



**HAL**  
open science

# L'acalculie chez les patients AVC : représentations symboliques et sémantiques du nombre

Anne Dupin

► **To cite this version:**

Anne Dupin. L'acalculie chez les patients AVC : représentations symboliques et sémantiques du nombre. Sciences cognitives. 2013. dumas-00868536

**HAL Id: dumas-00868536**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00868536>**

Submitted on 5 Nov 2015

**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.

ACADEMIE DE PARIS

UNIVERSITE PARIS VI PIERRE ET MARIE CURIE

MEMOIRE POUR LE CERTIFICAT DE CAPACITE D'ORTHOPHONISTE

L'ACALCULIE CHEZ LES PATIENTS AVC :  
REPRESENTATIONS SYMBOLIQUES  
ET SEMANTIQUES DU NOMBRE

DIRECTEUR DE MEMOIRE : DOCTEUR PASCAL AUZOU

ANNEE UNIVERSITAIRE 2012-2013

DUPIN Anne

Née le 24 juillet 1990

*Je soussignée Anne DUPIN, déclare être pleinement consciente que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'Internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.*

## REMERCIEMENTS

*Merci à Pascal Auzou pour son investissement et sa passion de la recherche,*

*Merci à Charlotte Driollet pour son soutien toute l'année, ses avis éclairés et son mémoire dont j'ai pris la suite,*

*Merci à Canan Ozsancak de m'avoir accueillie dans son service et d'avoir contribué à mon mémoire,*

*Merci à Laureen Machado-Patiou pour sa gentillesse, nos discussions existentielles et ses conseils en stage,*

*Merci à Aurélie Renault d'avoir partagé avec moi son expérience,*

*Merci à Madame Prunel de m'avoir fait découvrir l'orthophonie,*

*Enfin,*

*MERCI à mes parents pour leur confiance et leur soutien en toute circonstance et pour tout ce qu'ils m'ont offert comme chances dans la vie, en particulier mes cinq belles années d'études pour devenir orthophoniste.*

*MEIS ET AMICIS*

# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	III
SOMMAIRE .....	V
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES ABREVIATIONS .....	XIII
INTRODUCTION.....	1
PARTIE THEORIQUE.....	2
INTRODUCTION.....	2
CHAPITRE 1 – LES ACALCULIES .....	3
I – APERCU GENERAL .....	3
1. Définition .....	3
2. Un mot bien choisi ?.....	3
3. Remarque sur la prise en charge de ce trouble. ....	3
II – ETIOLOGIES .....	4
III – CLASSIFICATIONS.....	4
IV - A L'ORIGINE DE NOMBREUSES DECOUVERTES.....	6
CHAPITRE 2 - TROIS MODELES DU TRAITEMENT DU NOMBRE.....	7
I - LE MODELE DE McCLOSKEY .....	7
II - LE MODELE DE CAMPBELL ET CLARK.....	9
III - LE MODELE DU TRIPLE-CODE.....	10
1. Le modèle fonctionnel des traitements numériques .....	10
2. Inscription anatomique du modèle de Triple-Code.....	11
CHAPITRE 3 – LES SYSTEMES DE CODAGE .....	14
I - LES NUMERAUX VERBAUX.....	14
1. Histoire.....	14
2. Toutes les langues se valent-elles ? .....	15
3. Inscriptions neuro-anatomiques .....	15
II - LES NUMERAUX ARABES .....	16
1. Histoire.....	16
2. Propriétés.....	17

3. Inscriptions neuro-anatomiques .....	18
III - LE TRANSCODAGE .....	18
1. Modèles de transcodage .....	19
a) <i>Le modèle de Deloche &amp; Seron</i> .....	19
b) <i>Le modèle de McCloskey</i> .....	20
c) <i>Le modèle de Dehaene</i> .....	21
2. Le transcodage fait-il appel au sens du nombre ? .....	22
3. Peut-il être utilisé inconsciemment ? .....	25
CHAPITRE 4 – LE SENS DU NOMBRE .....	25
I - DE QUOI PARLE-T-ON ? .....	26
II - LA FONCTION ANALOGIQUE .....	26
1. Données phylogénétiques et ontogénétiques .....	26
2. Notion de « ligne numérique » .....	28
3. Propriétés de notre représentation des quantités .....	30
III - INSCRIPTIONS NEURO-ANATOMIQUES .....	33
1. Localisation cérébrale générale .....	33
2. Le sillon intrapariétal est-il spécifique au traitement du nombre ? .....	34
3. Les experts en calcul complexe : accélération ou réorganisation ? ....	36
4. Les neurones des nombres .....	37
IV - LES TROIS PROCESSUS DE QUANTIFICATION .....	39
1. La subitisation .....	39
2. L'estimation .....	40
3. Le comptage .....	40
CHAPITRE 5 – LES ACTIVITES NUMERIQUES ESSENTIELLES .....	41
I - LE TRAITEMENT DE LA MAGNITUDE .....	41
II - LA RECUPERATION DE FAITS ARITHMETIQUES .....	42
1. Que sont les faits arithmétiques ? .....	42
2. Aspects neuropsychologiques .....	42
3. Aspects neuro-anatomiques .....	43
III - LE CALCUL MENTAL .....	44
1. Qu'est-ce que le calcul mental ? .....	44
2. Aspects neuropsychologiques .....	44
3. Aspects neuro-anatomiques .....	45
IV - AUTRES MODES D'UTILISATION DU NOMBRE .....	46

CHAPITRE 6 - UNE METHODE D'ANALYSE	
DES REPRESENTATIONS NUMERIQUES : L'ECAN .....	47
I - HISTOIRE DE LA BATTERIE.....	47
II - STRUCTURE DE LA BATTERIE .....	48
1. Le nombre.....	48
2. Les transcodages.....	48
3. Le calcul.....	49
4. Les connaissances usuelles des nombres .....	49
III - INTERPRETATIONS.....	50
IV - LIMITES.....	50
CONCLUSION .....	53
<b>OBJECTIFS DE L'ETUDE.....</b>	<b>54</b>
A/ PROBLEMATIQUE .....	54
B/ HYPOTHESES.....	54
Première hypothèse .....	55
Deuxième hypothèse.....	55
Troisième hypothèse.....	55
C/ METHODOLOGIE.....	55
<b>PARTIE PRATIQUE.....</b>	<b>56</b>
A/ RECUEIL DES DONNEES .....	56
I – La population.....	56
1. Caractéristiques démographiques de la population AVC.....	56
2. Données médicales des patients .....	57
II – L'outil utilisé.....	58
III – Les épreuves proposées .....	60
B/ TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES .....	60
I – Validation du Triple Code .....	60
II – Recherche de dissociations.....	61
III – Relations anatomiques .....	61
C/ RESULTATS.....	62
I – Validation du Triple Code .....	62
II – Recherche de dissociations.....	64
III – Relations anatomiques .....	66
1. Patients présentant une dissociation entre un domaine analogique préservé et un domaine symbolique déficitaire.....	66



a) AA.....	66
b) BJ.....	67
c) SM.....	68
2. Patients présentant une dissociation entre un domaine analogique déficientaire et un domaine symbolique préservé.....	69
a) AJ.....	69
b) LJM.....	69
c) BMJ.....	70
d) ND.....	71
3. La démarche du clinicien : le pari sur la dissociation d'après la lésion	71
4. Comparaison entre le pari et la réalité .....	73
<b>DISCUSSION.....</b>	<b>74</b>
A/ LE TRIPLE CODE EN PRATIQUE .....	75
B/ LES DISSOCIATIONS FONCTIONNELLES .....	75
C/ LES RELATIONS ANATOMIQUES.....	77
D/ UNE NOUVELLE METHODE DE REPARTITION DES PATIENTS.....	79
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>83</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>85</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>102</b>
ANNEXE 1 : NORMES DES EPREUVE UTILISEES POUR L'ETUDE DE GROUPE .....	103
ANNEXE 2 : INFORMATIONS CONCERNANT LES 33 PATIENTS EVALUES .....	104
ANNEXE 3 : LES EPREUVES INITIALES .....	105
ANNEXE 4 : EPREUVE D'ESTIMATION DE NUAGE DE POINTS .....	106
ANNEXE 5 : INFORMATIONS CONCERNANT LES 30 SUJETS TEMOINS POUR LA NORMALISATION DE L'EPREUVE D'ESTIMATION DE NUAGE DE POINTS .....	110
ANNEXE 6 : EPREUVES SOUMISES A LA POPULATION AVC .....	111
ANNEXE 7 : NOTES BRUTES DES 33 PATIENT AUX 8 EPREUVES .....	117
<b>RESUME .....</b>	<b>118</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Le modèle modulaire du calcul et du traitement des nombres, d'après McCloskey.....	8
<b>Figure 2</b> : Implantation anatomique des trois principales représentations numériques sur des vues de surface des hémisphères gauche et droit, d'après le modèle anatomo-fonctionnel de Dehaene et Cohen (1995).....	12
<b>Figure 3</b> : Les différents types de transcodage.....	18
<b>Figure 4</b> : Le transcodage selon Deloche et Seron.....	19
<b>Figure 5</b> : Activation et remplissage d'un cadre syntaxique de taille $10 \times 3$ lors de la production d'un numéral dans le code verbal (d'après McCloskey, Sokol et coll., 1990).....	21
<b>Figure 6</b> : Présentation simplifiée du modèle du Triple Code pour le traitement des nombres (d'après Dehaene, 1992).....	22
<b>Figure 7</b> : Graphique des valeurs propres.....	62
<b>Figure 8</b> : Diagramme des composantes.....	64
<b>Figure 9</b> : IRM de AA.....	67
<b>Figure 10</b> : IRM de BJ.....	68
<b>Figure 11</b> : IRM de SM.....	68
<b>Figure 12</b> : IRM de AJ.....	69
<b>Figure 13</b> : IRM de LJM, coupe basse.....	70
<b>Figure 14</b> : IRM de LJM, coupe haute.....	70
<b>Figure 15</b> : IRM de BMJ, coupe basse.....	70
<b>Figure 16</b> : IRM de BMJ, coupe haute.....	70

<b>Figure 17</b> : IRM de ND.....	71
<b>Figure 18</b> : Items de l'épreuve d'estimation de nuage de points (1).....	106
<b>Figure 19</b> : Items de l'épreuve d'estimation de nuage de points (2).....	107
<b>Figure 20</b> : Items de l'épreuve d'estimation de nuage de points (3).....	108
<b>Figure 21</b> : Carnet de notation de l'examineur pour l'épreuve d'estimation de nuage de points.....	109
<b>Figure 22</b> : Feuilles de passation montrées au patient pour l'épreuve de placement d'un nombre arabe sur une échelle graduée de 0 à 100 (1).....	111
<b>Figure 23</b> : Feuilles de passation montrées au patient pour l'épreuve de placement d'un nombre arabe sur une échelle graduée de 0 à 100 (2).....	112
<b>Figure 24</b> : Carnet de notation de l'examineur pour l'épreuve de placement d'un nombre arabe sur une échelle graduée de 0 à 100.....	112
<b>Figure 25</b> : Feuilles de passation montrées au patient pour l'épreuve de jugement de grandeur entre deux nombres arabes.....	113
<b>Figure 26</b> : Carnet de notation de l'examineur pour l'épreuve de jugement de grandeur entre deux nombres arabes .....	113
<b>Figure 27</b> : Feuille de passation montrée au patient pour l'épreuve de soustractions.....	114
<b>Figure 28</b> : Carnet de notation de l'examineur pour l'épreuve de soustraction.....	114
<b>Figure 29</b> : Feuille de passation montrée au patient pour l'épreuve de désignation de numéraux arabes.....	114
<b>Figure 30</b> : Carnet de notation de l'examineur pour l'épreuve de désignation de numéraux arabes.....	115
<b>Figure 31</b> : Feuille de passation montrée au patient pour l'épreuve de désignation de numéraux verbaux écrits.....	115

**Figure 32** : Carnet de notation de l'examineur pour l'épreuve de désignation de numéraux verbaux écrits.....115

**Figure 33** : Feuilles de passation montrée au patient pour l'épreuve de lecture à haute voix de numéraux arabes.....116

**Figure 34** : Carnet de notation de l'examineur pour l'épreuve de lecture à haute voix de numéraux arabes .....116

**Figure 35** : Carnet de notation de l'examineur pour l'épreuve d'écriture sous dictée de numéraux arabes.....116

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Caractéristiques démographiques de la population AVC.....	57
<b>Tableau 2</b> : Les épreuves retenues.....	60
<b>Tableau 3</b> : Corrélation de chacune des huit épreuves avec les deux facteurs de variance principaux.....	63
<b>Tableau 4</b> : Répartition des patients en fonction des domaines préservés ou perturbés, avec un seuil d'échec à 2 épreuves.....	65
<b>Tableau 5</b> : Répartition des patients en fonction des domaines préservés ou perturbés, avec un seuil d'échec à 3 épreuves.....	65
<b>Tableau 6</b> : Pari sur la dissociation d'après la lésion du patient.....	72
<b>Tableau 7</b> : Comparaison entre le pari et la réalité.....	73
<b>Tableau 8</b> : Répartition des patients selon la nouvelle définition des dissociations..	81
<b>Tableau 9</b> : Répartition détaillée, selon la nouvelle méthode, des 7 patients considérés comme ayant une dissociation avec la première méthode.....	81
<b>Tableau 10</b> : Normes des scores pour l'ECAN (1).....	103
<b>Tableau 11</b> : Normes des scores pour l'ECAN (2).....	103
<b>Tableau 12</b> : Normes des scores pour l'ECAN (3).....	103
<b>Tableau 13</b> : Informations concernant les 33 patients évalués.....	104
<b>Tableau 14</b> : Epreuves initiales.....	105
<b>Tableau 15</b> : Recueil de données pour la normalisation de l'épreuve d'estimation de nuage de points.....	110
<b>Tableau 16</b> : Scores des 33 patients aux 8 épreuves.....	117

## LISTE DES ABREVIATIONS

- AVC = Accident Vasculaire Cérébral
- ECAN = Evaluation Clinique des Aptitudes Numériques
- NA = Numéraux Arabes
- NVO = Numéraux Verbaux Oraux
- NVE = Numéraux Verbaux Ecrits
- Effet SNARC = Spacial Numerical Association of Response Codes
- Région HIPS = Horizontal segment of the IntraParietal Sulcus
- NSC = Niveau Socio-Culturel
- HLH = Hémianopsie Latérale Homonyme
- IRM = Imagerie par Résonance Magnétique

## INTRODUCTION

Chaque jour et sans y prêter attention, nous utilisons les nombres pour de nombreuses activités : gérer notre budget, évaluer le temps restant avant un événement, lire l'heure, mesurer une distance, calculer une remise de prix, estimer une quantité, etc. C'est pourquoi le handicap d'une personne est important lorsque celle-ci perd ses capacités de calcul et de traitement du nombre, par exemple à cause d'un accident vasculaire cérébral.

Les acalculies sont donc l'objet de plaintes à ne pas ignorer voire à anticiper, même si les troubles du langage, lorsqu'il y en a, concentrent les préoccupations du patient et des soignants. De plus, les recherches concernant les représentations du nombre dans notre cerveau ont beaucoup évolué ces dix dernières années et il convient d'adapter la prise en charge des patients acalculiques aux modèles théoriques récents et fiables.

A ce titre, le modèle du Triple Code de Dehaene et Cohen (1995) représente une solide assise théorique. Ce modèle stipule l'existence de deux domaines dissociés. Le domaine analogique, d'une part, correspond au sens du nombre et repose sur un substrat cortical pariétal. Le domaine symbolique, d'autre part, correspond aux numéraux verbaux et arabes et repose sur un substrat cortical temporal. Ces conclusions ont été tirées à partir d'études de cas uniques et de l'observation de doubles dissociations.

Si ce modèle est confirmé à de nombreuses reprises par des études de cas uniques choisis à cet effet, que dire de son intérêt en pratique de routine pour tout patient susceptible de souffrir d'une acalculie ?

Après avoir présenté les recherches concernant la manipulation et le traitement du nombre par le cerveau, nous montrerons l'intérêt pour un orthophoniste de se fonder sur le modèle du Triple Code en pratique quotidienne. Pour cela nous utiliserons des épreuves de la batterie ECAN créée il y a 3 ans et normalisée jusqu'en 2013 auprès de 423 sujets contrôles. Nous vérifierons d'abord la pertinence des épreuves choisies pour évaluer séparément les deux domaines, ainsi que l'existence de ces deux domaines. Puis nous validerons à l'échelle d'une population les dissociations fonctionnelle puis anatomique prédites par le modèle de Dehaene entre les domaines analogique et symbolique. Enfin nous discuterons les résultats.

# PARTIE THEORIQUE

## INTRODUCTION

« *Qu'est-ce qu'un nombre, pour qu'un homme puisse le connaître ?* »

(McCulloch, 1965)

Les mathématiques ne sont-elles qu'une invention de l'esprit, une manipulation formelle de symboles abstraits, tel que les formalistes les décrivent (Hilbert, 1899), ou au contraire la description de la réalité, tel que les platonistes les voient (Hermite, 1905) ? Il semble qu'un compromis soit trouvé par les intuitionnistes, déclarant que les mathématiques sont construites par l'esprit humain sur la base d'intuitions innées (Poincaré, 1905). Cette acception de ce qu'est le nombre, en répondant à la nécessité de dépasser la modularité cérébrale pour tisser des liens entre les réseaux, rejoint étonnamment les données actuelles sur l'organisation du cerveau humain.

Le Petit Larousse 2007 définit le nombre ainsi : « *Notion mathématique répondant au besoin de dénombrer, d'ordonner des objets, ou de mesurer les grandeurs* ».

Le Petit Robert 2003 signale quant à lui qu'il s'agit d'un concept indéfinissable ! Celui-ci peut en effet être considéré selon de nombreux aspects et analysé de manières extrêmement variées, à tel point qu'en donner une définition unitaire est impossible. C'est pourquoi ce mémoire se focalise sur le lien entre la réalité de quantité et ses systèmes de représentations et de manipulation par le cerveau humain.

Il convient de distinguer deux types de représentations des quantités. En effet, les notations numériques, ou codes symboliques, sont des représentations externes de l'information numérique, tandis que le sens du nombre est la représentation numérique interne, c'est-à-dire la façon dont notre système cognitif rend compte de la numérosité. Ces deux types de représentations sont à ne pas confondre avec la numérosité qui renvoie à la cardinalité elle-même, c'est-à-dire la « *propriété numérique d'une collection d'éléments du monde réel* » (Seron & Fayol, 2004).



## Chapitre 1 – LES ACALCULIES

Lorsqu'un accident lèse le cerveau au point d'affecter certains aspects du traitement et de la manipulation de la numérosité, de nombreuses caractéristiques insoupçonnées de la cognition numérique sont dévoilées.

