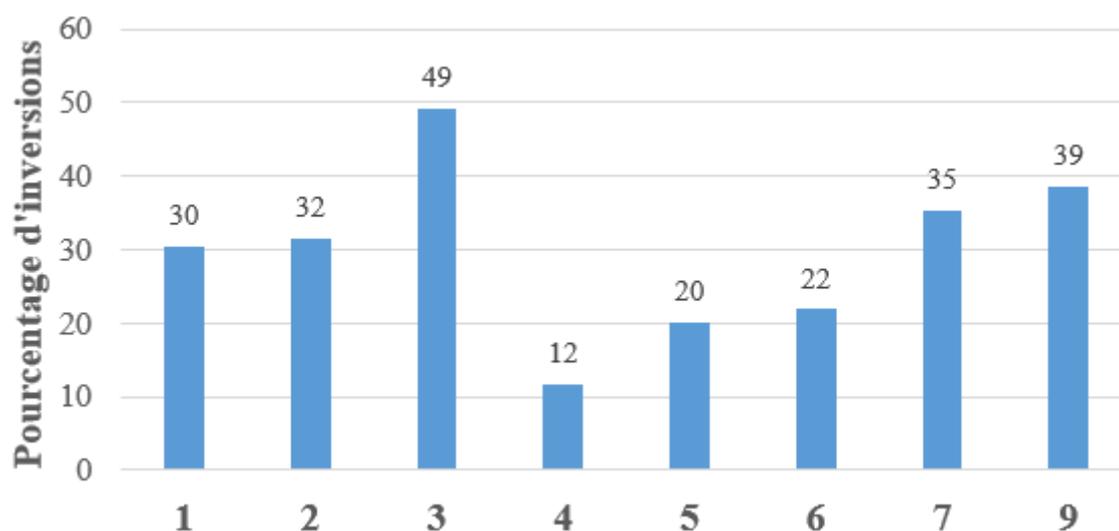


Figure 34 : Pourcentages moyens d'inversion des huit chiffres asymétriques en fonction du chiffre (moyennes pondérées de 6 études; 1563 enfants de GS, d'âge moyen 5 ans 8 mois; pour les détails voir Fischer & Luxembourger, 2018a, Table 1).

Bien que les enfants produisent annuellement des millions de caractères en miroir dans les seules écoles françaises (notamment maternelles), personne, à ma connaissance, n'avait essayé d'établir la fréquence de ces inversions en fonction des caractères. Pendant une dizaine d'années, à partir de 2008, nous avons tenté de le faire en contrôlant autant que possible les conditions de l'écriture. Pour la bonne raison que les enfants produisent surtout des inversions lors de l'écriture de mémoire (voir Section 4.3), nous avons assez systématiquement dicté les caractères (chiffres et lettres majuscules), sauf pour leur prénom que les enfants écrivaient seul de mémoire. Pour le codage des écritures, il est important de préciser que seule l'orientation était jugée sans exigence d'une grande qualité pour les autres composantes de la forme. Pour le calcul du pourcentage, indiqué au-dessus des barres dans les figures 34 et 35, le nombre d'écritures en miroir horizontal a été rapporté à celui des écritures pertinentes pour la théorie (écritures en miroir horizontal ou correctes). La non-prise en compte des autres types de miroir ne rehausse que très légèrement ce pourcentage par rapport à un pourcentage calculé sur la

totalité des écritures exploitables, car les autres miroirs sont très peu nombreux (ils concernent principalement une confusion entre 6 et son miroir double, 9). Nous résumons les résultats obtenus dans les deux figures 34 et 35.

La figure 34 met en évidence le chiffre 3, clairement le plus inversé : près d'une écriture sur deux est en miroir ! À l'opposé, elle montre que 4 est le chiffre le moins inversé. Elle permet aussi de voir que les chiffres 4, 5 et 6, sont moins inversés que les autres. Les inversions concernent donc plutôt les chiffres 1, 2, 3, 7 et 9, dont l'analyse théorique et l'évaluation par les étudiants ont conduit à leur attribuer une orientation gauche (voir Fig. 9). Cette dernière évaluation ne contredisait que légèrement la catégorisation initiale du chiffre 4 dans le type d par Treiman et Kessler (voir Section 2.2). En revanche, l'émergence de 4 comme chiffre le moins inversé, la contredit lourdement : alors que le type d de 4 aurait dû le conduire à des inversions fréquentes, l'observation empirique montre qu'il est le moins inversé de tous les chiffres. Reste à voir, dans la section suivante, s'il ne s'agit pas d'une particularité due à notre pays ou région d'observation.

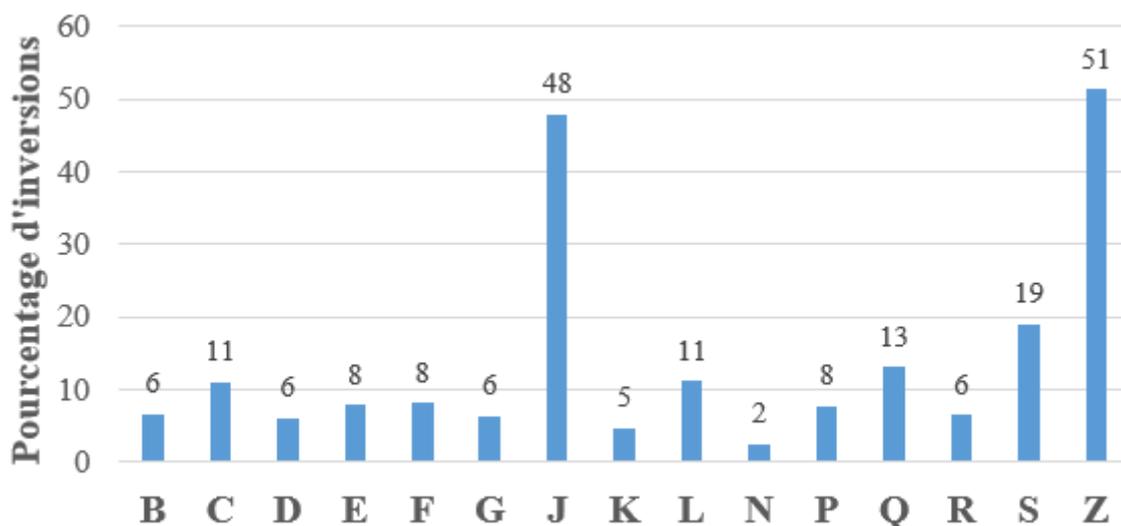


Figure 35 : Pourcentages moyens d'inversion des 15 lettres majuscules asymétriques en fonction du chiffre (moyennes pondérées de 4 études; 679 enfants de GS, d'âge moyen 5 ans 8 mois; pour les détails voir Fischer & Luxembourger, 2018a, Table 2).

Pour les lettres majuscules, la figure 35 met en évidence les deux lettres majuscules Z et J. Pour Z, on dépasse les 50%, c'est-à-dire qu'il y a eu plus d'écritures en miroir horizontal que d'écritures correctes ! Précisons toutefois que, pour J, nous n'avons pas fait de distinction avec sa minuscule j qui a la même orientation. Ces inversions de Z et J sont en parfait accord avec, à la fois, l'analyse théorique et le jugement par les étudiants de leur orientation (voir Section 2.1). La particularité de ces lettres apparaissait aussi dans notre analyse de l'évolution historique de l'écriture.

Pour les lettres minuscules, j'ai expliqué dans la section 4.7 qu'elles ne sont pas un matériel idéal car, à l'âge typique de l'inversion, les enfants souvent ne les connaissent pas encore suffisamment. Une évaluation statistique entraînera donc l'exclusion de beaucoup d'enfants ou une abondance de données manquantes. Cela risque de biaiser la comparaison des fréquences d'inversion entre lettres, et a fait renoncer certains chercheurs à les présenter (e.g., Ritchey, 2008). C'est aussi le cas de McIntosh et al. (2018b), qui avaient demandé à leurs élèves

écossais d'écrire la lettre minuscule après la majuscule, mais ont renoncé à analyser leurs données sur ces lettres minuscules. Comme elles ont été publiées en données supplémentaires, nous les avons néanmoins analysées. Les écritures de lettres minuscules manquantes concernent surtout des lettres minuscules dont la majuscule correspondante est très semblable (e.g., c et C). J'ai donc considéré que les élèves qui venaient d'écrire cette majuscule n'ont pas voulu produire une écriture identique juste après. Pour ces lettres minuscules (c, f, j, k, p, s et z), j'ai alors repris l'écriture (correcte, inversée, ou manquante) de la majuscule correspondante. La figure 36 présente les pourcentages qui, grâce à ces reprises, ont pu être calculés toujours sur plus de 20 enfants.

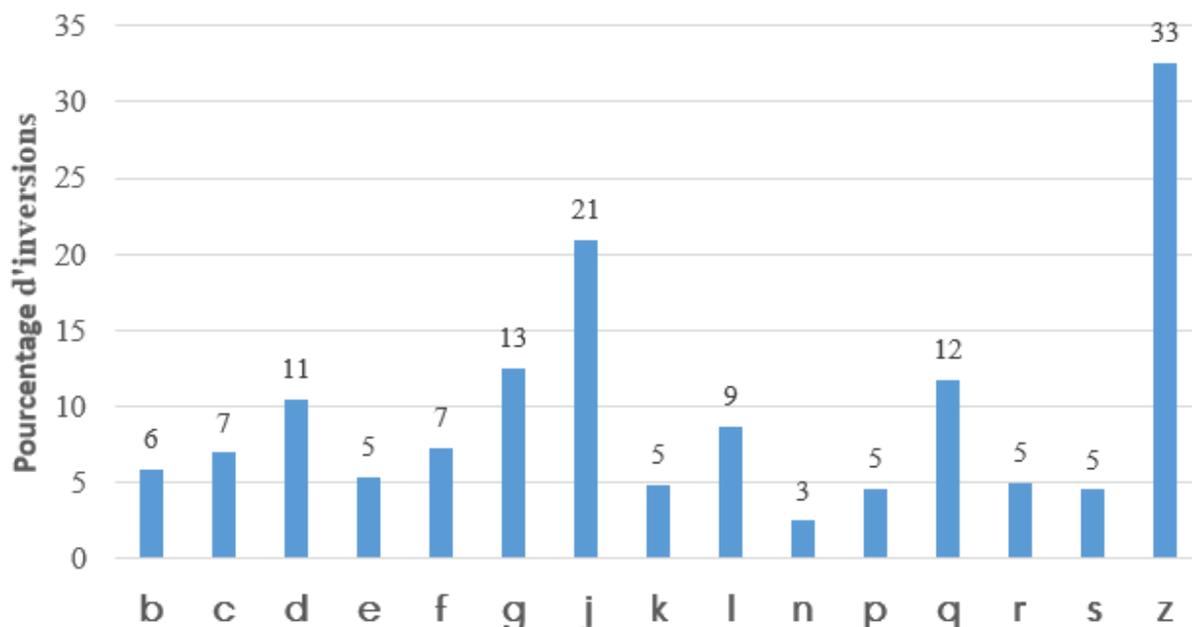


Figure 36 : Pourcentages moyens d'inversion des 15 lettres minuscules, correspondant aux 15 lettres majuscules asymétriques, calculés à partir des données aménagées (voir texte) de McIntosh et al. (2018b, étude 1).

La figure 36 confirme que, pour les lettres minuscules aussi, z et j sont les lettres les plus fréquemment inversées. Un autre intérêt de la figure est de montrer l'influence sur leur fréquence d'inversion des lettres dont l'orientation change quand on passe de leur écriture en majuscule à leur écriture en minuscule. Tel est le cas des lettres majuscules D, G, Q orientées vers la droite et qui sont clairement orientées à gauche lorsqu'on les écrit d, g, et q (voir Section 2.1). Ces trois lettres apparaissent alors les plus fréquemment inversées, après z et j. De ce fait, les 5 lettres minuscules orientées vers la gauche (z, j, g, q, d) sont, chacune, plus inversée que toutes les lettres minuscules orientées vers la droite (b, c, e, f, k, l, p, r, s) ou à orientation non déterminée (n).

Pour surmonter ce problème de l'insuffisante connaissance des lettres minuscules par les enfants avant l'école élémentaire, McIntosh et al. (2018b) ont testé des élèves irlandais dont le système scolaire enseigne les lettres minuscules dès le début. Leurs données portent sur au moins 80 répondants pour chaque lettre. Mais, ne voulant vraisemblablement pas mélanger

deux problèmes (voir Section 8.2), McIntosh et al. ont exclu les lettres réversibles b, d et p (i.e., toutes sauf q).

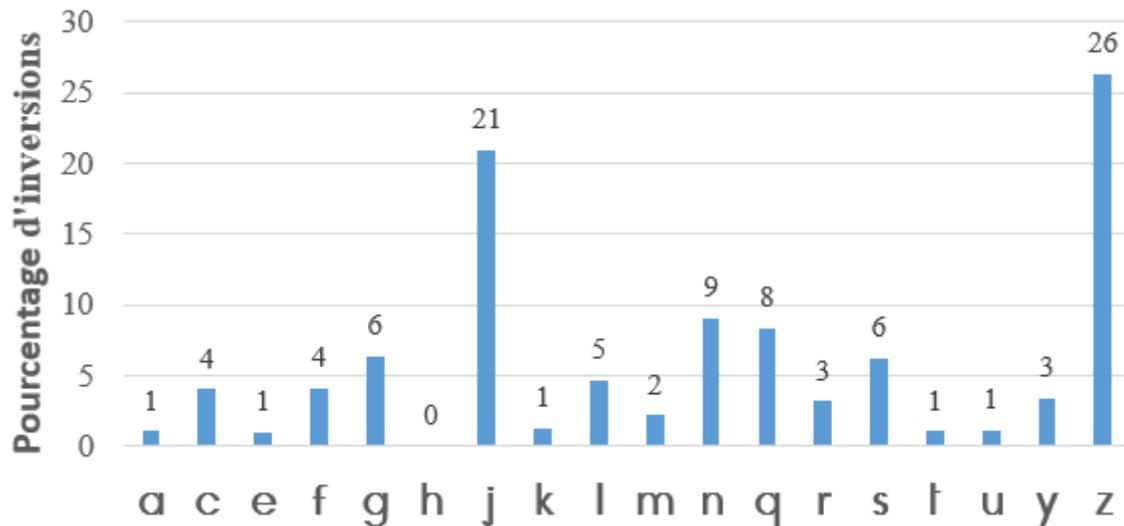


Figure 37 : Pourcentages moyens d'inversion des 18 lettres minuscules, correspondant aux 26 lettres de l'alphabet, moins les 5 lettres approximativement symétriques et 3 lettres réversibles, calculés à partir des données de McIntosh et al. (2018b, étude 2).

La figure 37 confirme encore une fois clairement que z et j sont les lettres les moins inversées. La différence entre les lettres orientées à gauche (z, j, q, g, y, a) et les lettres orientées à droite (n, s, l, c, f, r, e, k, h), dans l'évaluation par les étudiants de Treiman et al. (voir Section 2.1), sachant que l, m, t et u sont neutres, n'est pas aussi parfaite que celle précédemment obtenue. Cette différenciation imparfaite peut cependant provenir, en partie, d'une catégorisation discutable, ou d'une écriture dont l'orientation est difficile à juger. C'est notamment le cas des lettres n, orientée à droite, et a et y, orientées à gauche, dans l'évaluation par Treiman et al., des lettres qui ont fortement réduit la différence d'inversion entre les lettres orientées à gauche et celles orientées à droite.

Il apparaît donc que, pour les lettres minuscules, j et z sont les plus inversées, comme J et Z pour les lettres majuscules. Cette observation n'est pas étonnante puisque j et z ne se différencient guère de J et Z, en tout cas pour ce qui concerne l'orientation. En outre, on retrouve aussi, quoique moins nettement que pour les lettres majuscules, le contraste entre les lettres orientées à gauche (fréquemment inversées) et celles orientées à droite (moins fréquemment inversées).

6.2. L'universalité de la hiérarchie des fréquences

L'opposition entre les inversions (nombreuses) de 3 et celles (rares) de 4, aussi bien que les inversions de J (ou j) et Z (ou z) qui dominent nettement celles des autres lettres, amènent à se demander si les particularités de ces caractères ont été fréquemment soulignées. Malheureusement, les recherches ayant observé systématiquement l'écriture de mémoire (avec leur main dominante) des chiffres et lettres majuscules asymétriques par des enfants en âge de les inverser – disons de 4 à 7 ans – sont rares. Néanmoins, dans des conditions qui sont au moins partiellement celles que nous venons d'énoncer, nous en avons relevé quelques-unes. Nous acceptons quelques entorses à ces conditions, mais pas sur la nature de la tâche. En effet, nous avons vu que la copie est une tâche fondamentalement différente de l'écriture de mémoire (voir

Section 4.2). Lorsque la tâche proposée aux élèves permet une part de copie – fut-elle partielle comme dans Simner (1984) où les enfants regardaient le caractère pendant 2.5 s avant de l'écrire – on ne sait plus trop ce que l'on analyse. Et les résultats sont difficilement interprétables. J'ai beaucoup de mal à comprendre pourquoi des chercheurs expérimentés n'en ont pas conscience, alors qu'il est évident que l'on peut copier des caractères chinois (par exemple) tout en étant totalement incapable d'en écrire un seul de mémoire.

Nous analysons maintenant, à des fins comparatives avec les nôtres, les données de McIntosh et al. (2018b) relatives aux 15 lettres majuscules asymétriques. Ces données ont été obtenues lors de la première étude, sur 44 enfants écossais (Edimbourg) de 4 ans ½ à 10 ans (près de 7 ans en moyenne), écrivant avec leur main dominante. Les données sont bien corrélées avec les nôtres de la figure 35, $r = 0.76$. En particulier on y retrouve aussi que Z (33% d'inversions) et J (26%) sont les deux lettres les plus fréquemment inversées. Les pourcentages quantitativement inférieurs peuvent, en partie au moins, s'expliquer par l'âge moyen supérieur de leurs participants écossais. En outre, McIntosh et al. s'assuraient, préalablement à leur écriture, que les participants savent lire les lettres.

Janet Richmond a testé 126 élèves de la 1^{ère} à la 4^{ème} année d'école, en Australie. Les enfants devaient écrire l'alphabet et les chiffres de mémoire (Richmond, 2012). Dans un poster présenté à la Conférence de l'Association australienne de thérapie occupationnelle du Territoire du Nord (Darwin, Australie), elle ne présente que très succinctement les résultats de ces écritures pour les lettres écrites en script minuscule. Comme les lettres j et z (en script) présentent les mêmes orientations que leur correspondantes majuscules J et Z, les pourcentages d'inversion de Richmond peuvent quand même être comparés aux nôtres pour ces deux lettres et certaines autres (c, p et s). Les voici : j (9.5%), z (11.9%), b (0.8%), c (0.8%), i (0.8%), q (0.8%), t (0.8%), d (1.6%), l (1.6%), p (1.6%), s (2.4%). Ces pourcentages, tout au moins ceux qui sont comparables (j, z, c, p et s), s'accordent quasi parfaitement avec les nôtres, en montrant notamment que les fréquences d'inversion de j et z dominent celles des autres lettres. Le fait que ces fréquences, de l'ordre des 10%, soient inférieures aux nôtres (de l'ordre des 50%) peut s'expliquer principalement par l'âge des élèves qui dépasse 7 ans pour la plupart d'entre eux. Richmond n'indique d'ailleurs pas les inversions pour les chiffres : l'âge des enfants permet de penser qu'elle n'en a guère observées.

Kristen Ritchey, de l'Université du Delaware, a testé l'écriture des lettres (minuscules et majuscules) sur 60 enfants d'école maternelle, d'âge moyen 5 ans et 9 mois, du nord-est des États-Unis (Ritchey, 2008). Bien qu'elle ne rapporte pas les pourcentages d'inversion, son graphique (après rectification de la légende !) permet de les calculer approximativement pour toutes les lettres majuscules asymétriques : Z (35%), C (22%), J (17%), S (13%), avec toutes les 11 lettres suivantes à moins de 10%. On est un peu surpris de la présence de C comme deuxième lettre la plus inversée. Ritchey l'explique par le changement de direction qu'implique son tracé, une explication qui vaut aussi pour S et Z. Mais les élèves australiens de Richmond, écossais ou irlandais de McIntosh et al., et les nôtres, français, devaient eux aussi changer de direction et n'ont pas pour autant beaucoup inversé la lettre C ! Nous émettrons une autre hypothèse explicative en fin de section.

Récemment, en Angleterre, Sylke M. Göbel et al. (le nom est aussi orthographié Goebel) et ses collaborateurs (Göbel et al., 2019) ont rapporté des observations d'enfants anglais, à la conférence de la *Mathematical Cognition and Learning Society* qui s'est tenue les 16-18 juin

2019, à Carleton University (Ottawa ON, Canada). Les chiffres de 1 à 9 (non dans l'ordre) ont été dictés trois fois, ainsi que les lettres, à des élèves de deux niveaux scolaires : 84 enfants de 49 à 75 mois étaient dans l'année précédant la première année d'école (Année 0), et 75 enfants de 58 à 80 mois fréquentaient première année d'école (Année 1). Les auteurs n'indiquent les inversions des caractères individuels que pour les chiffres. En omettant 1, non inversable pour une partie des enfants anglais qui l'écrivent sans le petit trait diagonal, le graphique de Göbel et al. montre les hiérarchies des inversions suivantes :

- En Année 0 : 9 (presque 60%), 7 (50%), 3 (presque 50%), 2 (presque 40%), puis, nettement moins inversés, 5 (à peine 10%), 6 (moins de 10%) et 4 (environ 5%).
- En Année 1, 3 (presque 20%), 9 (plus de 15%), 7 (dépassé 10%), 2, 5, 6 et 4 tous inférieurs à 10%, avec 4 proche de 0%.

Il est intéressant d'observer que les participants en Année 0 ont approximativement l'âge de nos participants. On retrouve alors des pourcentages d'inversions impressionnants, autour de 50%, comme celui que nous avons observé pour 3 (voir Fig. 34). On observe aussi que 3 est fréquemment inversé, alors que 4 est très peu inversé (et même le moins inversé, dans les deux Années).

En France, mais dans une région – le Sud-Ouest – presque diagonalement opposée à celle – la Lorraine – où Fischer et coll. ont fait la quasi-totalité de leurs observations, Marine Portex n'a étudié que quelques lettres et chiffres, mais les autres conditions expérimentales correspondent parfaitement à nos exigences (Portex, 2017 ; Portex et al., 2018). En effet, comme elle a mis en oeuvre un apprentissage préalable, elle a pu tester l'écriture sous dictée avec 30 enfants très jeunes (de 4 ans 3 mois à 5 ans) de quelques caractères : B, E, N, R, S, J, Z, 1, 3. Dans les conditions d'écriture normale, c'est-à-dire de la gauche vers la droite, J, Z, 1 et 3 ont été inversés considérablement plus fréquemment que les autres caractères : J, 1, et 3 l'ont été dans près de 70% des occasions, Z dans plus 50%, N et S dans 10% ou moins, et B, E, et R, pas du tout. Encore une fois, la fréquence d'inversion dominante des lettres J et Z s'est clairement confirmée ; celle, impressionnante, du chiffre 3 aussi.

Parmi les recherches de la seconde moitié du 20^e siècle qui satisfont à peu près mes conditions, j'ai pu retenir celles Zaslou (1966) et Suggate et al. (1997). Robert Zaslou, du San Jose State College (Californie), a entrepris une expérience d'apprentissage avec 80 élèves ayant des problèmes d'inversion, en majorité de 6 ou 7 ans mais dont quelques-uns pouvaient être plus âgés. Il indique assez systématiquement les fréquences d'inversion pour les chiffres, mais se contente de préciser que les lettres Z, b, et C ont été les plus fréquemment inversées. Pour les chiffres, l'ordre descendant par fréquence d'inversion est : 2 (25%), 7 (19%), 3 (17%), 9 (% non indiqué), 6 (9%), 5 (8%) et 4 (6%).

Jennifer Suggate et al. ont testé 67 enfants de 4 et 5 ans au début de leur première année scolaire en Angleterre (en septembre ou en janvier) et à la fin de la première année scolaire (en juillet). Ils ont demandé aux enfants d'indiquer sur une feuille de papier combien de briques il y avait (de 1 à 10). Entre le test initial et le test final, le pourcentage de chiffres inversés a légèrement augmenté, passant de 19 % à 24 %, mais l'ordre des inversions de chiffres était le même, le 7, suivi du 2, du 9 et du 3, étant le plus sujet aux inversions et le 4, le 5 et le 6 étant les moins sujets aux inversions.

Comme le suggère l'expérience de Zaslou, ci-avant rapportée et qui remonte à plus d'un demi-siècle, l'universalité se vérifie aussi dans le temps. Même si je ne connais pas d'étude systématique des écritures en miroir dans les conditions voulues (caractères écrits de mémoire, de la main dominante, enfants de moins de 7 ans) dans la première moitié du 20^e siècle, je peux me référer à quelques figures présentées dans la partie historique et à une observation anecdotique de Hildreth (voir Fig. 38). Cette dernière montre que Robert, en 1934, à 5 ans tout juste, oriente déjà clairement l'écriture des chiffres dans la direction de l'écriture. La figure 6 montre, qu'en 1936, John avait seulement inversé J dans l'écriture de son prénom. Quasiment dans la même année, la figure 3 montre que Thomas avait, en parfait accord avec l'inversion en fonction de notre catégorisation des caractères (orientés à gauche ou non), inversé 2 et 3, mais pas 4 et 5 (1 est neutre aux USA). Et même, déjà en 1901, la figure 2 reproduisait des inversions de 2 et 3 par un enfant droitier.

