

## 7 COMMENT LA LANGUE INFLUENCE LES MATHÉMATIQUES

Cette contribution se consacre, à l'aide de la méthode des neurosciences cognitives, à la question de savoir quelle est l'influence de la formation scolaire (mathématique) sur nos concepts numériques et leur apprentissage. Elle doit être évaluée du point de vue du système de formation multilingue au Luxembourg. Concrètement, l'influence de la (des) langue(s) parlée(s) par une personne sur la représentation et les techniques de son répertoire numérique et mathématique est analysée.

### 7.1 | Introduction

**L**es mathématiques sont souvent considérées comme un pilier majeur de l'éducation scolaire. En effet, il semble y avoir un lien entre la probabilité d'avoir un emploi à plein temps et la compétence arithmétique, c.-à-d. les connaissances arithmétiques de base et la capacité d'utiliser ces connaissances pour résoudre des problèmes de la vie courante (Rivera-Batiz, 1992). De façon générale, l'obtention de meilleurs résultats en mathématiques va de pair avec de plus grands succès dans la vie professionnelle, comme le fait d'atteindre un niveau socio-économique plus élevé, ainsi que de meilleures qualifications académiques (Duncan et al., 2007; Ritchie & Bates, 2013).

De ce point de vue il est extrêmement important de comprendre comment s'apprennent les mathématiques et de déterminer la manière optimale de les enseigner. À l'origine, cette question était traditionnellement posée par les sciences de l'éducation. L'essor récent des (neuro)sciences cognitives permet d'apporter des pistes de réponses supplémentaires à ces interrogations et d'enrichir nos connaissances sur l'apprentissage et l'enseignement en général et celui des mathématiques en particulier (Kail & Fayol, 2003 ; Blakemore & Frith, 2005).

Concernant l'éducation en mathématiques, les principales questions actuellement investiguées par les (neuro)sciences cognitives sont :

**a)** Quels sont les mécanismes cognitifs et cérébraux qui nous permettent de concevoir et de manipuler la numérosité et le nombre ?

**b)** Comment se développent ces mécanismes numériques-mathématiques au cours de la vie ?

**c)** Comment l'éducation scolaire, et notamment l'apprentissage des mathématiques, influencent et façonnent-ils les concepts numériques et leurs apprentissages ?

Dans ce chapitre nous allons utiliser la méthodologie des neurosciences cognitives<sup>46</sup> pour nous intéresser plus particulièrement à la dernière question. Elle sera étudiée en considérant l'exemple du système d'éducation multilingue du Luxembourg. Concrètement nous allons examiner si la ou les langues maîtrisées par une personne ont une influence sur les représentations et les procédures qu'elle met en œuvre dans le domaine numérique-mathématique. La situation linguistique du Luxembourg et de son système éducatif multilingue servira de point de départ et constituera en même temps le point central de notre questionnement.

Chacun d'entre nous peut manipuler des quantités numériques approximatives indépendamment du langage (Xu & Spelke, 2000). C'est une habileté que nous partageons même avec les tout jeunes enfants ainsi qu'avec d'autres espèces animales. Cependant, pour acquérir et maîtriser des représentations symboliques de (grandes) quantités exactes, le langage et l'instruction sont nécessaires (p.ex : Pica, Lemer, Izard & Dehaene, 2004). Autrement dit, l'utilisation du langage facilite et façonne l'apprentissage du concept de quantité numérique exacte (Fuson, Richards & Briars, 1982 ; Le Corre, Vandewalle, Brannon & Carey, 2006). On

comprend dès lors qu'il est intéressant et nécessaire d'analyser la manière dont un contexte langagier donne influence et forme les concepts numériques, ainsi que la manière de les manipuler.

Dans un pays multilingue comme le Luxembourg, cette démarche scientifique est extrêmement pertinente. De fait, ce chapitre vise à montrer qu'elle est même indispensable pour comprendre les mécanismes cognitifs et neurophysiologiques des apprentissages numériques-mathématiques. Au Luxembourg, le système scolaire reflète le multilinguisme national. Ainsi on retrouve les trois langues nationales qui sont le luxembourgeois, le français et l'allemand utilisées à différents degrés à travers tous les niveaux de l'enseignement. Concernant l'enseignement des mathématiques, la langue d'instruction varie en fonction des cycles d'enseignement. Alors que le luxembourgeois est utilisé pour l'enseignement préscolaire du premier cycle (C1.1-C1.3), les mathématiques sont enseignées en allemand pendant les six années de l'enseignement fondamental (C2.1-C4.2). Pendant les sept années de l'enseignement secondaire, les mathématiques sont apprises en français. Confronté à cette multitude de langues, on comprend intuitivement l'intérêt et l'importance d'étudier la manière dont chaque langue influence l'apprentissage des concepts et des processus numériques-mathématiques. De même il est évident qu'il est nécessaire de s'interroger sur l'influence de plusieurs langues combinées, c.-à-d. de s'interroger sur l'influence du multilinguisme sur la cognition numérique et les mathématiques. L'augmentation continue de la diversité linguistique de la population scolaire au Luxembourg ne fait que rendre les réponses à toutes ces questions encore plus pressantes. Ainsi le pourcentage d'élèves commençant leur carrière scolaire au Luxembourg et ayant comme langue maternelle le luxembourgeois a chuté d'un peu plus de 50% à 36.1% de 2005-2006 à 2012-2013, une tendance qui se confirme depuis lors (Martin, Ugen & Fischbach, 2013).