### I – APERCU GENERAL

#### 1. Définition

L'acalculie est un **trouble acquis du calcul et/ou du traitement des nombres**.

#### 2. Un mot bien choisi ?

Le terme d'acalculie a été inventé par Henschen en 1919 et désignait uniquement les troubles du calcul, la manipulation de la numérosité. Or le concept a depuis évolué et englobe aussi maintenant les troubles du sens du nombre, c'est-à-dire la représentation de la numérosité, le traitement du nombre.

En outre, il n'existe pas qu'une seule acalculie mais un ensemble de syndromes acalculiques déterminés en fonction des modules numériques atteints. C'est pourquoi on parle plutôt **des** acalculies.

#### 3. Remarque sur la prise en charge de ce trouble.

Une acalculie est un trouble rarement isolé et souvent compris dans un tableau sémiologique bien plus large. Dans le cadre d'une prise en charge hospitalière, elle passe généralement inaperçue car l'attention des soignants se focalise sur les troubles plus visibles et qui paraissent plus handicapants. Les atteintes motrices font l'objet des plus grandes préoccupations, suivies des troubles langagiers, puis sensoriels (visuels surtout), et les autres troubles cognitifs enfin. Parmi ces-derniers, les troubles du calcul et du traitement des nombres sont probablement les déficits les moins considérés car ils ne semblent pas entraver de manière importante l'autonomie de la personne.

L'acalculie n'est pourtant pas à ignorer car ses incidences sur la vie quotidienne et professionnelle du malade sont nombreuses. Les patients sont d'ailleurs souvent demandeurs d'une aide à ce niveau. De plus, n'étant pas traité, ce trouble reste parfois la dernière séquelle d'un AVC par exemple.

## II – ETIOLOGIES

L'origine des acalculies est une lésion neurologique acquise. Elle peut être vasculaire, traumatique, infectieuse, neurodégénérative, idiopathique ou toxique.

## III – CLASSIFICATIONS

En 1919, **Henschen** postule l'existence d'une seule sorte d'acalculie : « *une incapacité à réaliser des opérations arithmétiques* ».

En 1926, **Berger** établit la première classification : il distingue les acalculies primaires causées par une atteinte des fonctions de calcul, et les acalculies secondaires dues à une atteinte d'autres fonctions cognitives et interférant de ce fait sur les performances en calcul.

En 1961, **Hécaen** propose une classification en trois catégories (Hécaen, Angelergues et coll., 1961) :

-l'acalculie alexique ou agraphique, qui serait issue d'un trouble de la lecture ou de l'écriture.

-l'acalculie spatiale, qui provoquerait des anomalies de la place des chiffres les uns par rapports aux autres.

*Il est à noter que le terme d'« acalculie spatiale » désigne actuellement une acalculie résultant de troubles plus généraux comme une négligence, issue d'une lésion de l'hémisphère droit, et occasionnant un déficit central de la représentation mentale des nombres (Cohen & Revkin, 2008). Cela se rapporte au fait que la « ligne numérique mentale » serait hémiségligée (voir chapitre 4).*

-l'anarithmétique, qui serait un déficit de la fonction de calcul elle-même.

Selon **Luria** (Luria, 1970), il n'existe pas d'acalculie pure car le calcul serait toujours lié à plusieurs autres fonctions instrumentales et intellectuelles. Il admet cependant l'existence d'une acalculie de compréhension du sens du nombre, due selon lui à un déficit linguistique ou visuo-spatial.

Depuis 1997, **Dehaene et Cohen** ont instauré la classification actuellement utilisée qui consiste à distinguer les **troubles symboliques** et les **troubles analogiques** (Dehaene & Cohen, 1997 ; Lemer, Dehaene et coll., 2003 ; Cohen & Revkin, 2008). Les troubles analogiques sont les troubles de la représentation des quantités, du sens du nombre, tandis que les troubles symboliques concernent les codes utilisés pour exprimer l'information numérique.

Peut-on alors parler d'acalculie chez un patient pour qui tout trouble numérique serait issu d'un trouble du langage ?

La réponse est **oui**.

Deux arguments soutiennent cette théorie :

-le nombre se construit aussi par le langage : les nombres n'en sont pas moins des nombres dans leur part linguistique.

-les tâches mathématiques faisant intervenir le langage non pas de manière périphérique mais centrale, comme le calcul mental complexe et les problèmes, n'en demeurent pas moins des tâches arithmétiques.

Quelles seraient les facultés atteintes et celles préservées si l'hémisphère gauche, siège des représentations verbales, était lésé ?

**Il y aurait une « gestion implicite des quantités » ou un « calcul implicite » grâce à un codage analogique dans l'hémisphère droit** (McNeil & Warrington, 1994 ; Cohen & Dehaene , 1995 ; Miozzo & Caramazza, 1998 ; Cohen & Dehaene, 2000). En effet, il n'y aurait pas de traitement verbalisé, mais un traitement analogique seul. D'où le fait que des patients dans ce cas-là peuvent par exemple correctement effectuer des soustractions – les traitements visuel puis analogique sont possibles dans l'hémisphère droit - mais ne pourraient pas les lire correctement à haute voix – le traitement verbal se produit dans l'hémisphère gauche. **Les**

**résultats apportés sont de plus souvent approximatifs** car l'hémisphère droit, ne pouvant s'appuyer sur une représentation verbale exacte, effectue un traitement issu uniquement de la représentation analogique.

#### IV - A L'ORIGINE DE NOMBREUSES DECOUVERTES

Le premier médecin à évoquer le fait que le cerveau serait anatomiquement organisé est Gall lorsqu'il expose sa théorie de la phrénologie en 1808. Selon lui, le cerveau est constitué des nombreux petits organes, plus ou moins développés selon les individus, avec chacun une habileté précise, comme le langage, le calcul, la musique voire « *l'esprit satirique et du calembour* » (Gall & Spurzheim, 1808). La palpation du crâne permettrait de déterminer les capacités des différents sujets car Gall suppose que plus une fonction est efficiente, plus l'organe correspondant est volumineux et crée une proéminence crânienne. D'où l'expression « avoir la bosse des maths » pour parler d'une personne compétente en mathématiques. Bien que cette théorie soit maintenant considérée comme fautive, elle a néanmoins eu le mérite d'apporter la notion de spécialisation fonctionnelle des régions cérébrales.

Après Gall, la méthode de recherche suivie ne consistait plus à observer des sujets sains et à les comparer entre eux, mais à comparer les compétences de sujets déficitaires avec celles de sujets sains. L'étude des troubles acquis du calcul a donc inspiré les chercheurs qui voulaient modéliser les fonctions numériques.

Henschen parle le premier du terme d'acalculie et cible ainsi un trouble sur lequel s'appuyer afin d'élaborer des modèles de calcul.

Grâce à la méthode sus citée, Warrington démontre en 1888 l'existence des faits arithmétiques (Warrington, 1888). Il s'agit de « *problèmes simples (addition, soustraction, multiplication et peut-être division) qui sont stockés en mémoire à long terme et qui y sont récupérés* » sans nécessiter de calcul (Delazer & Girelli, 2004).

Entre 1888 et 1893, Deloche et Seron élaborent un modèle de transcodage encore utilisé aujourd'hui quoique perfectionné.

En 1992, McCloskey modélise le traitement cognitif du nombre : il sépare le versant compréhension du versant production et place le système sémantique en passage obligé au milieu.

En 2000, Dehaene élabore le modèle du Triple Code en vigueur actuellement.

La connaissance que nous pouvons avoir de la façon dont le cerveau traite les nombres peut venir de nombreuses méthodes :

- la psychologie animale,
- l'étude comportementale ou en imagerie des sujets sains,
- les explorations neurophysiologiques, comme les potentiels évoqués, l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, la tomographie par émission de positons, la magnétoencéphalographie ou l'électroencéphalographie
- et la neuropsychologie classique lésionnelle qui étudie les relations entre le cerveau lésé et les performances.

C'est cette dernière méthode qui prend pour objet d'étude l'acalculie et qui est la plus utilisée pour étudier le traitement des nombres par le cerveau humain ; elle sera donc particulièrement développée dans ce mémoire.

## Chapitre 2 - TROIS MODELES DU TRAITEMENT DU NOMBRE

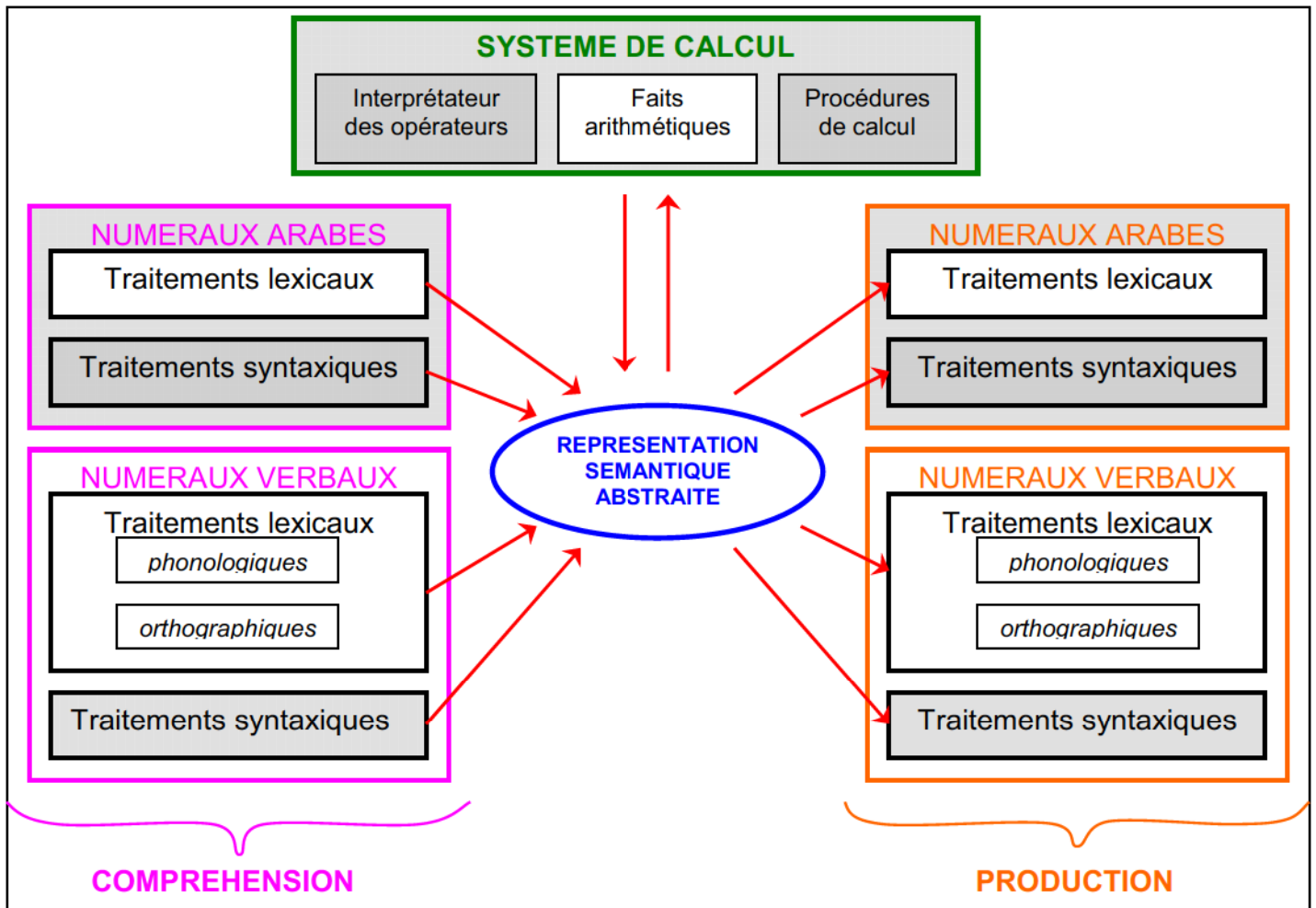
### I - LE MODELE DE McCLOSKEY

Il est inspiré des modèles neuropsychologiques du traitement des mots. A ce propos, les modules propres au modèle des numéraux sont grisés dans le schéma ci-après.

Une forte modularité le caractérise, c'est-à-dire que de nombreux ensembles et sous-ensembles fonctionnels jouissent d'une relative indépendance les uns par rapports aux autres (McCloskey, Caramazza et coll., 1985).

Deux types de modules principaux peuvent être détachés : d'une part **le versant compréhension dissocié du versant production** ; et d'autre part **le système de calcul indépendant du système de traitement des nombre** (Sokol, McCloskey et

coll., 1991). Ce-dernier comprend le versant compréhension, le versant production, mais aussi la représentation sémantique.



**Figure 1** : *Le modèle modulaire du calcul et du traitement des nombres, d'après McCloskey.*

Ce modèle concerne les activités numériques de transcodage et de calcul simple (les quatre opérations).

Le système sémantique constitue le centre de ce modèle (McCloskey, Macaruso et coll., 1992). Il s'agit d'une **représentation abstraite des numéraux**, apparaissant sous la forme de quantités de 1 à 9 chacune associée à un exposant de 10.

Par exemple, le numéral arabe 1053 est représenté dans ce module de la manière suivante :  $\{1\}10^3$ ,  $\{5\}10^1$ ,  $\{3\}10^0$ . Cette représentation étant abstraite, elle est aussi

activée pour « mille cinquante-trois », pour [milsinkanttrwa] ou pour « 1025 + 18 ». Elle est amodale (McCloskey, Aliminosa et coll., 1991).

Cette représentation sémantique se décompose donc en deux types d'informations essentielles. D'une part les informations de classe contiennent la valeur d'une **unité** (unité, dizaine, centaine, etc), c'est-à-dire son **rang en terme de puissance par rapport à la base 10**. D'autre part les informations de position dans la classe donnent le **nombre d'unités contenues par la classe**.

Le système de calcul est en lien direct avec la représentation sémantique et est constitué de trois modules : celui qui interprète les symboles arithmétiques, celui qui stocke les faits arithmétiques (*voir chapitre 5*), et celui qui répertorie les procédures de calcul (Macaruso, McCloskey et coll., 1993).

Le modèle de McCloskey, qui repose sur la base 10, possède donc une représentation sémantique précise, unique, abstraite et indépendante des notations, qui serait activée lors de toute activité de transcodage ou de calcul.

Il distingue comme modules indépendants la compréhension, la production, le sens du nombre et le système de calcul.

Ce modèle répond à de nombreuses analyses de cas uniques mais présente des failles certaines. De plus, rien n'est dit sur le traitement de la numérosité non symbolique car seule l'arithmétique symbolique est considérée.

## II - LE MODELE DE CAMPELL ET CLARK

Il s'agit du **seul modèle au sein duquel la représentation sémantique est dispersée sur des représentations multiples** (Campbell & Clark, 1992). En effet, les auteurs stipulent que les représentations sont différentes selon les modalités et forment un réseau par leurs étroites interconnexions.

Quels critères déterminent l'activation d'une représentation plutôt qu'une autre?

Les représentations sont activées selon la tâche à effectuer, la notation verbale ou arabe et la modalité orale ou écrite. Les schémas d'activation dépendraient en outre des variables d'apprentissage individuelles.

Des patterns d'association ou d'inhibition assurent la gestion des activations du réseau.

Ce modèle a été conçu en opposition au modèle de McCloskey afin de montrer que la récupération des faits arithmétiques se fonde sur des représentations dépendantes des systèmes de notation.

### III - LE MODELE DU TRIPLE-CODE

Ce modèle est celui qui est le plus utilisé aujourd'hui en recherche et en clinique.

#### 1. Le modèle fonctionnel des traitements numériques

Comme son nom l'indique, ce modèle postule l'existence de trois types de représentations mentales du nombre (Dehaene & Cohen, 1991).

La **forme visuelle des nombres arabes**, d'une part, constitue un code visuo-spatial. Le nombre « 52 » par exemple est perçu comme l'assemblage de deux chiffres distincts possédant chacun une place précise par rapport à l'autre : <5> <2> (Caramazza & Hillis, 1990).

La **représentation verbale des numéraux**, d'autre part, présente le nombre comme une séquence de mots syntaxiquement organisée. Pour « cinquante-deux » par exemple, la notation peut être la suivante : Dizaines {5} Unités {2} (McCloskey, Sokol et coll., 1986 ; Cohen & Dehaene, 1991). Les **deux modalités** de ce code sont les suivantes : orale et écrite.

Enfin seule la **représentation analogique des quantités numériques** contient le sens des nombres. Il s'agit d'un code à part entière car elle n'est pas la numérosité mais bien un système pour la représenter, avec des caractéristiques propres censées permettre au cerveau d'approcher la réalité elle-même. C'est pourquoi elle est dite analogique.



Cette représentation possède la signification du nombre dans tous ses aspects. Elle comprend par exemple le fait que 52 est inférieur à 60, ou que 12 est compris entre 0 et 20, mais aussi que 16 est une puissance de 2 ou 17 un nombre premier, et même que 1789 est une date célèbre.

La représentation analogique de la magnitude est conçue comme une **ligne numérique orientée de gauche à droite et obéissant à la loi de Weber-Fechner**.

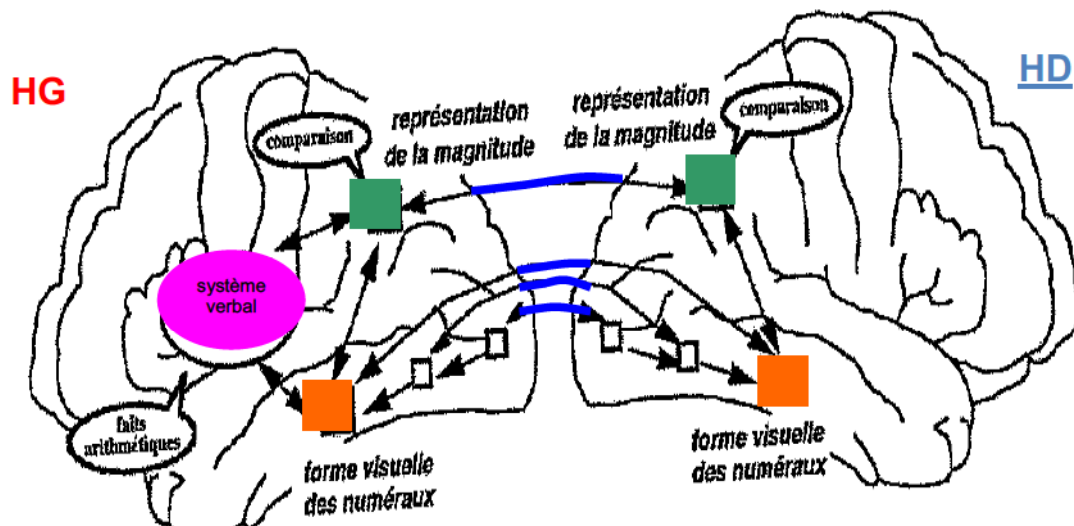
Cette dernière décrit, en psychophysique, la relation entretenue par la sensation avec la grandeur physique d'un stimulus. Elle stipule que le seuil différentiel est proportionnel à l'intensité du stimulus, et Fechner explique que « *la sensation varie comme le **logarithme** de l'excitation* ». Autrement dit plus l'intensité du stimulus est élevée, plus l'accroissement qu'il faut lui donner pour faire ressentir un écart de perception est grand.