The image shows a sequence of handwritten numbers: 15, 7, 2, 6, 7, 8, 6. The numbers 2, 6, 7, and 8 are written in a way that suggests they might be inversions or reflections of the original numbers, consistent with the text's discussion of character inversion in writing.

Figure 38 : Robert (5 ans) écrit spontanément, par intérêt, la suite des chiffres (Reproduit de Hildreth, 1934, p. 3).

Concernant cette universalité dans le temps, et la rareté des observations bien contrôlées des inversions de caractères au 20^e siècle, il faut reconnaître que ces dernières sont plus faciles aujourd'hui. En effet, les enfants contemporains sont encouragés à écrire de plus en plus jeunes, aussi bien par leur entourage familial, soucieux de leur donner un bon départ dans la vie, que par certains systèmes éducatifs, inquiets de voir que les performances des élèves ne sont pas à la hauteur souhaitée dans les comparaisons internationales. À ce sujet, il est bon de rappeler qu'il y a à peine un demi-siècle on aurait parlé, du moins en France, d'apprentissage prématuré à propos de l'écriture par des enfants de 4 ou 5 ans. En 1982, *Le Monde de l'éducation*, n'écrivait-il pas que « Pour des enfants de cinq ans, apprendre à compter jusqu'à 10 n'a guère d'utilité (sinon faire plaisir aux parents) » ? A fortiori, le même journal aurait certainement condamné la pratique de l'écriture des chiffres par des enfants qui n'y voient aucun sens ! Les écritures, précocement encouragées aujourd'hui, ont certainement favorisé l'observation des nombreuses écritures en miroir dans nos recherches. Les résultats de Johansson (2005), qui a directement comparé l'inversion des chiffres par les enfants suédois, autour des années 2000, à ceux d'anciennes recherches, autour des années 1950, corroborent une augmentation de la fréquence des écritures en miroirs : à nombre d'écritures correctes comparable, les enfants de 6 ans (non encore scolarisés en Suède) de son observation ont produit 2.4 inversions, alors que ceux des années 1950 (1942 précisément), âgés de 7 ans, n'en ont produit que 0.9 en moyenne (scores sur 10).

En conclusion de ces observations dans différentes régions du monde occidental et, secondairement, au cours du temps, il apparaît clairement que Z et J sont deux lettres majuscules (et minuscules) très fréquemment inversées, et souvent nettement davantage que les autres, et que les chiffres 4, 5 et 6 sont moins inversés que les chiffres 2, 3, 7 et 9 (et 1 le cas échéant). Cela confirme l'universalité de la plus grande fréquence d'inversion des caractères 2, 3, 7, 9, J, Z, et éventuellement 1, comparativement aux autres caractères. Au niveau des caractères individuels, outre J et Z, 3 est fréquemment inversé aussi. Néanmoins, il faut nuancer ces hiérarchies de fréquence : 3 par exemple ne semble pas toujours aussi fréquemment inversé

dans d'autres pays qu'en France; C semble exceptionnellement fréquemment inversé au moins dans certaines régions des USA (nord-est, Californie). Comme expliqué dans la section 2.4 c'est moins l'orientation des lettres per se qui importe, mais cette orientation en interaction avec le tracé enseigné aux enfants. L'insistance, en France, sur le tracé des cercles dans le sens antihoraire (voir les sections 7.2 et 7.5) permet d'expliquer ces deux divergences : elle induit aussi bien l'écriture en miroir de 3 que l'écriture correcte de C. Enfin, une mention spéciale doit être accordée à 4 : dans toutes les cultures occidentales que j'ai pu examiner, il est le chiffre qui résiste le mieux à l'erreur d'inversion en miroir. Dans Fischer (2013a), j'avais expliqué pourquoi la dynamique de son écriture est en parfaite harmonie avec l'écriture de gauche à droite. Avec les termes et notions introduits dans la section 2.1, je peux dire que la morpho-cinétique et la topo-cinétique de son écriture coïncident, quelle que soit la morpho-cinétique induite par l'enseignement ou l'environnement de l'enfant.

6.3. Une observation apparemment discordante

L'une des raisons pour lesquelles l'explication de l'inversion des caractères a tardé à être comprise est que la littérature, notamment ancienne, contient des observations contradictoires. Souvent l'âge des enfants constitue une explication pertinente et suffisante des discordances observées. Mais cela est loin d'être la seule explication. Une observation de Legrün (1931) paraît particulièrement intéressante et importante à analyser car elle conduit, au vu de notre observation de l'inversion fréquente de 3, à un résultat aux antipodes du nôtre, puisque 3 s'est avéré le chiffre le moins inversé. Analysons-la de près.

Alois Legrün avait, en 1931, déjà publié plusieurs articles sur l'écriture en miroir : en 1921, un article intitulé « L'écriture en miroir » (*Die Spiegelschrift*) dans une revue de formation continue des enseignants (*Lehrerfortbildung*) ; en 1928, un article sur l'écriture en miroir générée par la main droite (*Über rechtshändigkeit erzeugte Spiegelschrift*) dans le journal de psychologie pédagogique (*Zeitschrift für pädagogische Psychologie*), et, en 1929, dans la même revue, un article clinique sur l'écriture de la main gauche d'un élève hémiplégique droit (*Über die Linksschrift einer rechtsgeläimten Schülers*). Dans son nouvel article, de 1931, Legrün rapporte des observations d'enfants entrant à l'école et qui devaient écrire, de mémoire, les chiffres et nombres qu'ils connaissent. De manière précise, le didacticien du calcul Konrad Falk (dont les livres des années 1920 sont encore visibles sur Internet) avait demandé à deux institutrices de Vienne de tester leurs élèves au début de la scolarité obligatoire. À la rentrée scolaire de 1930, l'une des institutrices, Mme Fechner, a procédé à l'observation le 18/09 et l'a renouvelée le 24/10, tandis que la seconde institutrice, Mme Kreith, a fait la 1^{ère} observation dans la semaine du 29/09 au 4/10, et la seconde le 13/11. Entre les deux observations, les enfants n'ont pas appris l'écriture des chiffres et n'ont été en contact avec les nombres que sous la forme de numéros de cahiers, boîtes et autres (numéro de catalogues).

Les observations, confrontées aux nôtres, sont étonnantes : « 3 » figure en effet parmi les trois chiffres les moins écrits en miroir. Dans le dernier point du résumé, Legrün écrit : « Les chiffres individuels ne suscitent pas, dans la même mesure et avec la même constance, une restitution en miroir ; les chiffres 6 et 9 sont inversés le plus souvent, les chiffres 2, 3 et 5 le sont plus rarement » (p. 557). Pour essayer de déterminer l'origine de la discordance de nos observations avec celles de Legrün, j'ai construit un tableau à partir de ses données : à une erreur de total (1001 au lieu 901, avec une répercussion sur le pourcentage) et à certains arrondis non conventionnels de Legrün près, j'ai retrouvé ses totaux et pourcentages. En réunissant les 4 passations, cela fait un total de 6389 chiffres écrits « spontanément », le plus souvent dans

l'ordre d'après les productions d'enfants reproduites : 687 sont en miroir, soit environ 11% si l'on inclut les chiffres 8 et 0 (comme l'a fait Legrün), ou 12.5% si on exclut 0 et 8 qui ne pouvaient être (et n'ont pas été) écrits en miroir.

Dans mon tableau, il se confirme bien que 9 est, avec 23%, le chiffre le plus écrit en miroir, devant 6 (19%), 1 (15%), 4 (13%), 5 (9%), 3 (6.5%) et 2 (6.2%) ; ces pourcentages diffèrent légèrement de ceux établis par l'auteur car il n'a pas pondéré les moyennes. Avec les moyennes non pondérées 3 est vraiment dernier ! De nombreuses explications, qui non seulement ne s'excluent pas mutuellement mais peuvent même interagir pour contribuer à la discordance observée, peuvent être avancées.

(1) L'âge des élèves. Contrairement à nos observations en GS de maternelle, où les enfants ont une moyenne d'âge de moins de 6 ans, les élèves en début d'école obligatoire devaient avoir une moyenne d'âge supérieure à 6 ans. Précisons que les enfants rentraient à l'école à 6 ans, même s'il y a une petite ambiguïté car l'auteur parle de la 6^{ème} année de vie (mais il serait déraisonnable de penser que les enfants rentraient à l'école 5 ans) et qu'il y avait une tolérance de 4 mois pour ceux nés en fin d'année. L'année de l'observation (1930), la rentrée était le 16 septembre.

(2) La nature de la tâche. Les élèves écrivent spontanément les nombres qu'ils croient savoir écrire. Certes ils les écrivent de mémoire, mais la récupération ne se fait pas sur la base du mot de nombre entendu par l'élève, comme dans le cas d'une dictée de nombres non dans leur ordre naturel.

(3) Le décompte des écritures. Les nombres ont été écrits inégalement : 1 a été écrit 1840 fois soit environ 5 fois plus que 7 ou 9 (351 et 371 fois) ; 3 a été écrit 696 fois. Cela s'explique par le fait que les enfants ont davantage écrit les nombres à deux chiffres commençant par 1 que ceux commençant par 7 ou 9 : d'une part, ils savaient probablement moins bien écrire ces derniers, d'autre part, ils avaient en général moins de temps et moins de place pour les écrire, s'ils écrivaient les nombres dans l'ordre naturel. Au cours d'une passation, chacun des élèves a, en moyenne et approximativement, écrit 52 chiffres, ce qui correspond à l'écriture des nombres de 0 à 30. Une simulation théorique suggère alors qu'un élève peu avancé dans l'écriture des chiffres et qui n'est arrivé que jusqu'à 9, n'a écrit qu'un seul 3, alors qu'un élève plus avancé qui a écrit les nombres jusqu'à 39 en a écrit 14. Or il y a lieu de penser qu'un élève de 6 ans, à développement peu avancé a plus de chances d'écrire en miroir qu'un élève de 6 ans à développement avancé. On voit donc comment le mode de décompte de Legrün, en incluant les écritures correctes de 3 surreprésentées dans les nombres de 30 à 39 (écrits par les seuls élèves les plus avancés), a pu contribuer au faible pourcentage d'écriture en miroir de 3. Une simulation m'a convaincu que cela est une explication majeure puisque j'ai obtenu 18% d'écritures de 3 en miroir si on se limite aux nombres jusqu'à 29.

(4) La qualité des observations. Les expériences ont été conduites par deux institutrices différentes en situation de classe (30, ou plus, élèves dans chacune), avec les consignes d'un didacticien. Il n'est donc nullement assuré que ce dernier, ni les institutrices, ont pensé à décrocher les affichages de caractères (lettres et chiffres) que l'on trouve usuellement dans salles de classe de la 1^{ère} année d'école. Certains enfants ont pu recopier les chiffres sur ces affichages, et aussi sur leurs camarades. D'ailleurs, il n'y a aucune corrélation entre les pourcentages d'écriture en miroir des 8 chiffres asymétriques dans les deux classes : pour les deux passations réunies, le r de Pearson vaut .04 ; pour la première passation, la corrélation est

même négative : -.33. Cela suggère des conditions de passation différentes dans les deux classes. Les corrélations intra-classe entre les deux passations (espacées d'environ 5 semaines) sont elles-mêmes assez faibles ($r = .22$ et $r = .46$) et parfois étonnantes. Dans la classe de Mme Fechner, par exemple, 6 est le moins écrit en miroir lors de la passation 1 (6%), mais le plus écrit en miroir (21%) lors de la passation 2 !

(5) Les imprécisions sur le codage. Le problème du neuf qui, en miroir double, devient 6 (ou inversement) n'est pas évoqué. En outre, dans sa figure 6, Legrün reproduit un 4 en miroir vertical (i.e., par rapport à un axe de symétrie horizontal) : cela suggère une inclusion des miroirs non horizontaux dans son codage des écritures en miroir. Une telle inclusion a probablement contribué à la grande fréquence d'inversion de 6 et 9 qui sont les deux chiffres les plus fréquemment sujets à inversion verticale ou double dans nos observations.

6.4. L'apport décisif de l'écriture des prénoms

De longue date, des observations anecdotiques (e.g., Legrün, 1931 ; Hildreth, 1950a, voir aussi Fig. 7) ou moyennement bien contrôlées (Cornell, 1985) ont montré que lorsque les enfants écrivent de droite à gauche, ils inversent les lettres orientées à droite vers la gauche, c'est-à-dire dans la direction de leur écriture (non usuelle). Dans nos recherches, nous avons repris la procédure de Cornell consistant à diviser une feuille par un trait vertical et à indiquer à l'enfant, par un point, le point de départ de l'écriture de son prénom. Le point de départ pouvait être à gauche ou à droite du trait vertical (les points sont visibles sur les figures 39, 40 et 43). Cornell s'était en effet aperçu que, lorsque le point est à gauche, les enfants jeunes se mettent assez facilement à écrire (complètement) en miroir afin de ne pas traverser le trait vertical. Nous avons ainsi pu obtenir plus d'un millier d'écritures de prénoms en miroir. Nous les qualifions parfois de spontanées par opposition aux procédures où l'on demande explicitement aux enfants d'écrire en miroir, « à l'envers ». Même si nous parlons parfois de condition contrainte, nous n'avons jamais obligé les enfants à écrire en miroir, à l'envers, et avons accepté des écritures qui franchissent la ligne verticale, comme celle d'ELIES (voir Fig. 39). Mais nous avons évidemment conscience que ces écritures en miroir ont été induites par notre procédure et que certains enfants « devinaient » notre désir d'obtenir de telles écritures « à l'envers ». Une fillette de 5 ans a ainsi pu me dire : « Ah ! Tu veux qu'on écrit à l'envers. Autrefois je savais ! ».

La figure 39 illustre d'abord un éventail de possibilités. Les enfants ont pu écrire, toujours avec leur main droite dominante, en majuscules, de droite à gauche, en inversant : (1) toutes les lettres asymétriques, (2) une partie des lettres, ou (3) aucune lettre. Ils ont aussi pu écrire (4) normalement de gauche à droite. Enfin, nous avons aussi ajouté (5) une écriture de droite à gauche en lettres minuscules cursives attachées pour suggérer qu'avec ce type d'écriture les enfants sont quasiment obligés d'inverser systématiquement les lettres.

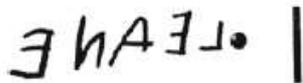
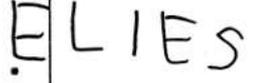
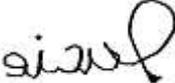
Enfant	Écriture point à gauche	Commentaire
(1) Leane, 6 ans 1 mois		Écriture de droite à gauche, avec toutes les lettres asymétriques, L, E (deux fois), et N inversées.
(2) Capucine, 5 ans 3 mois		Écriture de droite à gauche, avec toutes les lettres asymétriques inversées sauf E.
(3) Anissa, 5 ans 4 mois		Écriture de droite à gauche, sans aucune inversion des lettres asymétriques, N et S (deux fois).
(4) Elies, 7 ans 0 mois		Écriture de gauche à droite franchissant le trait vertical. À noter que l'élève, qui a 7 ans, était au CP.
(5) Lucie, 5 ans 9 mois		Écriture de droite à gauche, avec inversion de toutes les lettres. Avec les lettres minuscules cursives on peut voir que le 'l' est inversé.

Figure 39 : Différents types d'écriture dans la condition avec le point à gauche du trait vertical produits par les enfants avec leur main dominante.

Comme tous les enfants qui ont produit des écritures dans la condition « point à gauche », ont aussi écrit leur prénom dans la condition « point à droite » et ont été testés sur l'écriture des lettres majuscules isolées, sous dictée, nous avons pu calculer trois coefficients de corrélation différents (Fischer, 2017). Le premier, entre les lettres inversées lors des écritures dans les deux conditions (place du point de départ de l'écriture à gauche et à droite), est certainement le plus étonnant car la corrélation très forte est négative. Étonnant, car on aurait pu penser que si les enfants ont tendance à inverser les lettres ils les inversent indépendamment des conditions ; ou aussi que, si les enfants orientent les lettres vers la droite car ils se sont aperçus que la plupart des lettres sont orientées à droite (apprentissage statistique), ils les orientent toujours vers la droite. Tel n'est manifestement pas le cas. Au contraire, l'inversion des caractères dans leur prénom semble fondamentalement déterminée par la direction de l'écriture (voir Fig. 40). Quand ils écrivent vers la gauche, les nombreuses lettres majuscules orientées vers la droite sont le plus souvent tournées vers la gauche, alors que, lorsqu'ils écrivent vers la droite, elles se trouvent être correctement orientées ! Pour exemplifier cette corrélation négative, nous pouvons considérer la lettre E, très présente dans les prénoms des enfants. Dans l'écriture des prénoms vers la droite (en général dans la condition point à droite), moins de 1% des lettres E ont été inversées ; mais dans l'écriture des prénoms vers la gauche (en général dans la condition point à gauche), 84% des lettres E ont été inversées.

Point à gauche	Point à droite	Point à gauche	Point à droite
EMARITTE	MARIETTE	YNNY	IENNY
TUABIT	THIBAUT	2INER	INES
ENTVAI	VALENTINE	MEGRKEM	•GVRKEM
LOK	LOIC	IORIAN	DORIAN
EMAXNCE	MAXENCE	ALDIN	ALDIN
ROBIN	ROBIN	ASIA	LISA

Figure 40 : Un échantillon d'écritures (toujours produites avec la main dominante) de leur prénom par les enfants participant à la recherche de Fischer et Tazouti (2012, Expé. 2). Les prénoms sont écrits correctement à droite (condition normale) et complètement en miroir (condition contrainte à cause du trait vertical et du point de départ à gauche du trait vertical).

Les deux autres coefficients de corrélation calculés s'accordent parfaitement avec cette première observation. D'une part, la corrélation entre l'inversion des lettres isolées et celle de l'écriture « normale », vers la droite, est bien positive (et forte). D'autre part, la corrélation entre l'inversion des lettres isolées et celle de l'écriture vers la gauche, induite principalement par le point à gauche du trait vertical, est bien négative (et assez forte).

Ces résultats nous ont conduit à parler d'une règle d'orientation des caractères dans la direction de l'écriture, qui englobe ou implique une règle d'orientation vers la droite dans notre culture. Ils sont qualitativement et quantitativement impressionnants et ont été confirmés dans la thèse de Marine Portex, élaborée indépendamment (même si, ensuite, j'ai été membre du jury de thèse). Nous la décrivons plus amplement dans la section suivante.

6.5. Une confirmation de l'orientation dans la direction de l'écriture

Nous avons déjà fait référence à la recherche de Marine Portex (2017 ; Portex et al., 2018). Grâce à un apprentissage préalable, elle a permis de demander à des enfants très jeunes d'écrire de mémoire non seulement des caractères, mais aussi des mots entiers : BISE, NEZ, OURS, JOUE et ROSE.



Figure 41 : Les 7 cartes imagées qui ont servi de support visuel à l'histoire, support de l'apprentissage de l'écriture de mots entiers, dans Portex (2017, Fig. 23).

L'apprentissage de l'écriture s'est appuyé sur une histoire attractive : « Quand on lui donne 3 BISES sur le NEZ, petit OURS a 1 JOUE ROSE » qui a pu être imagée avec des cartes comme sur la figure 41. Ensuite, Marine Portex a repris les deux conditions d'écriture de

Cornell (1985), normale (à droite du trait vertical) et contrainte (à gauche du trait vertical). Portex et al. (2018), dans leur article tiré de la thèse, ont reproduit les productions d'un enfant, en mettant face à face les écritures dans les deux conditions (voir Fig. 42). Sur la figure, on peut observer que les écritures de mots à gauche du trait sont presque complètement en miroir : écriture (fort vraisemblablement) de la droite vers la gauche, et inversion de tous les caractères individuels, sauf J et Z. En revanche, les écritures de mots à droite sont presque complètement correctes : seules les lettres J et Z sont inversées. Ces dernières lettres sont assez remarquables : lorsque l'enfant écrit normalement, il inverse J et Z, mais lorsqu'il écrit en miroir il les écrit correctement ! Les chiffres 1 et 3 sont, de la même façon, remarquables : en miroir lorsque l'enfant semble écrire normalement et corrects lorsqu'il semble écrire en miroir.

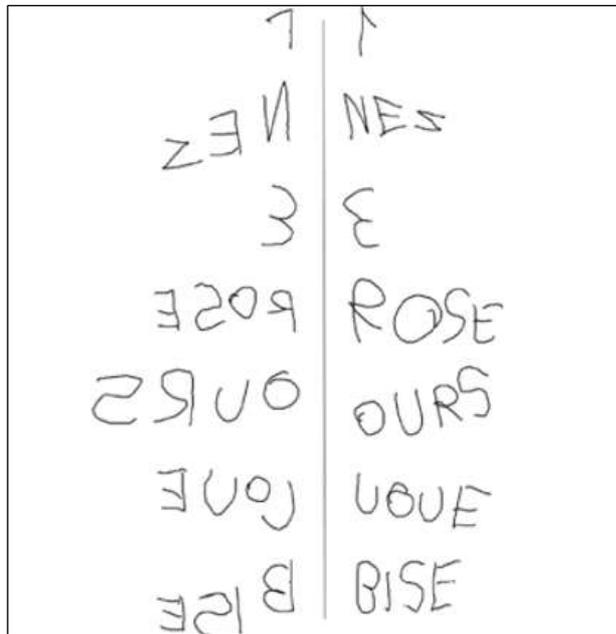


Figure 42 : Les productions d'un enfant dans les deux conditions, contrainte, à gauche, et normale, à droite. [Figure reproduite de Portex et al., 2018, Fig. 3].

Cette observation, en particulier l'écriture correcte, a priori curieuse mais tout à fait logique, de J et Z lorsque les enfants écrivent en miroir n'est pas anecdotique. Nous avons également relevé toutes sortes de tergiversations autour des lettres J et Z. La figure 43 montre ainsi que, lorsque les enfants écrivent correctement J dans la condition normale, ils peuvent l'inverser (Jeanne) ou l'écrire correctement dans la condition contrainte (Juliette). Mais ce qui est surtout intéressant, c'est de voir que ceux qui l'inversent dans la condition normale (Hadjer et Jarod), l'écrivent correctement dans la condition contrainte même si, comme Hadjer, ils inversent toutes les autres lettres inversables. La lettre Z était moins présente dans les prénoms des enfants, malgré la popularité du champion du monde de football Zinedine Zidane ! Mais l'un des rares enfants qui l'avait dans son prénom a bien inversé Z lors de l'écriture normale et l'a écrit correctement lorsqu'il a écrit son prénom en miroir !

Prénom et âge	Condition contrainte	Condition normale
Hadjer, 5 ans 10 mois	REJAH	HADJER
Juliette, 6 ans 2 mois	ETTEJUL	JULIETTE
Doraj, 5 ans 8 mois	DRAJ	DARO
Jeanne, 5 ans 2 mois	ENNAJ	JEANNE
Joana, 5 ans 2 mois	ANAJ	JOANA
Zacharia, 6 ans	AZAHZ	ZACHARIA

Figure 43 : Les tergiversations des enfants autour de l'écriture de J et Z dans leur prénom.

6.6. La montagne accouche d'une souris !

À ce stade nous avons recensé une littérature – plus d'une centaine d'articles cités, peut-être beaucoup d'omis ! – sur l'écriture en miroir des enfants à développement typique. Le constat clair qui en résulte est que les enfants inversent relativement souvent les caractères, mais pas du tout au hasard. Ils inversent préférentiellement les chiffres (1, 2, 3, 7, 9) et les lettres majuscules (J et Z) ou minuscules (j et z, notamment) orientés à gauche.

L'explication de ce constat peut paraître dérisoirement simple : les enfants inversent les caractères, parfois de groupes de caractères (des mots, des nombres), tout simplement parce qu'ils ne connaissent pas (encore) leur orientation et la font alors dans la direction de l'écriture de leur culture environnante ! Cela les conduit à inverser préférentiellement, dans notre culture, les lettres orientées à gauche. Nous proposerons une explication un peu plus profonde en conclusion, en faisant un lien avec le développement historique de l'écriture au cours de l'humanité, un lien que nous avons déjà partiellement tissé pour les lettres J et Z.

Cette simplicité rend l'incompréhension de certains auteurs – qui opposent les théories neurobiologique de généralisation en miroir et cognitive d'orientation dans la direction de l'écriture – difficile à comprendre. Répétons donc que les deux théories se complètent, la première étant un préalable de la seconde. Si l'orientation des caractères n'était pas effacée en mémoire du fait de la généralisation en miroir les enfants n'auraient pas besoin d'opérer un choix de cette orientation. Le choix, qu'ils font statistiquement dans la direction de l'écriture, et les inversions auxquelles il conduit par suite de l'orientation et de la dynamique de l'écriture des caractères, conforte donc, en retour, l'hypothèse de la généralisation en mémoire (sans laquelle ils n'auraient pas besoin de faire un choix !).