*L'utilisation du langage facilite et façonne l'apprentissage du concept de quantité numérique exacte.*

<sup>46</sup> Les méthodes de recherche en neurosciences cognitives permettent de comprendre les processus d'apprentissage et de réflexion ainsi que la manière dont notre cerveau les commande. Il s'agit par exemple de mesurer la rapidité et le taux d'erreurs chez une personne appelée à résoudre un exercice spécifique. Les chercheurs peuvent de même recourir à des méthodes d'imagerie médicale, telles que l'électroencéphalographie (EEG) ou l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Une autre méthode, existant depuis longtemps, consiste à étudier des patients présentant des lésions localisées dans certaines parties du cerveau lorsqu'ils résolvent des exercices spécifiques. De la même manière, il existe depuis quelques années des techniques permettant de désactiver de petites régions cérébrales durant un court laps de temps. Ceci a pour but d'étudier la manière dont la personne observée résout des exercices spécifiques dans cette situation. L'objectif de toutes ces méthodes consiste à comprendre le rôle que jouent les différentes parties du cerveau lors de processus mentaux. Progressivement, elles nous permettent d'obtenir un aperçu des fonctions de toutes les parties du cerveau et de leurs interactions.

## 7.2 | Les nombres sont traités différemment selon la langue utilisée

**A**fin de mieux comprendre l'influence du contexte linguistique sur la manière dont une personne comprend et traite les nombres, l'équipe de recherche « Cognitive Neurosciences Research Group » à l'Université du Luxembourg a mis en place ces dernières années une série d'études de neurosciences cognitives.

Dans ces expériences nous avons testé différents groupes d'enfants et d'adultes mono- et multilingues avec des tâches numériques très simples telles que la lecture ou la comparaison de magnitude de nombres arabes. Les résultats de ces expériences montrent clairement que la structure lexicale de la (ou des) langue(s) parlée(s) influence le traitement des nombres.

Afin de comprendre de quelle manière les deux langues utilisées lors du cursus scolaire luxembourgeois (l'allemand pendant l'enseignement fondamental et le français pendant le secondaire) influencent la compréhension et le traitement numérique, il nous semblait logique de nous intéresser d'abord à chacune des deux langues séparément. C'est pourquoi nous avons en premier lieu étudié des personnes ayant un profil monolingue germanophone et des personnes ayant un profil monolingue francophone. Ainsi, nous avons étudié le traitement de nombres à deux chiffres dans une population d'enfants de 10 ans ( $n = 42$ ) et de jeunes adultes ( $n = 50$ ) monolingues francophones et germanophones. Dans un paradigme innovant, les participants entendaient un nombre à deux chiffres tel que 42 et devaient le retrouver parmi quatre possibilités visuellement présentées sur un écran. Dans les deux premières conditions, l'ordre d'apparition des deux chiffres était manipulé de manière à simuler soit l'ordre « dizaine-unité » de la prononciation des nombres en français (quarante-deux), soit l'ordre « unité-dizaine » de la prononciation des nombres en allemand (« zweiundvierzig »). Une troisième condition présentait les deux chiffres en même temps, tel que c'est classiquement le cas avec des chiffres arabes.

Alors que les adultes francophones et germanophones réalisaient toutes ces tâches de la même manière, les enfants germanophones étaient significativement plus lents que les enfants francophones dans la condition classique présentant les deux chiffres simultanément. De plus, les enfants des deux groupes langagiers étaient plus rapides dans la condition qui présentait les chiffres dans le même ordre d'apparition que celui de leurs mots nombres respectifs (Poncin, Van Rinsveld & Schiltz, soumis). Ces résultats indiquent que les langues ayant la propriété d'inverser dizaines et unités (dites aussi langues « inversées », comme l'allemand) imposent un certain coût cognitif dans le traitement des nombres chez les enfants, alors que ces coûts semblent avoir disparu à l'âge adulte. En partant de ces constats, on pourrait réfléchir à la mise en place d'interventions pédagogiques s'adressant spécifiquement à cette difficulté linguistique et permettant aux jeunes enfants de l'identifier et de l'approprier au mieux.

Actuellement, nous sommes en train d'évaluer comment ces tâches sont réalisées par de jeunes adultes luxembourgeois multilingues,<sup>47</sup> parlant entre autres l'allemand et le français. Les premiers résultats indiquent que cette simple tâche de traitement de nombre est réalisée significativement plus rapidement en allemand (qui est la première langue d'instruction de mathématiques formelles) qu'en français. Néanmoins et de manière assez remarquable, pour une tâche si simple, les jeunes adultes multilingues sont plus lents dans chacune de ces deux langues, comparés à leurs pairs monolingues allemands ou français (Poncin et al., soumis). En examinant la lecture de nombres à deux chiffres dans une population d'enfants et d'adolescents luxembourgeois d'âges différents (10 ans,  $n = 32$  ; 13 ans,  $n = 32$  ; 16 ans,  $n = 32$ ) on retrouve cet avantage du traitement des chiffres en allemand. En outre, les enfants de 10 ans du cycle 4.1 de l'enseignement fondamental sont non seulement plus lent en français, mais réalisent

<sup>47</sup> Dans nos recherches nous avons examiné exclusivement l'influence des deux langues d'éducation mathématiques formelles qui sont officiellement utilisées au Luxembourg, c.-à-d. l'allemand et le français. Pour refléter le fait que nos participants luxembourgeois parlent en plus d'autres langues (comme le luxembourgeois et plus tard l'anglais) nous utilisons ici systématiquement le terme « multilingue » pour les désigner.

aussi significativement plus d'erreurs lorsqu'ils traitent un nombre à deux chiffres présenté en français (Poncin et al., en préparation).