Les auteurs affirment enfin l'existence de **contacts entre ces trois représentations**, ce qui permettrait des conversions de codes et des transferts d'informations d'un code à un autre. Il est à noter qu'il existe un lien entre les numéraux arabes et les numéraux verbaux ne passant pas par le sens du nombre, ce qui suppose l'existence de transcodages asémantiques possibles (*voir la troisième partie du chapitre 3*).

## 2. Inscription anatomique du modèle de Triple-Code

Jusqu'en 1995, l'arithmétique mentale n'avait été étudiée que dans les cadres séparés de la neuropsychologie cognitive ou de la neuro-anatomie. Les modèles des traitements numériques étaient donc soit des modèles fonctionnels, soit des modèles anatomiques.

Grâce au rattachement des modules du modèle du Triple-Code aux substrats neurologiques correspondants, Dehaene et Cohen ont créé un **modèle anatomo-fonctionnel** (Dehaene & Cohen, 1995 ; 2000).



**Figure 2 :** Implantation anatomique des trois principales représentations numériques sur des vues de surface des hémisphères gauche et droit, d'après le modèle anatomo-fonctionnel de Dehaene & Cohen (1995).

Voici la légende des couleurs ajoutées au schéma :

En orange sur ce schéma se situent les régions occipito-temporales bilatérales appartenant à la voie visuelle ventrale. Elles sont le siège des procédures d'identification et de reconnaissance visuelle des chiffres arabes simples et des nombres à plusieurs chiffres. L'hémisphère gauche reconnaît aussi les mots écrits, tandis que l'hémisphère droit ne peut le faire que d'une façon très limitée.

En vert se trouve la jonction pariéto-temporo-occipitale. Elle est le siège de la représentation analogique des quantités et des procédures de comparaison. L'hémisphère **droit** est supérieur au gauche dans le traitement des quantités.

En rose se trouvent les gyrus frontal inférieur et temporal supérieur et les noyaux gris centraux et thalamiques de l'hémisphère **gauche**. Ils sont le siège de la représentation des numéraux verbaux.

C'est aussi là que se produisent l'identification et la production des numéraux verbaux, qui sont des procédures langagières donc non spécifiques aux numéraux.

En bleu est représenté le **corps calleux**. Il relie les informations visuelles gauches et droites et les informations de quantité gauches et droites.

On remarque qu'aucune voie directe ne relie l'hémisphère droit au système verbal. Ainsi, du fait de l'absence de système verbal dans l'hémisphère droit mais de sa présence dans l'hémisphère gauche, les procédures de transcodage ne sont pas structurées de la même manière selon l'hémisphère.

En effet, l'hémisphère droit n'ayant pas de facultés symboliques précises, ne peut ni identifier des numéraux verbaux, ni lire à haute voix des numéraux arabes, ni effectuer des calculs exacts (Gazzaniga & Hillyard, 1971). En revanche, il peut traiter de la numérosité et effectuer des calculs approximatifs grâce à sa représentation analogique (Grafman, Kampen et coll., 1989 ; Cohen & Dehaene, 1996). Il est aussi tout à fait apte à comparer des numéraux arabes.

Ainsi, si l'hémisphère gauche est dit dominant, l'hémisphère droit a lui aussi des domaines de prédilection. En effet **dans cet hémisphère, les traitements approximatifs et de la numérosité ainsi que les traitements des données spatiales sont plus efficaces** (Dehaene & Cohen, 1991 ; Piazza, Mechelli et coll., 2006 ; Funnel, Colvin et coll., 2007 ; Dormal, Andres et coll., 2012). C'est pourquoi les « acalculies spatiales » sont plus souvent retrouvées lors de lésions droites (Cohen & Revkin, 2008).

Ce modèle a donc montré que **les liens entre les fonctions cognitives et l'anatomie cérébrale ne sont ni aléatoires ni très variables selon les individus**. Il a cependant aussi été mis en évidence le fait qu'**il n'y a pas de centre du calcul**, mais plutôt un ensemble de régions participant aux traitements numériques, et ce de façon parfois non spécifique. C'est pourquoi Dehaene explique, dans son livre La bosse des maths écrit en 2010, que « *notre cerveau ne contient pas d'unité arithmétique génétiquement programmée pour les nombres et les mathématiques* ». Ainsi, afin de résoudre une tâche numérique, le cerveau « *recrute un vaste réseau d'aires cérébrales dont les fonctions n'ont initialement rien de commun avec les mathématiques, mais qui, collectivement, parviennent au but* ».

## Chapitre 3 – LES SYSTEMES DE CODAGE

**Grâce à ses représentations symboliques des nombres, l'homme a pu développer une arithmétique exacte, précise et abstraite traitant de grandeurs discrètes.** En effet, pour percevoir approximativement et variablement des grandeurs de façon continue, il n'est pas besoin de langage (Pica, Lemer et coll., 2004). En revanche, **les symboles sont nécessaires pour le calcul exact.**

Il a de plus été remarqué que la différence quantitative minimale discriminable diminue avec l'âge et l'éducation (Piazza, Facoetti et coll., 2010). Cela signifie que **l'instruction et la maîtrise des codes numériques raffine notre intuition des quantités.**

### I - LES NUMERAUX VERBAUX

La représentation auditivo-verbale est intriquée avec le langage ; ce sont les mots-nombres. Comme le langage, elle présente deux modalités : la modalité orale et la modalité écrite.

Les numéraux verbaux sont soumis à une **syntaxe** particulière qui répond à trois procédés : la composition additive, c'est-à-dire l'ajout d'une valeur à la base, la composition multiplicative, c'est-à-dire la multiplication de la base par une valeur, et enfin la création de nouvelles puissances de la base (Fayol, 2004 ; Mirassou, 2010).

Dans le **lexique** des numéraux verbaux français, quatre catégories peuvent être distinguées : les unités (de « un » à « neuf »), les particuliers (de « onze » à « seize »), les dizaines de « dix » à « soixante », et les opérateurs (« cent », « mille », « million », etc).

Les numéraux verbaux sont donc un codage symbolique à part entière soumis à des règles propres.

#### 1. Histoire

L'implication du langage oral dans l'évolution du concept de nombre est primordiale. La symbolisation des nombres par le langage a permis à l'homme de s'affranchir des contingences matérielles immédiates et des émotions générées par l'environnement afin d'accéder à une réflexion sur les quantités dans l'absolu

(Boysen, Bernston et coll., 1996). Il est ainsi devenu concevable d'évoquer sans autre outil que sa voix une quantité particulière à distance spatiale et temporelle des objets concernés. Un autre apport de la symbolisation des quantités est la possibilité de dénombrer des quantités discrètes et de ne plus se cantonner à l'estimation de quantités continues.

Cependant, toute activité numérique n'est pas issue d'une activité linguistique, loin s'en faut. Le nombre précède la langue et celle-ci en a permis le raffinement. Par exemple, comme nous le verrons plus loin, la comparaison de chiffres est une activité non linguistique – il est inutile de traduire mentalement les chiffres en mots - qui fait appel essentiellement à l'hémisphère droit. De même, l'approximation ne nécessite pas de langage.

## 2. Toutes les langues se valent-elles ?

Les Chinois suivent une régularité parfaite pour exprimer verbalement les nombres. En effet, il existe un mot pour chaque chiffre de « un » (« yi ») à « neuf » (« jiu »), et un mot pour les multiplicateurs « dix », « cent », « mille » et « dix mille ». Avec ces treize noms de nombres, combinés grâce aux règles de multiplication et d'addition, les Chinois peuvent exprimer tous les nombres qu'ils veulent.

Ce n'est toutefois pas le cas pour beaucoup d'autres langues. Tandis que la symbolisation grâce à la notation arabe est régulière, la symbolisation verbale des nombres en français l'est beaucoup moins. Outre le fait que nous possédons beaucoup plus de noms de nombres comme par exemple les particuliers, tel que « treize », et les dizaines tel que « quarante », nous sommes aussi confrontés à des irrégularités surprenantes quant aux règles de formation des mots-nombres. Qui ne s'est jamais étonné de la structure de « quatre-vingt-dix » ou « soixante-dix » ? La régularité respectée par les Chinois voudrait pourtant que nous disions « neuf dix\* » et « sept dix\* ».

Ces différences dans l'appellation des nombres selon les langues créent des inégalités lors de l'apprentissage du comptage chez les enfants, ou lors de la mémorisation de séries de nombres par exemple.

## 3. Inscriptions neuro-anatomiques

De nombreuses études attestent le rôle de l'hémisphère gauche, et en particulier les zones régissant le langage, dans la production et la compréhension des numéraux verbaux. Les **aires péri-sylviennes gauches** sont donc au premier plan.

Néanmoins, il existe un **circuit spécialisé dans la production orale et écrite des nombres**. Ce circuit est relativement indépendant de ceux concernant les autres mots de la langue, tant sur le plan sémantique que phonologique. Des cas de patients produisant un jargon ou une agraphie épargnant uniquement les nombres ont été en effet relevés dans la littérature (Cohen, Verstichel et coll., 1997 ; Anderson, Damasio et coll., 1990).

Certaines classifications des acalculies parlent d'acalculies sous-corticales qui seraient évoquées notamment lorsque les additions simples et les multiplications seraient atteintes. Cela s'explique de la manière suivante : un circuit sous-cortical de l'hémisphère gauche, impliquant les noyaux gris centraux, joue un rôle dans les automatismes verbaux, comme les prières et les faits arithmétiques (multiplications, additions simples ; voir chapitre 5).

## II - LES NUMERAUX ARABES

### 1. Histoire

La notation arabe telle que nous la connaissons est le fruit d'une évolution de plusieurs millénaires et de la sélection des représentations les plus adaptées à notre structure cognitive. **L'objectif principal était de créer une notation la plus claire et la plus concise possible permettant de limiter le coût cognitif et en particulier mnésique lors de la lecture des numéraux.**

La première notation numérique était une **notation par correspondance terme à terme** entre les objets à dénombrer et par exemple une entaille dans un bâton ou un caillou dans un récipient. Cette symbolisation des quantités a permis de passer d'un calcul approximatif à un calcul exact.

Puis le **principe d'addition** a été utilisé, tel qu'on le retrouve avec les chiffres romains ( $XVI = 10 + 5 + 1$ ).

Le **principe multiplicatif** a été ajouté au principe additif afin de diminuer encore la longueur des symboles utilisés. En chinois, la notation étant parfaitement

régulière, la combinaison de ces deux principes ressort très bien : 2342 s'écrit « 2 1000 3 100 4 10 2 » (1000, 100 et 10 possèdent chacun un symbole arbitraire propre), soit  $2 \times 1000 + 3 \times 100 + 4 \times 10 + 2$ .

Enfin le **principe de position** s'est imposé et a révolutionné le calcul numérique car il rend compte des relations d'ordre de grandeur entre les différents chiffres d'un nombre. En effet, dans le nombre « 222 », chaque chiffre « 2 » n'a pas la même valeur. Cette-dernière est déterminée en fonction de la position du chiffre dans le nombre. Dans notre notation arabe, le principe de position repose sur la base 10.

**Ce principe de position a en outre rendu nécessaire l'utilisation du chiffre « 0 ».**

La notation arabe ainsi obtenue, et qui est en réalité une notation indienne, a ainsi permis de grandes avancées dans le domaine des mathématiques (Dehaene, 2010).

## 2. Propriétés

La représentation arabe ne possède qu'une modalité et répond à une organisation visuo-spatiale.

En effet, son système de notation est logographique, c'est-à-dire que les plus petites unités (les chiffres) sont porteuses de sens. Cela n'est pas le cas dans le système verbal alphabétique, car les plus petites unités (les lettres) ne réfèrent pas à un concept significatif.

Ce codage qu'est la notation arabe comporterait un lexique et une syntaxe.

Pour ce qui est de la syntaxe, il s'agit d'un système positionnel de base 10, l'agencement des chiffres les uns par rapport aux autres étant soumis à des règles particulières.

D'un point de vue du codage, le lexique arabe est composé de dix unités : les chiffres de 0 à 9.

D'un point de vue cognitif, le lexique de la représentation arabe concerne les nombres mais n'existerait que pour les numéraux arabes fréquents. En effet, il existe une infinité de nombres issus d'une infinité de combinaisons, chacun ne pouvant avoir une entrée propre. Un mécanisme de segmentation par décomposition et recombinaison syntaxiques permettrait alors de décoder un nombre peu connu. De plus, le lexique arabe ne serait pas en tout point comparable au lexique verbal car il

ne serait pas porteur d'informations très diverses comme peut l'être un mot (Fias & Pesenti, 2004).

### 3. Inscriptions neuro-anatomiques

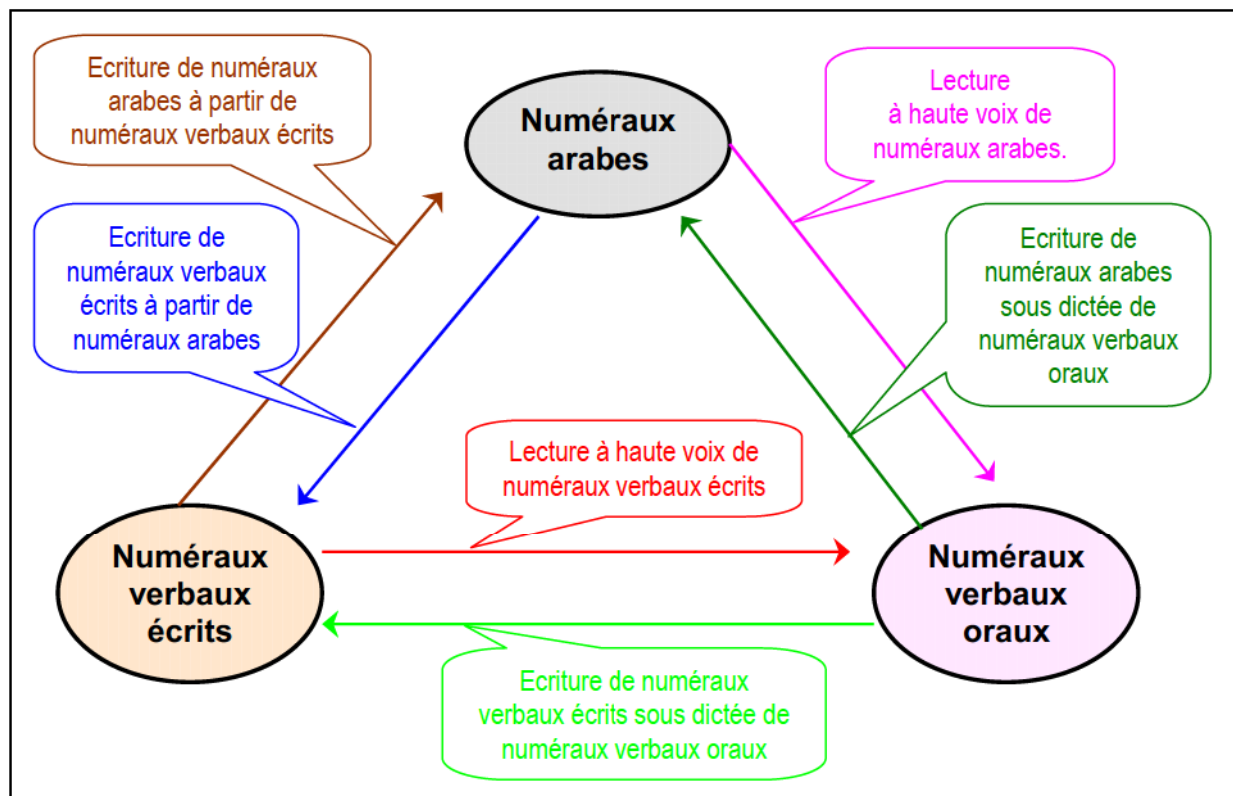
La représentation arabe est activée de façon bilatérale dans les régions ventrales occipito-temporales et plus précisément dans les gyrus fusiformes (Dehaene & Cohen, 1995 ; Cohen , Dehaene et coll., 2000).

## III - LE TRANSCODAGE

**Le transcodage est une opération mentale qui consiste à passer un numéral d'un code à un autre.**

Il s'agit par exemple de transformer le numéral arabe « 12 » en numéral verbal oral [duz] ; c'est dans ce cas ce que l'on appelle la lecture de nombres arabes.

Chaque transcodage correspond à une activité précise, représentée par le schéma ci-après :



**Figure 3 : Les différents types de transcodage**



**Le transcodage, puisqu'il implique toujours les numéraux verbaux, est forcément une activité psycholinguistique.** Cette observation explique le fait qu'une altération du transcodage est souvent en lien avec une aphasie (trouble du langage suite à une lésion cérébrale acquise).

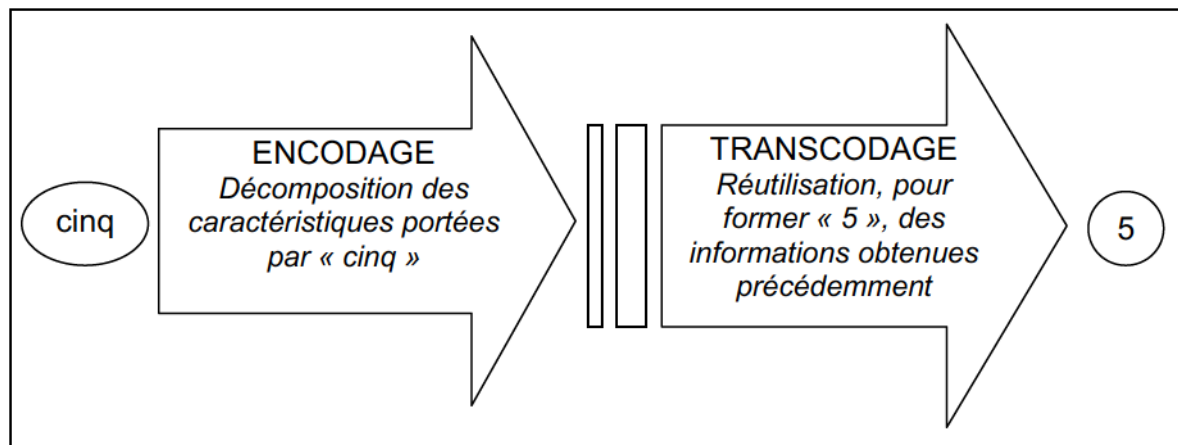
## 1. Modèles de transcodage

### a) Le modèle de **Deloche & Seron**

Lors de l'activité que l'on appelle généralement « transcodage » (partir d'un code pour arriver à un autre), **une distinction est faite dans ce modèle entre l'encodage et le transcodage à proprement parler** (Deloche & Seron, 1987).