7. L'école peut-elle (ou doit-elle) éviter l'écriture en miroir ?

7.1. Des méthodes empiriques de remédiation

Le phénomène d'inversion, parce qu'il fait craindre une dyslexie aux parents et parce qu'à l'école les enfants sont censés apprendre à écrire correctement, a toujours été considéré comme gênant. En conséquence la littérature psycho-pédagogique regorge d'essais, relativement imprécis et mal contrôlés, tentant d'y remédier. La recherche de Vogel (1979) fait cependant exception. Dans cette recherche, 36 enfants d'école maternelle ont d'abord vu une série de 10 dessins au crayon d'objets. Comme ils ont ensuite montré une faible capacité à faire la distinction entre ces images et leurs images miroir gauche-droite, l'auteur a mis en œuvre une remédiation pouvant prendre l'une des trois formes suivantes : Les enfants ont pu être incités à (a) donner des descriptions verbales détaillées des images, ou (b) spécifier une différence entre ce qu'il voit et ce que voit l'expérimentateur, ou (c) les deux. Après chaque réponse verbale, les images ont été masquées et l'enfant répétait son constat verbal. Les 3 stratégies induites ont été aussi efficaces les unes que les autres. Mais, lors d'un posttest effectué environ une semaine plus tard, les enfants n'ont maintenu l'utilisation d'aucune de ces stratégies efficaces ! On voit donc que de telles stratégies verbales ne présentent qu'un intérêt réduit.

Une attention (comme l'appelle les auteurs) ou une attitude positive, bienveillante de l'enseignant suffit-elle ? Bien avant que les concepts de positivité et de bienveillance aient connu leur succès actuel, Hasazi et Hasazi (1972) rapportent le cas particulier d'un élève (8 ans) d'une école élémentaire (en Californie) qui, presque systématiquement, inversait l'ordre des chiffres quand il additionnait des nombres conduisant à une somme à deux chiffres. Par exemple, en réponse à la somme de $5+7$ il écrivait 21. Durant une période de base initiale, l'enseignante répondait à l'inversion des chiffres en soulignant l'incorrection et en fournissant à l'enfant une aide supplémentaire jusqu'à ce que toutes les sommes soient correctement exprimées. L'enseignante actuelle de l'élève, et celle de l'année scolaire antérieure, avaient toutes deux géré de cette façon le problème d'inversion de cet élève durant près d'une année avant que l'étude ne débute. Dans sa période expérimentale, toutes les sommes ont été marquées comme correctes, qu'elles soient inversées ou non. L'aide supplémentaire n'a pas été fournie en continu et les formes de réponses correctes, c'est-à-dire non inversées, ont été saluées par un sourire, une tape/caresse sur le dos, et un bref commentaire. Durant cette période le taux d'inversion a décliné fortement. Puis, durant une période consécutive, l'enseignante réagissait à nouveau aux inversions comme elle l'avait fait durant la période de base. Une augmentation des inversions vers le niveau de base s'est alors produite en l'espace de trois jours. Enfin, une période finale, répliquant la période expérimentale, s'en est suivie : elle a été caractérisée par une forte décline des taux d'inversion. On peut donc voir dans cette observation l'effet favorable d'une attitude positive, bienveillante de l'enseignante, toutefois sans aucun contrôle systématique ni tentative de démonstration statistique.

Wagner (1981) fournit des exemples – et suggère des explications et remédiations – de cinq types d'erreurs mathématiques dues à des difficultés perceptives ou cognitives. L'un des types d'erreur est précisément l'écriture en miroir. Parmi les erreurs de ce type qu'il a pu observer, au cours de son travail avec des élèves présentant des déficiences en arithmétique (dyscalculie), il décrit le cas d'une soustraction posée ($44-23$) qui a conduit à deux sortes d'erreur. Un élève a répondu 12 : Wagner présume que l'élève a fait correctement la soustraction

dans sa tête mais a inversé les chiffres du nombre 21 en l'écrivant. Un autre a écrit **21**, inversant ainsi chacun des chiffres 2 et 1 individuellement. Observons que 1, avec un petit trait oblique en haut vers la gauche est distinguable de son miroir, bien que l'auteur soit professeur associé à Valdosta (Géorgie) aux USA où l'on écrit souvent le 1 sans ce petit trait oblique. À propos du second exemple, mais le commentaire semble davantage adapté au premier, l'auteur reprend l'exemple de quelqu'un qui écrirait (ou lirait) *was* pour *saw*, en soulignant que ce problème d'orientation visuo-spatial réfère spécifiquement à la discrimination gauche-droite. À titre de remédiation il propose une approche tactilo-kinesthésique (par ex., écrire dans le sable ou le sel), l'utilisation d'indices colorés (qui ne me semble pertinente que pour l'écriture inversée des nombres, comme 12 à la place de 21) et, plus original, l'écriture de nombres dans le dos, avec le pouce ou le côté effaceur d'un crayon. À propos de cette dernière écriture, l'élève doit dire en premier le nombre écrit dans son dos, ensuite l'écrire sur une feuille de papier posée en face de lui. C'est là une activité qui ressemble à un jeu de devinette que les enfants devraient apprécier, mais, pour cause de possibles dérapages (dans le bas du dos par exemple !), elle ne peut pas (ou plus) être pratiquée sans précautions.

À propos de cette écriture, par un autre, dans le dos, je voudrais réitérer ma remarque de la section 1.5, selon laquelle l'écriture, par soi-même, sur le front ou sous la table, n'est nullement une écriture en miroir. En revanche, lorsque quelqu'un d'autre écrit une lettre ambiguë (comme 'b', 'd', 'p', 'q') sur votre front, vous pouvez adopter une perspective interne, comme si vous regardiez vers l'extérieur à partir d'un point imaginaire dans le milieu du corps (l' 'égocentre'), ou une perspective externe, comme si vous vous trouviez à l'extérieur de vous-même. Spence et al. (2010), par référence à un vieux cours de psychologie, indiquent même que 75% des gens adoptent la première perspective, alors que seulement 25% adoptent la seconde. Notons que c'est seulement la perspective interne qui mène aux inversions en miroir et que pour des lettres dessinées (ou présentées) sur le ventre une confusion similaire se produit en adoptant cette perspective. En contraste, la majorité des gens tend à rapporter correctement les lettres (ou autres symboles) qui sont dessinées sur l'arrière de leur tête ou dans leur dos.

7.2. L'école maternelle est-elle dangereuse ?

J'ai longtemps cru que l'école maternelle, notamment par les travaux en atelier où un groupe d'enfants est rassemblé autour d'une table, les uns assis en face des autres, pouvait favoriser le développement de l'écriture en miroir. En effet, supposons qu'un enfant sache écrire le mot **BEC** et que la maîtresse encourage les autres enfants à regarder comment leur camarade a écrit ce nouveau mot : ceux en face du scripteur performant verront **CEB** et, peut-être, l'écriront et retiendront que le [be] que l'on entend au début de [bɛk] s'écrit **B** ou **EB**. Pour les chiffres, il en va de même, voire pire : si l'on suppose à nouveau qu'un scripteur performant sait déjà écrire 36 et que les camarades assis en face regardent son écriture, ils verront **93** ! Mais le lecteur peut facilement voir que je n'ai pas choisi mes exemples au hasard. Les lettres du mot **BEC** et le chiffre 3 ont tous un axe de symétrie horizontal, et ce sont les seuls, avec D et K. Quant à 6 tous les enseignants savent bien qu'il faut souligner le 6 pour le différencier du 9 dans les jeux avec des chiffres amovibles et donc retournables. L'argument théorique qui s'oppose à ma croyance est que le point de vue du lecteur assis en face du scripteur n'inverse pas (gauche-droite) en général les caractères mais leur fait subir une rotation de 180°. Et, surtout, l'argument empirique qui a définitivement annihilée cette croyance est que les enfants n'inversent quasiment pas les lettres B, C, D, E et K (voir Fig. 35).

Comme je viens de le suggérer à propos du chiffre 6, cette question des enfants qui verraient les caractères d'un point de vue ou sous un angle inapproprié se pose aussi pour les caractères amovibles en carton, bois, plastic, etc. de Scrabble, ou Mathable, son équivalent dans le domaine des nombres. Bien que les enfants de 4 à 7 ans ne jouent pas encore typiquement à ces jeux, ils peuvent voir leurs aînés y jouer et, surtout, utilisent souvent de tels caractères amovibles dans nombre d'autres jeux. Or lorsqu'on tire un caractère (caché par retournement ou à l'aveugle) dans de tels jeux, on a une probabilité non nulle de le tirer tourné de 180° par rapport à une position standard (1 chance sur 4 approximativement), comme celle des caractères sur le clavier d'ordinateur devant moi. Comme visualisé sur la figure 44, certains de ces caractères apparaissent alors en miroir par rapport aux caractères véridiques. Bien que le Scrabble, pratiqué par des amateurs, ait pu faire l'objet de nombreux débats sur l'acceptation de certains mots, abréviations, conjugaisons, etc. il est remarquable qu'il n'y a jamais eu le moindre doute sur le fait qu'un tirage comme celui de la figure 44a2 soit un C. La figure 44 illustre qu'un C ou un 3, même s'il se présente tourné de 180°, est un C ou un 3. Il se pose donc clairement un problème sémantique : un C ou un 3 en miroir est-il bien un C ou un 3 ? Lévy (1935) a probablement eu tort de s'étonner (en tout cas pour E et 3, moins pour 4 : voir Section 3.3) que des élèves, même en 2^{ème} année d'école, identifient sans broncher un caractère, fut-il présenté en miroir. Pour un joueur de Scrabble ou de Mathable aussi, un C ou un 3 tiré en miroir est bien un C ou un 3, sans bronchement non plus ! Pour ces jeux, aujourd'hui souvent informatisés (sur tablette notamment), le problème du tirage physique ne se pose plus. Mais le problème du point de vue inapproprié se pose toujours, de manière analogue, pour un observateur qui est en face du joueur.

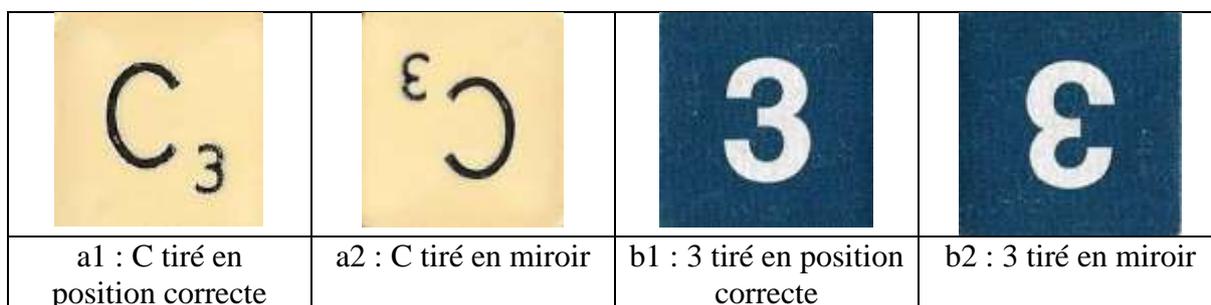


Figure 44 : Tirage initial de caractères (cachés par retournement ou en aveugle) de la lettre C d'un jeu de Scrabble et du chiffre 3 d'un jeu de Mathable, en position correcte ou tournée de 180°. À noter : (a) la valeur 3 indiquée pour la lettre C apparaît aussi en miroir, mais en haut ! (b) le miroir de 3 n'est pas parfait car la boucle inférieure du 3 véridique est légèrement plus ample.

7.3. La comparaison de trois types d'école

Mather (2012) a étudié l'écriture en miroir, avec une technique analogue à celle de Cornell (1985), en 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} année d'école, dans trois types d'école : publique, Montessori et Waldorf, au Canada. Les écoles Montessori sont souvent caractérisées par un apprentissage multi-modalités. Les écoles Waldorf, aussi connues sous le nom de Steiner, sont fondées sur les conceptions éducatives de Rudolf Steiner (1861-1925), philosophe et occultiste autrichien. Suivant une présentation publicitaire, les enfants des écoles Waldorf-Steiner y apprennent avec le cœur, la tête et les mains. Pour comprendre les résultats, il me faut d'abord succinctement présenter non pas la théorie de Mather, quelque peu compliquée, mais au moins la notion d'inversion inversée. Pour ce faire, on peut revenir à la figure 16c qui présente quelques

exemples d'inversions inversées de l'élève Tenneson. Ce dernier a aussi écrit correctement son prénom dans l'hémi-espace droit, mais en miroir dans l'hémi-espace gauche (sauf S). Cela est le pattern normal d'inversion des prénoms dans une culture où l'on écrit de la gauche vers la droite. En revanche, dans la suite dictée b, 3, z, 5, d, 7, s, 2, p, c, il a inversé les caractères 3, z, 7, 2 dans l'hémi-espace droit et les a écrits correctement dans l'hémi-espace gauche. C'est un pattern d'écriture que nous avons déjà rencontré avec certaines tergiversations des enfants avec les lettres J et Z dans leur prénom (voir Fig. 43) ou avec les écritures de 1, 3, J et Z reproduites dans la figure 42. Nous les avons simplement appelées pour ce qu'elles sont, à savoir des écritures correctes. L'appellation d'inversions inversées de Mather présume que les enfants ont une représentation inversée de ces caractères et l'inversent encore une fois. Notre théorie est plus parcimonieuse : nous supposons simplement que les enfants ne connaissent pas l'orientation des caractères et la mettent alors dans la direction de l'écriture. Cela dit, l'appellation « inversions inversées » souligne bien le caractère spectaculaire de ces écritures, incorrectes en écriture normale et correctes en écriture miroir !

Cette notion d'inversion inversée étant précisée, je peux maintenant présenter le tableau 5 comparatif des trois types d'école et des trois niveaux scolaires. D'abord, on peut noter que les inversions simples sont plus fréquentes dans l'hémi-espace gauche que dans l'hémi-champ droit. Comme les caractères à écrire semblent équilibrés du point de vue de leur orientation – 3, z, d, 7, 2 font face à la gauche, alors que b, 5, s, p et c font plutôt face à la droite – ce résultat montre que les élèves sont loin d'avoir systématiquement inversé les caractères orientés à gauche dans l'hémi-espace droit et de même mutatis mutandis. L'âge ou le niveau scolaire des élèves a certainement contribué à cette observation : le tableau 5 le suggère puisque c'est au niveau 1 dans l'école publique que la différence entre hémi-espaces est la plus faible (0.80), et au niveau 3 à l'école Waldorf qu'elle est la plus forte (3.80). Ensuite, on peut vérifier que les inversions inversées sont systématiquement moins fréquentes que les inversions simples dans l'hémi-espace droit. Cette observation est simplement logique, vu la définition d'une inversion inversée, à savoir un caractère inversé dans l'hémi-espace droit mais correct dans l'hémi-espace gauche. Mais peut-on en déduire que les élèves, au moment où ils produisent une inversion inversée, inversent un caractère déjà inversé ? Par ailleurs, les inversions inversées ne diffèrent guère entre les différentes écoles : simplement, sans grande surprise, elles diminuent avec le niveau scolaire.

Pour les inversions simples, une analyse de variance mixte 2 (hémi-espaces) x 3 (niveaux scolaire) x 3 (types d'école), outre confirmer l'effet principal de l'hémi-espace déjà discuté, conduit aussi à un effet principal du type d'école. Malheureusement, cet effet est difficile à interpréter. Par exemple, il apparaît une moindre fréquence des inversions simples dans l'hémi-espace gauche chez les élèves de l'école publique que dans les écoles Montessori (en 1^{ère} et 2^{ème} année) et, surtout, Waldorf. Mather se contente d'observer qu'« il n'y a pas de raison évidente » à cette moindre fréquence des erreurs en miroir dans l'école publique. Toutefois, pour l'école Waldorf, il suggère que le plus grand nombre d'écritures miroir peut être dû à la politique de cette école consistant à retarder l'enseignement de l'écriture, car il a été constaté que le déclin de l'écriture miroir des enfants est moins lié à l'âge qu'à la pratique de l'écriture. Mais le contraire ne pourrait-il pas être avancé pour l'école Montessori ? En effet, le matériel de lettres rugueuses, en trois formats (minuscules et majuscules d'imprimerie, cursives françaises), qui est une des caractéristiques de la méthode Montessori, est précisément destiné à imprégner la forme des lettres chez l'enfant, et ce dès 4 ans (dans la publicité commerciale il

est vrai) ! Il faut remarquer aussi qu'une seule école de chaque type était incluse dans la recherche de Mather : une généralisation est donc impossible.

Tableau 5 : Nombre moyen M (sur 10) et écart-type ET des inversions simples et inversées en fonction de la classe, de l'école et de l'hémi-espace (tableau original construit à partir des tableaux 2 et 3 de Mather, 2012, p. 175).

Niveau	École	n	<u>Inversion simple</u>				<u>Inversion inversée</u>	
			<u>hémi-espace gauche</u>		<u>hémi-espace droit</u>		M	ET
			M	ET	M	ET		
1	Publique	20	3.25	1.52	2.45	1.67	1.65	1.42
	Montessori	17	4.88	1.97	1.82	1.29	1.29	1.45
	Waldorf	15	5.07	2.05	1.87	1.60	1.48	1.42
2	Publique	20	3.40	2.26	0.95	1.19	0.40	0.68
	Montessori	15	4.20	2.62	1.60	1.72	0.53	1.06
	Waldorf	20	4.65	2.56	1.05	1.64	0.55	0.95
3	Publique	20	2.15	2.41	0.35	0.93	0.00	0.00
	Montessori	12	1.75	1.91	0.75	0.87	0.58	0.79
	Waldorf	20	4.50	2.78	0.70	1.03	0.55	0.76

7.4. Une recherche prometteuse (d'après les auteurs !)

Récemment, une recherche expérimentale a été mise en œuvre sur des enfants brésiliens de Natal (Torres et al., 2021). Le nom de cette grande ville, du Nord-Est du Brésil, est tiré du latin Natale car elle a été fondée le 25 décembre 1599, le jour de la nativité de Jésus. En utilisant un design scolaire écologiquement valide, Torres et al. ont montré que l'enseignement multi-modalités de la suppression de l'invariance en miroir pour les lettres représente une avancée majeure pour l'acquisition de la fluidité de la lecture en première année d'école. Le résumé des auteurs, que je viens déjà de citer et que je reprends en grande partie dans les lignes ci-après, est euphorique. L'approche causale, dans une combinaison synergique avec le sommeil post-apprentissage pour augmenter la consolidation de ce dernier, a révélé une amélioration sans précédent de la fluidité de la lecture, qui est devenue deux fois plus rapide. Ce gain a été obtenu avec seulement 7.5 heures d'entraînement multi-sensoriel et moteur pour distinguer les lettres en miroir, comme « b » par rapport à « d ». L'ampleur, l'automatisme et la durée de cet apprentissage de la discrimination en miroir ont été grandement améliorées par le sommeil, et les gains parfaitement maintenus même après 4 mois. Les résultats ont été systématiquement reproduits dans trois essais contrôlés randomisés. Ils révèlent non seulement un cas extrême de plasticité cognitive chez l'homme (c'est-à-dire l'inhibition en seulement 3 semaines d'un mécanisme visuel vieux de 25 millions d'années), qui permet l'adaptation à une activité culturelle (la lecture), mais ils montrent aussi en même temps un moyen simple et rentable de libérer le potentiel de fluidité de lecture de millions d'enfants dans le monde.

Une telle prometteuse recherche va-t-elle conduire à des applications dans les écoles ? Il est fort probable que non. L'une des raisons est la complexité pratique de sa mise en œuvre dans les classes, notamment parce qu'elle nécessite une sieste après l'apprentissage. Une autre conséquence de cette complexité est que la recherche est difficilement reproductible, d'autant que les conditions de test étaient très particulières : les participants devaient écrire les lettres

L'école peut-elle éviter l'écriture en miroir ?

minuscules individuelles, immédiatement après une présentation pendant 3 s, avec les yeux bandés. Pourtant, il serait nécessaire de la reproduire car l'analyse des écritures, que les auteurs ont mis en ligne, montre une observation curieuse que je n'arrive pas, après 20 ans de recherches sur l'écriture en miroir des enfants, à expliquer clairement : les enfants inversaient en miroir quasiment systématiquement les lettres b et d, b en d et vice-versa, alors que, même au hasard, on aurait pu espérer au moins une moitié d'écritures bien orientées. Nous avons tenté d'accommoder un modèle susceptible de rendre compte d'une telle observation. Mais le résultat n'est pas vraiment convaincant (voir Fischer & Luxembourger, 2021).

La recherche de Torres et al. demanderait d'autant plus d'être répliquée qu'elle comporte quelques autres imperfections. Par exemple, les icônes-images utilisées pour la discrimination en miroir présentent, pour une moitié, une symétrie axiale (voire 2), bien qu'elles soient qualifiées d'asymétriques (voir Fig. 45). Les enfants devaient juger si deux images en miroir horizontal de l'une de ces figures sont les mêmes ou différentes. Bien des personnes adultes seraient embarrassées pour répondre à l'item-test présenté au bas de la figure 45.

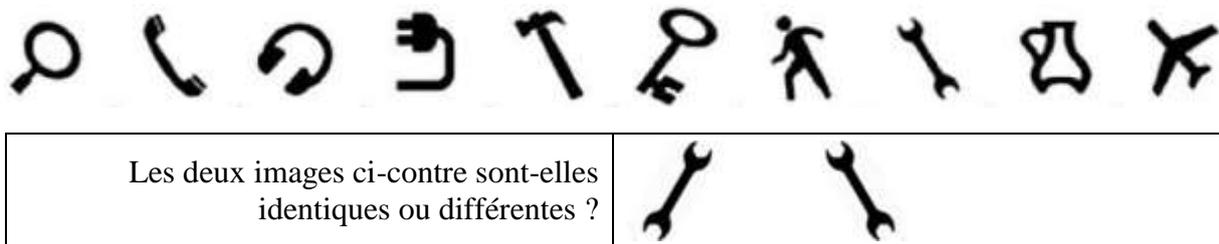


Figure 45 : Les 10 icônes-images utilisées pour la discrimination en miroir par Torres et al. (2021, p. e3) et, en dessous, un exemple d'item de test.

Enfin, s'ils sont fiables, les résultats sur la relation entre l'inversion dans la tâche d'écriture et la discrimination des images en miroir des lettres et des icônes dans la tâche visuelle sont également étonnants. En effet, alors que le nombre d'icônes correctement discriminées de leur miroir prédit significativement le pourcentage d'inversions des lettres (un résultat en accord avec une observation de Göbel et al., 2019), le nombre de lettres visuellement discriminées de leur miroir ne le prédit pas (Fischer & Luxembourger, 2021) ! Une bonne discrimination visuelle des lettres en miroir ne réduit donc pas significativement l'inversion en miroir dans l'écriture. Un tel résultat, étonnant, peut cependant être rapproché de celui de la section 8.2 qui montrera que la reconnaissance des lettres b et d n'est pas liée à l'inversion des chiffres en écriture, dans le sens où les enfants qui confondent beaucoup b et d en lecture ne sont pas ceux qui écrivent fréquemment en miroir.

7.5. L'éducation nationale demande de tourner en sens horaire !

Le ministère de l'Éducation Nationale français, ayant probablement eu vent de la fréquence des inversions de caractères, a fait quelques recommandations dans une publication plus générale sur l'écriture en maternelle (Eduscol, 2015). Rédigée par un groupe d'experts anonymes, on y trouve un exemple d'inversion du R et du N dans l'écriture de **ROBINET** par un enfant dont l'âge n'est pas précisé. En revanche, l'autre exemple d'inversion des lettres du mot RENARD n'est pas correct, ou est incorrectement présenté, puisque les lettres E, N et D ne sont nullement inversées (la lettre R est écrite maladroitement).

Ensuite, à propos des chiffres, le document reproduit l'écriture d'un enfant, dans l'ordre 1, ..., 9, qui a inversé le 2, le 3 et le 5. Se basant sur cet exemple, les auteurs écrivent que ce

sont « principalement le 3, le 5 et parfois le 2 » (p. 15) qui sont inversés, et commentent : « L'observation montre que ces trois chiffres nécessitent un mouvement de rotation vers la droite, c'est-à-dire, l'inverse des lettres rondes, ce qui peut sans doute expliquer cette inversion. Ceci conforte l'idée qu'il est nécessaire d'exercer les élèves à tracer des ronds aussi bien vers la gauche (sens de rotation des lettres rondes) que vers la droite, mouvement nécessaire pour écrire le 2, 3, 5, mais aussi quelques lettres en capitales (B, D, P, R) » (p. 15).

Cette explication par le sens de rotation des lettres rondes est tout à fait pertinente pour les chiffres 2 et 3. La recommandation pédagogique qui en découle est d'autant plus pertinente qu'Anne-Marie Koch, dans un mémoire de maîtrise, a pu vérifier que la quasi-totalité des nombreux livres commerciaux proposés aux parents/enseignants pour l'apprentissage de l'écriture des enfants à partir de la MS, leur apprend à tracer des cercles dans le sens antihoraire (contraire à celui des aiguilles d'une montre ; voir Fig. 46). Ce tracé antihoraire des cercles peut d'ailleurs expliquer aussi la fréquence relativement faible des inversions de 6, et celles, très forte, de J et Z. Mais il explique mal le peu d'inversions de 5 (totalement en miroir : voir Fig. 11), B, D, P, R, et est plutôt contredit par les fréquentes inversions de 9. En outre, il est aussi beaucoup moins pertinent pour expliquer les inversions fréquentes de 1 et 7, et la quasi-absence d'inversions pour E, F, K, L, N. Même si la recommandation de l'Éducation Nationale d'exercer aussi les élèves à tracer des ronds vers la droite (dans le sens des aiguilles d'une montre) peut contribuer à réduire la fréquence d'inversions de certains caractères, notamment de 3, cela n'éliminera pas toutes les inversions, voire pourrait en favoriser d'autres (par exemple celles de 6 et C).