Ces résultats indiquent que la première langue d'instruction en mathématique joue un rôle marquant dans l'apprentissage. Ils nous semblent particulièrement intéressants et importants à considérer lorsqu'on réfléchit à mettre en place des conditions d'apprentissages idéales pour des enfants de 12 ans passant de l'enseignement fondamental à l'enseignement secondaire. Pour rappel, lors de cette transition scolaire les enfants sont confrontés au Luxembourg à un brusque changement de la langue d'instruction en mathématiques évoluant de l'allemand au français. Nos résultats indiquent que ce changement vers une nouvelle langue d'enseignement pourrait causer un ralentissement, ainsi qu'un certain nombre de fautes lors des productions mathématiques à ce moment précis. Un enseignement adapté à ce contexte linguistique devrait donc idéalement reconnaître cette difficulté et en tenir compte dans sa méthodologie et ses contenus. Toutefois, cette supposition reste à vérifier empiriquement par des études d'interventions en milieu scolaire.



La difficulté que les élèves luxembourgeois multilingues éprouvent avec le traitement des nombres en français semble donc avant tout refléter le fait que le français est seulement leur deuxième langue d'instruction de mathématique. Néanmoins, il faut savoir que certaines caractéristiques du vocabulaire mathématique français sont particulièrement difficiles à maîtriser et ce même pour des personnes poursuivant une éducation mathématique exclusivement en français. Ainsi d'autres études réalisées par notre équipe sur des élèves monolingues indiquent que la structure vigésimale des mots nombres entre 70 et 100 du français (p.ex. 72 = « soixante-douze ») semble poser des difficultés supplémentaires lors du traitement de ces mots nombres (Van Rinsveld & Schiltz,

2016). En comparant des enfants fréquentant la 5<sup>e</sup> classe des écoles fondamentales anglaises et françaises au Luxembourg, nous avons ainsi observé que la reconnaissance et la production de mots nombres au-delà de 60 était plus lente chez les enfants francophones que chez les enfants anglophones qui utilisent des mots nombres ayant une structure décimale (p.ex. 72 = « seventy-two »). L'irrégularité du système vigésimal semble donc constituer un obstacle langagier auquel l'éducation en mathématiques pourrait s'intéresser plus particulièrement pour faciliter les apprentissages mathématiques, surtout dans un contexte multilingue complexe comme celui du Luxembourg.

Néanmoins, cette hypothèse reste à tester car à notre connaissance il n'y a pas encore d'étude qui aurait évalué directement l'effet d'une telle intervention pédagogique.

Au-delà de la simple reconnaissance ou lecture de nombres à deux chiffres, la langue influence aussi les traitements numériques plus élaborés comme la *comparaison de magnitude*. Lors de la comparaison de magnitude il faut simplement dire lequel parmi deux chiffres est numériquement plus grand (ou plus petit). C'est une tâche mathématique particulièrement intéressante, car la réussite de cette tâche est considérée comme étant précurseur d'habiletés mathématiques plus complexes. En effet, la facilité avec laquelle les jeunes enfants de première année primaire comparent deux nombres arabes prédit leurs niveaux de compétence en mathématiques pour l'année suivante (De Smedt, Verschaffel & Ghesquière, 2009). D'autre part, plusieurs études ont pu montrer que le profil linguistique de la personne module sa manière de comparer la magnitude de nombres à deux chiffres (Nuerk, Weger & Willmes, 2005; Macizo, Herrera, Paolieri & Román, 2010 ; Van Rinsveld et al., 2016). Lorsqu'on compare des nombres à deux chiffres (p.ex. 44 et 88), on répond moins vite et moins correctement quand la comparaison des dizaines et des unités prise chacune de manière isolée mène à des réponses différentes →

*Nos résultats indiquent que ce changement vers une nouvelle langue d'enseignement pourrait causer un ralentissement, ainsi qu'un certain nombre de fautes lors des productions mathématiques à ce moment précis. Un enseignement adapté à ce contexte linguistique devrait donc idéalement reconnaître cette difficulté et en tenir compte dans sa méthodologie et ses contenus. Toutefois, cette supposition reste à vérifier empiriquement par des études d'interventions en milieu scolaire.*

*En d'autres termes, les personnes parlant une langue inversée sont plus sensibles à l'interférence des unités dans les tâches de comparaison de nombres arabes à deux chiffres. Nous avons pu montrer que ceci est également vrai pour les luxembourgeois multilingues (c.-à-d. ayant comme première langue d'instruction en mathématique l'allemand), qu'ils soient adultes ou adolescents.*