L'encodage serait la première étape : la récupération des informations transportées par le numéral d'entrée.

Le transcodage serait la seconde étape : le recodage dans le code voulu grâce aux informations obtenues à l'étape précédente.



**Figure 4 : Le transcodage selon Deloche et Seron**

Pour chaque type de « transcodage », les auteurs énumèrent un certain nombre d'erreurs, qu'ils attribuent pour chacune à une étape particulière (Noël & Seron, 1995).

En effet, **pour Deloche & Seron, les erreurs de transcodage sont celles qui ne peuvent pas être dues à une autre étape que le transcodage**, donc qui ne peuvent pas être dues à un mauvais encodage d'entrée.

Par exemple en tâche de lecture d'un numéral arabe, si « 8003 » est lu « huit mille sept », il s'agit d'une erreur de position dans la classe : Deloche & Seron en déduiront donc que c'est lors de l'étape d'encodage qu'est survenue l'erreur.

Or il est en réalité impossible d'assurer l'origine des erreurs observées, c'est-à-dire certifier qu'elles proviennent de l'étape d'encodage ou de l'étape de transcodage. Dans l'exemple proposé, l'erreur pourrait tout aussi bien s'être produite lors de l'étape de transcodage ou au moment de la sélection du lexique phonologique de sortie.

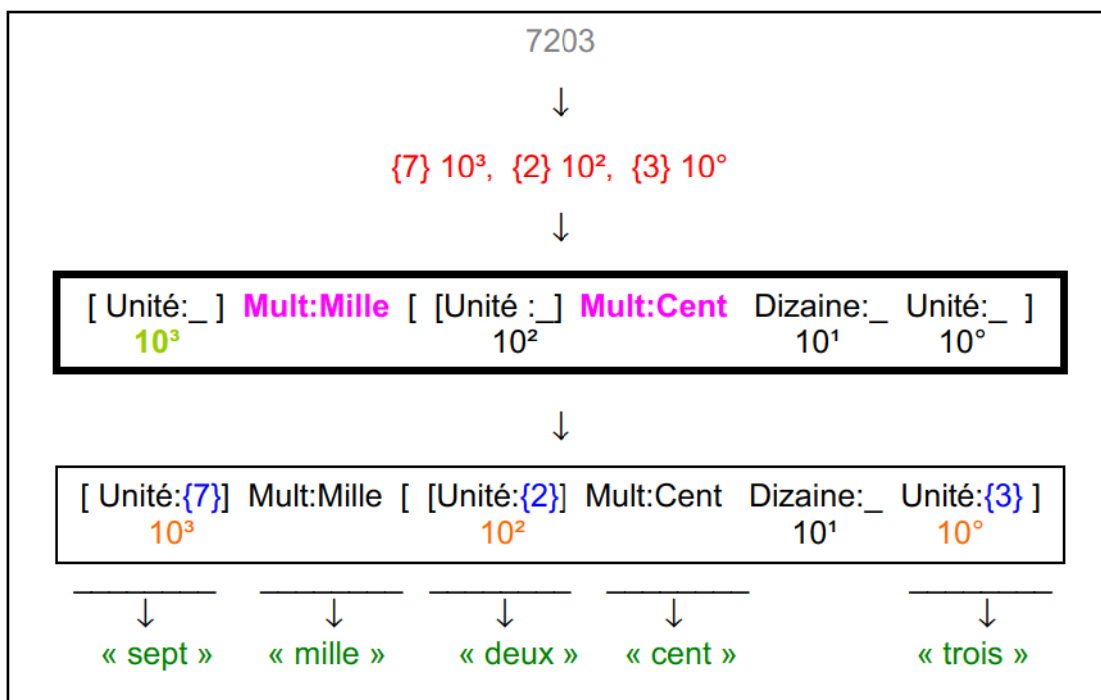
Dans ce modèle enfin, le transcodage n'existe qu'entre les numéraux arabes et les numéraux verbaux, et non entre les numéraux verbaux écrits et les numéraux verbaux oraux, car il s'agit là d'un changement de modalité et non de code.

#### b) Le modèle de **McCloskey**

La principale différence entre le modèle de Deloche & Seron et le modèle de McCloskey (1985 à 1993) est la présence chez ce dernier d'une **représentation abstraite des numéraux**, passage obligé lors de tout transcodage.

En effet, les informations de classe et de position dans la classe sont récupérées à partir du numéral d'entrée afin d'obtenir la **représentation sémantique abstraite correspondante**. Puis cette représentation permet d'obtenir un cadre syntaxique construit en fonction du **plus grand exposant** ainsi que de la **place des multiplicateurs** (mille, cent...). Ce cadre est ensuite rempli avec les **quantités de base**, chacune indiquée par la **position dans la classe**, et selon leur **position dans le cadre**, indiquée par leur **classe**. Enfin, le **lexique** numéral arabe, ou phonologique, ou orthographique approprié est récupéré.

Exemple proposé par Thioux dans *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres* (2000) (les couleurs ont été ajoutées et correspondent à celles du texte explicatif précédent) :



**Figure 5** : Activation et remplissage d'un cadre syntaxique de taille  $10 \times 3$  lors de la production d'un numéral dans le code verbal  
(d'après McCloskey, Sokol et coll., 1990)

Ce modèle stipule donc qu'il y aurait une indépendance des informations de classe et de position dans le lexique phonologique de sortie. Or ce modèle de production des numéraux verbaux n'a pas reçu de validation.

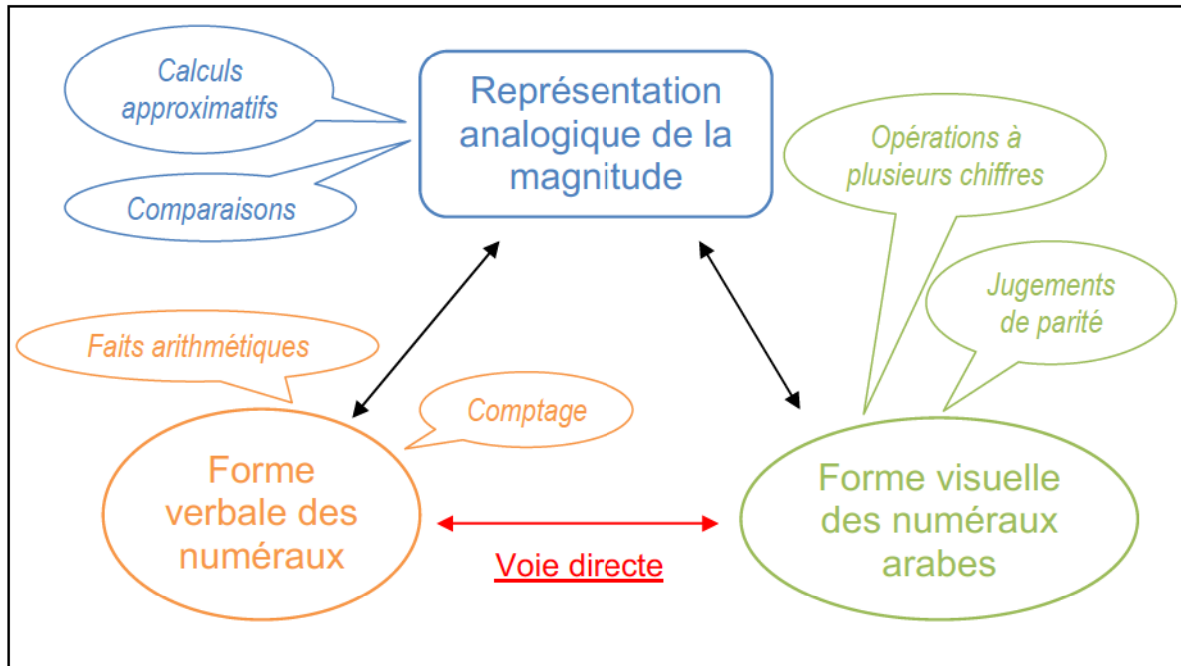
De plus, il dépend largement de l'hypothèse sur la forme des représentations sémantiques. Enfin, la construction d'un cadre syntaxique au cours de la production est supposée. Cependant, des études utilisant en référence cette architecture générale du transcodage et des traitements numériques ont été effectuées: sur treize cas cliniques, dix ont été dits incompatibles avec le modèle de McCloskey.

L'argument principal invalidant le modèle de McCloskey est l'existence observée d'une voie asémantique de transcodage.

### c) Le modèle de Dehaene

Dehaene en créant le modèle du Triple Code a en même temps proposé un nouveau modèle de transcodage (Dehaene & Cohen, 1991).

En effet, en plus de ses trois modules, le modèle du Triple-Code postule l'existence de plusieurs voies de transcodage dont une **voie directe** ne passant pas par une représentation sémantique de la quantité.



**Figure 6 : Présentation simplifiée du modèle du Triple Code pour le traitement des nombres (d'après Dehaene, 1992)**

Il affirme en outre qu'à chaque module correspondent des opérations particulières : la récupération des faits arithmétiques à lieu grâce aux numéraux verbaux, les jugements de parité et les opérations à plusieurs chiffres ne se font qu'avec le code arabe et les comparaisons et les calculs approximatifs ne sont possibles qu'à l'aide de la représentation analogique des quantités. C'est pourquoi Dehaene soutient que **les transcodages sont souvent obligatoires** lors de certaines tâches.

## 2. Le transcodage fait-il appel au sens du nombre ?

La question des voies utilisées pour le transcodage fait encore débat aujourd'hui. Existe-t-il une voie asémantique ? Ou les deux voies, avec et sans

sémantisation, coexistent-elles ? Si c'est le cas : sont-elles toujours activées simultanément, ou en fonction des tâches effectuées ?

Selon les modèles de transcodage conçus et les méthodes d'analyse employées, les avis diffèrent.

**Les modèles de transcodage des numéraux se sont longtemps calqués sur les modèles de voies de lecture de mots** (Cipolotti, 1995). Cependant, les démarches pour montrer une double dissociation entre une voie sémantique et une voie asémantique ne se sont pas avérées similaires. Pourquoi ?

Pour la lecture, il suffit de montrer une dissociation entre la lecture de non-mots et la lecture de mots irréguliers. En revanche, cette double dissociation est plus difficile à trouver pour les numéraux car il n'existe pas de numéraux arabes dépourvus de sens (avec toute combinaison de chiffres, on obtient un numéral acceptable), et il n'existe pas non plus de numéral arabe irrégulier. C'est pourquoi les méthodes utilisées doivent être plus complexes et donc plus à risque d'erreurs et d'interprétations diverses.

Il est à noter que les auteurs parlent parfois de voie « directe » pour parler d'un transcodage ne passant pas par la représentation sémantique abstraite, et de voie « indirecte » pour parler d'un transcodage sémantique.

#### Quels indices penchent en défaveur d'un transcodage asémantique ?

Certains patients cérébrolésés ont commis des erreurs sémantiques lors de tâches de transcodage (Macaruso, McCloskey et coll., 1993).

Même pour des tâches ne nécessitant pas un traitement sémantique, on observe des **effets de taille et de distance** (Dehaene & Akhavein, 1995), on relève aussi un **effet SNARC** (*voir chapitre 4*) (Fias, Brysbaert et coll., 1996 ; Fias, Lauwereyns et coll., 2001) ainsi qu'un **effet d'amorçage** (Brysbaert, 1995).

Selon le modèle de McCloskey, il n'existerait pas de transcodage asémantique, car sur le chemin entre la compréhension d'un nombre et sa production se situerait la représentation sémantique.

#### A l'inverse, quels indices penchent en faveur d'un transcodage asémantique ?

Des cas de patients avec une compréhension verbale préservée et un transcodage aboli ont été observés (Cipolotti, 1995 ; Cipolotti, Warrington et coll., 1995 ; Cohen, Dehaene et coll., 1994 ; Cohen & Dehaene, 1991).

Un **effet de la notation d'entrée sur le mécanisme de sortie** a en outre été constaté : il signifierait qu'il n'y a pas de passage par la représentation amodale (Noël & Seron, 1995).

Selon le modèle du Triple Code, il existerait une voie directe possible entre les numéraux verbaux et les numéraux arabes.

Il est désormais admis que **les deux voies de transcodage existent**. Cependant, tous les auteurs ne s'accordent pas quant aux modalités et aux circonstances d'activation de ces deux voies.

Une hypothèse évoque par exemple le fait que les numéraux arabes auraient un accès privilégié aux représentations sémantiques, contrairement aux numéraux verbaux (Fias, Reynvoet et coll., 2001).

De plus, le modèle du Triple Code ne parle que d'une voie directe lors des transcodages uniquement verbaux car ils s'effectueraient dans le même module et ne transiteraient pas par la représentation analogique. Or il a été montré un lien sémantique lors du passage d'un numéral verbal oral à un numéral verbal écrit (écriture) ou lors de la tâche contraire (lecture), montrant que le sens du nombre serait activé même dans ces cas-là (Reynvoet, Brysbaert et coll., 2002).

Une autre hypothèse stipule qu'il y aurait une primauté de la voie sémantique sur la voie asémantique car cette dernière serait plus lente. Les cas observés de transcodage asémantique s'expliqueraient par une lésion de la voie sémantique. La voie asémantique serait donc une voie de secours, moins performante (Fias & Pesenti, 2004).

En 2010, Dehaene conclut qu'il y a toujours une activation sémantique du nombre. Cependant, cela ne serait pas d'une façon semblable à ce que le modèle de McCloskey laisserait supposer. Dans ce modèle, toute l'information numérique pass**e** par la représentation analogique. Or selon Dehaene, **toute activation d'une représentation symbolique du nombre**, que ce soit pour une activité de transcodage ou non, **activerait automatiquement et simultanément une**

**représentation analogique en plus.** Cela ne serait ni volontaire ni conscient mais inévitable, sauf lésion justement de la représentation analogique.

### 3. Peut-il être utilisé inconsciemment ?

D'après le modèle de Dehaene, **le transcodage est souvent nécessaire et toujours différent selon les opérations mentales.**

Il convient de transcoder vers la représentation analogique pour la comparaison. Elle est une activité non linguistique car il est inutile de traduire les chiffres en mots (Dehaene, Dupoux et coll., 1990). Elle utilise en effet surtout l'hémisphère droit (Dehaene, Tzourio et coll., 1996). Elle active la ligne numérique mental. Il en va de même pour le calcul approximatif qui constitue une estimation. Il est plus facile et plus rapide que le calcul exact et repose sur le sens du nombre (Dehaene & Cohen, 1991).

Il convient de transcoder en numéraux verbaux pour les comptages, qui utilisent le chaîne numérique verbale, et pour les faits arithmétiques (Noël, Fias et coll., 1997).

Il convient de transcoder en numéraux arabes lors des jugements de parité (Dehaene, Bossini et coll., 1993) et des opérations à plusieurs chiffres (Fias & Pesenti, 2004).

Le constat se fait aisément : **nous n'avons généralement pas conscience des transcodages que nous faisons** dans ces cas-là. Nous les effectuons sans même nous en rendre compte car ce processus fait partie des stratégies de calcul automatiquement enclenchées lors de tâches de traitements numériques.

## Chapitre 4 – LE SENS DU NOMBRE

La numérosité n'est pas comprise dans les représentations arabes et verbales : « 6 » ou « six » ou [sis] ne renseignent pas sur la signification quantitative symbolisée par ces signes. Cette signification quantitative est représentée séparément et il faut y accéder pour que les symboles perçus prennent sens.

## I - DE QUOI PARLE-T-ON ?

Ce terme a de nombreuses acceptions et il convient de préciser celle qui est concernée dans le contexte présent.

Il peut évoquer la représentation sémantique de nature encyclopédique, comme par exemple les dates, les heures, les marques commerciales, les départements, les codes téléphoniques (Cohen, Dehaene et coll., 1994 ; Dehaene & Cohen, 1997). Cependant, cette acception ne sera pas traitée dans ce mémoire et **seule la représentation interne de la numérosité** (Seron & Fayol, 2004), **c'est-à-dire la façon dont notre système cognitif rend compte des quantités, sera signifié par le terme de « sens du nombre ».**

## II - LA FONCTION ANALOGIQUE

D'après le dictionnaire Larousse, l'analogique « *se dit de systèmes, dispositifs ou procédés qui représentent, traitent ou transmettent des données sous la forme de variations continues d'une grandeur physique* ». Ce mot provient du grec *analogos* qui signifie « proportionnel ».

La fonction correspondant au sens du nombre représente la numérosité de façon physique car elle est continue et varie proportionnellement aux réalités quantitatives considérées. C'est pourquoi elle est dite « analogique ».

Ce terme est employé par opposition à « numérique » qui désigne les systèmes représentant les grandeurs de façon discontinue, par paliers, à l'aide d'unités discrètes. Les systèmes numériques sont rarement rencontrés dans la nature car les phénomènes qui nous entourent sont quasiment tous continus.

Il sera traité ici de la représentation analogique telle qu'elle est utilisée dans le modèle du Triple Code de Dehaene.

### 1. Données phylogénétiques et ontogénétiques

De nombreuses expériences sur les animaux et en particulier les rats et les singes ont montré chez eux des compétences en ce qui concerne la perception de la numérosité et l'arithmétique (Mechner, 1958 ; Platt & Johnson, 1971; Woodruff & Premack, 1981 ; Church & Meck, 1984 ; Rumbaugh, Savage-Rumbaugh et coll.,



1987 ; Boysen, Bernston et coll., 1996 ; Washburn & Rumbaugh, 1991 ; Matsuzawa, 1985 ; 2009).

Il est donc possible d'appréhender des quantités numériques sans symbole discret (ce que sous-entend pourtant habituellement le terme de « nombre »), d'une façon continue et floue. La principale découverte obtenue par ces études est donc que **le langage n'est pas indispensable pour compter** (Meck & Church, 1983).

D'un point de vue ontogénétique, Piaget considérait qu'il y avait une construction progressive du nombre, conséquence de la maîtrise de processus préalables tels que la conservation, la sération et l'inclusion (Piaget & Szeminska, 1941). Cependant depuis les années 1990, des études chez le bébé ont permis de remarquer **l'existence d'intuitions numériques, un sens du nombre inné** (McGarrigle & Donaldson, 1974 ; Starkey & Cooper, 1980 ; Antell & Keating, 1983 ; Van Loosbroek & Smitsman, 1990 ; Wynn, 1996 ; Izard, Sann et coll., 2009). C'est ce que l'on appelle **les compétences « proto-numériques », qui concernent le concept abstrait et amodal du nombre, et « proto-arithmétiques », qui concernent la manipulation de la numérosité**. Ces compétences ne sont toutefois pas complètes car elles présentent des points d'achoppement possibles. Par exemple, une règle suivie par le jeune enfant est que le nombre est une propriété des ensembles d'objets physiques discrets. Or si on présente cinq fourchettes à un enfant, dont une est cassée en deux, il en comptera six car il ne pourra pas s'empêcher de considérer chaque objet distinct comme une unité (Shipley & Shepperson, 1990).