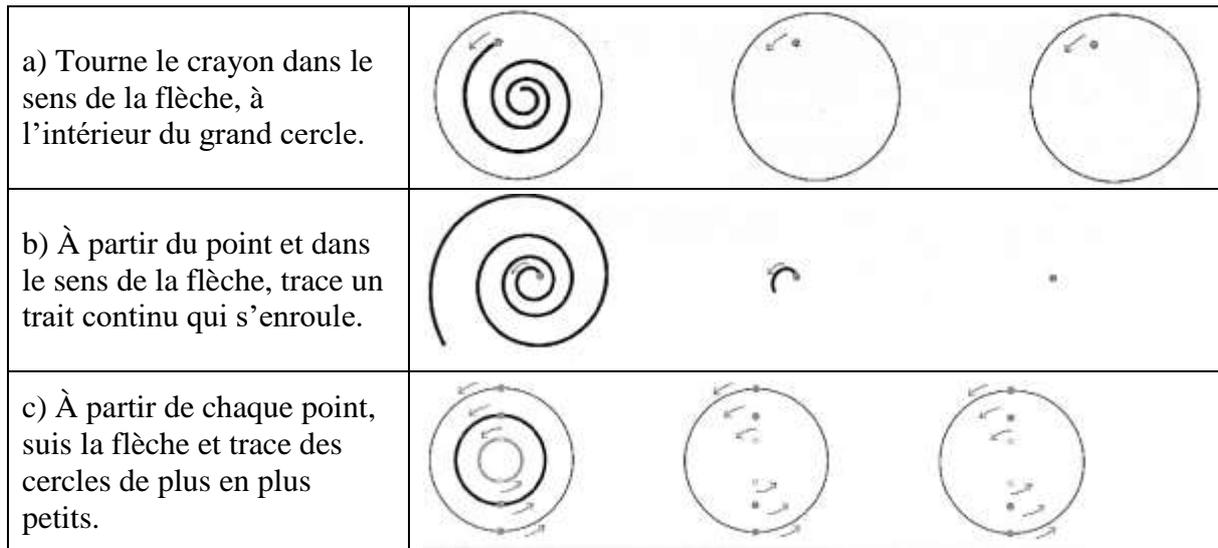


Figure 46 : Les exercices de tracé d'un cercle proposés dans un manuel pour les enfants de MS (4-5 ans) [adapté de Spitz, 2010, p. 15]. On notera que l'on induit systématiquement un tracé dans le sens antihoraire, aussi bien pour a) la spirale intérieure, b) la spirale extérieure, et c) les cercles concentriques. Je précise en outre qu'aucun exercice de tracé analogue n'est proposé dans le sens horaire.

Il a certes pu être observé que, dès l'âge de 5 ans, lorsque les enfants commencent à dessiner un cercle en haut, ils utilisent le plus souvent un mouvement de rotation dans le sens antihoraire. Cela est compatible avec des différences biomécaniques entre les mouvements d'extension et de flexion, parfois invoquées pour expliquer cette tendance chez les adultes. Mais Meulenbroek et al. (1993) ont établi que cela ne concerne encore que 75% des enfants à l'âge de 5 ans et que ce pourcentage ne fait que s'accroître avec l'âge pour atteindre 100% à 9 ans. On peut donc penser que, même si une « contrainte » biomécanique existe, la prédominance du sens de rotation antihoraire dans l'écriture cursive est un facteur essentiel de ce principe de tracé d'un simple cercle. D'autant que, pour anticiper l'apprentissage de l'écriture cursive, les enseignants et les manuels enseignent ce tracé en MS de maternelle, comme cela est illustré sur la figure 46. La suggestion de l'Education Nationale paraît donc utile, mais ne résoudra pas tous les problèmes d'inversion et en créera d'autres.

7.6. L'étude des apprentissages par l'adulte nous éclaire-t-elle ?

L'efficacité d'un apprentissage de l'écriture des caractères classiques ne peut plus être étudiée sur des personnes adultes tout-venant puisqu'ils les connaissent et fréquentent depuis longtemps. Mais, avec un matériel non classique, on peut procéder à un tel apprentissage. C'est ce qu'ont fait Longcamp et al. (2006) avec les caractères de la figure 47.



Figure 47 : Les deux ensembles de « caractères » appris par les 12 participants à l'étude de Longcamp et al. (2006).

Dans la condition « Frappe (au clavier) » les participants devaient trouver la touche, avec le caractère présenté sur le clavier, et l'enfoncer; dans la condition « Écriture (manuelle) », ils devaient l'écrire. L'évaluation comparative de l'efficacité de l'apprentissage a consisté en un test de reconnaissance (reconnaître si un caractère est correct ou en miroir) et en un test de discrimination (moins pertinent car il pouvait être réussi sans apprentissage). Ces tests ont été pratiqués à trois moments : immédiatement après l'apprentissage, 1 semaine et 3 semaines après. Les participants ont mieux reconnu les caractères dans la condition « Écriture » que dans la condition « Frappe », mais essentiellement dans le test de reconnaissance après 3 semaines. Les auteurs concluent que leurs résultats indiquent que les mouvements d'écriture produits pendant l'apprentissage ont affecté la capacité des participants à différencier ultérieurement les caractères de leurs images miroir.

Il s'agit là d'un résultat important, d'autant qu'un apprentissage scolaire intéressant est un apprentissage qui s'inscrit dans la durée, ce qui est le cas dans l'observation de Longcamp et al.. Mais le problème principal, au demeurant souligné par les auteurs, est celui de la durée supérieure de l'apprentissage par l'écriture. Les enseignants, durant de longues années, faisaient recopier un petit résumé à la fin de chaque leçon. Un enseignant expérimenté de CE2 de ma connaissance, qui avait suivi cette pratique, m'a confié que cela est totalement impossible aujourd'hui : certains élèves écrivent tellement lentement qu'ils ne termineraient jamais ! Et il ne peut plus obliger ces élèves de terminer la copie durant (et à la place de) la récréation, comme on faisait dans le temps ! En conséquence, il distribue des résumés photocopiés.

7.7. L'apprentissage de l'écriture (en général) réduit-il les inversions en miroir ?

On peut se demander si l'apprentissage de l'écriture, indépendamment du problème des inversions de caractères, ne réduit pas, en même temps, la fréquence de ces dernières. On sait en effet que l'apprentissage d'un script avec des graphiques en miroir est la force la plus puissante pour briser l'invariance en miroir (Fernandes et al., 2021). L'absence d'un tel apprentissage s'accompagne souvent d'une indistinction entre l'image d'une forme et son miroir, par exemple chez les participants monolingues en Tamil (une langue originaire du Sud de l'Inde) de Pederson (2003), chez les participants parlant le Mopan Maya (un langage parlé dans un groupe indigène de régions du Belize et du Guatemala) de Danziger (2011), ou encore chez les participants Mundurucu (un groupe indigène amazonien isolé) d'Izard et al. (2022). Une condition nécessaire est cependant que l'apprentissage soit efficace ! Le problème plus général du meilleur apprentissage de l'écriture ne peut être posé ici que succinctement car il est protéiforme.

Vinci-Booher et al. (2016) ont étudié la connectivité fonctionnelle avec des enfants de 4 à 6 ans après l'apprentissage des lettres capitales et des formes par l'écriture manuscrite, le traçage ou la dactylographie. Ils ont montré que les connexions fonctionnelles entre les régions

L'école peut-elle éviter l'écriture en miroir ?

visuelles et pariétales augmentaient après toutes les conditions d'entraînement. Plus précisément, l'analyse des interactions a révélé que pour les lettres entraînées (quel que soit l'entraînement), les connexions fonctionnelles entre le gyrus fusiforme gauche et l'IPS droit antérieur/lobe pariétal inférieur étaient plus fortes pendant leur perception que pour les lettres non entraînées. Bien que la composante motrice soit, en dactylographie, très différente des deux autres, on pourrait penser que c'est elle qui rend efficace les trois modalités d'apprentissage.

On pourrait penser notamment que cette expérience motrice apporte une information spécifique à l'apprentissage de l'écriture de lettres à la main, améliorant ainsi davantage la reconnaissance des lettres que l'expérience visuelle. Mais les recherches de Zemlock et al. (2018) ont, par la suite, montré que cet effet n'est pas spécifique à l'entraînement avec des lettres. Comme l'écriture digitale améliore également la reconnaissance des lettres, on voit que l'amélioration ne résulte pas d'une mémorisation d'un schéma moteur spécifique pour chaque lettre. Cela peut alors suggérer que l'écriture manuelle facilite des gains généraux de coordination visuo-motrice.

L'observation de Cohn et Stricker (1979) sur des élèves de 1^{ère} année d'école fournit, pour la lecture, un élément de réponse à la question soulevée dans cette section pour l'écriture. Dans cette recherche, les élèves, testés dans les deux premiers mois de l'année scolaire, devaient lire des lettres, notamment de l'ensemble {b, d, p, q}. Bien que les auteurs aient recours à une notion d'inversion plus générale que la présente nôtre (et en lecture), on peut observer dans leurs données que les erreurs d'inversion sont proportionnellement plus nombreuses dans le groupe des élèves les plus compétents en lecture. Par exemple, pour la lettre d, alors que les élèves du groupe « très compétent » ne font que des erreurs d'inversion (100%), ces dernières ne représentent que 58% des erreurs dans le groupe « faiblement compétent ». Les erreurs d'inversion semblent donc très « résistantes », du moins en lecture, et d'un niveau supérieur à celui d'autres erreurs de forme. Cette observation est en accord avec l'idée que les inversions, en écriture, ont une certaine valeur (voir Section 4.4).

8. Quelques conséquences étonnantes

8.1. Ecrire et reconnaître un chiffre inversé n'ont pas grand-chose en commun

Lorsque les enfants doivent reconnaître un chiffre correct en compétition avec son écriture inversée appliquent-ils la même règle de préférence du chiffre orienté dans la direction de l'écriture (i.e., la droite) ? Pour répondre à cette question, nous avons projeté trois séries de matrices 2x2 d'écritures de chiffres, comme la série de la figure 48, à des élèves de GS de maternelle. Les élèves devaient simplement montrer le chiffre correctement écrit. Dans la figure 48 le chiffre cible est précisé par écrit mais, avec les enfants, il était exclusivement énoncé oralement.

1	4	5	9	7	6	5	4	1	3	2	3				
4	1	9	2	6	7	4	2	3	1	3	5				
« quatre »		« deux »		« six »		« sept »		« neuf »		« cinq »		« un »		« trois »	

Figure 48 : Les élèves devaient indiquer, en le pointant avec un stylet, le chiffre demandé par l'expérimentateur (Fischer & Luxembourg, 2020).

Nous avons prévu que certains élèves vont être « embarrassés » pour faire un choix entre deux écritures si elles leur semblent toutes deux valables. En effet, chaque matrice contient non seulement l'écriture correcte du chiffre cible, mais aussi son miroir (diagonalement opposé dans la série de la figure 48), ainsi qu'un autre chiffre et son miroir. Cet embarras devait alors se traduire par des allers-retours du regard entre le chiffre cible et son miroir. Nous avons essayé de le vérifier avec un appareil de poursuite oculaire.

Le logiciel de traitement associé à l'appareil nous a permis de produire de nombreuses cartes de chaleur (par addition des données d'un groupe d'enfants) attestant que le regard se concentre bien sur ces deux chiffres. La figure 49 présente deux de ces cartes. Les couleurs chaudes jaune et orange montrent que le regard des enfants s'est effectivement surtout porté sur le chiffre cible et son miroir, 6 pour la carte de gauche et 3 pour celle de droite.



Figure 49 : Cartes chaudes (collectives) obtenues pour les troisième et huitième matrices de chiffres de la figure 48.

Il nous a également permis d'obtenir, au niveau individuel, le parcours détaillé des saccades de chaque enfant. La figure 50 reproduit un parcours individuel engendré par la dernière matrice de la figure 48. Dans ce type de visualisations, les fixations successives du regard de l'enfant sont numérotées de 1, en général presque au centre (ce qui permet de vérifier que l'enfant fixait bien le centre au début de la projection), jusqu'au maximum (ici 8), mais

sont parfois difficiles à lire à cause des superpositions des disques (dont la taille est modulée en fonction de la durée).

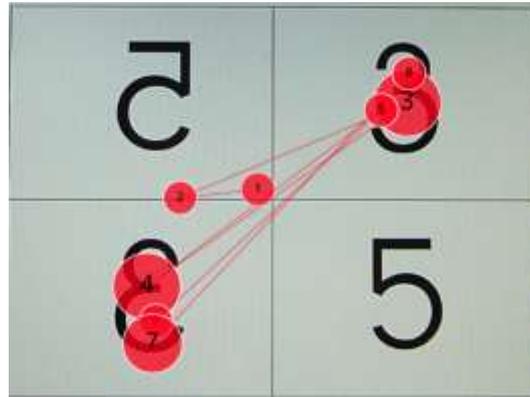


Figure 50 : Visualisations des fixations d'un participant pour la dernière matrice de chiffres de la figure 48.

Remarquons que ces images suggèrent aussi que les enfants ont quasiment ignoré le chiffre non-cible et son miroir. Cela s'est vérifié quantitativement avec des pourcentages de choix de ces deux écritures quasiment nuls, un résultat non surprenant puisque les enfants de cet âge reconnaissent facilement la forme (sans orientation) des chiffres (voir Section 4.4).

Mais le résultat quantitatif principal concernait le choix des participants lorsqu'ils ne reconnaissent pas le chiffre cible. Dans une tâche de reconnaissance, la composante morpho-cinétique de l'écriture des caractères a fondamentalement disparu. En conséquence, elle ne peut plus s'opposer à la composante topo-cinétique, opposition qui est à l'origine de l'écriture inversée des caractères, lorsque la morpho-cinétique ne coïncide pas avec la topo-cinétique. Notre réponse théorique est donc que la composante topo-cinétique, c'est-à-dire la direction générale de l'écriture/lecture dans notre culture, reste seule à dicter sa loi. Cela doit conduire les participants qui ne connaissent pas encore l'orientation des chiffres à choisir l'écriture dans la colonne de droite, qu'elle soit inversée, comme le 6 dans la matrice de gauche de la figure 49, ou correcte, comme le 3 dans la matrice de droite de la figure 49. C'est ce que nous avons observé : les participants ont choisi le chiffre (cible ou son miroir) de la colonne de droite dans près de 62% des possibilités (dans l'une des trois séries, le chiffre cible et son miroir était dans une même colonne, rendant un tel choix impossible). Ce pourcentage peut être comparé à 50%, le pourcentage vers lequel on devrait tendre si les participants ne distinguaient pas un chiffre-cible de son miroir avaient répondu au hasard le chiffre dans la colonne de gauche ou dans celle de droite. Ce pourcentage a aussi pu être augmenté par la position de l'expérimentateur, plutôt à droite des participants. En effet, Corballis et Beale (1976, 1993) ont souligné que cette position peut servir d'indice de la direction de telle sorte que l'enfant n'a pas besoin de recourir à un sens interne de cette dernière. Quoi qu'il en soit, une conséquence presque directe du choix des participants en fonction de la position spatiale est que ce choix ne résulte pas de l'orientation des chiffres. Nous avons quand même vérifié que les chiffres orientés à gauche (1, 2, 3, 7, 9) ne génèrent ni plus, ni moins de choix de leur miroir que les autres chiffres (4, 5, 6).

8.2. L'écriture en miroir n'a pas grand-chose à voir avec l'inversion en lecture

La lecture, notamment son dysfonctionnement majeur, la dyslexie, est certainement le sujet le plus traité dans littérature psycho-pédagogique. L'abondance des documents qu'un chercheur consciencieux devrait analyser et synthétiser est telle que j'ai longtemps hésité à m'aventurer

dans le domaine. Néanmoins, les évaluations nationales en CP (à la rentrée 2020) offraient un matériel qui se prête à l'étude de la relation entre l'inversion de l'écriture des chiffres et la lecture, la reconnaissance des lettres tout au moins.

Dans le cadre de ces évaluations, les élèves devaient répondre à des tests impliquant la reconnaissance de différentes écritures correctes de plusieurs lettres. Parmi celles-ci, nous nous intéressons plus particulièrement aux écritures de [be] et [de]. Ces deux lettres ont en effet donné lieu à une littérature abondante : il suffit de regarder les titres de Brault-Foisy et al. (2017), Davidson (1935), Smith et Lovitt (1973) ou Soares et al. (2019), qui ne sont que quelques-uns parmi d'autres articles traitant de l'inversion de b en d (et vice versa). Les différentes formes d'écriture proposées dans les évaluations sont : les minuscules imprimées (b, d), les cursives (*b*, *d*) et les majuscules (B, D). On a demandé aux élèves d'entourer les écritures de [be] dans l'échantillon d'écritures présenté dans la figure 51. Cela nous permet d'identifier les élèves qui ne font pas la différence entre b et d dans la ligne 1. Pour reconnaître b, ces élèves pouvaient fondamentalement faire deux types d'erreur : soit entourer le d uniquement, soit entourer le d et le b, sans entourer aucune autre écriture. Il en va de même pour la lettre d.



Figure 51 : L'échantillon de différentes écritures de lettres à partir duquel les élèves devaient reconnaître toutes les écritures de [be] ou [de] (les lignes sont indiquées dans notre texte mais ne l'étaient pas dans le cahier d'évaluation des élèves; ces derniers étaient encouragés à travailler ligne par ligne grâce à un exemple de pré-test utilisant une lettre non testée).

Dans un autre test, les enfants devaient écrire sous la dictée les dix chiffres arabes et le nombre 10, toujours dans le même ordre : 3, 5, 1, 4, 2, 6, 9, 0, 8, 10, 7. La figure 52 montre les écritures de deux enfants. L'idée que certains enfants auraient une propension à l'inversion conduit tout naturellement à l'hypothèse que les élèves qui inversent l'écriture des chiffres sont essentiellement les mêmes que ceux qui ne distinguent pas b de d, voir qui prennent b pour d et vice versa. Mais nous avons déjà suggéré qu'une telle idée est fautive (voir la section 2.6). Par ailleurs, comme l'inversion en écriture provient du fait que les élèves doivent donner une orientation, qu'ils ne connaissent pas encore, aux chiffres, on remarquera qu'ils n'ont pas à faire le même choix au cours d'une épreuve de reconnaissance des caractères puisqu'ils voient l'orientation. Notre interprétation de l'inversion des chiffres conduit donc à prédire qu'il n'y a pas de lien entre cette dernière et la confusion entre b et d. Autrement dit, l'inversion de l'écriture des chiffres et la confusion en lecture des lettres b et d seraient deux processus différents et quelque peu indépendants. Statistiquement, cela devrait se traduire par l'absence de corrélation du taux de confusion de b et d avec le taux d'inversion des chiffres.

8	5	3	2
1	4	1	4
5	6	2	6
e	0	e	0
8	10	8	01
f		7	
Garçon de 6 ans 5 mois	Fille de 6 ans 1 mois		

Figure 52 : Le subtest d'écriture de chiffres, complété par deux élèves en début de CP, lors des évaluations nationales.

Dans notre article de *Reading et Writing*, une revue qui s'imposait puisque nous traitons précisément du lien entre l'écriture et la lecture, nous avons défini de tels taux d'inversion (des chiffres) et de confusion des lettres (b/d). Cette définition est complexifiée si l'on veut y intégrer l'écriture de 10 car, comme le montre partiellement la figure 52, 10 peut conduire à des inversions partielles : le garçon a inversé le chiffre 1 dans son écriture, alors que la fille l'a écrit correctement mais a permuté les chiffres 1 et 0 ! Elle est complexifiée aussi par le fait que l'erreur d'un enfant qui prend b pour d (et vice versa) est différente de celle d'un enfant qui, simplement, ne différencie pas les deux écritures. Quelle que soit la manière de traiter les données, nous avons néanmoins abouti au constat que cette corrélation est négative, comme le montre la figure 53. Ce constat est surprenant relativement à notre hypothèse d'absence de corrélation. Mais, d'une part, la corrélation n'est pas très intense ($r_s = -0.37$), d'autre part, et surtout, elle montre à tout le moins que l'idée selon laquelle les élèves qui inversent les chiffres ont de bonnes chances d'être ceux qui confondent aussi deux lettres en miroir comme b et d est totalement fautive. Ce dernier point soulève alors la question de l'origine de cette confusion. Nous remarquerons simplement la similarité à la fois graphique de b et d (voir Section 4.10) et phonique de [be] et [de] (cf. Jee et al., 2022, qui incitent à rapprocher le graphisme et la prononciation), et renvoyons à la littérature abondante sur la dyslexie développementale (e.g., Lachmann, 2018, ou le livre dont est extrait cet article).

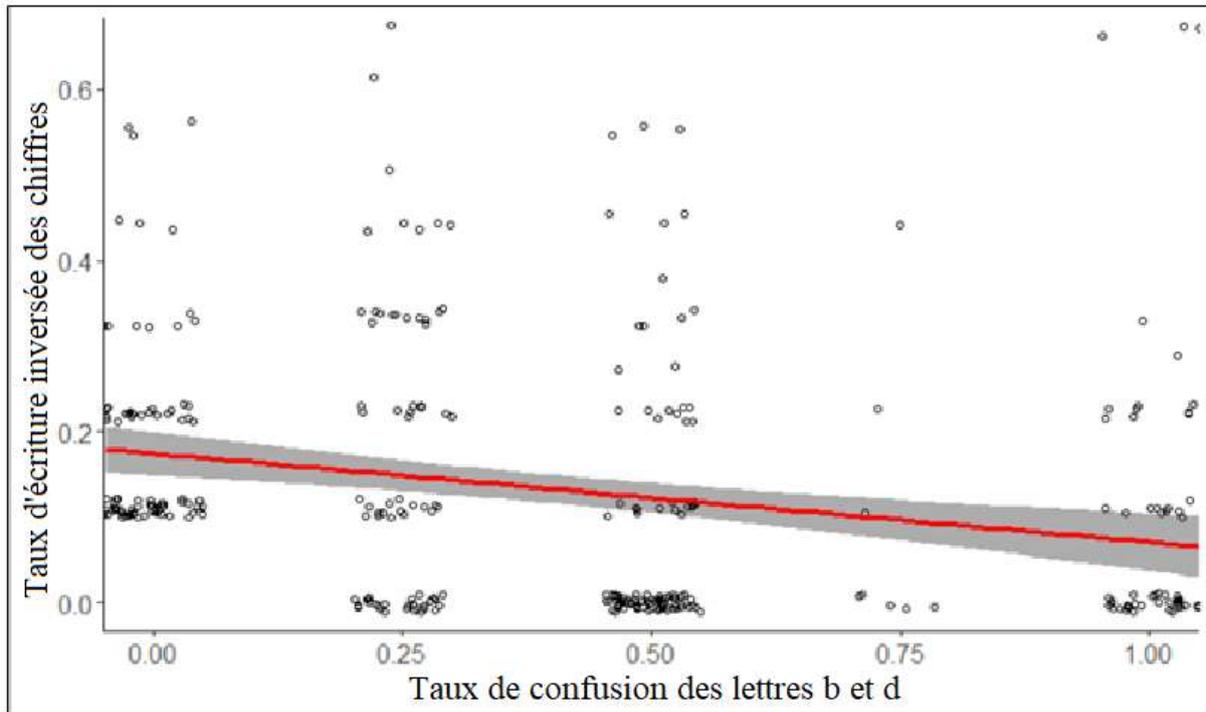


Figure 53 : Diagramme (de dispersion) du taux d'inversion en fonction du taux de confusion, avec la ligne de régression (en rouge) et l'intervalle de confiance à 95% (en gris) dans la recherche de Fischer et Luxembourgier (2022).

8.3. Les enfants à développement atypique ne font peut-être pas plus d'inversions

Dans la section 1.4 nous avons vu que Gordon, n'ayant guère observé d'inversions chez des élèves à développement typique, vraisemblablement trop âgés, s'est focalisé sur des enfants à développement atypique (déficience mentale). Cela peut suggérer que ces derniers font plus d'erreurs d'inversion. La recherche de Lyle (1969) fournit indirectement une première indication. Son analyse (factorielle) sur des garçons à retard en lecture (des 6 niveaux de l'école primaire, c'est-à-dire jusqu'à 12 ans 1/2) n'a pas confirmé que les inversions de lettres et de séquences (mots) constituent un seul et même syndrome. Plus généralement, elle « n'a apporté aucune lumière sur la nature exacte des tendances à l'inversion en lecture et écriture » (p. 842). De telles conclusions amènent à s'interroger sur cette nature, voire à se demander s'il s'agit bien d'inversions. Cette interrogation est d'autant plus nécessaire que l'une des questions qui m'a le plus fréquemment été posée au cours de mes exposés, ou par écrit, concerne les cas d'enfants qui continuent à inverser les caractères au-delà de 7-8 ans.

La section 8.2 précédente suggère cependant que l'inversion de caractères doit être distinguée de certaines confusions que l'on peut observer chez des enfants un peu plus âgés. Ces confusions concernent principalement le chiffre 6 confondu avec le chiffre 9, le chiffre 7 confondu avec la lettre majuscule F, et le chiffre 9 qui, en plus d'être confondu avec le chiffre 6, peut également être confondu avec P ou la lettre minuscule e. Cette dernière confusion est renforcée par la fréquence élevée de la lettre e, qui est la lettre la plus fréquente en français (Trost, n.d.) et certainement dans d'autres langues. L'explication de ces confusions en mémoire est presque évidente lorsqu'on se réfère au fonctionnement de la mémoire déclarative (Ullman et al., 1997).