→ (p.ex. 38 et 53, pour les lesquels  $3 < 5$ , mais  $8 > 3$ ). Cette comparaison est appelée « incompatible ». Elle contraste avec la comparaison dite « compatible » dans laquelle les dizaines et les unités mènent à la même réponse (p.ex. 86 et 32, pour les lesquels  $8 > 3$ , et  $6 > 2$ ). L'effet décrit ci-dessus est appelé l'effet de compatibilité entre unité et dizaine ou simplement « effet de compatibilité » (Nuerk, Weger & Willmes, 2001). C'est précisément cet effet dont l'intensité varie en fonction de la (ou des) langue(s) parlée(s). Plus particulièrement, les langues « inversées » telles que l'allemand provoquent un effet de compatibilité plus marqué<sup>48</sup> que des langues « non-inversées » telles que l'anglais ou le français (Nuerk et al., 2005 ; Van Rinsveld et al., 2016). En d'autres termes, les personnes parlant une langue inversée sont plus sensibles à l'interférence des unités dans les tâches de comparaison de nombres arabes à deux chiffres. Nous avons pu montrer que ceci est également vrai pour les luxembourgeois multilingues (c.-à-d. ayant comme première langue d'instruction en mathématique l'allemand), qu'ils soient adultes ou adolescents (Van Rinsveld et al., 2016). Ces résultats sont remarquables car ils montrent que le profil linguistique module le traitement de la magnitude de chiffres arabe (via l'influence relative des dizaines et des unités sur ce traitement). Autrement dit, la langue parlée influence la manière dont nous comparons des nombres qui nous sont présentés visuellement. Cette observation prend toute sa force et son importance si on considère, comme nous l'avons vu ci-dessus, que la comparaison de magnitude est un précurseur d'habiletés mathématiques plus complexes. Pris ensemble, les données présentées ci-dessous montrent que la ou les langue(s) parlée(s) par une personne influence(nt) significativement la manière dont elle conçoit et manipule les nombres. Un enseignement mathématique idéalement adapté au contexte devrait donc tenir compte de cette emprise langagière, de manière à aider les élèves à aborder et maîtriser les difficultés spécifiques à chaque langue ou, au contraire, tirer profit des caractéristiques langagières particulièrement favorables à l'apprentissage des mathématiques. A notre connaissance il n'existe actuellement pas d'études qui auraient développées de telles interventions pédagogiques tout en évaluant leur efficacité par des mesures comportementales ou neurophysiologiques.

*Un enseignement mathématique idéalement adapté au contexte devrait donc tenir compte de cette emprise langagière, de manière à aider les élèves à aborder et maîtriser les difficultés spécifiques à chaque langue ou, au contraire, tirer profit des caractéristiques langagières particulièrement favorables à l'apprentissage des mathématiques.*

<sup>48</sup> La différence vient du fait que la distance entre les unités module l'effet de compatibilité dans les langues inversées : dans les langues non-inversées l'effet de compatibilité est le même pour des grandes et des petites distances entre les unités, mais dans les langues inversées l'effet de compatibilité est plus marqué si la distance entre les unités est grande que quand elle est petite.

## 7.3 | Les calculs sont résolus différemment selon la langue utilisée

**P**armi les habiletés mathématiques plus complexes, l'arithmétique est l'une de celles qui a été le mieux étudiée par les neurosciences cognitives (Arsalidou & Taylor, 2011). Partant du constat que la langue influence la manière dont nous traitons les chiffres et leur magnitude, l'existence d'un impact langagier sur la résolution de problèmes arithmétiques devient prévisible et ne devrait pas surprendre après la lecture de la première partie de ce chapitre. La comparaison de monolingues parlant différentes langues a ainsi montré que la structure des mots nombres peut influencer la méthode et l'efficacité de la résolution de calculs. Dans une étude réalisée en Belgique, Brysbaert, Fias & Noël (1998) ont observé que les francophones résolvaient plus rapidement des calculs de type « 21 + 4 », alors que leurs concitoyens néerlandophones répondaient plus rapidement à des calculs de type « 4 + 21 ». Ces résultats soulignent que les néerlandais ont plus de facilités à répondre à ce dernier type d'addition. Ils pourraient être expliqués par le fait que le néerlandais, pareillement à l'allemand, est une langue « inversée », c.-à-d. inversant les dizaines et les unités. Alors que ces résultats reflètent des différences de stratégies selon les langues, il semble que certaines structures langagières ont pour effet de rendre l'apprentissage du calcul globalement plus laborieux. Göbel, Moeller, Pixner, Kaufmann & Nuerk (2014) décrivent en effet que des enfants germanophones de 10 ans avaient plus de difficultés avec les additions nécessitant un report (p.ex : 42 + 19) que des enfants italo-phones du même âge dont les mots nombres n'ont pas une structure inversée. Les auteurs proposent que l'inversion des mots nombres cause une charge mentale supplémentaire pendant le calcul en allemand qui se traduit par une baisse de performance chez des enfants parlant une langue inversée (c.-à-d. l'allemand) comparée à des enfants du même âge et niveau scolaire dont la langue n'inverse pas les dizaines et les unités (c.-à-d. l'italien).

Qu'en est-il de la façon dont les multilingues résolvent des exercices de calcul qui leur sont posés dans les différentes langues qu'ils maîtrisent ?