Sur le plan anatomique, il a été démontré que l'hémisphère droit pariétal est fonctionnel très tôt dans la vie d'un enfant (Cantlon, Brannon et coll., 2006). En effet, dès les premiers mois de vie, une distinction se fait entre les voies du traitement du nombre, dans le cortex pariétal droit, et de la forme, à savoir le cortex visuel ventral gauche (Izard, Dehaene-Lambertz et coll., 2008 ; Izard, Sann et coll., 2009).

Le fait que l'on ait pu tester la notion de nombre chez l'animal et le bébé à leur insu montre qu'il s'agit dans ses aspects les moins élaborés d'une **capacité automatique et inconsciente**.

## 2. Notion de « ligne numérique »

De nombreuses études montrent que le sens du nombre est représenté sous la forme d'une ligne numérique, c'est-à-dire une représentation en une dimension, orientée de gauche à droite par ordre croissant de quantité. Cette ligne numérique mentale serait inscrite dans le cerveau sous la forme d'un alignement de neurones codant pour les quantités. Il s'agit donc d'une représentation très concrète, spatialement organisée et sous-tendue par un substrat neurologique équivalent de part son organisation structurelle.

### Quels sont les preuves que le sens du nombre est représenté sous la forme d'une ligne orientée ?

**La découverte la plus importante, effectuée par Dehaene en 1990, est l'observation d'un « effet SNARC »** qui signifie « Spatial-Numerical Association of Response Code », c'est-à-dire « association spatio-numérique des codes de réponse » (Dehaene, Dupoux et coll., 1990). Il a en effet été observé que les personnes sont significativement plus rapides pour appuyer sur un bouton de réponse lorsque la main utilisée pour cela est celle de droite pour un grand nombre et celle de gauche pour un petit, que le contenu de l'épreuve fasse appel ou non au sens du nombre (Fias, Brysbaert et coll., 1996 ; Fias, Lauwereyns et coll., 2001 ; Hubbard, Piazza et coll., 2005 ; Hubbard, Piazza et coll., 2009). Dehaene en a donc déduit que **la présentation d'un nombre active automatiquement une représentation spatiale numérique orientée de gauche à droite** dans le sens croissant.

Deux propriétés de cet effet inconscient ont été mises en évidence (Dehaene, Bossini et coll., 1993). L'effet SNARC se produit selon le référentiel induit par l'intervalle de nombres utilisé lors de l'épreuve, et non par rapport à une taille absolue des nombres. Il est donc **relatif**. De plus, **c'est le côté de l'espace qui compte et non la main**. En effet, lorsque les mains sont croisées, la main gauche répond plus vite pour les grands nombres et la main droite pour les petits.

Grâce à l'étude de cet effet, il a été remarqué que **l'orientation de la ligne numérique de gauche à droite est due au sens de l'écriture** (Ito & Hatta,

2004 ; Zebian, 2005 ; Shaki & Fischer, 2008). En effet, elle est inversée pour les Iraniens par exemple (Dehaene, Bossini et coll., 1993).

Des expériences ont montré à quel point notre représentation des quantités est en lien avec la notion d'espace et d'orientation gauche – droite : **lorsque nous manipulons des nombres, les aires codant le mouvement des yeux s'activent en adéquation avec la manipulation** (Knops, Thirion et coll., 2009 ; Knops, Viarouge et coll., 2009). Par exemple, l'activation cérébrale indique un codage du mouvement des yeux vers la droite lorsque la personne doit effectuer des additions, et vers la gauche lorsqu'elle doit effectuer des soustractions. Il a même été observé que la direction du regard peut indiquer si la personne pense à un grand ou un petit nombre (Loetscher, Bockisch et coll., 2010). C'est pourquoi il est possible de dire que les mathématiques ne sont pas si abstraites mais ancrées dans des réseaux neuronaux primaires.

Des cas de patients **hémipariétaux** étayaient cette théorie d'une ligne numérique mentale. Il a en effet été observé chez certains d'entre eux une tendance à la **surestimation des quantités** (Zorzi, Priftis et coll., 2002).

Comment cela se fait-il ?

Lorsque le patient présente une lésion droite provoquant une négligence spatiale unilatérale gauche, il néglige le côté gauche de son espace voire de lui-même et est attiré par le côté droit. Il semble que ce soit le même processus qui affecte la ligne numérique : **le patient néglige le côté gauche à savoir les petits nombres et est attiré par le côté droit à savoir les grands nombres**. D'où la surestimation des quantités observée chez ces patients. C'est cela que l'on appelle une acalculie spatiale. On remarque donc que **les notions d'espace et de nombre sont très liées** (Hubbard, Piazza et coll., 2005).

En outre, **la répartition de notre attention dans l'espace est affectée par le simple fait de penser à un nombre**. Une expérience prouve qu'un grand nombre attire notre attention vers la droite et un petit vers la gauche, ce qui rejoint d'une certaine manière l'effet SNARC (Fischer, Castel et coll., 2003).

Il ne semble donc plus faire de doute que la représentation du sens du nombre est concrète et organisée spatialement sous forme d'une ligne orientée de gauche à droite.

### 3. Propriétés de notre représentation des quantités

Dehaene, dans *La bosse des maths*, propose une comparaison afin de comprendre le fonctionnement de notre représentation sémantique de la numérosité. La **métaphore de l'accumulateur** servait initialement d'image au fonctionnement arithmétique des rats. Le principe consiste à imaginer Robinson Crusoe sur son île qui ajoute ou enlève un peu d'eau d'un récipient afin de rendre compte d'ajouts ou de suppressions de quantités observées dans l'environnement, en l'occurrence l'arrivée ou le départ de cannibales. On obtient ainsi une certaine quantité finale, censée correspondre à la quantité-cible de l'environnement.

Ce système d'accumulateur avec une représentation par niveau d'eau est, de même que la représentation des quantités chez l'animal, approximatif, variable, insaisissable et continu. Il est alors impossible de traiter des quantités de façon discrètes et individuelles.

Comme le souligne cette métaphore, **la ligne numérique est une représentation physique analogique et continue**. Le codage des nombres se fait donc sous forme de quantités continues et non discrètes, sur un continuum analogique.

De plus, **la ligne numérique est compressée de façon logarithmique** (Banks & Hill, 1974 ; Shepard, Kilpatrick et coll., 1975 ; Banks & Coleman, 1981 ; Dehaene, 2007b ; Viarouge, Hubbard et coll., 2008).

En effet, « *la ligne numérique est supposée obéir à la loi de Weber, de telle manière que la représentation de quantités de plus en plus grandes devient de plus en plus imprécises* » (Dehaene, Dehaene-Lambertz et coll., 1998).

Il n'y a donc pas de relation linéaire entre le continuum objectif, c'est-à-dire la numérosité, et le continuum subjectif, c'est-à-dire la représentation mentale de la numérosité.

L'étude des réponses aux tâches de comparaisons de nombres, de même que la comparaison de grandeurs naturelles, a permis de déceler deux caractéristiques apportant des indices quant à notre façon de percevoir les nombres (Moyer & Landauer, 1967).

**L'effet de distance** concerne l'écart entre les nombres : plus deux nombres à comparer sont distants l'un de l'autre, plus il est facile de les comparer. Par exemple 3 et 43 sont plus faciles à comparer que 41 et 43.

L'effet de distance a aussi été observé en épreuves de jugements de grandeurs psychophysiques, comme la taille, la longueur, l'intensité lumineuse ou sonore (Fias & Pesenti, 2004). Ces grandeurs étant par nature fondées sur des représentations continues, cela étaye la théorie selon laquelle la représentation sémantique de la numérosité est elle aussi continue.

**L'effet de taille** dépend de la taille absolue des nombres à comparer : plus deux nombres sont grands, plus il faut qu'ils soient distants pour les différencier. Par exemple 3 et 43 sont plus faciles à comparer que 223 et 263, pourtant également distants de quarante unités.

Cela s'explique par le caractère logarithmiquement compressé de la ligne numérique.

### **La ligne numérique est orientée de gauche à droite.**

Comme nous l'avons vu précédemment, cela a été essentiellement démontré par l'observation de l'effet SNARC. Cette orientation est valable aussi bien pour les gauchers que les droitiers, mais s'inverse pour les personnes dont le sens de l'écriture est de droite à gauche (Dehaene, Bossini et coll., 1993).

### **La représentation sémantique du nombre est indépendante des notations et des modalités sensorielles.**

Les numéraux arabes, verbaux écrits et verbaux oraux, ainsi que les modalités auditive ou visuelle donnent accès à la même ligne numérique, à savoir une représentation unique, abstraite et amodale (Fias & Pesenti, 2004).

La représentation des quantités peut être activée de manière **non consciente**, c'est pourquoi on parle parfois de **gestion implicite de la quantité**.

Des cas de patients appuyant cette théorie ont été observés. Ils présentent un déficit des codes symboliques et n'accèdent pas à une représentation consciente

des données numériques présentées. Ils peuvent en revanche réaliser simultanément les tâches non verbales demandées (Cohen, Verstichel et coll., 1997). Par exemple, il a été relevé le cas d'un patient dont la lecture à haute voix de numéraux arabes était en partie erronée - il lisait par exemple [trentset] et [soisantis] pour « 97 » et « 70 » - mais désignait correctement le plus grand nombre.

De plus, comme nous l'avons vu, il a été démontré que la représentation sémantique est activée même lors de tâches ne nécessitant pas son utilisation, et ce indépendamment de la volonté et de la conscience des sujets testés (Naccache & Dehaene, 2001a ; 2001b).

### Quelle est l'étendue de la ligne numérique ?

Elle est inconnue. Les nombres au-delà de deux chiffres seraient décomposés en éléments syntaxiques, voire comparés chiffre par chiffre. La question reste encore à l'étude et n'est pas résolue.

### Le cerveau traite-t-il les nombres comme le fait un ordinateur ?

La tendance est de **comparer le cerveau à un ordinateur**, tant du point de vue des processus impliqués que du déterminisme de son fonctionnement.

Cette théorie concerne l'ensemble des champs cognitifs, y compris la linguistique avec à sa tête Chomsky. Selon ce dernier, la grammaire est un mécanisme, un programme, un automate qui calcule l'ordre des symboles à partir de règles et est assimilable au logiciel d'un ordinateur (Chomsky, 1956).

Si le langage est assimilé à un ensemble d'algorithmes, combien plus le traitement des mathématiques l'est aussi ?

L'ordinateur répond à un codage **numérique** binaire grâce à des unités **discrètes**. Il obéit à des processus sériels **exacts**.

Or il a été démontré que le cerveau est un dispositif **analogique** avec une représentation quantitative **continue**. Il effectue une reconnaissance **approximative** de la numérosité, sans symbole discret.

C'est pourquoi Randy Gallistel déclare en 1990: « *En fait, le système nerveux inverse la convention représentationnelle selon laquelle les nombres sont utilisés pour représenter des grandeurs linéaires. Au lieu d'utiliser des nombres pour représenter des grandeurs, le rat [et l'homme] utilise des grandeurs pour représenter les nombres* ». La logique, tel que ce terme est utilisé en électronique à savoir le codage numérique (JMB, 2013), et le calcul exact sont donc des propriétés dérivées de la nature du cerveau.

Il n'y a pas que dans le domaine de la cognition numérique que le cerveau n'est pas comparable à un ordinateur. D'une façon générale, son fonctionnement est éloigné d'une machine automatique et logiquement prévisible.

En effet, il ne faut pas oublier que le cerveau attribue du **sens** et crée des images mentales lorsqu'il traite des données.

De plus, l'**influence des émotions** sur les performances a été démontrée à maintes reprises (Damasio, 1994).

Sur le plan ontogénétique, on sait que le cerveau fonctionne en apprenant par **essais-erreurs** et en s'adaptant constamment. Or l'ordinateur de son côté applique des programmes à la lettre et ne peut commettre des erreurs. Il peut produire des résultats manifestement faux, non parce qu'il est faillible, mais parce que l'ingénieur qui l'a programmé s'est trompé ou parce que le technicien qui l'a construit a fauté lors de l'assemblage.

Enfin sur le plan phylogénétique, l'idée d'un organe parfait ne cadre pas avec la théorie de l'**évolution** (Notari, 2010).

Cette métaphore du cerveau-ordinateur est donc inexacte voire opposée dans nombre de ses aspects aux fonctionnements cognitif et cérébral.

### III - INSCRIPTIONS NEURO-ANATOMIQUES

#### 1. Localisation cérébrale générale

Le calcul et le traitement des nombres mobilisent un nombre important de fonctions, et par conséquent de régions cérébrales, non spécifiques à cela.

Les informations numériques sont surtout présentées visuellement, auditivement ou tactilement. Une étape de détection des informations selon leur modalité active les aires sensorielles correspondantes.

Puis ces informations se retrouvent toutes dans le **cortex pariétal** inférieur au niveau de l'aire amodale associative de la numérosité, à savoir le **gyrus angulaire** ou « aire d'association des aires d'association » selon Geschwind (Geschwind & Galaburda, 1985). Il s'agit de la zone de convergence entre les aires sensorielles de la vue, de l'ouïe et du toucher, c'est pourquoi elle est dite associative et semble de ce fait adaptée au traitement de la numérosité (Simon, Mangin et coll., 2002 ; Fias, Lammertyn et coll., 2003 ; Piazza, Pinel et coll., 2007 ; Dehaene, 2010).

Puis le **cortex préfrontal** est activé pour maintenir les informations en mémoire de travail.

Le cortex préfrontal est aussi une région de connexion entre différentes régions corticales. C'est pourquoi son rôle chez l'enfant dans l'avènement du code symbolique arabe est important : il est le premier à faire le lien entre le numéral arabe et la quantité correspondante (Ansari, Garcia et coll., 2005 ; Ansari & Dhital, 2006 ; Kaufmann, Koppelstaetter et coll., 2006). Il est donc le lieu de la prise de conscience. Lorsque le lien est automatisé, les activations se produisent dans le cortex pariétal (Rivera, Reiss et coll., 2005 ; Kucian, Von Aster et coll., 2008).

En outre, en cas de détection de numéraux verbaux, les **zones du langage** sont activées en plus.

Il ressort donc une **multiplicité des activations neuronales lors des tâches de calcul ou de traitement du nombre**. Cependant, une région semble correspondre spécifiquement à la perception de la numérosité : les gyrus angulaires ou plutôt **la partie horizontale des sillons intrapariétaux bilatéraux** (Dehaene, Tzourio et coll., 1996 ; Chochon, Cohen et coll., 1999 ; Rickard, Romero et coll., 2000).

## 2. Le sillon intrapariétal est-il spécifique au traitement du nombre ?

Il est important mais difficile de différencier les zones spécifiques au calcul et les zones utilisées pour le calcul mais relevant de l'attention, du langage, de la



mémoire de travail... Il a été toutefois remarqué que le sillon intrapariétal est le résultat le plus robuste pour le calcul et la représentation de la quantité numérique (Dehaene, Spelke et coll., 1999 ; Cohen, Dehaene et coll., 2000 ; Pinel, Dehaene et coll., 2001 ; Delazer, Domahs et coll., 2003).

Cela signifie-t-il pour autant que son implication est spécifiquement numérique ?

Trois hypothèses tentent de répondre à cette question (Zago & Pesenti, 2004).

La première stipule qu'il s'agit bien d'une **zone spécifique et dédiée de façon innée au traitement des magnitudes numériques**.

La seconde soutient qu'il s'agit d'une **dérivation des traitements visuo-spatiaux proches**. En effet, les zones dédiées à l'analyse de l'espace se trouvent dans le cortex pariétal à proximité et cela expliquerait l'orientation gauche-droite de la ligne numérique mentale (Walsh, 2003 ; Pinel, Piazza et coll., 2004 ; Hubbard, Piazza, 2005 ; Tudusciuc & Nieder, 2007 ; Hubbard, Piazza, 2009). De plus, il a été montré que les mouvements oculaires sont influencés par les manipulations numériques mentales (Knops, Thirion et coll., 2009 ; Knops, Viarouge et coll., 2009). Le sillon intrapariétal est d'ailleurs ainsi organisé : sa partie postérieure est dédiée au déplacement du regard, sa partie antérieure est dédiée quant à elle à la préhension des objets (Simon, Mangin et coll., 2002 ; Simon, Kherif et coll., 2004). Enfin, sa partie centrale, horizontale, serait dédiée au sens du nombre.

La dernière hypothèse explique que **le substrat numérique adulte repose sur une région qui servait dans l'enfance à la coordination manuelle motrice du comptage sur les doigts**.

Plusieurs arguments vont dans ce sens.

D'une part, tous les enfants de tous les pays apprennent à compter sur les doigts ; il s'agit donc d'une caractéristique universelle qui semble favoriser le développement des capacités numériques.

De plus, Gerstmann met en évidence en 1930 un syndrome, appelé à posteriori « **Syndrome de Gerstmann** », constitué de quatre symptômes : une agnosie digitale, une agraphie, une désorientation droite-gauche et une acalculie. Un

déficit commun du schéma corporel limité à la main et causé par une lésion focale du gyrus angulaire de l'hémisphère dominant expliquerait selon lui ce syndrome (1940). Cependant, de nombreux auteurs ne partagent pas ce point de vue (Benton, 1987). Certains expliquent que ce syndrome a pour origine un déficit visuo-spatial ou linguistique. D'autres remettent en cause l'existence même de ce syndrome : ils avancent le fait que ces quatre fonctions sont distinctes mais dépendantes de régions cérébrales contiguës et que l'association fréquente des quatre symptômes ne constituerait pas un syndrome mais une coïncidence. Le syndrome de Gerstmann n'est donc pas forcément un argument en faveur de la dernière hypothèse.

De toute façon, quelle que soit l'origine phylogénétique et ontogénétique du substrat neurologique de notre sens du nombre, il semble claire que *« nous ne calculons jamais vraiment « dans l'abstrait ». Pour faire des mathématiques, nous nous reposons sur des réseaux neuronaux qui nous servent également à guider nos mains et nos yeux dans l'espace – des circuits présents depuis des millions d'années dans le cerveau de tous les primates et qui n'ont certainement pas évolué pour les mathématiques, mais que nous parvenons à réutiliser dans ce but »* (Dehaene, 2010). **La fonction de la partie horizontale du sillon intrapariétal serait donc le résultat d'un recyclage de réseaux neuronaux non spécifiques aux mathématiques.**

### 3. Les experts en calcul complexe : accélération ou réorganisation ?

Certaines personnes parviennent à réaliser des calculs complexes avec une rapidité hors du commun et un nombre d'erreurs extrêmement faible.