Quelques conséquences étonnantes

La mémoire déclarative a en effet été décrite comme sensible aux interférences, ou aux confusions associatives comme nous préférons les appeler en référence à Winkelman et Schmidt (1974). Son principal support cérébral est le lobe temporal médian, en particulier l'hippocampe (Cohen et al., 1999 ; Eichenbaum, 1997 ; Menon & Chang, 2021 ; Squire, 1994). On pense que l'une de ses fonctions essentielles est la consolidation des connaissances déclaratives (Squire et al., 1984). Une connaissance typiquement déclarative telle que les faits multiplicatifs (Fischer, 1992), est donc grandement sensible aux interférences (De Visscher & Noël, 2014 ; De Visscher et al., 2018). En effet, un fait de multiplication peut interférer ou être confondu avec un autre pour la simple raison que les deux produits impliquent exactement les mêmes chiffres. Par exemple, Dotan (2022) souligne que la similarité entre les faits de multiplication – comme $8 \times 8 = 64$ et $8 \times 6 = 48$, deux faits qui impliquent exactement les mêmes chiffres – les rend difficiles à mémoriser. Ainsi, nous voyons qu'une ressemblance purement « physique », sans base sémantique, ou alors pré-sémantique comme Moscovitch (1995) appelle les sorties superficielles du lobe temporal médian, peut conduire à des confusions associatives. De la même manière, la mémoire déclarative doit stocker la forme de l'écriture des chiffres. Elle contient donc des représentations d'une portion de cercle et d'un arc de cercle plus grand, aussi bien pour 6 que pour 9 et e ; elle contient également des représentations de 7 et de son miroir horizontal presque parfait (lorsque 7 s'écrit avec un deuxième petit trait horizontal), la lettre majuscule F. Par conséquent, elle peut entraîner des confusions associatives entre les écritures de 6, 9 et e, d'une part, et de 7 et F, d'autre part.

Cette distinction entre inversion et confusion conduit à l'hypothèse que les enfants à développement atypique, qui ont été retardés dans leur scolarité et sont donc plus âgés, devraient produire des inversions, qui ne sont pas des alignements avec la direction de l'écriture, mais qui relèvent de ces confusions associatives. À ce jour, et à notre connaissance, aucune recherche n'a cependant finement étudié ce phénomène d'inversion ou, selon nous, de confusion associative chez les enfants ayant un retard de développement. Nous avons donc demandé, en situation scolaire, d'écrire quatre séries de 10 chiffres (voir Fig. 54), d'une part à des élèves présentant une déficience intellectuelle, attestée par un QI inférieur à 70, et d'autre part à des élèves dont le handicap cognitif est plutôt d'origine comportementale (agressivité, déstructuration, hallucinations, ...), nécessitant une scolarisation dans un établissement spécialisé. Seulement 13 des 46 élèves concernés, âgés entre 7 et 15 ans, ont produit au moins une inversion. La figure 54 reproduit les écritures d'un des élèves handicapé mental.

Chapitre 8

8059721364	8	0	7	9	5	2	1	3	6	4
3294160785	3	2	9	4	1	6	0	7	8	5
1935704682	1	9	3	7	5	0	4	6	8	2
0126374895	0	1	2	6	3	7	4	8	9	5

Figure 54 : Les écrits d'un élève handicapé mental avec sa main droite habituelle; dans la colonne de gauche on précise la série des chiffres dictés.

Dans leur ensemble, les élèves ont fait plus d' « inversions » pour les chiffres particulièrement sujet à confusion du sous-ensemble $C_p = \{6, 7, 9\}$ comparativement aux autres chiffres. En outre, et en partie en conséquence, nous n'avons pas vraiment retrouvé la différence d'inversion entre les chiffres de $C_g = \{1, 2, 3, 7, 9\}$ et de $C_d = \{4, 5, 6\}$.

L'un des enseignants impliqués dans la recherche nous a fourni une production de l'écriture des nombres dans un exercice scolaire d'un de ces élèves. Dans cet exercice, l'élève, devait compléter des lignes partiellement remplies (les chiffres imprimés en caractères noirs dans la figure 55) d'une partie de tableau. Cette dernière était tirée d'un grand tableau de 10 x 10 montrant les nombres de 1 à 100 dans leur ordre naturel, c'est-à-dire que la première ligne contient les nombres de 1 à 10, et la dernière ligne les nombres de 91 à 100. Nous reproduisons le travail de l'élève dans la figure 55, sachant que les corrections (en rouge, dans la dernière colonne du tableau c) ont été surajoutées par l'enseignant.

Quelques conséquences étonnantes

3 4 5 6 7	3 4 5 6 F	3 4 5 6 F
13 14 15 16 17	13 14 15 16 1F	13 14 15 16 1F
23 24 25 26 27	23 24 25 26 2F	23 24 25 26 2F
33 34 35 36 37	33 34 35 36 37	33 34 35 36 3F
43 44 45 46 47	43 44 45 46 47	43 44 45 46 4F
53 54 55 56 57	53 54 55 56 57	53 54 55 56 6F
a) 7 est toujours écrit correctement	b) 7 est inversé avant l'occurrence de 37, mais écrit correctement après	c) 7 est toujours inversé (corrigé par l'enseignant)

Figure 55 : L'inversion non systématique de 7 dans une activité scolaire par l'élève dont les écritures au test sont reproduites dans la figure 54.

Sur la figure 55 on peut observer que l'élève, en voyant les écritures imprimées de 5 et 7 (dans la première ligne de la partie a), ne semble ni inverser le 7 (comme dans les 4 lignes de la figure 54), ni utiliser son écriture idiosyncrasique du chiffre 5, à savoir 'C'. Dans les trois premières lignes de la figure 55b, cependant, il répète l'inversion du 7 qui était systématique dans la figure 54. Mais, remarquablement, lorsqu'il tombe sur la première écriture imprimée de 7 (dans 37, ligne 4 de la figure 55b), il commence à écrire correctement le chiffre 7 dans les deux lignes suivantes. Enfin, dans le tableau de la figure 55c, dans lequel il n'y a pas de chiffre 7 imprimé, il se remet à inverser systématiquement le chiffre 7. Même si nous parlons ici d'inversion, par commodité, il est important de répéter que notre interprétation théorique est celle d'une confusion entre 7 et la lettre majuscule F.

Cette analyse suggère une remédiation ou, plus généralement, une stratégie pédagogique. En effet, tant que l'élève voit l'écriture correcte, il écrit les chiffres correctement (ici les chiffres 5 et 7). En revanche, lorsqu'il les écrit de mémoire, il est obligé de recourir à sa représentation idiosyncrasique ou erronée et, par conséquent, reproduit cette idiosyncrasie ou cette erreur et la renforce dans sa mémoire déclarative. Pour éviter un tel renforcement des représentations erronées, il semble important de ne pas forcer les élèves à écrire les chiffres de mémoire trop tôt, mais de les obliger à regarder l'écriture d'un chiffre avant de l'écrire – ou du moins à la vérifier après coup –, sur une ligne de chiffres bien visible, par exemple sur le bureau de l'élève.

Nous concluons que ces élèves n'inversent pas réellement les nombres, mais les confondent plutôt dans leur mémoire déclarative. Cette observation prolonge et renforce la suggestion de Fischer et Luxembourgger (2022) selon laquelle l'inversion et la confusion sont deux concepts fondamentalement différents. Même pour les enfants à développement typique qui « inversent » encore certains caractères, les enseignants doivent savoir qu'il ne s'agit peut-être pas d'une persévérance de la tendance à inverser les chiffres pour les aligner dans le sens de l'écriture, qui est omniprésente chez les enfants d'âge préscolaire, mais probablement d'une

confusion associative découlant de la similitude physique de ces chiffres avec des écritures existantes déjà bien consolidées dans leur mémoire déclarative (comme F ou e).

Nous avons aussi étudié les écritures des chiffres par quelques enfants à déficit auditif. Mais lorsqu'on teste des enfants déficients auditifs, le recours à la langue française des signes (LFS), au Langage Parlé Complété (LPC), voire à la Lecture Labiale (LB), pour dicter les chiffres, perturbe certainement le recours aux informations visuelles internes. En conséquence, il est difficile de commenter leurs écritures de manière générale. À un niveau individuel, une des enfants, implantée, et dont le déficit auditif n'était pas trop profond, a produit les écritures de la figure 56. Dans le type de dictée qui se rapproche le plus de la dictée normale avec les élèves à audition normale – la lecture labiale (LB) – il est alors intéressant d'observer qu'elle a inversé tous les chiffres du sous-ensemble $C_g = \{1, 2, 3, 7, 9\}$ et aucun du sous-ensemble $C_d = \{4, 5, 6\}$.

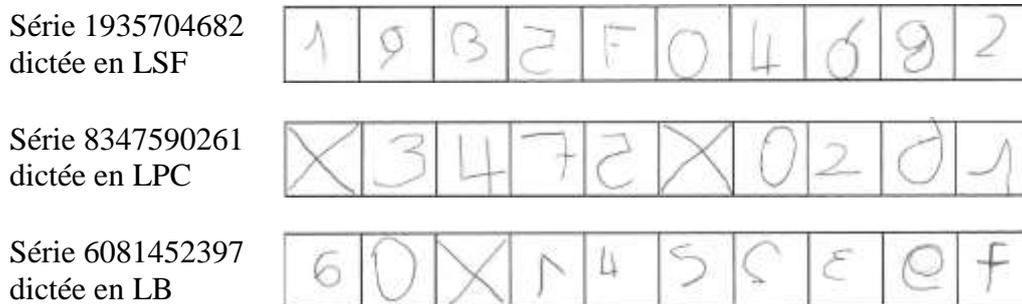


Figure 56 : Trois (des 12) séries écrites par une élève de 5 ans 8 mois en situation de handicap auditif (implantée), avec sa main droite (habituelle) sous dictée dans les trois langages testés.

8.4. Une indication auditive active une représentation visuelle

Dans la quasi-totalité des dictées de caractères, nous (et d'autres) avons indiqué oralement les caractères à écrire. Comme nous soutenons le primat de la modalité visuelle (Section 4.5), il convient de préciser comment la représentation écrite visuelle des caractères peut être activée par une indication orale, auditive. En fait, lorsque des participants adultes se voient présenter les noms auditifs d'objets, plutôt qu'une entrée visuelle, ils activent néanmoins des représentations visuelles d'objets (Peelen et al., 2014). Comment est-ce possible ?

Plusieurs recherches de neuroscience fournissent des éléments de réponse. Ludersdorfer et al. (2016) ont observé une activation du cortex ventral occipito-temporal (vOT: *ventral occipitotemporal cortex*) gauche en réponse à des mots entendus. Cette activation pourrait refléter l'accès à des représentations visuelles-orthographiques de mots entiers. De plus, l'activation dans le vOT postérieur peut refléter la génération d'images explicites de séquences de lettres spécifiques à des mots. En outre, sur la base du phénomène de suppression inter-modalités, la découverte d'une désactivation marquée en réponse à des tonalités auditives soutient également l'idée que les représentations orthographiques des mots dans le vOT gauche sont de nature visuelle.

Taylor et al. (2014) ont enseigné à 19 adultes à lire 24 mots nouveaux écrits dans des lettres inconnues et à nommer 24 objets nouveaux. Avec un scanner IRM, ils observent que les cortex pariétaux traitent de manière préférentielle les mises en correspondance visuelles-

verbales composantes, un processus crucial pour le développement précoce de la lecture. Taylor et al. (2019) ont découvert un gradient hiérarchique, de postérieur à antérieur, dans le cortex vOT, dans lequel les représentations des lettres sont transformées pour transmettre des informations sur le langage parlé.

Kok et Turk-Browne (2018) ont observé que les prédictions descendantes découlent souvent d'associations intermodales, comme lorsqu'un son (par exemple, une sonnette ou un aboiement) conduit à une attente de l'apparence visuelle de l'objet correspondant (par exemple, un vélo ou un chien). Ils ont découvert qu'en entendant un indice auditif familier, l'hippocampe représente les informations visuelles qui avaient précédemment coïncidé avec l'indice, même lorsque cette attente diffère de ce qui est actuellement visible. Compte tenu des propriétés générales de l'hippocampe, et de l'importance de la connaissance orale des caractères, on peut alors penser que c'est ainsi que se met en place la liaison entre le nom oral et l'écriture des caractères. Au-delà de cet apprentissage initial, la participation de l'hippocampe n'est probablement plus nécessaire. C'est une des grandes leçons que nous a apprises H.M., un célèbre patient qui a subi une résection bilatérale de l'hippocampe et qui a ensuite été testé, même au-delà du raisonnable selon Hilts (1995).

8.5. L'écriture manuelle n'est peut-être pas d'une grande efficacité

Je prends d'emblée le soin de dire que je ne discute pas ici le problème contemporain et beaucoup plus général du maintien d'un apprentissage de l'écriture manuelle dans les écoles. Mon propos est simplement de discuter une conséquence implicite et potentielle de ma théorie sur la seule inversion des caractères. En effet, la théorie n'est logiquement cohérente et pratiquement pertinente que si les premiers apprentissages de l'écriture des lettres, avec ses vicissitudes, sont d'origine visuelle. Je soutiens qu'ils le sont. Même si la forme d'un objet n'est pas une propriété strictement visuelle de l'objet, comme l'est la couleur, la connaissance de la forme de l'objet est généralement acquise par la modalité visuelle (Peelen et al., 2014]. Les enseignants et les élèves utilisent d'ailleurs un objet visuel pour désigner l'écriture des lettres capitales : ils disent « écriture en bâtons », toutes les lettres non courbes apparaissant comme un assemblage de bâtons (A, E, F, H, I, K, L, M, N, T, V, W, X, Y et Z). Mais des pédagogues peuvent justement penser que l'écriture manuelle va aider les enfants à retenir la bonne orientation. Comme nous l'avons vu, Dehaene (2007) n'écarte pas l'idée que l'apprentissage moteur puisse contribuer à désapprendre la symétrisation. Mais l'apprentissage de l'écriture est lente (Chartrel & Vinter, 2004) et, plus précisément, la constitution de représentations motrices ne peut être considérée mise en place que vers l'âge de 10 ans (Zesiger et al., 2000).

Askov et Greff (1975) ont comparé directement la copie au traçage sur des élèves de maternelle et de 2^{ème} année d'école. Le traçage consiste à passer avec le crayon par-dessus l'écriture, d'abord nette puis de moins en moins encrée. Il s'est avéré que la copie est la plus efficace. Ceci ne prouve pas que l'entraînement moteur est inefficace mais montre que l'apprentissage moteur – qui est également présent dans la copie et dans le traçage – n'est certainement pas l'explication majeure de l'efficacité.

Pour la catégorisation visuelle des lettres, Li et James (2016) ont directement démontré sur des enfants de cinq ans que la condition d'apprentissage, que ce soit par une pratique visuo-motrice (copier des symboles dactylographiés de manière autonome, tracer des symboles dactylographiés, tracer des symboles manuscrits) ou par une pratique visuo-auditive (voir et dire des symboles dactylographiés d'une seule police de caractères, de polices de caractères

variables et d'exemples manuscrits) n'est pas déterminante. Ce qui est décisif, c'est que l'apprentissage implique (ou non) des exemples variables d'une catégorie, indépendamment de la production visuo-motrice. La raison pour laquelle l'écriture manuscrite favorise la reconnaissance des lettres est qu'elle produit des symboles perceptifs (visuels essentiellement) variables dans l'environnement qui servent à améliorer la compréhension des catégories. L'acte moteur sollicité pour écrire la lettre, qui est toujours fondamentalement le même, ne possède pas la même propriété. En outre, de manière générale, les performances motrices ne font pas bon ménage avec les performances intellectuelles. Sur la base de l'étude des connexions spécifiques entre les fonctions motrices et intellectuelles, Jenni et al. (2013) suggèrent même que les domaines moteurs et intellectuels chez les enfants sains sont largement indépendants.

Les pédagogues peuvent recourir à d'autres modalités sensorielles que la modalité visuelle pour l'apprentissage de l'écriture. Même s'il peut sembler logiquement évident qu'un apprentissage multi-modalités doit être plus efficace qu'un apprentissage uni-modalité, ce n'est pas toujours le cas (voir Madan & Singhal, 2021 ; Pecher & Zeelenberg, 2022). La grande pédagogue Maria Montessori utilisait des caractères rugueux que les enfants exploraient tactilement (cf. Calo, 1956). D'autres pédagogues, moins connus mais mentionnés dans la section 7.1, écrivaient les caractères dans le dos des enfants. Spence et al. (2010) observent d'ailleurs que le dos offre clairement de grandes opportunités pour la présentation tactile de l'information car près de 50% de la surface de peau se trouve sur le tronc du corps. Personnellement, ayant automatisé l'écriture de la lettre grecque « epsilon » (ϵ) au cours de mes études de mathématiques, je continue à ne pas comprendre comment une mémoire motrice pourrait m'indiquer la bonne orientation de 3.

Néanmoins, il faut discuter ici au moins une recherche qui a, expérimentalement, confirmé l'efficacité de l'apprentissage manuel, étant entendu que l'apprentissage multi-modalités de Torres et al. (voir Section 7.4) n'a pas vraiment été efficace par lui seul mais par l'adjonction d'une période de consolidation (sieste) juste après les apprentissages. Cette recherche française a été publiée originellement dans un journal de langue anglaise (Longcamp et al., 2005), mais est résumée en français dans l'article de Velay et Longcamp (2005). On y compare un apprentissage d'écriture manuelle des lettres avec un apprentissage par frappe au clavier. Cette recherche est d'autant plus importante à examiner qu'elle est souvent invoquée par les défenseurs, nostalgiques ou non, de l'écriture manuelle pour soutenir qu'elle a toujours son utilité. La recherche a impliqué 76 enfants, de 33 mois à 57 mois, qui avaient appris 12 lettres majuscules pendant trois semaines et ont ensuite été testés deux fois, immédiatement après l'apprentissage et une semaine après, avec un test QCM où il fallait choisir la lettre (correcte) apprise parmi quatre, dont l'une était le miroir de la lettre correcte. Comme les enfants avaient de bonnes chances de choisir la lettre correcte au hasard et que chacune des lettres a été testée deux fois, les auteurs n'ont attribué une identification correcte d'une lettre à un enfant que s'il a choisi deux fois, correctement, cette lettre. Les scores varient donc entre 0 et 12. Les résultats plaident-ils de manière convaincante en faveur de l'apprentissage de l'écriture manuelle ?

Remarquons d'abord qu'un effet plancher affecte ces résultats puisque la majorité des enfants ne dépasse pas le score de 2 (sur 12). Ensuite, la différence entre l'apprentissage par frappe au clavier et celui par écriture manuelle (en faveur de ce dernier) n'est pas significative

au seuil conventionnel. En revanche, l'interaction Age x Mode d'apprentissage l'est¹⁷ : pour les enfants les plus âgés la différence est significative en faveur de l'écriture manuelle. Mais on peut s'interroger s'ils n'ont pas, durant les trois semaines d'apprentissage, pu bénéficier d'un renforcement « à domicile ». Les auteurs avaient certes demandé aux parents de ne pas pratiquer l'écriture à domicile pendant la durée de l'expérience, mais certains enfants de 4 ans, fiers de leur nouvel apprentissage, n'ont-ils pas voulu le montrer à leur entourage ? Je pense notamment qu'aucun grand-parent – fut-il au courant des consignes des expérimentateurs – ne dira à son petit-enfant qu'il lui interdit de montrer comment il sait écrire. Et, on aura certainement anticipé ma remarque, les enfants qui avaient tapé les lettres au clavier, à l'école (en 2005, ou avant, peu d'enfants de 4 ans devaient disposer d'un clavier dans leur foyer), n'avaient, quant à eux, guère d'occasions de réactiver leur apprentissage en cours. Je suis donc plutôt réservé quant à l'efficacité de l'écriture manuelle pour surmonter l'inversion en écriture, d'autant plus que ce n'est pas l'écriture manuelle (apprise) qui est testée mais la reconnaissance, une tâche fondamentalement différente relativement à l'inversion des caractères (Fischer & Luxembourg, 2020).

Plusieurs recherches confirment le bien-fondé de ces réserves. Kiefer et al. (2015) écrivaient ainsi que, contrairement à leurs attentes et aux résultats précédents (notamment de Longcamp et al.), « l'entraînement à l'écriture manuscrite n'a pas amélioré les performances de reconnaissance et de désignation des lettres par rapport à l'entraînement à la dactylographie » (p. 144). Duiser et al. (2022) ont étudié 81 enfants néerlandais de l'école primaire (de 4 à 6 ans) assignés à l'un de trois groupes: écriture manuelle, dactylographie tactile et contrôle (enseignement classique de l'alphabet). Bien qu'ils se soient assurés que le nombre de répétitions des lettres dans tous les groupes était supérieur à celui de Longcamp et al. (2005), ils concluent « ne pas avoir constaté que les enfants apprennent à mieux reconnaître et distinguer les lettres isolées après un enseignement de d'écriture manuelle qu'après un enseignement par dactylographie tactile, et pas non plus par rapport à un enseignement classique de l'alphabet » (p. 701).

Seyll et Content (2022) ont poussé l'investigation un peu plus avant en cherchant à déterminer ce qui est important pour la reconnaissance des caractères. Or c'est en se basant sur la preuve que l'apprentissage de nouveaux caractères par l'écriture manuscrite conduit à une meilleure reconnaissance que l'apprentissage par la dactylographie, que Longcamp et collaborateurs ont proposé que les plans moteurs graphiques acquis par l'écriture manuscrite contribuent à la reconnaissance des caractères. La recherche expérimentale de Seyll et Content étudie donc aussi la contribution de l'analyse visuelle détaillée à la reconnaissance des caractères chez les enfants d'école maternelle. À cette fin, trois groupes d'enfants d'âge préscolaire ont appris de nouveaux symboles soit par l'écriture manuelle, soit par la dactylographie, soit par la composition, une méthode nécessitant une analyse visuelle détaillée mais aucune activité grapho-motrice spécifique. Après l'apprentissage, les enfants ont effectué une tâche de reconnaissance à quatre alternatives. Le même schéma de résultats, que celui que ces auteurs avaient déjà observé chez les adultes (Seyll et al., 2020), est apparu, notamment l'absence de preuve de l'influence des connaissances motrices. Ils confirment donc l'importance de l'analyse visuelle détaillée dans l'apprentissage de formes ressemblant à des lettres.

¹⁷ Les auteurs indiquent $p < .02$ pour $F(1,70) = 4.50$. Mais Excel indique $p = .037$.

8.6. La première écriture d'un enfant peut être une écriture en miroir

Dès lors que j'ai été convaincu que l'écriture en miroir était un phénomène de mémoire, et non de perception, mes observations se sont focalisées sur des enfants d'au moins 5 ans. Pour des enfants plus jeunes, l'écriture de mémoire est en effet encore trop aléatoire, tout au moins si l'on essaie de tester des échantillons d'enfants représentatifs et non sélectionnés. Une autre raison pour laquelle il est difficile d'observer des écritures en miroir chez des enfants très jeunes, de 3 ou 4 ans, est que les parents, enseignants ou chercheurs, leur proposent souvent des modèles à copier et, nous l'avons vu, cette écriture par copie ne génère guère d'inversions en miroir. Dans l'écriture du prénom, nous en avons néanmoins obtenues quelques-unes, fussent-elles imparfaites (celle d'AYSEL), avec notre technique de partage de la feuille, dans l'étude longitudinale d'Anne-Marie Koch (voir Fig. 57).

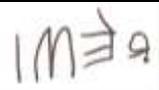
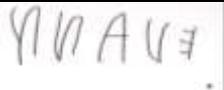
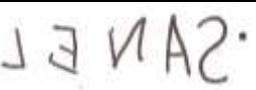
REMI : 4 ans 4 mois	EVANN : 4 ans 5 mois	SANEL : 4 ans 6 mois	AYSEL : 4 ans 10 mois
			

Figure 57 : Écritures en miroir par quelques enfants de moins de 5 ans (extraites de Koch & Fischer, 2013).

Dans cette étude longitudinale, sur des enfants de milieu socio-économique en moyenne plutôt défavorisé, la présence d'écritures en miroir à 4 ans et l'absence d'évolution dans la fréquence des écritures en miroir (du prénom) entre la MS et la GS peuvent être vues comme étayant un développement en parallèle des écritures en miroir et correcte. Ce résultat suggère en effet que les écritures en miroir n'émergent pas « tardivement », lorsque les enfants ont atteint un certain niveau d'écriture.

Ce n'est cependant que récemment qu'un collaborateur, Christophe Luxembourger, m'a offert un cadeau que je n'espérais plus. ROSE, une enfant de son environnement familial, a en effet écrit en miroir son prénom, spontanément, à l'âge de 3 ans 1 mois (à l'école : sa maîtresse de PS encourageait les enfants qui en étaient capables à signer leur dessin). Cette signature est une écriture en miroir complète, c'est-à-dire de droite à gauche et avec inversion de toutes les lettres potentiellement inversables (voir Fig. 58). Elle mérite une analyse plus approfondie. D'abord, le R peut sembler imparfaitement en miroir. Mais on peut penser que le trait vertical est en fait le trait secondaire, en diagonale, à droite, du R correct : en miroir, il est donc du côté gauche de celui qui sert d'appui à la boucle du R. Le O lui-même, non inversable, semble tracé dans le sens horaire. Puis le S est parfaitement inversé. Enfin, le E est détaché, mais bien sur la gauche des autres lettres, en respectant la structuration en miroir : La hasta est bien à droite, et la coda comporte bien les trois traits parallèles, même s'ils sont imparfaitement connectés à la hasta.



Figure 58 : L'écriture en miroir complète de ROSE, par Rose, signant son dessin à 3 ans 1 mois.