Au Luxembourg cette situation se pose régulièrement pour les écoliers ayant pour langue maternelle le luxembourgeois, qui apprennent d'abord à lire, écrire et calculer en allemand pendant l'enseignement fondamental, puis poursuivent leur éducation (mathématique) en français au cours de l'enseignement secondaire. Les jeunes adultes ayant traversé ce système éducatif avec succès sont multilingues et bénéficient d'un niveau de maîtrise excellent dans ces deux langues. Dans une étude menée au Luxembourg, nous avons évalué comment des adolescents de différentes classes de l'enseignement secondaire (7<sup>e</sup>, 8<sup>e</sup>, 10<sup>e</sup>, 11<sup>e</sup> année d'enseignement formel ; n = 36, 33, 35, 41) ainsi que des jeunes adultes (n = 48) issus de ce même enseignement résolvent des problèmes d'addition (Van Rinsveld, Brunner, Landerl, Schiltz & Ugen, 2015). Comme il est d'usage dans la littérature scientifique, nous avons examiné séparément les performances réalisées lors d'additions très simples (opérants <10) et lors d'additions plus complexes (opérants >10). Les résultats ont montré que la résolution de calculs simples était légèrement plus rapide en allemand qu'en français à tous les âges. Néanmoins, le taux de réponses correctes était similaire pour les deux langues. Seulement en 7<sup>e</sup> les jeunes adolescents faisaient plus de fautes pour ce type de calcul en français qu'en allemand. Pour les calculs complexes (dont les solutions ne dépassaient cependant jamais 100) l'avantage de l'allemand était encore plus flagrant. En effet, dans cette langue, ces calculs étaient systématiquement résolus plus rapidement et avec moins de fautes qu'en français par tous les groupes d'âge. Une analyse des erreurs produites lors des résolutions de problèmes indique que les erreurs étaient le plus souvent commises sur les dizaines en allemand et sur les unités en français. L'ensemble de ces données étaye le fait que le profil linguistique d'une personne influence la manière dont celle-ci résout des problèmes arithmétiques. Dans notre cas, il s'avère que les personnes bénéficiant de l'enseignement multilingue luxembourgeois deviennent progressivement plus performantes pour calculer en allemand et en français, tout en gardant un certain avantage en allemand. Nous expliquons cela par le fait que l'allemand →

*L'avantage de l'allemand était encore plus flagrant. En effet, dans cette langue, ces calculs étaient systématiquement résolus plus rapidement et avec moins de fautes qu'en français par tous les groupes d'âge.*

→ est la langue dans laquelle les mathématiques ont été apprises en premier lieu.

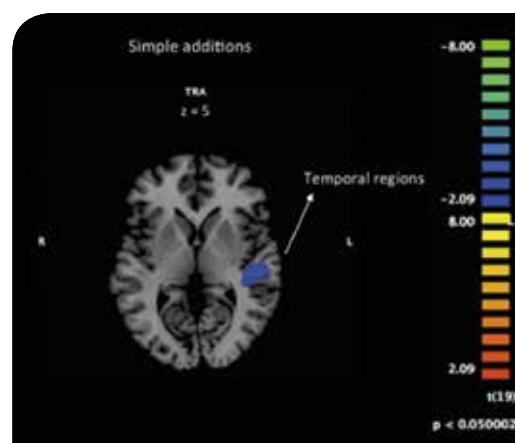
Ces observations posent naturellement la question de savoir s'il est éventuellement possible d'améliorer les performances pour le calcul en français. Pour tenter d'y répondre nous nous sommes intéressés à la situation langagière dans laquelle un problème arithmétique est résolu. Concrètement nous avons examiné si on pouvait faciliter la tâche arithmétique en permettant aux participants de se familiariser d'abord avec la langue du calcul avant de résoudre ce dernier. Dans cette condition « avec contexte langagier » les participants devaient juger si une phrase présentée auditivement faisait sens avant de résoudre un calcul présenté visuellement et de dire la réponse à haute voix. Cette situation était comparée à une situation dans laquelle les participants devaient simplement résoudre des problèmes arithmétiques présentés l'un à la suite de l'autre. Ces deux conditions étaient réalisées par chaque participant aussi bien en allemand qu'en français. Les résultats de cette étude montrent très clairement que la présentation d'un contexte langagier a un effet bénéfique pour les calculs en français. Plus précisément, les calculs français précédés par un jugement sémantique en français étaient résolus environ 200 ms plus rapidement que les calculs présentés directement, sans contexte langagier. En revanche, la performance en allemand n'était pas affectée par la présence de la tâche linguistique. Une hypothèse que l'on pourrait formuler sur base de ces résultats est que l'ajout de contexte langagier adapté pourrait favoriser l'apprentissage mathématique dans la seconde langue d'enseignement (Van Rinsveld, Brunner, Landerl, Schiltz & Ugen, 2016). Néanmoins, il faut savoir que la présence d'instructions mathématiques trop complexes peut avoir un effet néfaste sur la performance. Lorsqu'on crée un contexte langagier il faudrait donc veiller à ce que ce contexte ne soit pas trop compliqué pour l'élève en question. Avant de pouvoir transposer ces résultats dans la pratique pédagogique, il sera nécessaire d'implémenter des études supplémentaires, en situation scolaire.

Afin d'avoir une meilleure compréhension des mécanismes cognitifs sous-jacents du calcul chez les multilingues, nous avons alors mis à profit les possibilités offertes par l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Cette technique permet de

déterminer les zones du cerveau qui sont activées par une tâche donnée. C'est actuellement une des techniques « reines » des neurosciences cognitives. Dans notre cas nous l'avons utilisée pour mettre en évidence les régions cérébrales activées chez les multilingues lorsqu'ils résolvent des additions dans les différentes langues qu'ils maîtrisent.

Pour cette étude nous avons recruté des sujets de langue maternelle luxembourgeoise ayant terminé leur scolarité au Luxembourg, puis étudié dans des universités francophones en Belgique (n=21). Les participants à l'étude maîtrisaient donc parfaitement l'allemand et le français et avaient étudié les mathématiques en allemand à l'école primaire, puis en français au secondaire. Les participants devaient résoudre des additions très simples (opérants <10) et d'autres quelque peu plus complexes (opérants >10) dans deux situations d'épreuve distinctes, en allemand et en français. Il ressort des tests que les sujets étaient capables de résoudre les additions simples de manière équivalente dans les deux langues. Pour les additions complexes en français, ils avaient besoin de plus de temps que pour un énoncé identique en allemand. De plus, ils commettaient davantage d'erreurs lors de la résolution des exercices en français. Ces résultats comportementaux obtenus pendant la résonance magnétique fonctionnelle confirment donc les résultats que nous avons obtenus en testant des jeunes adultes dans un environnement plus classique (Van Rinsveld et al., 2015).