Ces résultats s'obtiennent-ils grâce à une accélération des procédures de résolution ou grâce à une modification des réseaux neuronaux ?

Parmi ces calculateurs aux performances à peine croyables, on trouve des savants de renom, mais aussi par exemple des personnes souffrant d'autisme. Ce sont ceux que l'on appelle les **« calculateurs prodiges »**. On remarque chez eux une augmentation de l'activité du cortex préfrontal et médio-temporale de l'hémisphère droit (Pesenti, Zago et coll., 2001) lors du calcul complexe. Or ce sont les régions dédiées à la mémoire à long terme. Ces personnes parviennent donc à

résoudre très rapidement et sans erreurs des opérations difficiles car **elles ont emmagasiné les résultats en mémoire épisodique** et n'ont plus qu'à les récupérer grâce à la mémoire de travail à long terme et à l'application d'algorithmes de résolution automatisés.

D'autres personnes ont acquis de très bonnes capacités arithmétiques grâce à un **apprentissage du calcul sur abaque**. Cet enseignement est principalement observé en Asie, en particulier en Chine ou au Japon, mais il mériterait d'être appliqué en Occident tant son efficacité a fait ses preuves.

Il a été observé chez ces personnes ayant acquis une expertise en calcul mental une augmentation de l'activation du sillon intrapariétal ainsi que des aires visuo-spatiales. L'activation reste principalement dans le sillon intrapariétal gauche pour les petits nombres, mais s'étend à celui de l'hémisphère droit pour les grands nombres. Le calcul mental de ces personnes repose donc, comme ils le signalent eux-mêmes, sur **une représentation et une manipulation mentale de l'abaque**. Le sens du nombre est donc très sollicité, d'où l'importante activation du sillon intrapariétal.

#### 4. Les neurones des nombres

Comme il a été précisé précédemment, le sens du nombre se situe dans la part horizontale du sillon intrapariétal, appelée **région hIPS** pour *horizontal segment of the IntraParietal Sulcus*, c'est-à-dire le **segment horizontal du sillon intrapariétal** (Chochon, Cohen et coll., 1999 ; Dehaene, Piazza et coll., 2003 ; Eger, Sterzer et coll., 2003). Il ne s'agit pas d'une région sensorielle, bien au contraire : c'est une **région amodale**. En effet, l'activité de hIPS ne varie pas selon la modalité de présentation des nombres, mais augmente avec la complexité de la tâche en terme de quantité, d'effets de taille et de distance (Pinel, Dehaene et coll., 2001). Cela correspond bien aux caractéristiques cliniques du module du sens du nombre.

Il a été montré que **la région hIPS est spécifique à la quantité** - et ne concerne donc pas les échelles de degré comme la férocité - **mais pas au nombre** - donc concerne des quantités continues comme la longueur, la position spatiale, la durée ou la luminosité (Cappelletti, Butterworth et coll., 2001 ; Lemer, Dehaene et coll., 2003).

Des études chez le **singe macaque** ont permis de mettre en évidence des **neurones des nombres** (Nieder, Freedman et coll., 2002 ; Sawamura, Shima et coll., 2002 ; Nieder & Miller, 2003 ; 2004 ; Nieder, 2005 ; Nieder & Dehaene, 2009), et même d'en distinguer deux types.

Des groupes de **neurones de l'aire VIP**, l'aire ventrale intrapariétale au fond du sillon intrapariétal, déchargeraient chacun préférentiellement pour un nombre particulier. La décharge des neurones d'un nombre se produirait selon une courbe de Gauss, soit en suivant une large courbe en cloche, donc de façon **très sensible et peu spécifique**. Cette dernière caractéristique s'accroît avec les quantités considérées, ce qui rejoint la notion de ligne numérique logarithmiquement compressée. Ils s'activent face à un ensemble concret d'objets et permettent une **approximation** de leur quantité (Dehaene, 2006 ; 2007b ; Pearson, Roitman et coll., 2010).

Il existe en outre les **neurones de l'aire LIP**, l'aire latérale intrapariétale en arrière de l'aire VIP (Roitman, Brannon et coll., 2007). Ceux-ci déchargent selon une courbe monotone : **l'activation augmente ou diminue** (selon le groupe de neurones) **régulièrement en fonction de la taille du nombre**.

Quelle est la raison d'être de ces différents codes neuronaux ?

Les neurones de l'aire LIP fonctionnent comme des accumulateurs et fournissent une représentation monotone et approximative du nombre.

Les neurones de l'aire VIP sont soumis en revanche à des seuils d'activation et fonctionnent comme des détecteurs numériques avec un nombre préféré.

Cependant, les neurones du nombre n'ont été observés pour le moment que chez l'animal et pas chez l'homme pour des raisons éthiques de méthode.

Dehaene explique pourtant en 2008 dans un cours destiné au Collège de France qu'« *il est bien possible que la région VIP du singe macaque soit le précurseur de la région hIPS activée pendant l'arithmétique mentale dans l'espèce humaine. Toutefois, affirmer une homologie précise reste difficile dans l'état actuel des connaissances* ».

Il est possible d'extrapoler l'existence de deux groupes de neurones similaires à ceux du singe chez l'être humain à partir des études des comportements.

Face à un **ensemble concret d'objets**, l'être humain effectue une **approximation**, ce qui correspondrait à l'activation des **groupes de neurones avec une large courbe en cloche**. Cela évoque les capacités quantitatives élémentaires indépendantes du langage.

Face à un **symbole numérique** ou un mot, la **précision** est de mise et cela correspondrait à l'activation d'un **sous-groupe de neurones avec une courbe pointue**, donc très spécifique et peu sensible. On constate donc l'influence de la symbolisation des quantités sur la perception de celles-ci. C'est pourquoi l'exactitude et la précision, suite au raffinement arithmétique dû aux symboles, ne serait observé que chez les neurones pariétaux de l'**hémisphère gauche**. Le langage aurait donc permis le développement de systèmes cérébraux aptes à effectuer des calculs exacts.

Ces différentes études anatomiques chez l'animal et chez l'humain confirment les analyses cliniques qui ont permis d'élaborer un modèle du sens du nombre.

#### IV - LES TROIS PROCESSUS DE QUANTIFICATION

Il n'existe que trois manières d'**extraire de la numérosité** à partir d'un ensemble d'éléments concrets et discrets de l'environnement.

##### 1. La subitisation

La subitisation est un processus **exact**.

C'est une **reconnaissance visuelle** non instantanée mais très furtive qui permet de dénombrer dans comptage. Elle est valable pour **un, deux ou trois** éléments mais pas plus. Au-delà, il est nécessaire de compter pour dénombrer. En effet, il a été observé qu'à partir de quatre unités, le temps pour extraire de la numérosité augmente régulièrement avec la quantité et correspond donc à l'ajout d'un élément par un (Mandler & Shebo, 1982).

Cette subitisation pour un, deux et trois ne serait pas le fruit de l'accumulateur, approximatif, qui ne distinguerait précisément que ces trois petites quantités, mais d'un **processus distinct** et précis dédié spécifiquement à ces trois nombres (Revkin, Piazza et coll., 2008 ; Hyde & Spelke, 2009).

## 2. L'estimation

L'estimation est un processus **approximatif**.

C'est la **quantification d'un « ensemble d'éléments sans recourir à la mise en correspondance terme à terme des items avec la séquence verbale des noms de nombre »** (Piazza, 2004).

Elle répond à la loi de Weber car plus la quantité est importante, plus l'estimation est imprécise, et est soumise aux effets de taille et de distance. Elle est donc très liée au modèle de l'accumulateur et donc au sens du nombre.

Il existe donc de façon innée deux processus de quantification : un système d'approximation valable pour tous les nombres, toutes les quantités ; et un système exact pour les petits nombres et qui se caractérise par un zoom sur les numérosités un, deux et trois (Feigenson, Carey et coll., 2002 ; Feigenson, Dehaene et coll., 2004).

## 3. Le comptage

Le comptage est un processus **exact**.

Il apparaît avec l'acquisition du langage et l'apprentissage en particulier de la comptine numérique.

C'est la **correspondance terme à terme de chaque élément avec un nom de nombre** de la chaîne numérique verbale.

Il s'agit d'une opération complexe car elle doit pour être valide respecter plusieurs critères. Il doit y avoir d'une part une stricte correspondance terme à terme entre les items et les noms de nombre, sans répétition ni omission. D'autre part les noms de nombres doivent respecter l'ordre conventionnel. Enfin le dernier nom de nombre prononcé représente la numérosité de l'ensemble.

## Chapitre 5 – LES ACTIVITES NUMERIQUES ESSENTIELLES

A quoi sert le nombre ? Comment l'utilise-t-on ? Il existe trois grands ensembles d'activités numériques mentales qui regroupent à peu près toutes les utilisations que nous avons du nombre. Elles se distinguent chacune par plusieurs aspects : leurs avantages et leurs inconvénients, leur contexte d'utilisation et les régions cérébrales sollicitées.

### I - LE TRAITEMENT DE LA MAGNITUDE

On distingue le traitement du nombre qui permet une **représentation de la numérosité**, et l'arithmétique qui consiste à manipuler de la numérosité. Le traitement du nombre sollicite donc beaucoup le **sens du nombre** et par conséquent la ligne numérique mentale située dans la **région HIPS**.

Différentes tâches peuvent être effectuées grâce au traitement de la magnitude.

La **comparaison** de nombres se réfère directement au code analogique. Des études déjà évoquées dans ce mémoire ont montré une influence des propriétés de la ligne numérique lors des tâches de comparaison : on retrouve des effets de taille et de distance, ainsi qu'un effet SNARC, et ce indépendamment des notations et des modalités sensorielles de présentation des nombres. De plus, les comparaisons peuvent être effectuées de manières inconscientes. Tout ceci rappelle bien la ligne numérique qui est analogique, amodale, compressée de façon logarithmique, orientée dans l'espace et ne nécessite pas d'activation consciente.

D'autres tâches font appel au traitement de la magnitude : le **jugement de proximité numérique**, le **calcul approximatif**, le **positionnement de nombres sur une échelle**, la **bissection d'intervalles** et évidemment la **quantification**. Cette dernière s'effectue par le biais de trois processus vus au chapitre précédent : la subitisation, l'estimation et le comptage.

Toutes ces tâches de traitement de la magnitude sont résolues **rapidement** et pour certaines de façon presque automatique. La personne qui est soumise à ce

genre d'activité a rarement l'impression de fournir un effort considérable, sauf en cas de pathologie. Cela montre l'efficacité de l'activation de la ligne numérique mentale, mais cela cache en même temps la complexité des processus sous-jacents.

## II - LA RECUPERATION DE FAITS ARITHMETIQUES

### 1. Que sont les faits arithmétiques ?

D'après Lemer, les faits arithmétiques « *sont les **problèmes arithmétiques simples dont la résolution ne requiert pas réellement de calcul car ils ont été mémorisés durant l'enfance et sont stockés en mémoire à long terme sous forme de connaissances déclaratives dans des réseaux sémantiques** » (2004).*

A l'opposé, on parle de calculs complexes, qui nécessitent de recourir à des algorithmes de calcul pour être résolus.

La distinction entre les deux n'est pas toujours évidente car elle **varie d'un individu à l'autre** : tout le monde par exemple ne connaît pas ses tables de multiplication par cœur. De plus, certaines personnes ont des stratégies de calcul tellement rapides que l'on peut les confondre avec de la récupération de faits arithmétiques en mémoire à long terme.

Les faits arithmétiques concernent les **opérations simples effectuées mentalement sur une paire de chiffres** (Delazer, 2000) : les additions, multiplications, soustractions parfois, et pour certains les divisions simples, dont le résultat ne nécessite aucune stratégie de calcul.

Il s'agit donc d'un **processus rapide et automatique** non maîtrisé par la personne. Il a été en effet démontré que nous additionnons systématiquement et inconsciemment deux nombres qui nous sont présentés si le résultat est en mémoire (Lefevre, Bisanz et coll., 1988 ; Lemaire, Barrett et coll., 1994).

### 2. Aspects neuropsychologiques

Les faits arithmétiques seraient stockés en **mémoire déclarative**.

Plusieurs hypothèses divergent sur la nature de ce stockage : certains pensent qu'ils seraient stockés dans un format abstrait (McCloskey, 1992), d'autres



stipulent que les formats de stockage seraient nombreux et leur activation varierait selon la notation utilisée (Campbell & Clark, 1992).

Enfin certains pensent que les faits arithmétiques relèvent de processus verbaux : ils seraient stockés sous la forme de **suites automatiques** apprises par cœur, au même titre que les comptines, les jours de la semaine ou la chaîne numérique verbale. C'est donc la **mémoire d'association** qui serait sollicitée (Dehaene & Cohen, 1997).

Cela explique pourquoi les enfants ont tant de difficultés à retenir les tables de multiplications. En effet, la mémoire associative est la mémoire qui fonctionne par liens, c'est-à-dire par activations de proche en proche. Or ce sont toujours les mêmes chiffres qui reviennent lorsque nous apprenons les tables de multiplications, ce qui crée des liens attractifs entre elles et provoque des confusions (Ashcraft, 1992 ; Campbell, 2004).

Beaucoup d'auteurs affirment en outre que la récupération des faits arithmétiques passe par le module des **numéraux verbaux** et inclut donc souvent un **transcodage** préalable vers ce code (Noël, Fias et coll., 1997).

Cependant, des études de cas uniques ont montré qu'il existe parfois une **dissociation** entre les capacités de récupération des **faits arithmétiques** et le **langage** : certains patients ayant subi un accident vasculaire cérébral (AVC) souffrent d'importants troubles langagiers tandis que les faits arithmétiques sont préservés (Rossor, Warrington et coll., 1995). L'inverse a aussi été observé (Warrington, 1982).

Il apparaît donc que le lien entre le langage et faits arithmétiques, s'il est présent, n'est pas prégnant.

### 3. Aspects neuro-anatomiques

Le **sillon intrapariétal**, siège du code analogique, est activé surtout dans l'hémisphère **gauche** (Chochon, Cohen et coll., 1999).

Le **cortex frontal** est sollicité dans des régions dédiées à la **mémoire** de travail et la mémoire à long terme (Rickard, Romero et coll., 2000 ; Gruber, Indefrey et coll., 2001).

Les **suites apprises par cœur** constituent des mécanismes automatisés utilisant des **réseaux sous-corticaux** : la récupération de faits arithmétiques active les ganglions de la base et les noyaux thalamiques (Fias & Pesenti, 2004).

En revanche des chercheurs ont découvert avec étonnement que **les aires périsylviennes du langage, à savoir Broca et Wernicke, sont désactivées** (Dehaene, Tzourio et coll., 1996 ; Zago, Pesenti et coll., 2001).

Ces observations anatomiques confirment l'implication du sens du nombre lors de toute activité numérique. Elles confirment aussi la théorie stipulant que **les faits arithmétiques sont récupérés en mémoire à long terme par des processus automatisés. D'où l'intervention du cortex frontal et des circuits sous-corticaux.** Enfin, la surprise vient du fait que les zones du langage ne sont aucunement sollicitées, voire même désactivées, ce qui **infirme l'idée d'une médiation verbale nécessaire pour la récupération des faits arithmétiques.**

### III - LE CALCUL MENTAL

#### 1. Qu'est-ce que le calcul mental ?

Le mot calcul vient du latin et signifie « petit caillou » : cela renvoie aux calculs primitifs utilisant des cailloux plutôt que des symboles arbitraires pour représenter des quantités. Il apparaît donc dès le début la notion d'**exactitude** mais aussi de **lenteur**.

On parle de **calcul** ou d'**arithmétique** lorsqu'il y a **manipulation de la numérosité**. Cela se produit pour les **opérations sur plusieurs nombres**, qui nécessitent des **stratégies** de résolution. Il ne s'agit donc plus ici ni de traitement de la numérosité, ni de récupération de résultats en mémoire à long terme. Le sens du nombre est sollicité pour être travaillé.

Le calcul mental consiste à effectuer une opération ou un ensemble d'opérations sans support extérieur.

#### 2. Aspects neuropsychologiques

Le calcul mental implique un accès aux **représentations sémantiques du nombre et des opérateurs** utilisés. En effet, une approximation de tout calcul est automatiquement effectuée par notre cerveau sans que nous en ayons conscience (LeFevre, Bisanz et coll., 1988). On ne sait pas encore à ce jour si le calcul exact, dont il est question dans ce chapitre, et le calcul approximatif sont réalisés parallèlement ou en alternance.

Il nécessite aussi l'utilisation de la **mémoire à long terme** pour la récupération des procédures de calcul ou stratégies.

Enfin, l'importance de la **mémoire de travail** lors de tâches de calculs mentaux ne doit pas être négligée (Takayama, Sugishita et coll., 1994). Toutefois, le type de mémoire de travail utilisé ne fait pas consensus : certains penchent pour la mémoire de travail **verbale** (Dehaene, Spelke et coll., 1999) tandis que d'autres optent pour la mémoire de travail **visuo-spatiale** (Butterworth, Cipolotti et coll., 1996; Zago & Tzourio-Mazoyer, 2002). La première serait utilisée pour le maintien des résultats intermédiaires, tandis que la seconde serait utilisée pour le maintien des retenues.

### 3. Aspects neuro-anatomiques

Une zone cérébrale pour les approximations a été découverte : la région HIPS. En revanche, **il n'existe pas d'organe cérébral prédisposé au calcul**. Une suppléance de l'ensemble du cerveau s'avère donc nécessaire et provoque des erreurs et un ralentissement. Le calcul mental complexe exact mobilise en effet de nombreuses régions cérébrales dédiées à des fonctions non spécifiques au calcul. En outre, les réseaux impliqués sont plus ou moins étendus selon la complexité du calcul à effectuer.

Une activation des **aires pariétales** est bien sûr systématiquement retrouvée, en particulier le sillon intrapariétal (Dehaene & Cohen, 1991).

En fonction du code utilisé, les **aires du langage** peuvent être sollicitées (Dehane, Spelke et coll., 1999).

Les **régions dédiées à la mémoire de travail visuo-spatiale** sont activées de façon récurrente, ce qui renforce les théories évoquant l'importance de l'imagerie mentale visuelle lors de tout calcul mental. Ces régions sont le sillon frontal

supérieur, le gyrus supra-marginal et la jonction occipito-temporale bilatérale (Zago, Pesenti et coll., 2001).

De nombreuses zones corticales sont donc utilisées lors d'une tâche de calcul mental. Quelle région orchestre toutes ces activations ?

Le **cortex préfrontal** et le cortex cingulaire antérieur (Zago, Turbelin et coll., 2008) servent de substrat neurologique à ce que l'on appelle l'administrateur central des fonctions cognitives supérieures.