9. Conclusion

Notre explication théorique de l'écriture en miroir, insérée dans un cadre historique, semble simple. Les enfants vers 4-5 ans traversent une période pendant laquelle ils ne connaissent pas l'orientation des caractères, par suite du processus de symétrisation en mémoire et, alors, les orientent simplement dans la direction de l'écriture de leur culture. Elle n'est guère concurrencée que par la théorie de Corballis qui décrit une représentation double (véridique et en miroir) des caractères et des mots dans le cerveau de personnes adultes. Cette représentation double peut suggérer que les enfants, pour écrire un caractère ou un mot, activent davantage la représentation en miroir que la représentation véridique. Cela arriverait de temps à autre et pour une raison que l'on ne connaît pas précisément. Nos travaux ne permettent pas une discussion générale de cette représentation. Ils permettent seulement de rejeter l'hypothèse qu'elle serait à l'origine des écritures en miroir par les enfants à développement typique, entre 4 et 7 ans.

Dans une perspective de comparaison plus générale, nous pouvons observer que les théories sont parfois comparées en fonction de deux propriétés : leur parcimonie par rapport aux hypothèses qu'elles font, ou sont forcées de faire, et leur capacité à expliquer les observations empiriques (Brainerd & Reyna, 2015 ; voir aussi Fig. 59). Mais une telle approche de la comparaison des théories reste tout à fait théorique ! Notamment, toute tentative de comparaison de deux ou plusieurs théories se heurte au problème de leur beauté, un trait fondamentalement subjectif.

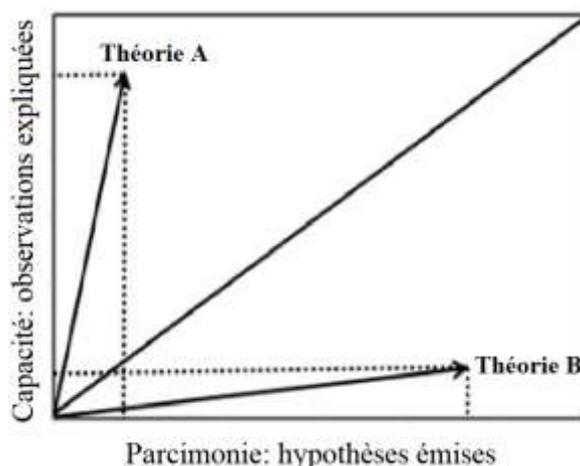


Figure 59 : Espace vectoriel représentant l'échange entre le pouvoir explicatif d'une théorie et ses hypothèses fondatrices. Dans cet espace, les théories sont des vecteurs : celles situées au-dessus de la diagonale représentent de meilleures théories que celles situées en dessous, car elles expliquent plus d'observations avec moins d'hypothèses (adaptée de Brainerd & Reyna, 2015, Fig. 1).

Relativement à cette question de la beauté, je voudrais d'abord souligner que notre description de la gestion cérébrale de la prise en compte de l'orientation est elle-même étonnamment jolie : les enfants perçoivent correctement l'orientation des caractères (chiffres et lettres) mais le processus de symétrisation (aussi appelé généralisation) la fait disparaître en mémoire ; grâce au secours de la voie cérébrale dorsale, elle est ensuite restaurée. Mais je veux surtout terminer ce texte en revenant presque au début, à la section 2.1. J'y avais en effet constaté

Conclusion

que les lettres, initialement orientées à gauche, n'étaient orientées à droite (notamment par leur appendice à côté de la hasta) qu'il y a 500 ans avant J.-C., lorsque l'écriture de gauche à droite s'est imposée dans notre culture. Nos lointains ancêtres ont alors fait coïncider l'orientation des lettres avec la direction de l'écriture. Dans mon approche théorique, l'écriture en miroir des enfants, qui a longtemps paru mystérieuse, suit donc le principe biologique de Haeckel (1907) selon lequel « l'ontogénèse est la récapitulation courte et rapide de la phylogénèse » (p. 310). Dans leur développement, quand ils ont le choix de l'orientation des caractères – involontairement à cause du processus de symétrisation –, ils choisissent comme leurs ancêtres d'orienter les caractères dans la direction de l'écriture. De la sorte, ils mettent l'orientation morpho-cinétique du tracé des caractères en conformité avec la topo-cinétique de leur écriture (voir Fig. 60). Notons que, à la fois les choix de nos ancêtres et celui des enfants contemporains, semblent satisfaire au principe économique de Brekle (voir Section 2.4), voire sont motivés par lui.

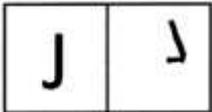
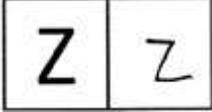
Age Tâche	≈ 4 ans ½ en MS copie d'après modèle	≈ 5 ans ½ en GS écriture de mémoire, sous dictée	≈ 6 ans ½ en CP
Fille: Main droite préférée			
Garçon: Main droite préférée			

Figure 60 : L'inversion, dans la direction de l'écriture, des lettres J et Z vers 5 ans ½, lors du passage développemental de la copie correcte à 4 ans ½ à la gestion de la symétrisation en mémoire à 6 ans ½ (données de Fischer & Koch, 2016b).

Toutefois, de par notre procédure expérimentale, un autre choix s'offrait, aux enfants. Ils pouvaient – et certains l'ont fait, mais ils sont minoritaires – lors de l'écriture de droite à gauche, ne pas inverser les lettres de leur prénom. Cela donne une écriture qui, bien que n'étant pas complètement une écriture en miroir, est tout à fait conforme aux consigne et contrainte (voir l'écriture d'ANISSA : Fig. 39). Mais, répétant encore une fois, 2500 ans après, le comportement de nos ancêtres, ils ont en général choisi d'orienter les caractères dans la direction (inhabituelle en l'occurrence) de l'écriture, inversant ainsi les lettres inversables, sauf J et Z le cas échéant (voir Fig. 43).

Certes, les « vieilles » réflexions de Haeckel, rassemblées dans son livre au titre attracteur – *Les merveilles de la vie* – et leur application aux enfants humains peuvent être scientifiquement critiquées. Mais lorsqu'on regarde un modèle de perception des lettres récent, comme celui de Testolin et al. (2017), qui suggère qu'en réutilisant des primitives visuelles naturelles, l'apprentissage des symboles écrits ne nécessite qu'un réglage limité et spécifique au domaine, on retombe sur une conclusion analogue. En effet, un tel modèle, qui suppose que la forme des caractères écrits a été culturellement sélectionnée pour correspondre à la structure statistique des environnements naturels, suggère que les enfants du 21^{ème} siècle trouvent « naturel » ce que nos ancêtres trouvaient « naturel » il y a près de 5 siècles avant J.-C.. En l'occurrence, orienter les lettres dans la direction de l'écriture.

Plus généralement, le concept de connaissance perpétuelle, récemment proposé par Geoffrey Schott (2022), peut être invoqué pour interpréter notre observation d'une répétition par les enfants contemporains de l'idée – faire correspondre l'orientation des caractères avec la direction de l'écriture – déjà appliquée par nos ancêtres il y a près de 2500 ans. Schott propose notamment l'exemple de la représentation circulaire du benzène par Friedrich August Kekulé, au 19^e siècle, sous la forme d'un serpent avec la queue dans la bouche (voir Fig. 61). À propos de cette idée de Kékulé il remarque qu'elle est déjà apparue environ 1 500 ans plus tôt en Mésopotamie et a également été reprise au 17^e siècle.

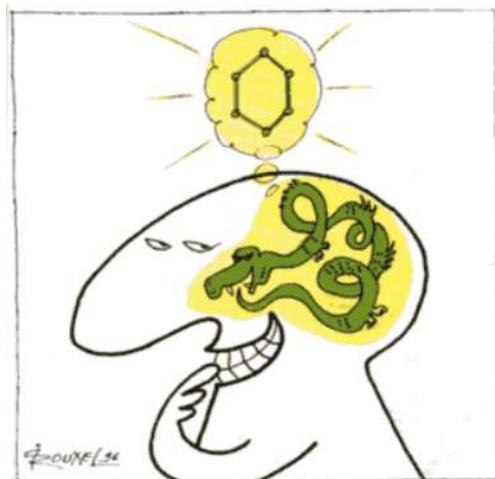


Figure 61 : Le serpent de Kékulé

(<http://sommeil.univ-lyon1.fr/articles/savenir/genie/serpent.php>).

Pourquoi une idée contemporaine, comme celle que nous pensons avoir trouvée dans notre explication de l'inversion des caractères par les enfants à développement typique de 4 à 7 ans, ressemble-t-elle autant à une idée originellement apparue il y a 2500 ans ? Schott tente une réponse : cela pourrait refléter le fait que le cerveau humain possède un répertoire créatif limité. Mais on peut lui préférer une réponse plus spécifique comme le principe d'économie dans l'écriture de Brekle. D'autant que Jerome Bruner (1966) a distingué l'idée d'économiser sa peine dans l'exécution d'une tâche comme l'un des trois savoir-faire fondamentaux qui gouvernent la spontanéité de l'enfant (les deux autres sont : diriger son attention, signifier son intention).

Références

- Ahr E., Houdé O. & Borst G., 2016. Inhibition of the mirror generalization process in reading in school-aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 145, 157-165. DOI: 10.1016/j.jecp.2015.12.009
- Ahr E., Houdé O. & Borst G., 2017. Predominance of lateral over vertical mirror errors in reading: A case for neuronal recycling and inhibition. *Brain and Cognition*, 116, 1-8. DOI: 10.1016/j.bandc.2017.03.005
- Ajuriaguerra J. de, Diatkine R. & Gobineau H. de, 1956. L'écriture en miroir. *La semaine des hôpitaux de Paris*, 32(1), 80-86.
- Alivisatos B. & Petrides M., 1997. Functional activation of the human brain during mental rotation. *Neuropsychologia*, 35, 111-118. DOI: 10.1016/s0028-3932(96)00083-8
- Angelillo V.G., De Lucia N., Trojano L. & Grossi D., 2010. Persistent left unilateral mirror writing: A neuropsychological case study. *Brain and Language*, 114(3), 157-163. DOI: 10.1016/j.bandl.2010.04.003
- Askov E.N. & Greff K.N., 1975. Handwriting: Copying versus tracing as the most effective type of practice. *The Journal of Educational Research*, 69, 96-98. DOI: 10.1080/00220671.1975.10884841
- Ayzenberg V. & Behrmann M., 2022. The dorsal visual pathway represents object-centered spatial relations for object recognition. *Journal of Neuroscience*, 42(23), 4693-4710. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2257-21.2022
- Baldo J.V., Kacinik N., Ludy C., Paulraj S., Moncrief A., Piai V., Curran B., Turken A., Herron T. & Dronkers N.F., 2018. Voxel-based lesion analysis of brain regions underlying reading and writing. *Neuropsychologia*, 115, 51-59. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.021
- Balfour S., Borthwick S., Cubelli R. & Della Sala S., 2007. Mirror writing and reversing single letters in stroke patients and normal elderly. *Journal of Neurology*, 254(4), 436-441. DOI: 10.1007/s00415-006-0384-8
- Behrmann M., Peterson M.A., Moscovitch M. & Suzuki S., 2006. Independent representation of parts and the relations between them: evidence from integrative agnosia. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(5), 1169-1184. DOI: 10.1037/0096-1523.32.5.1169
- Bertels J., Franco A. & Destrebecqz A., 2012. How implicit is visual statistical learning? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 38(5), 1425-1431. DOI: 10.1037/a0027210
- Bertha H., 1942. Die Spiegelschrift der linken Hand: Eine hirnpathologische Studie zur Frage der Leistung der rechten Großhirnhemisphäre. *Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie*, 175(1), 68-96.
- Bideaud J., Houdé O. & Pedinielli J.L., 1993. *L'homme en développement*. Paris : PUF.
- Blom E.C., 1928. Mirror-writing. *Psychological Bulletin*, 25(10), 582-594. DOI: 10.1037/h0072634
- Bonato M., Zorzi M. & Umiltà C., 2012. When time is space: evidence for a mental time line. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 36(10), 2257-2273. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2012.08.007
- Bornstein M.H., Gross C.G. & Wolf J.Z., 1978. Perceptual similarity of mirror images in infancy. *Cognition*, 6(2), 89-116. DOI: 10.1016/0010-0277(78)90017-3
- Boros M., Anton J.L., Pech-Georgel C., Grainger J., Szwed M. & Ziegler J.C., 2016. Orthographic processing deficits in developmental dyslexia: Beyond the ventral visual stream. *NeuroImage*, 128, 316-327. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2016.01.014
- Borst G., Ahr E., Roell M. & Houdé O., 2015. The cost of blocking the mirror generalization process in reading: evidence for the role of inhibitory control in discriminating letters with lateral mirror-image counterparts. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22(1), 228-234. DOI:10.3758/s13423-014-0663-9
- Bouhali F., Bézagu Z., Dehaene S. & Cohen L., 2019. A mesial-to-lateral dissociation for orthographic processing in the visual cortex. *PNAS*, 116(43), 21936-21946. DOI: 10.1073/pnas.1904184116
- Brainerd C.J. & Reyna V.F., 2015. Fuzzy-trace theory and lifespan cognitive development. *Developmental Review*, 38, 89-121. DOI: 10.1016/j.dr.2015.07.006
- Branigan H.P. & Messenger K., 2016. Consistent and cumulative effects of syntactic experience in children's sentence production: Evidence for error-based implicit learning. *Cognition*, 157, 250-256. DOI: 10.1016/j.cognition.2016.09.004
- Brault-Foisy L.M., Ahr E., Masson S., Houdé O. & Borst G., 2017. Is inhibitory control involved in discriminating pseudowords that contain the reversible letters b and d? *Journal of Experimental Child Psychology*, 162, 259-267. DOI: 10.1016/j.jecp.2017.05.011
- Brekle H.E., 1997a. De l'alphabet proto-phénicien à l'écriture grecque. *Histoire Épistémologie Langage*, 19(1), 177-186. DOI: 10.3406/hel.1997.2581
- Brekle H.E., 1997b. Randbedingungen und Gesetzmäßigkeiten im historischen Entwicklungsprozess unserer Buchstabenformen. *Osnabrücker Beiträge zur Sprachtheorie*, 56, 1-10.

- Brian C.R. & Goodenough F.L., 1929. The relative potency of color and form perception at various ages. *Journal of Experimental Psychology*, 12, 197-213. DOI: 10.1037/h0070967
- Bruner J.S., 1966. *Toward a theory of instruction*. Cambridge: Harvard University Press.
- Bryant P.E., 1969. Perception and memory of the orientation of visually presented lines by children. *Nature*, 224, 1331-1332. DOI: 10.1038/2241331a0
- Bryant P.E., 1973. Discrimination of mirror images by young children. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 82, 415-425. DOI: 10.1037/h0034141
- Buchwald A., 1878. Spiegelschrift bei Hirnkranken. *Berliner klinische Wochenschrift*, 5(1), 6-8.
- Bulthé J., De Smedt B. & Op de Beeck H.P., 2014. Format-dependent representations of symbolic and non-symbolic numbers in the human cortex as revealed by multi-voxel pattern analyses. *NeuroImage*, 87, 311-322. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2013.10.049
- Bulthé J., De Smedt B. & Op de Beeck H.P., 2015. Visual number beats abstract numerical magnitude: Format-dependent representation of arabic digits and dot patterns in human parietal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(7), 1376-1387. DOI: 10.1162/jocn_a_00787
- Cady S., 1988. *Latéralité et image du corps chez l'enfant : Une approche psychanalytique*. Paris : Centurion.
- Calo G., 1956. Maria Montessori. In J. Chateau (Ed.), *Les grands pédagogues* (pp. 311-336). Paris : PUF.
- Calvet L.J., 2022. Chaque lettre a son histoire. *Historia*, n° 901, 22-24.
- Canzano L., Piccardi L., Bureca I. & Guariglia C., 2011. Mirror writing resulting from an egocentric representation disorder: a case report. *Neurocase*, 17(5), 447-460. DOI: 10.1080/13554794.2010.532143
- Carmichael L. & Cashman H., 1932. A study of mirror-writing in relation to handedness and perceptual and motor habits. *Journal of General Psychology*, 6, 296-329. DOI: 10.1080/00221309.1932.9711876
- Carreiras M., Perea M., Gil-López C., Mallouh R.A. & Salillas E., 2013. Neural correlates of visual versus abstract letter processing in roman and arabic scripts. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(11), 1975-1985. DOI: 10.1162/jocn_a_00438
- Catani M., 2022. Lobes and asymmetry: The end of a cycle. *Cortex*, 151, 294-295. DOI: 10.1016/j.cortex.2022.04.012
- Chahboun S., Flumini A., Pérez González C., McManus I.C. & Santiago J., 2017. Reading and writing direction effects on the aesthetic appreciation of photographs. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 22(3), 313-339. DOI: 10.1080/1357650X.2016.1196214
- Chan J.L. & Ross E.D., 1988. Left-handed mirror writing following right anterior cerebral artery infarction: Evidence for nonmirror transformation of motor programs by right supplementary motor area. *Neurology*, 38, 59-63. DOI: 10.1212/wnl.38.1.59
- Chan W.W.L. & Wong T.T.Y., 2016. The underlying number-space mapping among kindergarteners and its relation with early numerical abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 148, 35-50. DOI: 10.1016/j.jecp.2016.03.010
- Chang C.H.C., Pallier C., Wu D.H., Nakamura K., Jobert A., Kuo W.J. & Dehaene S., 2015. Adaptation of the human visual system to the statistics of letters and line configurations. *NeuroImage*, 120, 428-440. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2015.07.028
- Chapman L. & Wedell K., 1972. Perceptual-motor abilities and reversal errors in children's handwriting. *Journal of Learning Disabilities*, 5(6), 321-325. DOI: 10.1177/002221947200500601
- Charles M.A., Thierry X., Lanoë J.L., Bois C., Dufour M.N., Popa R., Cheminat M., Zaros C. & Geay B., 2020. Cohort profile: The French national cohort of children ELFE: birth to 5 years. *International Journal of Epidemiology*, 49(2), 368-369j. DOI: 10.1093/ije/dyz227
- Chartrel E. & Vinter A., 2004. L'écriture : une activité longue et complexe à acquérir. *A.N.A.E.*, 78, 174-180.
- Chovsepian A., Empl L., Correa D. & Bareyre F.M., 2017. Heterotopic transcallosal projections are present throughout the mouse cortex. *Frontiers in Cellular Neurosciences*, 11, 36. DOI: 10.3389/fncel.2017.00036
- Cohen D.J., 2009. Integers do not automatically activate their quantity representation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16, 332-336. DOI: 10.3758/PBR.16.2.332
- Cohen N.J., Ryan J., Hunt C., Romine L., Wszalek T. & Nash C., 1999. Hippocampal system and declarative (relational) memory: summarizing the data from functional neuroimaging studies. *Hippocampus*, 9(1), 83-98. DOI: 10.1002/(SICI)1098-1063(1999)9:1<83::AID-HIPO9>3.0.CO;2-7
- Cohn M. & Stricker G., 1979. Reversal errors in strong, average, and weak letter namers. *Journal of Learning Disabilities*, 12(8), 533-537. DOI: 10.1177/002221947901200808
- Corballis M.C., 1974. The left-right problem in psychology. *Canadian Psychologist/ Psychologie Canadienne*, 15(1), 16-33. DOI: 10.1037/h0081738

Références

- Corballis M.C., 2018. Mirror-image equivalence and interhemispheric mirror-image reversal. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 140. DOI: 10.3389/fnhum.2018.00140
- Corballis M.C. & Beale I.L. 1970. Bilateral symmetry and behavior. *Psychological Review*, 77(5), 451-464.
- Corballis M.C. & Beale I.L., 1976. *The psychology of left and right*. New York: Erlbaum.
- Corballis M.C. & Beale I.L., 1993. Orton revisited: Dyslexia, laterality, and left-right confusion. In D.M. Willows, R.S Kruk. & E.M. Corcos (Eds), *Visual processes in reading and reading disabilities* (pp. 57-74). Hillsdale (NJ): Erlbaum.
- Corballis M.C. & Sergent J., 1992. Judgements about numerosity by a commissurotomed subject. *Neuropsychologia*, 30(10), 865-876. DOI: 10.1016/0028-3932(92)90032-H
- Corballis M.C. & Zalik M.C., 1977. Why do children confuse mirror image obliques? *Journal of Experimental Child Psychology*, 24(3), 516-523. DOI: 10.1016/0022-0965(77)90095-9
- Cornell J., 1985. Spontaneous mirror-writing in children. *Canadian Journal of Psychology*, 39(1), 174-179. DOI: 10.1037/h0080122
- Critchley M., 1927. The significance of mirror writing. *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 20(4), 397-404.
- Cubelli R. & Della Sala S., 2009. Mirror writing in pre-school children: a pilot study. *Cognitive Processing*, 10(2), 101-104. DOI: 10.1007/s10339-008-0233-z
- D'Mello S., Lehman B., Pekrun R. & Graesser A., 2014. Confusion can be beneficial for learning. *Learning and Instruction*, 29, 153-170. DOI: 10.1016/j.learninstruc.2012.05.003
- Danna J. & Velay J.L., 2015. Basic and supplementary sensory feedback in handwriting. *Frontiers in Psychology*, 6, 169. DOI: 10.3389/fpsyg.2015.00169
- Danziger E., 2011. Distinguishing three-dimensional forms from their mirror-images: Whorfian results from users of intrinsic frames of linguistic reference. *Language Sciences*, 33(6), 853-867. DOI: 10.1016/j.langsci.2011.06.008
- Davidson H.P., 1935. A study of the confusing letters b, d, p, and q. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 47(2), 458-468. DOI: 10.1080/08856559.1935.10534056
- De Visscher A. & Noël M.P., 2014. The detrimental effect of interference in multiplication facts storing: Typical development and individual differences. *Journal of Experimental Psychology: General*, 143(6), 2380-2400. DOI: 10.1037/xge0000029
- De Visscher A., Vogel S.E., Reishofer G., Hassler E., Koschutnig K., De Smedt B. & Grabner R.H., 2018. Interference and problem size effect in multiplication fact solving: Individual differences in brain activations and arithmetic performance. *NeuroImage*, 172, 718-727. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2018.01.060
- Dehaene S., 2007. *Les neurones de la lecture*. Paris : Odile Jacob.
- Dehaene S., 2010. *Reading in the brain: the new science of how we read*. London: Penguin Books (first published by Viking Penguin, USA, 2009).
- Dehaene S., Bossini S. & Giraux P., 1993. The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3), 371-396. DOI: 10.1037/0096-3445.122.3.371
- Dehaene S., Nakamura K., Jobert A., Kuroki C., Ogawa S. & Cohen L., 2010. Why do children make mirror errors in reading? Neural correlates of mirror invariance in the visual word form area. *NeuroImage*, 49(2), 1837-1848. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2009.09.
- Della Sala S. & Cubelli R., 2007. Directional apraxia: A unitary account of mirror writing following brain injury or as found in normal young children. *Journal of Neuropsychology*, 1(1), 3-26. DOI: 10.1348/174866407X180783
- Desmurget M., 2006. *Imitation et apprentissages moteurs : Des neurones miroirs à la pédagogie du geste sportif*. Marseille : Solal.
- Dilks D.D., Julian J.B., Kubišius J., Spelke E.S. & Kanwisher N., 2011. Mirror-image sensitivity and invariance in object and scene processing pathways. *Journal of Neuroscience*, 31(31), 11305-11312. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1935-11.2011
- Dillon M.R., Hyde D. & Spelke E.S., 2014. Functional and spatial dissociation in the brain systems encoding object shape and direction. Poster presented at the 21st Annual Meeting of the Cognitive Neuroscience Society, Boston, MA.
- Dillon M.R. & Spelke E.S., 2015. Core geometry in perspective. *Developmental Science*, 18(6), 894-908. DOI: 10.1111/desc.12266

- Dotan D., 2022. What's the most effective way to learn the times table? Retrieved, March 22, 2022, at : <https://bold.expert/whats-the-most-effective-way-to-learn-the-times-table/>
- Downey J.E., 1914. On the reading and writing of mirror-script. *Psychological Review*, 21(6), 408-441. DOI: 10.1037/h0070356
- Duiser I.H.F., Ledebt A., van der Kamp J. & Savelsbergh G.J.P., 2022. Does learning to write and type make a difference in letter recognition and discrimination in primary school children? *Journal of Cognitive Psychology*, 34(6), 691-702. DOI: 10.1080/20445911.2022.2060240
- Eager R. & Fisher J.W., 1932. A case of pseudo-mirror-writing and some observations. *The Lancet*, 219(5669), 876-881.
- Edfeldt A.W., 1955. *Test Reversal*. Paris : E.C.P.A. (2ème édition en français en 1970).
- Eduscol, 2015. L'écriture à l'école maternelle : la forme des lettres. Paris : MENESR.
- Eichenbaum H., 1997. Declarative memory: insights from cognitive neurobiology. *Annual Review of Psychology*, 48, 547-572. DOI: 10.1146/annurev.psych.48.1.547
- Erickson L.C. & Thiessen E.D., 2015. Statistical learning of language: Theory, validity, and predictions of a statistical learning account of language acquisition. *Developmental Review*, 37, 66-108. DOI: 10.1016/j.dr.2015.05.002
- Erlenmeyer A., 1879. *Die Schrift: Grundzüge ihrer Physiologie und Pathologie*. Stuttgart: A. Bonz.
- Fastame M.C., 2020. Visual and spatial working memory skills implicated in copying and drawing from memory of the Rey-Osterrieth Complex Figure: What relationship in school-aged children? *Cognitive Development*, 53, 100826. DOI: 10.1016/j.cogdev.2019.100826
- Fernandes T., Arunkumar M. & Huettig F., 2021. The role of the written script in shaping mirror-image discrimination: Evidence from illiterate, Tamil literate, and Tamil-Latin-alphabet bi-literate adults. *Cognition*, 206, 104493. DOI: 10.1016/j.cognition.2020.104493
- Fernandes T. & Leite I., 2017. Mirrors are hard to break: A critical review and behavioral evidence on mirror-image processing in developmental dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, 159, 66-82. DOI: 10.1016/j.jecp.2017.02.003
- Fernandes T., Leite I. & Kolinsky R., 2016. Into the looking glass: Literacy acquisition and mirror invariance in preschool and first-grade children. *Child Development*, 87(6), 2008-2025. DOI: 10.1111/cdev.12550
- Figuera F., 1902. Contribution à l'étude de l'écriture en miroir chez les enfants. *Annales de médecine et chirurgie infantiles*, 4(5), 145-154.
- Fildes L.G., 1923. Experiments on the problem of mirror-writing. *British Journal of Psychology*, 14(1), 57-67. DOI: 10.1111/j.2044-8295.1923.tb00112.x
- Fildes L.G. & Myers C.S., 1922. Left-handedness and the reversal of letters. *British Journal of Psychology*, 12(3), 273-278. DOI: 10.1111/j.2044-8295.1922.tb00058.x
- Fischer J.-P., 1992. *Apprentissages numériques: la distinction procédural/déclaratif*. Nancy (France) : Presses Universitaires.
- Fischer J.-P., 1997. L'apprentissage d'une grammaire artificielle par des enfants de 9 à 11 ans. *L'Année Psychologique*, 97, 207-236. DOI: 10.3406/psy.1997.28950
- Fischer J.-P., 1999. Le rôle exclusivement positif des erreurs: une conception erronée de l'apprentissage. *Résonances*, 5, 9-11.
- Fischer J.-P., 2000. Corrélations différenciées de l'apprentissage scolaire avec les apprentissages implicite/procédural et explicite/déclaratif. In Actes du colloque: "L'apprentissage: une approche transdisciplinaire", Orsay, 11 et 12 décembre 2000, pp. 53-56.
- Fischer J.-P., 2004. L'appréhension différenciée des trois premiers nombres et des suivants: une approche par le tri libre. *Psychologie & Education*, 3, 57-72.
- Fischer J.-P., 2010a. Vers une levée du mystère des écritures en miroir (des chiffres) chez l'enfant. *L'année psychologique*, 110(2), 227-251. DOI: 10.4074/S0003503310002034
- Fischer J.-P., 2010b. Vers une levée du mystère des écritures en miroir (des lettres majuscules) chez l'enfant : une hypothèse nouvelle. *Enfance*, 62(4), 371-386. DOI: 10.4074/S0013754510004015
- Fischer J.-P., 2011. Mirror writing of digits and (capital) letters in the typically developing child. *Cortex*, 47(6), 759-762. DOI: 10.1016/j.cortex.2011.01.010
- Fischer J.-P., 2012a. **ЯИОЯИМ ИМ ЯРИТЯИРЕ** - L'ECRITURE EN MIROIR. *Cerveau & Psychologie*, n° 52, 54-59.
- Fischer J.-P., 2012b. Rätsel Spiegelschrift. *Gehirn und Geist*, n° 12, 22-25.