Fig 48 Extrait de *Neuropsychologia*. 2017 Jul 1;101:17-29. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2017.05.009. Epub 2017 May 8



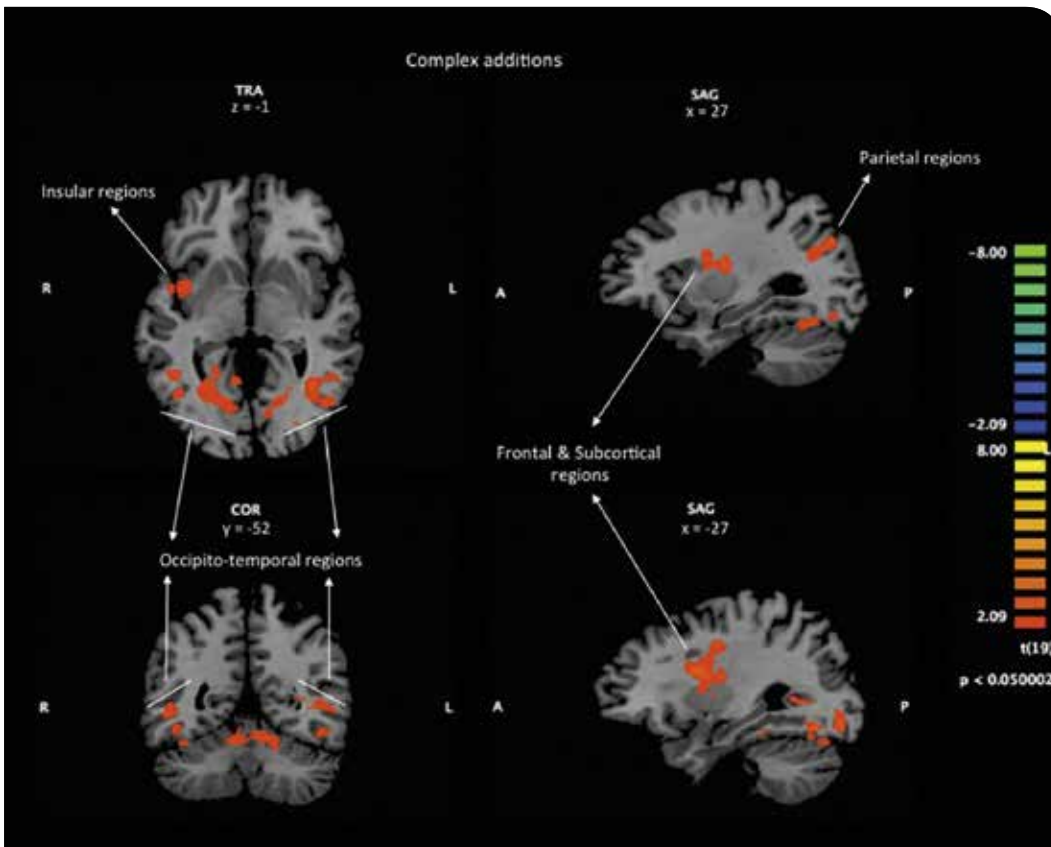
Pendant le test, l'activité cérébrale des sujets a été mesurée par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Ces données révèlent que différentes régions du cerveau s'activent en fonction de la langue utilisée. Pour les additions en allemand, c'est une petite région dédiée au langage et à la mémorisation du lobe temporal gauche qui est activée (figure 48). Lors de la résolution d'exercices de calcul plus complexes en français, une autre partie du cerveau, responsable du traitement de l'information visuelle, est également impliquée indiquant que les sujets ont recours, en complément, à la pensée figurative (figure 49). Les résultats ne légitiment pas l'hypothèse selon laquelle les sujets traduisent l'exercice posé, du français vers allemand, pour calculer la solution. Alors que les personnes testées peuvent résoudre des exercices en allemand en exploitant les zones numériques classiques du cerveau, ce système s'avère insuffisant pour la deuxième langue d'enseignement, le français dans le cas présent. En résumé, pour résoudre les exercices de calcul en français, les sujets devaient systématiquement avoir recours à d'autres processus de pensée non-verbale visuelle non encore observés chez des personnes monolingues.

À l'aide de mesures de l'activité cérébrale et de procédures d'imagerie, l'étude montre pour la première fois « l'effort cognitif supplémentaire » détectable lors de la résolution de problèmes mathématiques dans la seconde langue d'enseignement. De plus, les résultats de l'étude montrent clairement que les processus mathématiques sont directement influencés par la langue. Concernant le système scolaire luxembourgeois, ces données ont un certain retentissement. Alors que l'utilisation consécutive de deux langues différentes dans l'enseignement mathématique permet aux élèves issus du système éducatif multilingue luxembourgeois de faire des mathématiques dans les deux langues d'instruction, nos données comportementales et neurophysiologiques montrent que ce système marque profondément les processus cognitifs à la base des mathématiques, qui ne sont pas imperméables au contexte langagier des apprentissages.