Ce dernier permet la **supervision des comportements non automatiques** grâce à des processus de planification, de vérification, de décision... Il provoque la prise de conscience chez l'enfant de certaines relations entre symbole et quantité par exemple, ou l'application et l'amélioration de stratégies de calcul. Il est la partie du cerveau la plus développée dans l'espèce humaine. Cette région n'est aucunement spécifique au calcul mais permet l'organisation des différentes étapes nécessaires à la résolution de tâches arithmétiques.

#### IV - AUTRES MODES D'UTILISATION DU NOMBRE

Les **jugements de parité** reposent sur le code arabe.

Les **transcodages** sont un outil au service d'activités numériques diverses.

Les **calculs posés** ont été très peu étudiés dans la littérature pour le moment.

Les **problèmes** sont une forme particulière d'activité numérique car ils font beaucoup appel à la compréhension du langage et du rôle des opérations. Il n'existe pas de circuit cérébral spécifique pour les mathématiques mais de nombreux réseaux plus ou moins indépendants et automatisés. Ceux-ci ne sont pas toujours coordonnés de façon harmonieuse et en lien avec les intuitions numériques. C'est pourquoi l'erreur de répondre sans comprendre est retrouvée fréquemment chez les enfants qui découvrent ce type de tâche et même parfois chez les adultes. Stella Baruk en 1973 donne l'exemple du problème suivant posé à des enfants de CM1 et de CM2 : « *Sur un bateau, il y a douze moutons et treize chèvres. Quel est l'âge du capitaine ?* ». De nombreux élèves ont répondu «  $12 + 13 = 25$  ans ».

## Chapitre 6 - UNE METHODE D'ANALYSE DES REPRESENTATIONS NUMERIQUES : L'ECAN

Du point de vue de la recherche, diverses approches méthodologiques existent afin d'étudier le fonctionnement cérébral. Les études de cas uniques sont les plus prisées car elles font ressortir des dissociations révélatrices de structurations cérébrales notables. Les études par groupes à partir d'hypothèses fortes permettent par exemple de vérifier à grande échelle la validité des dissociations observées lors des études de cas uniques. C'est cette dernière méthode qui sera utilisée dans le cadre de ce mémoire.

Pour ce faire, un bilan de calcul est utile. Or les capacités numériques étant imbriquées avec de nombreuses autres capacités comme le langage, la mémoire, l'attention ou les fonctions exécutives, il est difficile d'élaborer des tests qui ciblent spécifiquement ce domaine. Cependant, des batteries cliniques ont été créées dans le but d'évaluer les compétences numériques de patients souffrant de troubles cognitifs acquis. La batterie d'**Evaluation Clinique des Aptitudes Numériques** est le bilan le plus récemment créé et étalonné, et celui à partir duquel ce mémoire est constitué.

### I - HISTOIRE DE LA BATTERIE

Avant l'ECAN, au moins trois batteries d'évaluation des compétences numériques existaient déjà.

L'EC 301 a été créée par Deloche et Seron en 1989 et est fondée sur le modèle de McCloskey et Caramazza (1987). Elle a été révisée en 1994 et étalonnée sur 551 adultes sains. La version française est normée quant à elle à partir de 180 sujets contrôles.

Le NPC (Number Processing and Calculation) a été créé par Delazer et Girelli en 2003 et est fondé sur le modèle de McCloskey et Caramazza (1987), mais aussi sur celui de Dehaene et Cohen (1991 et 1995). Il a été étalonné auprès de 282 adultes sains. Ce bilan permettrait une évaluation plus fine et fonctionnelle des compétences numériques que l'EC 301, mais aucune version française n'a été élaborée.

Le TLC<sup>2</sup> (Test Lillois de Calcul) a été créé par Bout-Forestier et Depoorter en 2005. Ce test français, qui a été étalonné auprès de 72 adultes sains, se veut exhaustif mais est peu précis de par la faiblesse du nombre d'items par domaine exploré. En outre, il ne repose sur aucun modèle théorique particulier.

En réaction à ces batteries présentant des lacunes gênant l'interprétation clinique des troubles du patient, une nouvelle batterie a été élaborée en 2011 sous la direction d'Auzou : l'ECAN.

Elle s'appuie sur le modèle du Triple Code de Dehaene (1992), sur le modèle du transcodage de Deloche et Seron (1987) et sur l'architecture modulaire de McCloskey et Caramazza (1987). Cet outil d'évaluation clinique a été étalonné de 2011 à 2013 sur 423 adultes sains.

Il présente plusieurs avantages par rapport aux autres tests sus cités. D'une part les épreuves sont chronométrées. D'autre part les items entre tâches d'un même domaine sont similaires, ce qui permet une comparaison pertinente entre chaque tâche. Enfin, des épreuves de connaissances encyclopédiques des nombres ont été ajoutées.

L'ECAN est donc un outil pratique et fonctionnel reposant sur des fondements théoriques solides dans le domaine de la cognition numérique.

## II - STRUCTURE DE LA BATTERIE

Les épreuves de l'ECAN sont réparties en quatre domaines :

### 1. Le **nombre**

Ce domaine repose sur le Triple Code de Dehaene (1992), et en particulier sur la distinction entre les représentations analogique et symbolique de la quantité.

Les tâches évaluant la représentation analogique sont par exemple les jugements de grandeurs entre deux nombres ou le placement d'un nombre sur une échelle. Les tâches évaluant les représentations symboliques sont par exemple les désignations de nombres arabes ou de numéraux verbaux écrits.

### 2. Les **transcodages**.

Ce domaine repose essentiellement sur le modèle du transcodage de Deloche et Seron (1987). Toutefois, le test n'affirme pas évaluer uniquement des transcodages asémantiques.

On trouve par exemple l'épreuve d'écriture de numéraux verbaux écrits à partir de numéraux arabes, ou encore la lecture à haute voix de nombres arabes. De plus, deux tâches font aussi appel au changement de modalité et ne répondent donc pas strictement à la définition de transcodage par Deloche et Seron : l'épreuve de lecture à haute voix de numéraux verbaux écrits et l'épreuve de dictée de numéraux verbaux écrits.

### 3. Le **calcul**

La batterie distingue dans ce domaine le calcul mental, comme par exemple les soustractions ou multiplications simples, et le calcul écrit, posé. Il distingue aussi le calcul exact et le calcul approximatif.

Ce domaine s'appuie beaucoup sur le modèle de l'architecture modulaire pour le traitement des nombres et du calcul de McCloskey (1987), car il propose des épreuves avec les quatre opérateurs, évalue spécifiquement les faits arithmétiques ainsi que les procédures de calcul.

Enfin, ce domaine est complémentaire du premier domaine, sur le nombre. En effet, la batterie ECAN est fondée sur la distinction entre la perception et la manipulation de la numérosité. L'évaluation des représentations analogique et symbolique du nombre constitue la première partie de l'ECAN : c'est le traitement du nombre, de la cardinalité. En revanche le calcul ou l'arithmétique, c'est-à-dire la manipulation de la numérosité, constitue cette troisième partie de l'ECAN.

### 4. Les **connaissances usuelles** des nombres

Trois épreuves constituent ce domaine. Elles concernent l'utilisation quotidienne du nombre dans ses aspects les moins quantitatifs.

Le nombre ne renvoie pas seulement à des quantités mais parfois aussi à des informations diverses comme par exemple des marques ou des événements : c'est ce que l'on appelle les connaissances encyclopédiques des nombres. Voici deux

items proposés pour cette épreuve: « *Quelle est la date de la bataille de Marignan ?* », ou encore : « *Quel est le numéro de téléphone de pompiers ?* ».

La tâche de jugement de grandeur contextuelle évalue les connaissances d'une personne à propos de certaines quantités habituellement retrouvées en vie quotidienne. Par exemple : « *Quinze pages pour un roman, c'est peu, normal ou beaucoup ?* ».

Enfin, une épreuve est proposée pour évaluer la capacité du sujet à lire l'heure sur une horloge. On note que l'heure est un système de notation particulier car il n'est pas en base dix mais en base soixante.

### III - INTERPRETATIONS

L'ECAN repose sur des théories pour la plupart modulaires et est conçue dans le but de repérer des **dissociations**. C'est pourquoi il convient d'effectuer une interprétation des résultats du patient en tenant compte des éventuelles dissociations observables. Cette batterie permet donc de déduire les défaillances ou les préservations de certains modules neuropsychologiques et ainsi de cibler des axes de rééducations pertinents.

On peut expliquer les erreurs d'un patient à partir des différents modèles théoriques précédemment évoqués. D'après ceux-ci, les dissociations que l'on peut le plus probablement retrouver sont les suivantes :

- représentation analogique *versus* représentation symbolique
- perception de la numérosité *versus* traitement de la numérosité
- calcul exact *versus* calcul approximatif
- opérations *versus* faits arithmétiques
- mots-nombres *versus* autres mots de la langue
- code arabe *versus* code verbal.

D'autres dissociations pourront être retrouvées et expliquées d'après les principaux modèles de la cognition numérique. Il peut aussi arriver que des patients présentent des troubles inexplicables au regard des théories actuelles, ou souffrent de troubles associés trop envahissants pour pouvoir évaluer le calcul.

### IV - LIMITES



Aucune batterie de tests n'est parfaite et celle-ci ne déroge pas à la règle. En effet, de nombreuses limites peuvent fausser l'interprétation des résultats et entraver la compréhension des compétences numériques du patient.

L'ECAN est une batterie très **longue**. En effet, chez les personnes témoin utilisées pour la normalisation, la passation totale durait environ deux heures, ce qui est déjà beaucoup. Chez les patients, elle dure en moyenne quatre heures. Un problème de fatigabilité entre donc en ligne de compte et provoque des biais attentionnels pour les dernières épreuves. L'interprétation des résultats devient alors plus ardue si l'on ne veut rendre compte que de l'aspect numérique des compétences et déficits du patient. De plus, à cause de la longueur de la passation, l'ECAN peut ne pas être réalisable pour des patients en trop mauvais état général ou par manque de temps.

La batterie ne prétend **pas** être **exhaustive** : il est parfois utile d'administrer des épreuves complémentaires pour affiner l'analyse d'un domaine numérique particulier.

De plus, l'ECAN ne propose aucune évaluation **écologique** du nombre : par exemple les courses, le remplissage d'un chèque, la prise de rendez-vous, l'interprétation des dates de péremption, les recettes de cuisine, le paiement par carte bleue, l'utilisation de l'informatique et tant d'autres actions utiles en vie quotidienne ne sont pas explorées avec cette batterie. Enfin, l'interprétation des troubles observés ne permet pas de déterminer la cause des déficits.

En outre, **deux épreuves** présentent un défaut majeur de conception les rendant ininterprétables.

D'une part l'épreuve dite de calcul « approximatif » n'évalue pas ce qu'elle prétend. En effet, on demande aux personnes d'estimer le résultat d'additions ou de multiplications simples. Or personne n'effectue de calcul approximatif pour des calculs aussi simples que «  $1+2$  » par exemple, mais seulement des calculs exacts. L'origine de cette épreuve se trouve dans une autre batterie : il s'agissait d'estimer le résultat de calculs très complexes. Or un effet plancher a été observé à partir des performances des personnes testées à cette épreuve. L'idée était donc de simplifier la tâche, ce qui a eu finalement pour conséquence de la dénaturer.

L'épreuve de jugement de grandeur contextuelle présente elle aussi un défaut considérable : elle ne comporte que cinq items. Cela fournit donc trop peu d'éléments pour permettre une interprétation fiable des résultats.

**Les besoins de la passation** créent eux aussi des biais.

En effet, lorsque l'on cherche à tester spécifiquement le sens du nombre, il est inévitable d'utiliser une représentation symbolique pour cela. C'est pourquoi tout trouble symbolique amoindrit les performances aux épreuves conçues pour tester la représentation analogique. Réciproquement, il a été démontré par Dehaene que toute activation symbolique du nombre active aussi la représentation analogique correspondante et permet un traitement plus rapide du nombre, même si le sens de celui-ci n'est pas nécessaire. C'est pourquoi si la représentation analogique est déficitaire, les performances aux épreuves testant les représentations symboliques seront perturbées. La difficulté de dissocier vraiment les épreuves analogiques des épreuves symboliques n'est qu'un exemple de **l'imbrication des différents modules** neuropsychologiques évalués par l'ECAN.

Un autre biais créé par la passation des épreuves est l'explication des consignes : cette étape préalable ne teste pas la cognition numérique mais peut entraver la réalisation de l'épreuve. Il convient alors de distinguer les épreuves dont la consigne a été incomprise des épreuves échouées par le patient à cause d'un déficit dans le domaine numérique testé.

Enfin la difficulté principale de cette batterie est la difficulté que l'on retrouve pour toute évaluation cognitive : la présence de **troubles associés**.

Ainsi, les troubles visuels ou auditifs ne doivent pas faire croire à un trouble numérique. De même, lorsque le patient doit écrire, il convient de vérifier s'il est hémiparétique par exemple, car l'objectif ici n'est pas de tester sa motricité.

Les autres fonctions cognitives peuvent aussi constituer des biais à l'interprétation des performances numériques du patient. Le langage est de toute façon à évaluer. Toute épreuve qui oblige à une réponse orale nécessite un langage et une parole intègres : il convient donc de vérifier si le patient n'a pas une aphasie, une apraxie bucco-faciale, une dysarthrie ou encore une paralysie faciale. La plupart des épreuves nécessitent une compréhension verbale et un système sémantique intègres.

Enfin, des troubles de la mémoire, des troubles de l'attention et en particulier une éventuelle héminégligence, des troubles des fonctions exécutives ou encore des éventuelles agnosies doivent faire l'objet d'un dépistage.

La passation et l'interprétation des résultats aux épreuves de l'ECAN doivent donc être adaptées à la lumière des troubles associés éventuels. Ceci dans le but de garder une évaluation ciblée sur les troubles du calcul et du traitement des nombres.

## CONCLUSION

La notion de nombre se montre très complexe, tant sur le plan philosophique que mathématique, neuropsychologique, anatomique ou encore rééducatif. Elle paraît d'abord concrète car elle repose sur des événements physiques, détectables. Puis lorsque l'on approfondit, on se rend compte que la numérosité se présente dans le cerveau sous la forme d'une représentation amodale qui s'active de façon inconsciente. Enfin, les dernières découvertes sur le fonctionnement cérébral ont montré que cette représentation repose sur un substrat neurologique très lié à l'espace, aux mouvements oculaires et à la coordination manuelle.

L'évolution symbolique du nombre ne s'est pas non plus produite de façon détachée du substrat neurologique concret à partir duquel elle se construisait. Les symboles numériques utilisés actuellement répondent à des contraintes mnésiques manifestes.

La plasticité cérébrale n'est cependant pas infinie. Afin qu'un circuit neuronal serve une fonction, il faut qu'il soit programmé pour cela de façon innée, ou que son architecture neuronale soit assez flexible et proche de la fonction voulue pour être recyclée dans cette fonction. La cognition numérique répond à ces deux processus : une capacité approximative innée et une capacité exacte développée grâce à la symbolisation.

**Il ressort donc au premier plan une dissociation entre la fonction analogique qui contient le sens du nombre et la fonction symbolique qui vise à exprimer le nombre par un système de codage.**

## OBJECTIFS DE L'ETUDE

### A/ PROBLEMATIQUE

Ce mémoire vise à valider l'**utilité du modèle du Triple Code en pratique de routine**. C'est pourquoi il cherche à montrer que ce modèle peut s'appliquer, tant sur le plan fonctionnel que sur le plan anatomique, à une large population de patients ayant subi une lésion cérébrale.

En effet, les modèles théoriques du calcul et du traitement du nombre ont jusqu'à présent été développés grâce à des études de cas uniques ou d'imagerie fonctionnelle. Or seules une étude de série permet de déduire le bénéfice pour un praticien non spécialisé de se reporter à ces modèles en pratique courante.

Cette étude a alors pour objectif de rechercher une dissociation entre les domaines analogique et symbolique chez un nombre significatif de patients de la population d'expérimentation. Elle consiste d'autre part à montrer que les lésions neuro-anatomiques des patients sont en relation avec les domaines neuropsychologiques déficitaires.

Ce mémoire s'inscrit donc dans un ensemble de recherches visant à **soumettre les théories anatomo-fonctionnelles des représentations du nombre à l'expérience clinique**.

### B/ HYPOTHESES

La principale dissociation actuellement admise, en ce qui concerne la conception mentale que nous avons du nombre, repose sur la relative **indépendance entre le fond et la forme**. En d'autres termes, il est reconnu que la représentation analogique contenant le sens du nombre constitue une unité cognitive et cérébrale à part entière, différenciée de la représentation symbolique qui contient les codes pour exprimer les quantités.

C'est pourquoi **l'étude de groupe est ciblée sur la recherche de cette dissociation**. L'outil créé à cet effet, que l'on appellera «*ECAN screening*», est par

conséquent constitué de deux parties : chacune comporte quatre épreuves spécifiques à l'évaluation d'un des deux domaines.

#### Première hypothèse

A partir de l'étude de population, **l'analyse statistique permet de distinguer un facteur réunissant les épreuves analogiques et un facteur réunissant les épreuves symboliques. Cela valide la notion de domaines distincts.**

#### Deuxième hypothèse

**S'il existe bien des domaines indépendants, on trouvera des patients présentant une dissociation entre un domaine préservé et l'autre déficitaire, comme l'avaient démontré les études de cas uniques.**

#### Troisième hypothèse

Le Triple Code fournit également une hypothèse de localisation neuro-anatomique : en étudiant les patients avec une dissociation, nous retrouverons une **atteinte pariétale si le déficit est analogique, et des aires du langage, en particulier temporelle gauche, si le déficit est symbolique.**

## C/ METHODOLOGIE

Dans le cadre de cette approche, **une étude de série a été effectuée chez 33 patients ayant subi un accident vasculaire cérébral** et hospitalisés dans l'Unité Neuro-Vasculaire de l'hôpital d'Orléans La Source.

En effet, **des épreuves de l'ECAN ont été soumises à ces patients.** Elles ont été choisies en raison de leur spécificité symbolique ou analogique. De plus, les données de normalisation recueillies chez 423 sujets contrôles (annexe 1) permirent une évaluation objective des performances des patients.

Les résultats obtenus ont été utilisés afin de **vérifier la validité du Triple Code et son application possible en pratique quotidienne.**

# PARTIE PRATIQUE

## A/ RECUEIL DES DONNEES

L'étude de population nécessite l'examen de plusieurs dizaines de patients à l'aide d'un outil adapté à l'évaluation des acalculies. Celui-ci doit tester les domaines analogique et symbolique d'une façon à la fois sensible et spécifique. C'est pourquoi l'outil est élaboré à partir de modèles théoriques pertinents, en particulier selon les indications de Dehaene (2010). De plus, les patients ont été sélectionnés dans un cadre précis permettant de cibler les personnes ayant subi un AVC et étant susceptibles de présenter un trouble du calcul et du traitement des nombres. La fiabilité des données ainsi obtenues est alors rendue suffisante pour tirer des conclusions valides.