Références

- Fischer J.-P., 2013a. Digit reversal in children's writing: a simple theory and its empirical validation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 115, 356-370. DOI: 10.1016/j.jecp.2013.02.003
- Fischer J.-P., 2013b. L'abstraction réfléchissante : une spécificité des mathématiques ? *Rééducation Orthophonique*, 255, 7-18.
- Fischer J.-P., 2017. Character reversal in children: The prominent role of writing direction. *Reading and Writing*, 30(3), 523-542. DOI: 10.1007/s11145-016-9688-y
- Fischer J.-P., 2018. Studies on the written characters orientation and its influence on digit reversal by children. *Educational Psychology*, 38(5), 556-571. DOI: 10.1080/01443410.2017.1359239
- Fischer J.-P. & Koch A.-M., 2014. La magie computationnelle de la voie ventrale est-elle à l'origine de l'inversion des lettres et des chiffres chez l'enfant de cinq à six ans ? *Revue de Neuropsychologie*, 6(4), 230-237. DOI: 10.1684/nrp.2014.0318
- Fischer J.-P. & Koch A.-M., 2016a. Mirror writing in 5- to 6-year-old children: The preferred hand is not the explanation. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 21(1), 34-49. DOI: 10.1080/1357650X.2015.1066383
- Fischer J.-P. & Koch A.-M., 2016b. Mirror writing in typically developing children: a first longitudinal study. *Cognitive Development*, 38, 114-124. DOI: 10.1016/j.cogdev.2016.02.005
- Fischer J.-P. & Luxembourger C., 2018a. A synoptic and theoretical account of character (digits and capital letters) reversal in writings by typically developing children. *Education Sciences*, 8(3), 137. DOI: 10.3390/educsci8030137
- Fischer J.-P. & Luxembourger C., 2018b. Commentary: Mirror-image equivalence and interhemispheric mirror-image reversal. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, e375. DOI: 10.3389/fnhum.2018.00375
- Fischer J.-P. & Luxembourger C., 2020. The battle between the correct and mirror writings of a digit in children's recognition memory. *Education Sciences*, 10(7), 183. DOI: 10.3390/educsci10070183
- Fischer J.-P. & Luxembourger C., 2021. A test of three models of character reversal in typically developing children's writing. *Frontiers in Communication*, 6, 719652. DOI: 10.3389/fcomm.2021.719652
- Fischer J.-P. & Luxembourger C., 2022 (on line). Typical 6-year-old children's confusion between "b" and "d" in reading cannot be assimilated to reversal. *Reading and Writing*. DOI: 10.1007/s11145-022-10290-6
- Fischer J.-P. & Tazouti Y., 2012. Unraveling the mystery of mirror writing in typically developing children. *Journal of Educational Psychology*, 104(1), 193-205. DOI: 10.1037/a0025735
- Fischer J.-P. & Thierry X., 2021. Miswriting (especially mirror writing) of the digits: An ecological assessment using ELFE data. *Journal of Cognitive Education and Psychology*, 20(1), 3-17. DOI: 10.1891/JCEP-D-19-00053
- Foxe J.J. & Simpson G.V., 2002. Flow of activation from V1 to frontal cortex in humans. A framework for defining "early" visual processing. *Experimental Brain Research*, 142, 139-150. DOI: 10.1007/s00221-001-0906-7
- Fraenkel M., 1908. Spiegelschrift und Fehlhandlungen der linken Hand bei Rechtsgelähmten (Apraxie): Die Schrift als Heilmittel und der Werth der Doppelhirnigkeit und Doppelhändigkeit. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 43(3), 1275-1311.
- Freiwald W.A. & Tsao D.Y., 2010. Functional compartmentalization and viewpoint generalization within the macaque face-processing system. *Science*, 330(6005), 845-851. DOI: 10.1126/science.1194908
- Freud E. & Ahsan T., 2022 (on line). Does the dorsal pathway derive intermediate shape-centred representations? *Cognitive Neuropsychology*, 1-3. DOI: 10.1080/02643294.2022.2040974
- Frith U., 1971. Why do children reverse letters? *British Journal of Psychology*, 62(4), 459-468. DOI: 10.1111/j.2044-8295.1971.tb02059.x
- Fuller J.K., 1916. *The psychology and physiology of mirror-writing*. Berkeley (Calif.) : University of California Publications (Vol. 2, N°3, 199-265).
- Furness E.L., 1956. Perspective on reversal tendencies. *Elementary English*, 33(1), 38-41.
- Gabrieli J.D.E., 2009. Dyslexia: A new synergy between education and cognitive neuroscience. *Science*, 325(5938), 280-283. DOI: 10.1126/science.1171999
- Gardner R.A., 1978. *Reversals frequency test*. Cresskill (New Jersey): Creative Therapeutics.
- Gesell A. & Ilg F., 1946/1975. *L'enfant de 5 à 10 ans*. Paris: PUF, 1975 (7^{ème} éd. française, traduite de la 3^{ème} éd. américaine: *Infant from 5 to 10*. New York: Harper and Row, 1946).
- Göbel S.M., Clayton F.J., Khanijou N., Diaz M.R. & Weiers H., 2019. Mirror writing of digits and its relation to mathematical performance in primary school children. Retrieved from osf.io/65pzq (or : Goebel_MCLS_Ottawa_2019_OSF.pdf)

- Göbel S.M., McCrink K., Fischer M.H. & Shaki S., 2018. Observation of directional storybook reading influences young children's counting direction. *Journal of Experimental Child Psychology*, 166, 49-66. DOI: 10.1016/j.jecp.2017.08.001
- Goffin C., Sokolowski H.M., Slipenkyj M. & Ansari D., 2019. Does writing handedness affect neural representation of symbolic number? An fMRI adaptation study. *Cortex*, 121, 27-43. DOI: 10.1016/j.cortex.2019.07.017
- Goldstein A., Cole T. & Cordes S., 2016. How parents read counting books and non-numerical books to their preverbal infants: An observational study. *Frontiers in Psychology*, 7, 1100. DOI: 10.3389/fpsyg.2016.01100
- Gombert J.E. & Fayol M., 1992. Writing in preliterate children. *Learning and Instruction*, 2(1), 23-41. DOI: 10.1016/0959-4752(92)90003-5
- Gonzalez C.L., Ganel T. & Goodale M.A., 2006. Hemispheric specialization for the visual control of action is independent of handedness. *Journal of Neurophysiology*, 95, 3496-3501. DOI: 10.1152/jn.01187.2005
- Goodale M.A. & Milner A.D., 1992. Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15(1), 20-25.
- Gordon H., 1921. Left-handedness and mirror writing, especially among defective children. *Brain*, 43(4), 313-368. DOI: 10.1093/brain/43.4.313
- Greenfield P.M. & Bruner J.S., 1966. Culture and cognitive growth. *International Journal of Psychology*, 1(2), 89-107. DOI: 10.1080/00207596608247117
- Gregory E., Landau B. & McCloskey M., 2011. Representation of object orientation in children: evidence from mirror-image confusions. *Visual Cognition*, 19(8), 1035-1062. DOI: 10.1080/13506285.2011.610764
- Grotheer M., Jeska B. & Grill-Spector K., 2018. A preference for mathematical processing outweighs the selectivity for Arabic numbers in the inferior temporal gyrus. *NeuroImage*, 175, 188-200. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2018.03.064
- Gullaud L. & Vinter A., 1998. Rôle de la vision dans la direction de mouvements graphiques simples. *L'Année psychologique*, 98(3), 401-428. DOI: 10.3406/psy.1998.28575
- Gurariy G., Mruczek R.E.B., Snow J.C. & Caplovitz G., 2022. Using high-density electroencephalography to explore spatiotemporal representations of object categories in visual cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 34(6), 967-987. DOI: 10.1162/jocn_a_01845
- Haeckel E., 1907. *Les merveilles de la vie : études de philosophie biologique*. Paris : Schleicher Frères.
- Hale A.B. & Kuh S., 1901. Mirror-writing and the inverted image. *Journal American Medical Association*, XXXVII(21), 1380-1385. DOI: 10.1001/jama.1901.62470470022001f
- Hannagan T., Amedi A., Cohen L., Dehaene-Lambertz G. & Dehaene S., 2015. Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(7), 374-382. DOI: 10.1016/j.tics.2015.05.006
- Hanse A., 1931. Spiegelschrift, Linkshändigkeit und Alexie. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 93(1), 34-45. DOI: 10.1007/BF01814417
- Harrison M.T. & Strother L., 2018. Visual recognition of mirrored letters and the right hemisphere advantage for mirror-invariant object recognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25, 1494-1499. DOI: 10.3758/s13423-018-1472-3
- Hasazi J.E. & Hasazi S.E., 1972. Effects of teacher attention on digit-reversal behavior in an elementary school child. *Journal of applied Behavior Analysis*, 5(2), 157-162. DOI: 10.1901/jaba.1972.5-157
- Hécaen H., 1984. *Les gauchers*. Paris : PUF.
- Heller T., 1904. *Grundriss der Heilpädagogik*. Leipzig: Engelmann.
- Henderson A. & Pehoski C., 2006. *Hand function in the child: foundations for remediation* (Second edition). St. Louis (Mo): Moby/Elsevier.
- Hildreth G., 1934. Reversals in reading and writing. *Journal of Educational Psychology*, 25(1), 1-20. DOI: 10.1037/h0074907
- Hildreth G., 1936. Developmental sequences in name writing. *Child Development*, 7(4), 291-303.
- Hildreth G., 1940. Bilateral manual performance, eye-dominance and reading achievement. *Child Development*, 11(4), 311-317.
- Hildreth G., 1949a. The development and training of hand dominance: I. Characteristics of handedness. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 75(2), 197-220. DOI: 10.1080/08856559.1949.10533517

Références

- Hildreth G., 1949b. The development and training of hand dominance: II. Developmental tendencies in handedness. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 75(2), 221-254. DOI: 10.1080/08856559.1949.10533518
- Hildreth G., 1949c. The development and training of hand dominance: III. Origins of handedness and lateral dominance. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 75(2), 255-275. DOI: 10.1080/08856559.1949.10533519
- Hildreth G., 1950a. The development and training of hand dominance: IV. Developmental problems associated with handedness. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 76(1), 39-100. DOI: 10.1080/08856559.1950.10533526
- Hildreth G., 1950b. The development and training of hand dominance: V. Training of handedness. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 76(1), 101-144. DOI: 10.1080/08856559.1950.10533527
- Hilts P.J., 1995. *Memory's ghost: The strange tale of Mr. M. and the nature of memory*. New York: Simon & Schuster.
- Hock S., 2021. Cahen-Brach, Eugen. In: Frankfurter Personenlexikon (Onlineausgabe), <https://frankfurter-personenlexikon.de/node/5844>
- Hoef F., McCandliss B.D., Black J.M., Gantman A., Zakerani N., Hulme C., Lyytinen H., Whitfield-Gabrieli S., Glover G.H., Reiss A.L. & Gabrieli J.D., 2011. Neural systems predicting long-term outcome in dyslexia. *PNAS*, 108(1), 361-366. DOI: 10.1073/pnas.1008950108.
- Hutchison R.M. & Gallivan J.P., 2018. Functional coupling between frontoparietal and occipitotemporal pathways during action and perception. *Cortex*, 98, 8-27. DOI: 10.1016/j.cortex.2016.10.020
- Ifrah G., 1981. *Histoire universelle des chiffres*. Paris : Seghers.
- Ireland W.W., 1881. On mirror-writing and its relation to left-handedness and cerebral disease. *Brain*, 4(3), 361-367. DOI: 10.1093/brain/4.3.361
- Izard V., Pica P. & Spelke E.S., 2022. Visual foundations of Euclidean geometry. *Cognitive Psychology*, 136, 101494. DOI: 10.1016/j.cogpsych.2022.101494
- Jee H., Tamariz M. & Shillcock R., 2022. Systematicity in language and the fast and slow creation of writing systems: Understanding two types of non-arbitrary relations between orthographic characters and their canonical pronunciation. *Cognition*, 226(5), 105197. DOI: 10.1016/j.cognition.2022.105197
- Jenni O.G., Chaouch A., Cafilisch J. & Rousson V., 2013. Correlations between motor and intellectual functions in normally developing children between 7 and 18 years. *Developmental Neuropsychology*, 38(2), 98-113. DOI: 10.1080/87565641.2012.733785
- Johansson B.S., 2005. Numeral writing skill and elementary arithmetic mental calculations. *Scandinavian Journal of Educational Research*, 49(1), 3-25. DOI: 10.1080/0031383042000302119
- Jordan B.T. & Jordan S.G., 1974. Jordan left-right reversal test: A study of visual reversals in children. *Child Psychiatry and Human Development*, 4(3), 178-187. DOI: 10.1007/BF01436026
- Jordan B.T. & Jordan S.G., 1990. Jordan left-right reversal test: an analysis of visual reversals in children and significance for reading problems. *Child Psychiatry and Human Development*, 21(1), 65-73. DOI: 10.1007/BF00709929
- Kandel E.R., 2006. *A la recherche de la mémoire : une nouvelle théorie de l'esprit*. Paris : Odile Jacob, 2007 (traduction française par M. Filoche de : *In Search of Memory*, Norton).
- Kiefer M., Schuler S., Mayer C., Trumpp N.M., Hille K. & Sachse S., 2015. Handwriting or typewriting? the influence of pen- or keyboard-based writing training on reading and writing performance in preschool children. *Advances in Cognitive Psychology*, 11(4), 136-146. DOI: 10.5709/acp-0178-7
- Kietzmann T.C., Poltoratski S., König P., Blake R., Tong F. & Ling S., 2015. The occipital face area is causally involved in facial viewpoint perception. *Journal of Neuroscience*, 35(50), 16398-16403. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2493-15.2015
- Kim Y.S.G., Petscher Y., Wanzek J. & Al Otaiba S., 2018. Relations between reading and writing: a longitudinal examination from grades 3 to 6. *Reading and Writing*, 31(7), 1591-1618. DOI: 10.1007/s11145-018-9855-4
- King L.W., 2012. Selectivity and development of the visual word form area. Doctoral Dissertation (Thesis Supervisor: J.D.E. Gabrieli). Cambridge (MA) : MIT.
- Koch A.-M. & Fischer J.-P., 2013. L'écriture en miroir chez l'enfant : une étude en moyenne section. *Psychologie & Education*, n° 1, 69-80.
- Kok P. & Turk-Browne N.B., 2018. Associative prediction of visual shape in the hippocampus. *Journal of Neuroscience*, 38(31), 6888-6899. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0163-18.2018

- Kolers P.A., 1969. Clues to a letter's recognition: Implications for the design of characters. *Journal of Typographic Research*, 3(2), 145-168.
- Kolinsky R., Verhaeghe A., Fernandes T., Mengarda E.J., Grimm-Cabral L. & Morais J., 2011. Enantiomorphy through the looking glass: Literacy effects on mirror-image discrimination. *Journal of Experimental Psychology: General*, 140(2), 210-238. DOI: 10.1037/a0022168
- Kushnir T., Arzouan Y., Karni A. & Manor D., 2013. Brain activation associated with practiced left hand mirror writing. *Brain and Language*, 125(1), 38-46. DOI: 10.1016/j.bandl.2012.12.015
- Lachmann, T., 2018. Reading and dyslexia: The functional coordination framework. In T. Lachmann, T. Weis (Eds), *Reading and dyslexia: from basic functions to higher order cognition* (pp. 271-296). Literacy Studies (vol. 16), Springer Cham.
- Lachmann T. & Geyer T., 2003. Letter reversals in dyslexia: Is the case really closed? A critical review and conclusions. *Psychology Science*, 45, 53-75.
- Lachmann T., Schmitt A., Braet W. & van Leeuwen C., 2014. Letters in the forest: global precedence effect disappears for letters but not for non-letters under reading-like conditions. *Frontiers in Psychology*, 5, 705. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00705
- Lane K.A., 1988. *Reversal errors: Theories and therapy procedures*. Santa Ana, CA: VisionExtension.
- Lebrun Y., 1990. Mirror-reading and mirror-writing in schoolchildren. *A.N.A.E.*, 2, 177-182.
- Lebrun Y., Devreux F. & Leleux C., 1989. Mirror-writing. In P.G. Aaron & R.M. Joshi (Eds), *Reading and writing disorders in different orthographic systems* (pp. 355-378). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Legrün A., 1931. Spiegelschrift bei Schulneulingen. *Zeitschrift für pädagogische Psychologie und Jugendkunde*, 32(9), 547-557.
- Levy F. & Young D., 2016 (on line version). Letter reversals, default mode, and childhood ADHD. *Journal of Attention Disorders*, 21, 1-6. DOI: 10.1177/1087054715624229
- Lévy J.M., 1935. L'écriture en miroir des petits écoliers. *Journal de Psychologie Normale et Pathologique*, 32, 443-454.
- Lewis E.R. & Lewis H.P., 1965. An analysis of errors in the formation of manuscript letters by first-grade children. *American Educational Research Journal*, 2(1), 25-35. DOI: 10.3102/00028312002001025
- Li J.X. & James K.H., 2016. Handwriting generates variable visual output to facilitate symbol learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 145(3), 298-313. doi.: 10.1037/xge0000134
- Liberman I.Y., Shankweiler D., Orlando C., Harris K.S. & Berti F.B., 1971. Letter confusions and reversals of sequence in the beginning reader: Implications for Orton's theory of developmental dyslexia. *Cortex*, 7, 127-142. DOI: 10.1016/S0010-9452(71)80009-6
- Livingstone M.S., Rosen G.D., Drislane F.W. & Galaburda A.M., 1991. Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *PNAS*, 88, 7943-7947. DOI: 10.1073/pnas.88.18.7943
- Lochte Dr., 1896. Beitrag zur Kenntniss des Vorkommens und der Bedeutung der Spiegelschrift. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 28(2), 379-410. DOI: 10.1007/BF01807829
- Longcamp M., Anton J.L., Roth M. & Velay J.L., 2003. Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. *NeuroImage*, 19, 1492-1500. DOI: 10.1016/S1053-8119(03)00088-0
- Longcamp M., Boucard C., Gilhodes J.C. & Velay J.L., 2006. Remembering the orientation of newly learned characters depends on the associated writing knowledge: A comparison between handwriting and typing. *Human Movement Science*, 25(4-5), 646-656. DOI: 10.1016/j.humov.2006.07.007
- Longcamp M., Zerbato-Poudou M.T. & Velay J.L., 2005. The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: A comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica*, 119(1), 67-79. DOI: 10.1016/j.actpsy.2004.10.019
- Ludersdorfer P., Wimmer H., Richlan F., Schurz M., Hutzler F. & Kronbichler M., 2016. Left ventral occipitotemporal activation during orthographic and semantic processing of auditory words. *NeuroImage*, 124(Part A), 834-842. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2015.09.039
- Lurçat L., 1979. *L'activité graphique à l'école maternelle*. Paris : ESF.
- Lyle J.G., 1969. Reading retardation and reversal tendency: a factorial study. *Child Development*, 40(3), 833-843. DOI: 10.2307/1127192
- Maass A., Suitner C. & Deconchy J.P., 2014a. *Living in an asymmetrical world: how writing direction affects thought and action*. London: Psychology Press.
- Maass A., Suitner C., Favaretto X. & Cignacchi M., 2009. Groups in space: Stereotypes and the spatial agency bias. *Journal of Experimental Social Psychology*, 45(3), 496-504. DOI: 10.1016/j.jesp.2009.01.004

Références

- Maass A., Suitner C. & Nadhmi F., 2014b. What drives the spatial agency bias? An Italian-Malagasy-Arabic comparison study. *Journal of Experimental Psychology: General*, 143(3), 991-996. DOI: 10.1037/a0034989
- Madan C.R. & Singhal A., 2021. Convergent and distinct effects of multisensory combination on statistical learning using a computer glove. *Frontiers in Psychology*, 11, 599125. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.599125
- Mahon B.Z., Kumar N. & Almeida J., 2013. Spatial frequency tuning reveals interactions between the dorsal and ventral visual systems. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(6), 862-871. DOI: 10.1162/jocn_a_00370
- Maldarelli J.E., Kahrs B.A., Hunt S.C. & Lockman J.J., 2015. Development of early handwriting: Visual-motor control during letter copying. *Developmental Psychology*, 51(7), 879-888. DOI: 10.1037/a0039424
- Martinaud O., Mirlink N., Bioux S., Bliiaux E., Champmartin C., Pouliquen D., Cruypeninck Y., Hannequin D. & Gérardin E., 2016. Mirrored and rotated stimuli are not the same: A neuropsychological and lesion mapping study. *Cortex*, 78, 100-114. DOI: 10.1016/j.cortex.2016.03.002
- Mather D.S., 2012. Ipsilateral printing in children's mirror-writing: A cause of specific learning disabilities? *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 66(3), 172-180. DOI: 10.1037/a0025873
- Mathewson I., 2004. Mirror writing ability is genetic and probably transmitted as a sex-linked dominant trait: it is hypothesised that mirror writers have bilateral language centres with a callosal interconnection. *Medical Hypotheses*, 62(5), 733-739. DOI: 10.1016/j.mehy.2003.12.039
- Mathewson I., 2007. Does a mutated X-linked dominant transcriptional repressor gene explain mirror writing ability and synaesthesia? *Medical Hypotheses*, 69(2), 368-371. DOI: 10.1016/j.mehy.2006.09.075
- McCrink K., Perez J. & Baruch E., 2017. Number prompts left-to-right spatial mapping in toddlerhood. *Developmental Psychology*, 53(7), 1256-1264. DOI: 10.1037/dev0000342.
- McIntosh R.D., Anderson E.L. & Henderson R.M., 2018a. Experimental confirmation of a character-facing bias in literacy development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 170, 207-214. DOI: 10.1016/j.jecp.2018.01.011
- McIntosh R.D. & Della Sala S., 2012. Mirror-writing. *The Psychologist*, 25(10), 742-746.
- McIntosh R.D., Hillary K., Brennan A. & Lechowicz M., 2018b. Developmental mirror-writing is paralleled by orientation recognition errors. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 23(6), 664-683. DOI: 10.1080/1357650X.2018.1445748
- McNutt M., 2016. Implicit bias. *Science*, 352(6289), 1035. DOI: 10.1126/science.aag1695
- Mehra M.R., Desai S.S., Ruschitzka F. & Patel A.N., 2020. Hydroxychloroquine or chloroquine with or without a macrolide for treatment of COVID-19: a multinational registry analysis. *Lancet*. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)31180-6. [retracted].
- Meletis D., 2020. *The nature of writing: a theory of grapholinguistics*. Brest: Fluxus Editions.
- Meljac C., 1994. Lire et écrire des mots-nombres en français : l'exemple des non-lecteurs. In C. Préneron, C. Meljac & S. Netchine (Eds), *Des enfants hors du lire* (pp. 159-176). Paris: Editions Bayard, INSERM & CTNERHI.
- Meltzoff A.N., Kuhl P.K., Movellan J. & Sejnowski T.J., 2009. Foundations for a new science of learning. *Science*, 325(5938), 284-288. DOI: 10.1126/science.1175626
- Mengotti P., Käsbauser A.S., Fin G.R. & Vossel S., 2020. Lateralization, functional specialization, and dysfunction of attentional networks. *Cortex*, 132, 206-222. DOI: 10.1016/j.cortex.2020.08.022
- Menon V. & Chang H., 2021. Emerging neurodevelopmental perspectives on mathematical learning. *Developmental Review*, 60, 100964. DOI: 10.1016/j.dr.2021.100964
- Meulenbroek R.G.J., Vinter A. & Mounoud P., 1993. Development of the start-rotation principle in circle production. *British Journal of Developmental Psychology*, 11(3), 307-320. DOI: 10.1111/j.2044-835X.1993.tb00605.x
- Milivojevic B., Hamm J.P. & Corballis M.C., 2011. About turn: How object orientation affects categorisation and mental rotation. *Neuropsychologia*, 49(13), 3758-3767. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.09.034
- Millichap J.G., 2000. Mirror writing, a normal attribute or pathological? *Pediatric Neurology Briefs*, 14(2), 16. DOI: 10.15844/pedneurbriefs-14-2-10
- Mishkin M. & Appenzeller T., 1987. L'anatomie de la mémoire. *Pour la Science*, 118, 26-36.
- Miton H. & Morin O., 2021. Graphic complexity in writing systems. *Cognition*, 214, 104771. DOI: 10.1016/j.cognition.2021.104771
- Morlaas J., 1939. Écriture en miroir et bilatéralisme humain. *Encéphale*, 34(2), 493-516.
- Moscovitch M., 1995. Recovered consciousness: A hypothesis concerning modularity and episodic memory. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 17(2), 276-290. DOI: 10.1080/01688639508405123