*Pour résoudre les exercices de calcul en français, les sujets devaient systématiquement avoir recours à d'autres processus de pensée non-verbale visuelle non encore observés chez des personnes monolingues.*

*À l'aide de mesures de l'activité cérébrale et de procédures d'imagerie, l'étude montre pour la première fois « l'effort cognitif supplémentaire » détectable lors de la résolution de problèmes mathématiques dans la seconde langue d'enseignement.*

Fig 49 Extrait de Neuropsychologia. 2017 Jul 1;101:17-29. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2017.05.009. Epub 2017 May 8





## 7.4 | Conclusion

*Les participants de tout âge réalisaient les exercices plus rapidement et plus correctement en allemand qu'en français.*

**E**n résumé, il apparaît clairement que le profil et le contexte langagier influencent les processus numériques et mathématiques. Grâce à l'utilisation de différentes approches méthodologiques issues des neurosciences cognitives, nous avons pu montrer que des tâches numériques basiques et fondatrices tels que la lecture de nombres et la comparaison de leur magnitude portent une signature de la ou des langue(s) parlée(s). De même, la résolution de problèmes arithmétiques est marquée langagièrement. Ces empreintes du langage ne se limitent pas au processus d'apprentissage, mais persistent jusqu'au stade de maîtrise et d'automatisme (p.ex. la récupération en mémoire de faits arithmétiques) caractéristiques de l'âge adulte.

Cependant, il faut faire attention à ne pas confondre empreinte externe et identité centrale. Les influences langagières sur les processus mathématiques et numériques ne signifient pas que ces processus peuvent être réduits à des phénomènes langagiers. Les nombres ne sont pas une sous-catégorie de lettres et les mathématiques ne constituent pas une part de notre système langagier. Au contraire, comme précisé au début de ce chapitre, nous savons qu'à l'origine, la cognition numérique et les mathématiques sont des processus non-verbaux, que nous partageons avec des nourrissons et même avec un grand nombre d'espèces animales (Dehaene, 2011). Dans nos propres recherches nous avons ainsi pu confirmer qu'il existe un sens (visuel) du nombre (Guillaume, Mejias, Rossion, Dzhelyova & Schiltz, 2018) qui nous permet d'extraire la numérosité d'un ensemble d'éléments visuels sans avoir recours au langage. De même, nous avons pu valider l'idée que la cognition numérique est intrinsèquement associée à la cognition visuo-spatiale (p.ex. : Goffaux, Dormal, Goebel, Martin & Schiltz,

2012 ; Hoffmann, Hornung, Martin & Schiltz, 2013 ; Georges, Hoffmann & Schiltz, 2017 ; Cornu, Schiltz, Martin & Hornung, 2018). Pour rendre compte des processus cognitifs sous-jacents des mathématiques, il ne faut donc pas se limiter à étudier le rôle du langage. La globalité du fonctionnement de la cognition numérique et mathématique pourra seulement être comprise si l'on s'intéresse à la fois aux mécanismes spécifiquement numériques et non-verbaux, ainsi qu'à leur interaction avec la cognition spatiale et avec le langage. Il est à noter que le rôle des capacités générales de raisonnement, de la mémoire de travail et du contrôle cognitif ne devront pas non plus être négligés (Hornung, Schiltz, Brunner & Martin, 2014; Hoffmann, Pigat & Schiltz, 2014). De surcroît, il faut rappeler que les mathématiques comprennent des processus numériques qui vont bien au-delà des processus numériques de base et de l'arithmétique que nous avons présentés ci-dessus. Ce chapitre permet un premier aperçu de l'influence du langage sur la cognition numérique. Il se limite à une petite partie des mathématiques, sans toucher aux domaines tels que la géométrie, l'algèbre, l'analyse ou la probabilité. Notre travail comme chercheurs en neurosciences cognitives ne fait donc que commencer ! Son but ultime est précisément d'identifier et de comprendre la nature primaire des processus numériques et mathématiques dans leur globalité, ainsi que la manière dont d'autres facteurs cognitifs, dont le langage, l'influencent. Il ne se limitera pas à décrire le fonctionnement numérique et mathématique à maturité, mais inclura aussi son développement ainsi que les processus d'apprentissage et conduisant. Ces connaissances empiriques pourront alors servir de base et d'inspiration au travail pédagogique (p.ex. à l'élaboration de curricula et de méthodes didactiques), sans néanmoins avoir ni l'ambition ni la capacité de s'y suppléer. ●