- Moulton E., Bouhali F., Monzalvo K., Poupon C., Zhang H., Dehaene S., Dehaene-Lambertz G. & Dubois J., 2019. Connectivity between the visual word form area and the parietal lobe improves after the first year of reading instruction: a longitudinal MRI study in children. *Brain Structure and Function*, 224, 1519-1536. DOI: 10.1007/s00429-019-01855-3
- Orton S.T., 1925. "Word-blindness" in school children. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 14(5), 581-615. DOI: 10.1001/archneurpsyc.1925.02200170002001
- Orton S.T., 1937. *Reading, writing, and speech problems in children and selected papers*. Baltimore: The International Dyslexia Association (Ed. 1999).
- Orton S.T. & Gillingham A., 1933. Special disability in writing. *Bulletin of the Neurological Institute of New York*, 3(1 et 2). Reproduit dans Orton S.T., 1937, pp. 267-292.
- Over R., 1967. Detection and recognition measures of shape discrimination. *Nature*, 214, 1272-1273. DOI: 10.1038/2141272a0
- Over R. & Over J., 1967. Detection and recognition of mirror-image obliques by young children. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 64(3), 467-470.
- Pavlidou E.V. & Bogaerts L., 2019. Implicit statistical learning across modalities and its relationship with reading in childhood. *Frontiers in Psychology*, 10, 1834. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.01834
- Pecher D. & Zeelenberg R., 2022. Does multisensory study benefit memory for pictures and sounds? *Cognition*, 226, 105181. DOI: 10.1016/j.cognition.2022.105181
- Pederson E., 2003. Mirror-image discrimination among nonliterate, monoliterate, and biliterate subjects. *Written Language & Literacy*, 6(1), 71-91. DOI: 10.1075/wll.6.1.04ped
- Peelen M.V., He C., Han Z., Caramazza, A. & Bi Y., 2014. Nonvisual and visual object shape representations in occipitotemporal cortex: evidence from congenitally blind and sighted adults. *Journal of Neuroscience*, 34(1), 163-170. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1114-13.2014
- Pegado F., Comerlato E., Ventura F., Jobert A., Nakamura K., Buiatti M., Ventura P., Dehaene-Lambertz G., Kolinsky R., Morais J., Braga L.W., Cohen L. & Dehaene S., 2014. Timing the impact of literacy on visual processing. *PNAS*, 111(49), E5233-E5242. DOI: 10.1073/pnas.1417347111
- Pegado F., Nakamura K., Cohen L. & Dehaene S., 2011. Breaking the symmetry: Mirror discrimination for single letters but not for pictures in the visual word form area. *NeuroImage*, 55(2), 742-749. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.11.043
- Pelli D.G., Burns C.W., Farell B., Moore-Page D.C., 2006. Feature detection and letter identification. *Vision Research*, 46(28), 4646-4674. DOI: 10.1016/j.visres.2006.04.023
- Perea M., Moret-Tatay C. & Panadero V., 2011. Suppression of mirror generalization for reversible letters: Evidence from masked priming. *Journal of Memory and Language*, 65(3), 237-246. DOI: 10.1016/j.jml.2011.04.005
- Perruchet P. & Pacton S., 2006. Implicit learning and statistical learning: one phenomenon, two approaches. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(5), 233-238. DOI: 10.1016/j.tics.2006.03.006
- Perruchet P. & Vinter A., 2002. The self-organizing consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 25, 297-388. DOI: 10.1017/S0140525X02000067
- Piaget J., 1955. Les structures mathématiques et les structures opératoires de l'intelligence. In J. Piaget, E.W. Beth, J. Dieudonné, A. Lichnerowicz, G. Choquet & G. Gattegno (Eds), *L'enseignement des mathématiques* (pp. 11-33). Neuchâtel : Delachaux & Niestlé.
- Piaget J. & Inhelder B., 1947. *La représentation de l'espace chez l'enfant*. Paris: PUF, 1969 (4ème édition).
- Pommier G., 1993. *Naissance et renaissance de l'écriture*. Paris : PUF.
- Portex M., 2017. La directionnalité de l'écrit : Evolution développementale et contribution dans le traitement des formes de lettres. Bordeaux : Thèse de doctorat (sous la direction de J.N. Foulin et B. Troadec).
- Portex M., Hélin C., Ponce C. & Foulin J.N., 2018. Dynamics of mirror writing compared to conventional writing in typical preliterate children. *Reading and Writing*, 31(6), 1435-1448. DOI: 10.1007/s11145-018-9838-5
- Posner M.I., Nissen M.J. & Klein R.M., 1976. Visual dominance: An information-processing account of its origins and significance. *Psychological Review*, 83(2), 157-171. DOI: 10.1037/0033-295X.83.2.157
- Preyer W., 1895. *Die Seele des Kindes* (Vierte Auflage). Leipzig: Th. Grieben's Verlag.
- Primus B., 2004. A featural analysis of the modern Roman alphabet. *Written Language & Literacy*, 7(2), 235-274. DOI: 10.1075/wll.7.2.06pri
- Rajalingham R., Schmidt K. & DiCarlo J.J., 2015. Comparison of object recognition behavior in human and monkey. *Journal of Neuroscience*, 35(35), 12127-12136. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0573-15.2015

Références

- Ramus F., 2010. Génétique de la dyslexie développementale. In S. Chokron & J.F. Démonet (Eds), *Approche neuropsychologique des troubles des apprentissages* (pp. 67-90). Marseille: Solal.
- Reber A.S., Walkenfeld F.F. & Hernstadt R., 1991. Implicit and explicit learning: Individual differences and IQ. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17(5), 888-896. DOI: 10.1037/0278-7393.17.5.888
- Regev T.I., Winawer J., Gerber E.M, Knight R.T. & Deouell L.Y., 2018. Human posterior parietal cortex responds to visual stimuli as early as peristriate occipital cortex. *European Journal of Neuroscience*, 48(12), 3567-3582. DOI: 10.1111/ejn.14164
- Reilhac C., Peyrin C., Démonet J.F. & Valdois S., 2013. Role of the superior parietal lobules in letter-identity processing within strings: fMRI evidence from skilled and dyslexic readers. *Neuropsychologia*, 51(4), 601-612. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2012.12.010
- Richmond J., 2010. School aged children: visual perception and reversal recognition of letters and numbers separately and in context. Thesis: Faculty of Education and Arts at the Edith Cowan University, Perth.
- Richmond J., 2012. Letter and number reversals - identifying the problem. Poster presented at the Occupational Therapy Association of Australian Northern Territory Conference. Participation in Action. June 8, 2012, Darwin, Northern Territory, Australia.
- Richmond J. & Brown T., 2008. The development of a test of letter and number reversal tendency for primary school children". Poster presented at the National Occupational Therapy Conference: Striving for excellence, achieving our best, 27-28th June 2008, Perth, Western Australia.
- Ritchey K.D., 2008. The building blocks of writing: Learning to write letters and spell words. *Reading and Writing*, 21(1-2), 27-47. DOI: 10.1007/s11145-007-9063-0
- Rock I. & Victor J., 1964. Vision and touch: an experimentally created conflict between the two senses. *Science*, 143(3606), 594-596. DOI: 10.1126/science.143.3606.594
- Rollenhagen J.E. & Olson C.R., 2000. Mirror-image confusion in single neurons of the macaque inferotemporal cortex. *Science*, 287(5457), 1506-1508. DOI: 10.1126/science.287.5457.1506
- Rothlein D. & Rapp D., 2017. The role of allograph representations in font-invariant letter identification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(7), 1411-1429. DOI: 10.1037/xhp0000384
- Saffran J.R., Aslin R.N. & Newport E.L., 1996. Statistical learning by 8-month-old infants. *Science*, 274(5294), 1926-1928. DOI: 10.1126/science.274.5294.1926
- Scheidemann N.V., 1936. Inverse writing: A case of consistent mirror writing. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 48(2), 489-494. DOI: 10.1080/08856559.1936.10533745
- Schneider J.M., Weng Y.L., Hu A. & Qi Z., 2022. Linking the neural basis of distributional statistical learning with transitional statistical learning: The paradox of attention. *Neuropsychologia*, 172, 108284. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2022.108284
- Schofield W.N., 1976. Do children find movements which cross the body midline difficult? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 28(4), 571-582. DOI: 10.1080/14640747608400584
- Schott G., 2007. Mirror writing: neurological reflections on an unusual phenomenon. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 78, 5-13. DOI: 10.1136/jnnp.2006.094870
- Schott G., 2022. The bases of remembrance. *The Lancet Neurology*, 21(9), 777. DOI: 10.1016/S1474-4422(22)00315-5
- Schubert T.M., 2017. Why are digits easier to identify than letters? *Neuropsychologia*, 95, 136-155. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2016.12.016
- Scordella A., Di Sano S., Aureli T., Cerratti P., Verratti V., Fanò-Illic G. & Pietrangelo T., 2015. The role of general dynamic coordination in the handwriting skills of children. *Frontiers in Psychology*, 6, 580. DOI: 10.3389/fpsyg.2015.00580
- Seife C., 2000. *Zéro: La biographie d'une idée dangereuse*. Paris : Lattès (2002 pour la traduction française).
- Séraphin-Thibon L., Barbier G., Vilain C., Sawallis T.R., Gerber S. & Kandel S., 2018 (on line). Investigating how children produce rotation and pointing movements when they learn to write letters. *Human Movement Science*, 65(1). DOI: 10.1016/j.humov.2018.04.008
- Seyll L. & Content A., 2022. Letter-like shape recognition in preschool children: does graphomotor knowledge contribute? *Frontiers in Psychology*, 12, 726454. DOI: 10.3389/fpsyg.2021.726454
- Seyll L., Wyckmans F. & Content A., 2020. The impact of graphic motor programs and detailed visual analysis on letter-like shape recognition. *Cognition*, 205, 104443. DOI: 10.1016/j.cognition.2020.104443

- Simner M.L., 1984. The grammar of action and reversals errors in children's printing. *Developmental Psychology*, 20(1), 136-142. DOI: 10.1037/0012-1649.20.1.136
- Smith D.D., & Lovitt T.C. (1973). The educational diagnosis and remediation of written b and d reversal problems: A case study. *Journal of Learning Disabilities*, 6(6), 356-363. DOI: 10.1177/002221947300600604
- Soares A.P., Lages A., Oliveira H. & Hernández J., 2019. The mirror reflects more for d than for b: Right asymmetry bias on the visual recognition of words containing reversal letters. *Journal of Experimental Child Psychology*, 182, 18-37. DOI: 10.1016/j.jecp.2019.01.008
- Sokal A. & Bricmont J., 1997. *Impostures intellectuelles*. Paris : Odile Jacob.
- Sokolowski H.M., Merkley R., Bray-Kingissepp S.S., Vaikuntharajan P. & Ansari D., 2022. Children's attention to numerical quantities relates to verbal number knowledge: An introduction to the Build-A-Train task. *Developmental science*, 25(3), e13211. DOI: 10.1111/desc.13211
- Song C., Sandberg K., Andersen L.M., Blicher J.U. & Rees G., 2017. Human occipital and parietal gaba selectively influence visual perception of orientation and size. *Journal of Neuroscience*, 37(37), 8929-8937. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3945-16.2017
- Spence C., Ngo M.K., Lee J.-H. & Tan H., 2010. Solving the correspondence problem in haptic/multisensory interface design. In M.H. Zadeh (Ed.), *Advances in haptics* (pp. 47-74). India: InTech.
- Spencer M., Kaschak M.P., Jones J.L. & Lonigan C.J., 2015. Statistical learning is related to early literacy-related skills. *Reading and Writing*, 28(4), 467-490. DOI: 10.1007/s11145-014-9533-0
- Sperry R., 1982. Some effects of disconnecting the cerebral hemispheres. *Science*, 217(4566), 1223-1226. DOI: 10.1126/science.7112125
- Spitz J., 2010. *Ecriture : 65 activités progressives pour découvrir l'écriture* (Moyenne Section : 4-5 ans). Paris : Bordas.
- Squire L.R., 1994. Declarative and nondeclarative memory: multiple brain systems supporting learning and memory. In D.L. Schacter & E. Tulving (Eds), *Memory systems 1994* (pp. 203-231). Cambridge (MA): MIT Press.
- Squire L.R., Cohen N.J. & Zola-Morgan M., 1984. The medial temporal region and memory consolidation: A new hypothesis. In H. Weingartner & E.S. Parker (Eds), *Memory consolidation* (pp. 185-210). Hillsdale: Erlbaum.
- St-Pierre M.C., Giroux C. & Lefebvre P., 2010. Difficultés en langage écrit : conceptualisations et terminologies contemporaines. In : M.C. St-Pierre, V. Dalpé, P. Lefebvre & C. Giroux (Eds), *Difficultés de lecture et d'écriture : prévention et évaluation orthophonique auprès des jeunes* (pp. 95-126). Québec : Presses de l'Université du Québec.
- Stern E., 2015. Embodied cognition: A grasp on human thinking. *Nature*, 524, 158-159. DOI: 10.1038/524158a
- Stern W., 1927. *Psychologie der frühen Kindheit bis zum sechsten Lebensjahre*. Leipzig: Quelle & Meyer (4ème éd. revue et augmentée).
- Stricker J., Vogel S.E., Schöneburg-Lehnert S., Krohn T., Dögnitz S., Jud N., Spirk M., Windhaber M.C., Schneider M. & Grabner R.H., 2021. Interference between naïve and scientific theories occurs in mathematics and is related to mathematical achievement. *Cognition*, 214, 104789. DOI: 10.1016/j.cognition.2021.104789
- Suggate J., Aubrey C. & Pettitt D., 1997. The number knowledge of four to five year olds at school entry and at the end of their first year. *European Early Childhood Education Research Journal*, 5(2), 85-101. DOI: 10.1080/13502939785208101
- Suitner C. & Maass A., 2016. Spatial agency bias: Representing people in space. *Advances in Experimental Social Psychology*, 53, 245-301. DOI: 10.1016/bs.aesp.2015.09.004
- Suitner C., Maass A., Bettinsoli M.L., Carraro L. & Kumar S., 2017. Left-handers' struggle in a rightward world: The relation between horizontal spatial bias and effort in directed movements. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 22(1), 60-89. DOI: 10.1080/1357650X.2015.1118112
- Tallet P., 2022. Le sphinx et le mystère de l'alphabet. *Historia*, n° 901, 41-43.
- Taylor J.S.H., Davis M.H. & Rastle K., 2019. Mapping visual symbols onto spoken language along the ventral visual stream. *PNAS*, 116(36), 17723-17728. DOI: 10.1073/pnas.1818575116
- Taylor J.S.H., Rastle K. & Davis M.H., 2014. Distinct neural specializations for learning to read words and name objects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(9), 2128-2154. DOI: 10.1162/jocn_a_00614
- Terepocki M., Kruk R.S. & Willows D.M., 2002. The incidence and nature of letter orientation errors in reading disability. *Journal of Learning Disabilities*, 35, 214-233. DOI: 10.1177/002221940203500304

Références

- Testolin A., Stoianov I. & Zorzi M., 2017. Letter perception emerges from unsupervised deep learning and recycling of natural image features. *Nature Human Behaviour*, 1(11), 657-664. DOI: 10.1038/s41562-017-0253-8
- Thesen T., McDonald C.R., Carlson C., Doyle W., Cash S., Sherfey J., Felsovalyi O., Girard H., Barr W., Devinsky O., Kuzniecky R. & Halgren E., 2012. Sequential then interactive processing of letters and words in the left fusiform gyrus. *Nature Communications*, 3, 1284. DOI: 10.1038/ncomms2220
- Thiebaut de Schotten M., Cohen L., Amemiya E., Braga L.W. & Dehaene S., 2014. Learning to read improves the structure of the arcuate fasciculus. *Cerebral Cortex*, 24(4), 989-995. DOI: 10.1093/cercor/bhs383
- Torres A.R., Mota N.B., Neto N.A., Adamy N., Naschold A., Lima T.Z., Copelli M., Weissheimer J., Pegado F. & Ribeiro S., 2021. Selective inhibition of mirror invariance for letters consolidated by sleep doubles reading fluency. *Current Biology*, 31, 1–11. DOI: 10.1016/j.cub.2020.11.031
- Treiman R. & Allaith Z., 2013. Do reading habits influence aesthetic preferences? *Reading and Writing*, 26(8), 1381-1386. DOI: 10.1007/s11145-012-9424-1
- Treiman R., Cohen J., Mulqueeny K., Kessler B. & Schechtman S., 2007. Young children's knowledge about printed names. *Child Development*, 78(5), 1458-1471. DOI: 10.1111/j.1467-8624.2007.01077.x
- Treiman R., Gordon J., Boada R., Peterson R.L. & Pennington B.F., 2014. Statistical learning, letter reversals, and reading. *Scientific Studies of Reading*, 18(6), 383-394. DOI: 10.1080/10888438.2013.873937
- Treiman R. & Kessler B., 2011. Similarities among the shapes of writing and their effects on learning. *Written Language and Literacy*, 14(1), 39-57. DOI: 10.1075/wll.14.1.03tre
- Trost S., n.d. Alphabet et fréquences de lettres: Français. Available at <<https://fr.sttmedia.com/frequences-de-lettres-francais>> [Accessed 23 March 2022].
- Tsao D.Y., Moeller S. & Freiwald W.A., 2008. Comparing face patch systems in macaques and humans. *PNAS*, 105(49), 19514-19519. DOI: 10.1073/pnas.0809662105
- Uehara I., 2013. Left-right and up-down mirror image confusion in 4-, 5- and 6-year-olds. *Psychology*, 4, 736-740. DOI: 10.4236/psych.2013.410104.
- Ullman M.T., Corkin S., Coppola M., Hickok G., Growdon J.H., Koroshetz W.J. & Pinker S., 1997. A neural dissociation within language: Evidence that the mental dictionary is part of declarative memory, and that grammatical rules are processed by the procedural system. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 266-276. DOI: 10.1162/jocn.1997.9.2.266
- Ungerleider L.G. & Mishkin M., 1982. Two cortical visual systems. In D.J. Ingle, M.A. Goodale & R.J.W. Mansfield (Eds), *Analysis of visual behavior* (pp. 549-586). Cambridge (MA): MIT Press.
- Vaid J., Rhodes R., Tosun S. & Eslami Z., 2011. Script directionality affects depiction of depth in representational drawings. *Social Psychology*, 42(3), 241-248. DOI: 10.1027/1864-9335/a000068
- Vannuscorps G., Galaburda A. & Caramazza A., 2021 (online). Shape-centered representations of bounded regions of space mediate the perception of objects. *Cognitive Neuropsychology*, 1-50. DOI: 10.1080/02643294.2021.1960495
- Vatansever G., Üstün S., Ayyıldız N. & Çiçek M., 2020. Developmental alterations of the numerical processing networks in the brain. *Brain and Cognition*, 141, 105551. DOI: 10.1016/j.bandc.2020.105551
- Velay J.L. & Longcamp M., 2005. Clavier ou stylo : comment écrire ? *Cerveau & Psycho*, n° 11, 3-7.
- Venter L., Richmond J. & Taylor M.F., 2018. Convergent validity of the Richmond Reversal Rating in relation to visual-spatial perception as measured by the SASP. *South African Journal of Occupational Therapy*, 48(3), 24-30. DOI: 10.17159/2310-3833/2017/vol48n3a5
- Vidyasagar T.R. & Pammer K., 2010. Dyslexia: a deficit in visuo-spatial attention, not in phonological processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 14, 57-63. DOI: 10.1016/j.tics.2009.12.003
- Vinci-Booher S., James T.W. & James K. H., 2016. Visual-motor functional connectivity in preschool children emerges after handwriting experience. *Trends in Neuroscience and Education*, 5(3), 107-120. DOI: 10.1016/j.tine.2016.07.006
- Vinter A. & Chartrel E., 2008. Visual and proprioceptive recognition of cursive letters in young children. *Acta Psychologica*, 129(1), 147-156. DOI: 10.1016/j.actpsy.2008.05.007
- Vogel J.M., 1979. The influence of verbal descriptions versus orientation codes on kindergartners' memory for the orientation of pictures. *Child Development*, 50(1), 239-242. DOI: 10.2307/1129062
- Von Hecker U., Lari Z.A., Fazilat-Pour M. & Krumpholtz L., 2022. Attribution of feature magnitudes is influenced by trained reading-writing direction. *Journal of Cognitive Psychology*, 34(2), 194-207. DOI: 10.1080/20445911.2021.1978472

- Vossel, S., Weidner, R., Driver, J., Friston, K.J. & Fink, G.R., 2012. Deconstructing the architecture of dorsal and ventral attention systems with dynamic causal modelling. *Journal of Neuroscience*, 32(31), 10637e10648. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0414-12.2012
- Wagemans J., 1995. Detection of visual symmetries. *Spatial Vision*, 9(1), 9-32. DOI: 10.1163/156856895X00098
- Wagner R.F., 1981. Remediating common math errors. *Academic Therapy*, 16(4), 449-453.
- Walbrin J. & Almeida J., 2021. High-level representations in human occipito-temporal cortex are indexed by distal connectivity. *Journal of Neuroscience*, 41(21) 4678-4685. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2857-20.2021
- Wang X.D., 1992. Mirror writing of Chinese characters in children and neurologic patients. *Chinese medical journal*, 105(4), 306-311.
- Weigelt S., Koldewyn K., Dilks D.D., Balas B., McKone E. & Kanwisher N., 2014. Domain-specific development of face memory but not face perception. *Developmental Science*, 17(1), 47-58. DOI: 10.1111/desc.12089.
- Winkelman J.H. & Schmidt J., 1974. Associative confusions in mental arithmetic. *Journal of Experimental Psychology*, 102(4), 734-736. DOI: 10.1037/h0036103
- Xingliang Q.I. & Houde C.A.I., 2021. Mirror equivalence or invariance and its breaking: Evidence from behavioral to cognitive neural mechanism. *Advances in Psychological Science*, 29(10), 1855-1865. DOI: 10.3724/SP.J.1042.2021.01855
- Yamagata K., 2007. Differential emergence of representational systems: Drawings, letters, and numerals. *Cognitive Development*, 22(2), 244-257. DOI: 10.1016/j.cogdev.2006.10.006
- Yamazaki H. & Lioumis P., 2022. Stochastic resonance at early visual cortex during figure orientation discrimination using transcranial magnetic stimulation. *Neuropsychologia*, 168, 108174. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2022.108174
- Yeo D.J., Wilkey E.D. & Price G.R., 2017. The search for the number form area: a functional neuroimaging meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 78, 145-160. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2017.04.027
- Yin L. & McBride C., 2015. Chinese kindergartners learn to read characters analytically. *Psychological Science*, 26(4), 424-432. DOI: 10.1177/0956797614567203
- Zaslow R.W., 1966. Reversals in children as a result of midline body orientation. *Journal of Educational Psychology*, 57(3), 133-139. DOI: 10.1037/h0023412
- Zemlock D., Vinci-Booher S. & James K.H., 2018. Visual-motor symbol production facilitates letter recognition in young children. *Reading and Writing*, 31(6), 1255-1271. DOI: 10.1007/s11145-018-9831-z
- Zesiger P., Deonna T. & Mayor C., 2000. L'acquisition de l'écriture. *Enfance*, 53(3), 295-304.
- Zhou W., Wang X., Xia Z., Bi Y., Li P. & Shu H., 2016. Neural mechanisms of dorsal and ventral visual regions during text reading. *Frontiers in Psychology*, 7, 1399. DOI: 10.3389/fpsyg.2016.01399