## Références

- Arsalidou, M., & Taylor, M. J. (2011). Is  $2+2=4$ ? Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. *NeuroImage* 54 (3), 2382–2393. Ashcraft, M. H., 1992. Cognitive arithmetic: a review of data and theory. *Cognition* 44 (1–2), 75–106.
- Blakemore, S.-J. & Frith, U. (2005). *The learning brain. Lessons for educators.* Blackwell publishing. Oxford, UK.
- Brybaert, M., Fias, W., & Noël, M.-P. (1998). The Whorfian hypothesis and numerical cognition: is 'twenty-four' processed in the same way as 'four-and-twenty'? *Cognition* 66, 51–77.
- Cornu, V., Schiltz, C., Martin, R., & Hornung, C. (2018). Visuo-spatial abilities are key for young children's verbal number skills. *J Exp Child Psychol.* 2018 Feb; 166:604-620. doi: 10.1016/j.jecp.2017.09.006. Epub 2017 Nov 3.
- Dehaene, S. (2011). *The number sense. How the mind creates mathematics.* Revised and updated version. Oxford university press, New York, USA.
- De Smedt, B., Verschaffel, L., & Ghesquière, P. (2009). The predictive value of numerical magnitude comparison for individual differences in mathematics achievement. *J Exp Child Psychol* 103: 469–479.
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., & Japel, C. (2007). School readiness and later achievement. *Dev Psychol*, 43(6), 1428–1446. doi: 10.1037/0012-1649.43.6.1428.
- Fuson, K. C., Richards, J., & Briars, D. J. (1982). The acquisition and elaboration of the number word sequence. In *Children's logical and mathematical cognition*, 33–92. Springer.
- Mathematical abilities in elementary school: Do they relate to number-space associations? *J Exp Child Psychol.* 2017 Sep; 161: 126–147. doi: 10.1016/j.jecp.2017.04.011. Epub 2017 May 17.
- Göbel, S. M., Moeller, K., Pixner, S., Kaufmann, L., & Nuerk, H.-C. (2014). Language affects symbolic arithmetic in children: the case of number word inversion. *Journal of Experimental Child Psychology*, 119, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.10.001>
- Goffaux, V., Dormal, G., Goebel, R., Martin, R., & Schiltz, C. (2012). Attentional shifts induced by uninformative number symbols modulate neural activity in human occipital cortex. *Neuropsychologia*, 50(14): 3419–3428. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2012.09.046.
- Guillaume, M., Mejias, S., Rossion, B., Dzhelyova, M., & Schiltz, C. (2018). A rapid, objective and implicit measure of visual quantity discrimination. *Neuropsychologia*. 2018 Feb 3. pii: S0028-3932(18)30056-3. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.01.044.
- Hoffmann, D., Hornung, C., Martin, R., & Schiltz, C. (2013). Developing number-space associations: SNARC effects using a color-discrimination task in 5-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 09/2013; 116(4): 775–791. doi: 10.1016/j.jecp.2013.07.013.
- Hoffmann, D., Pigat, D., & Schiltz, C. (2014). The impact of inhibition capacities and age on number-space associations. *Cognitive Processing* 15(3):329–342. doi: 10.1007/s10339-014-0601-9. Epub 2014 Jan 19.
- Hornung, C., Schiltz, C., Brunner, M., & Martin, R. (2014). Predicting first-grade mathematics achievement: The contributions of domain-general cognitive abilities, nonverbal number sense, and early number competence. *Frontiers in Psychology*, 5(APR), 1–18. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00272>.
- Kail, M., & Fayol, M. (2003). *Les sciences cognitives et l'école.* Presses universitaires de France. Paris, France.
- Le Corre, M., Vandewalle, G., Brannon, E., & Carey, S. (2006). Re-visiting the competence/performance debate in the acquisition of the counting principles. *Cognitive Psychology*, 52(2), 130–169. <http://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2005.07.002>.
- Macizo, P., Herrera, A., Paolieri, D. & Román, P. (2010). Is there crosslanguage modulation when bilinguals process number words? *Appl Psycholinguist* 31(04): 651–669. doi:10.1017/S0142716410000184.
- Martin, R., Ugen, S., & Fischbach, A., (2013). *Épreuves Standardisées. Bildungsmonitoring für Luxemburg. Nationaler Bericht 2011-2013.* Luxembourg Center for Educational Testing. University of Luxembourg. Esch/Alzette, Luxembourg.
- Nuerk, H.-C., Weger, U., & Willmes, K. (2001). Decade breaks in the mental number line? Putting tens and units back into different bins. *Cognition*, 82, B25–B33.
- Nuerk, H.-C., Weger, U., & Willmes, K. (2005). Language effects in magnitude comparison: small, but not irrelevant. *Brain Lang* 92(3): 262–277. doi:10.1016/j.bandl.2004.06.107.
- Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Materials and Method. Science*, 306(5695), 1–16. <https://doi.org/10.1126/science.1102085>.
- Poncin, A., van Rinsveld, A., & Schiltz, C. (submitted). Units first or tens first: Does language matter when processing visually presented two-digit numbers.
- Ritchie, S. J., & Bates, T. C. (2013). Enduring links from childhood mathematics and reading achievement to adult socioeconomic status. *Psychological Science*, 24(7), 1301–1308. <http://doi.org/10.1177/0956797612466268>.
- Rivera-Batiz, F. L. (1992). Quantitative literacy and the likelihood of employment among young adults in the United States. *The Journal of Human Resources*, 27(2), 313–328.
- Van Rinsveld, A., Brunner, M., Landerl, K., Schiltz, C., & Ugen, S. (2015). The relation between language and arithmetic in bilinguals: insights from different stages of language (Equal contribution) 1. *Frontiers in Psychology* doi: 10.3389/fpsyg.2015.00265 (IF: 2.8).
- Van Rinsveld, Brunner, M., A., Landerl, K., Schiltz, C., & Ugen, S. (2016). Solving arithmetic problems in first and second language: does the language context matter? *Learning and Instruction* 42, April 2016 DOI: 10.1016/j.learninstruc.2016.01.003.
- Van Rinsveld, A., & Schiltz, C. (2016). Sixty-twelve = Seventy-two? A cross-linguistic comparison of children's number transcoding. *Br J Dev Psychol.* 2016 Sep;34(3): 461–468. doi: 10.1111/bjdp.12151. Epub 2016 Jul 7.
- Van Rinsveld, A., Schiltz, C., Landerl, K., Brunner, M., & Ugen, S. (2016). Speaking two languages with different number naming systems: what implications for magnitude judgments in bilinguals at different stages of language acquisition? *Cognitive Processing* 17(3), March 2016. DOI: 10.1007/s10339-016-0762-9.
- Xu, F., & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1–B11.