### I – La population

Il s'agit de patients ayant subi un **accident vasculaire cérébral** et chez lesquels est suspectée une **acalculie**. Tous les patients ont été recrutés dans l'**unité neuro-vasculaire** du **CHR d'Orléans**.

Il ne s'agit cependant pas d'un recueil systématique car **les patients ont été choisis en fonction de l'intérêt clinique ou topographique de la lésion**.

Quelques **critères** permettent de sélectionner de façon adaptée les patients à qui proposer la passation :

-les critères d'inclusion : le patient doit être majeur, francophone et avoir récemment subi un AVC diagnostiqué.

-les critères d'exclusion : le patient ne doit en revanche pas être illettré, dément, en soins intensifs et avoir des antécédents de dyscalculie.

#### 1. Caractéristiques démographiques de la population AVC

L'« ECAN screening » a été administré à **33 patients** (annexe 2) dont :

<b><u>Sexe</u></b>	<b>19 hommes</b> 14 femmes
<b><u>Age</u></b>	<i>Moyenne = 61 ans, à plus ou moins 13,5 ans</i> <i>Minimum : 24 ans      Maximum : 89 ans</i>
<b><u>Latéralité</u></b>	<b>26 droitiers</b> 1 gaucher 1 gaucher contrarié
<b><u>Niveau socio-culturel</u></b> NSC 1 < Baccalauréat NSC 2 = Bac à Bac + 2 NSC 3 ≥ Bac + 3	<b>19 patients sont de NSC 1</b> 4 patients sont de NSC 2 4 patients sont de NSC 3

**Tableau 1 : Caractéristiques démographiques de la population AVC**

## 2. Données médicales des patients

**Durée entre l'AVC et le bilan** →

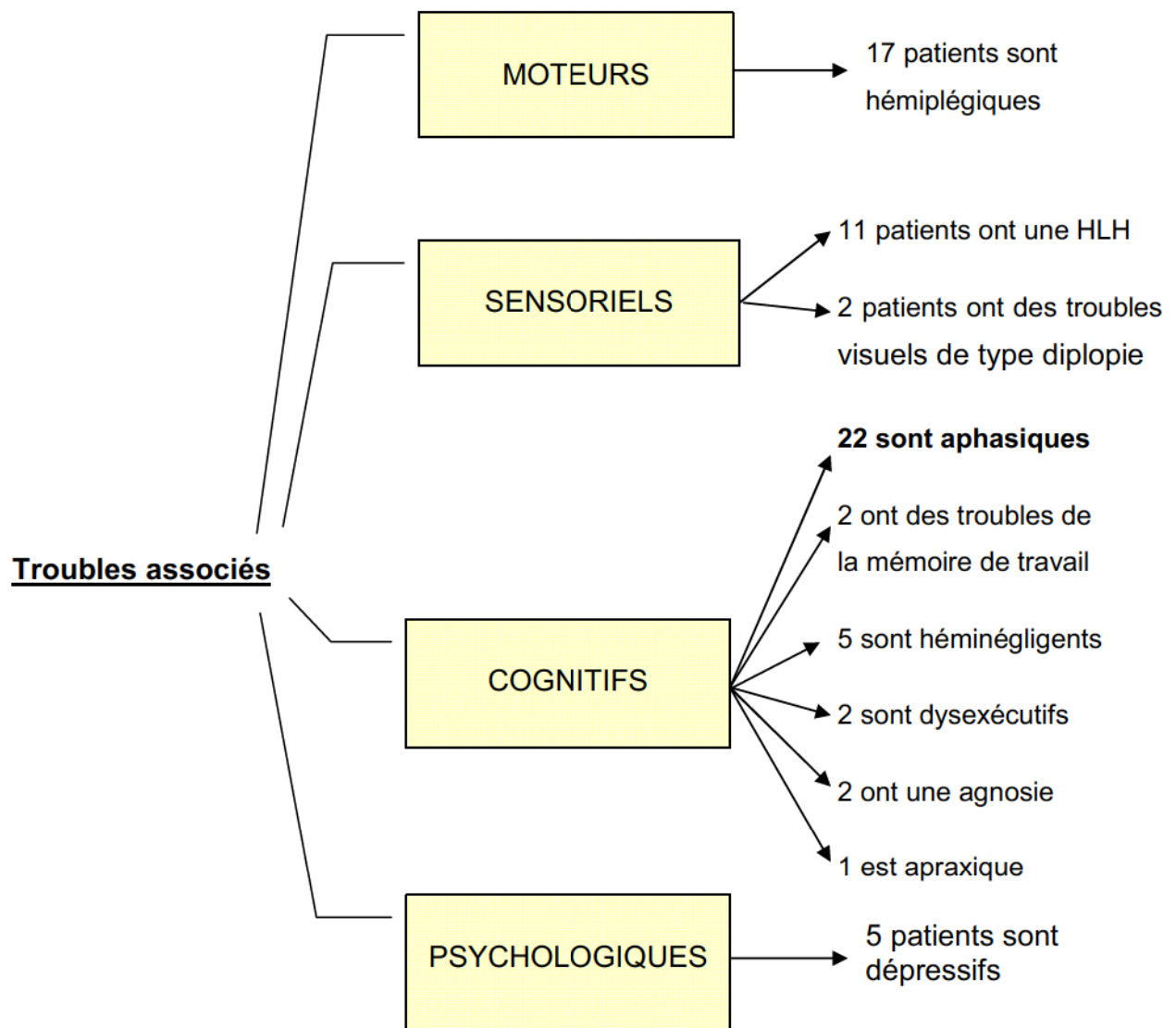
**Moyenne = 6 jours**  
Minimum : 1 journée  
Maximum : 20 jours

**Antécédents notoires** →

Accident vasculaire cérébral : 3 patients  
Accident ischémique transitoire : 2 patients

**Hémisphère lésé** →

**22 patients ont une lésion gauche**  
7 patients ont une lésion droite  
1 patient a une lésion bilatérale



On notera que certaines données sont inconnues et que tous les troubles des patients n'ont pas forcément été diagnostiqués.

## II – L'outil utilisé

L'ECAN, une batterie de tests dont il a été question dans la partie théorique, vise à évaluer les acalculies. Elle a servi de support pour débiter cette étude. En effet, certaines épreuves de cette batterie ont été choisies pour répondre aux besoins de l'examen spécifique des domaines analogique et symbolique. Ceci dans le but de catégoriser les patients selon les domaines déficitaires ou préservés.

Cette **sélection particulière d'épreuves de l'ECAN** devient alors un test court de dépistage, que l'on peut faire passer en environ vingt minutes.



Grâce à cet « ECAN screening », administré **de septembre 2012 à avril 2013**, on espère pouvoir observer un **regroupement statistique des patients selon les deux types d'épreuves** censées représenter les deux domaines. En effet, les épreuves se partagent en deux types : celles évaluant le domaine analogique, et celles évaluant le domaine symbolique. Cet outil permettrait donc d'**objectiver la modularité des domaines analogique et symbolique**.

Le modèle de référence utilisé est le **modèle du Triple Code** de Dehaene, car il distingue bien le domaine analogique des domaines verbal et arabe.

Les **épreuves analogiques** évaluent la ligne numérique mentale et testent donc autant que possible le sens du nombre, la représentation mentale des quantités. Elles essaient de contourner au maximum le biais que constitue la représentation symbolique.

Les **épreuves symboliques** quant à elles explorent les représentations verbales orales, verbales écrites et arabes du nombre. Les transcodages sont utilisés car ils permettent, sans être soumis à la nécessaire intégrité du sens du nombre, de mettre en valeur des défaillances précises des représentations symboliques du nombre.

Ce test constitué à partir de l'ECAN doit répondre aux qualités métrologiques requises pour tout test : l'évaluation doit être **standardisée**, le bilan **normalisé**, les mesures **fiables et valides**. Il n'est pas nécessaire de revenir dessus car chacune de ces qualités a été vérifiée lors de la conception et de la normalisation de l'ECAN d'où proviennent ces épreuves.

Cependant, **une nouvelle épreuve** a été conçue et ajoutées pour l' « ECAN screening ». En effet, **l'estimation de nuages de points** (annexe 4) n'existe pas dans l'ECAN et fait toutefois partie des 4 épreuves cherchant à explorer le domaine analogique du nombre. Une nouvelle normalisation a donc du être effectuée sur des sujets tout-venant : les performances de 30 personnes de 18 à 90 ans ont été recueillies afin de les comparer aux patients ayant subi un accident vasculaire cérébral. La distribution des scores des personnes témoin (annexe 5) indique qu'**en dessous de 8/10, la performance est pathologique**.

### III – Les épreuves proposées

Au début, 13 épreuves avaient été choisies (annexe 3) : 6 visant à explorer le domaine analogique, et 7 autres visant à explorer le domaine symbolique. Or parmi ces 13 épreuves, certaines se sont montrées trop peu spécifiques. De plus, **de nombreuses données manquantes perturbaient les traitements statistiques.**

C'est pourquoi **huit épreuves sont finalement retenues** (annexes 4 et 6) : elles sont considérées comme les plus spécifiques au domaine testé et provoquent le moins de données manquantes.

EPREUVES ANALOGIQUES	EPREUVES SYMBOLIQUES
Placement d'un nombre arabe sur une échelle de 0 à 100	Désignation de nombres arabes
Jugement de grandeur entre deux nombres arabes	Désignation de numéraux verbaux écrits
Estimation de nuages de points	Lecture à haute voix de nombres arabes
Soustraction	Ecriture sous dictée de nombres arabes

**Tableau 2 : Les épreuves retenues**

## B/ TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES

Seuls les patients ayant répondu à toutes les épreuves ont été pris en compte lors des traitements statistiques des scores (annexe 7). C'est pourquoi, **sur les 33 patients évalués tout au long de l'année, seuls 19 ont pu être étudiés.**

### I – Validation du Triple Code

Afin de déterminer si les quatre épreuves analogiques et symboliques sont spécifiques de ces domaines, nous avons effectué une **analyse factorielle** en composantes principales : nous avons déterminé le nombre de facteurs influant les scores, et les épreuves qui s'associent à chacun de ces facteurs.

**L'objectif est d'observer un regroupement entre épreuves du domaine analogique, et un autre regroupement entre épreuves du domaine symbolique.**

## II – Recherche de dissociations

Pour chacun des patients, nous avons déterminé si chaque épreuve est considérée comme perturbée ou non : **une épreuve est déficitaire si son score est inférieur au percentile 5 de la population générale (N= 423).**

Pour déterminer **si un domaine est perturbé ou non**, nous présenterons successivement **deux seuils** :

→ un domaine est perturbé si au moins **2** épreuves de ce domaine sont perturbées.

→ un domaine est perturbé si au moins **3** épreuves de ce domaine sont perturbées.

L'objectif est d'observer une répartition des patients en quatre ensembles, dont deux avec des patients présentant une dissociation entre les deux domaines évalués.

## III – Relations anatomiques

Afin de montrer que le substrat neurologique du domaine analogique est pariétal et que celui du domaine symbolique est temporal gauche, **les lésions des patients présentant une dissociation entre les deux domaines seront localisées** grâce aux données de l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique).

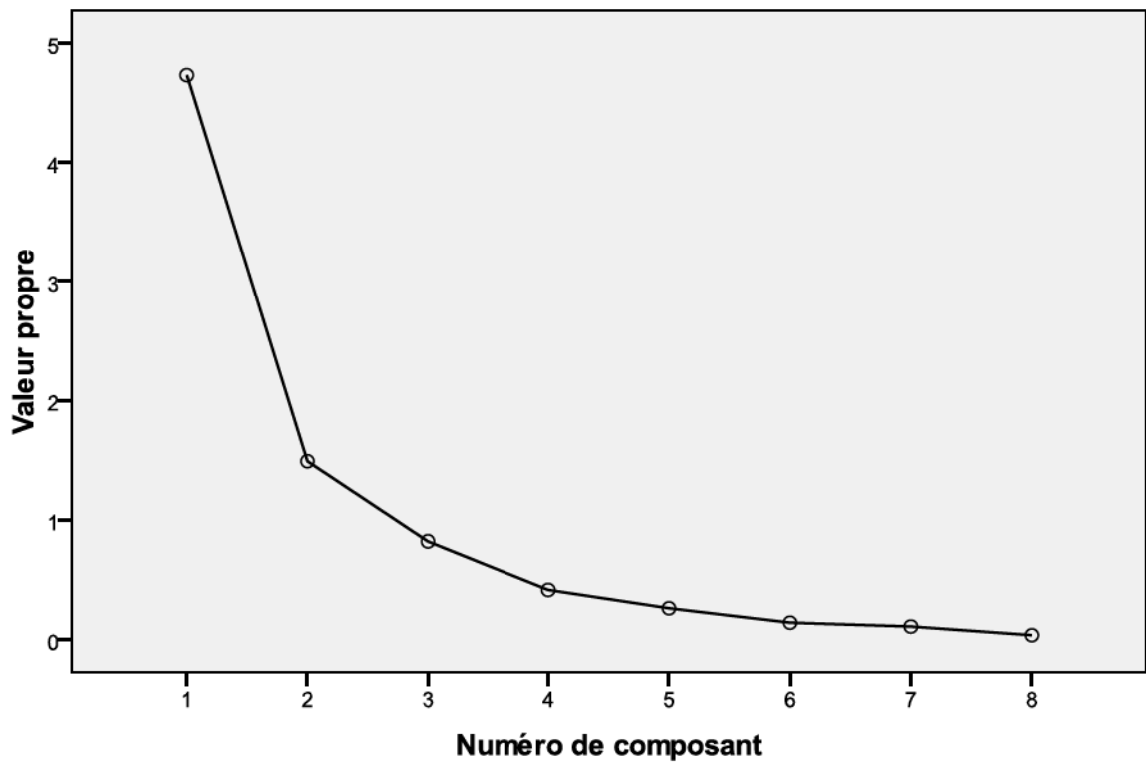
**L'objectif est d'observer que les patients présentant un déficit analogique et non symbolique souffrent d'une lésion pariétale, et que les patients présentant un déficit symbolique et non analogique souffrent d'une lésion des aires du langage, en particulier temporelle gauche.**

## C/ RESULTATS

Suite à l'analyse statistique des scores des patients aux huit épreuves de l' « ECAN screening », les hypothèses ont été en partie vérifiées.

### I – Validation du Triple Code

Le graphique des valeurs propres ci-dessous fait ressortir deux facteurs principaux : le premier explique 59,2% de la variance. Les deux premiers facteurs permettent d'expliquer 77,8% de la variance.



***Figure 7 : Graphique des valeurs propres***

L'analyse factorielle a donc montré que **2 facteurs expliquent la plupart des variations observées.**

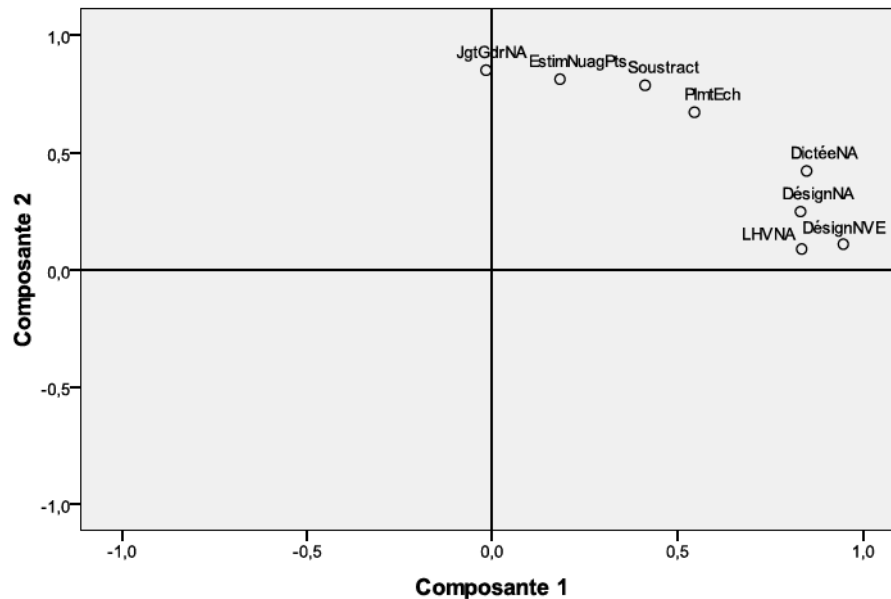
Le tableau suivant répertorie la corrélation de chaque épreuve par rapport à chacun des deux premiers facteurs :

	COMPOSANTE	
	1	2
Placement d'un nombre sur une échelle	0,546	0,672
Jugement de grandeur de numéraux arabes	-0,015	0,851
Estimation de nuages de points	0,183	0,813
Soustraction	0,413	0,787
Désignation de nombres arabes	0,831	0,250
Désignation de numéraux verbaux écrits	0,947	0,111
Lecture à haute voix de nombres arabes	0,835	0,090
Dictée de nombres arabes	0,848	0,423

**Tableau 3 : Corrélation des 8 épreuves avec les deux facteurs de variance principaux**

La matrice des corrélations montre que **les 4 tâches symboliques s'associent avec le premier facteur, et les 4 tâches analogiques avec le deuxième facteur.**

Cette association se retrouve avec le diagramme des composantes:



**Figure 8 : Diagramme des composantes**

**Certaines épreuves se regroupent autour du premier facteur et d'autres autour du second** : les modules du Triple Code peuvent donc être retrouvées grâce à 4 épreuves de chaque. **Cela confirme l'hypothèse initiale de 2 facteurs distincts.**

## II – Recherche de dissociations

Selon le modèle de Deheane, notre cerveau traite les quantités selon deux domaines : le domaine analogique qui correspond au sens du nombre, et le domaine symbolique qui correspond aux codes verbaux ou arabe.

Pour chacun des deux domaines, nous avons attribué 4 épreuves.

Grâce aux résultats des patients, nous repérons les épreuves échouées et celles réussies. Pour cela, nous nous référons aux normes de l'ECAN (annexe 1) : une épreuve est échouée si son score est inférieur au percentile 5 de la population générale (N= 423).

Ensuite, en fonction du nombre d'épreuves échouées dans un domaine, nous déterminons si ce domaine est déficitaire ou préservé. Or une difficulté réside dans cette étape : à partir de combien d'épreuves échouées peut-on considérer un

domaine comme échoué ? Il n'y a pas d'a priori sur la question, donc il faut essayer différentes solutions.

Enfin, en fonction des résultats ainsi obtenus, nous cherchons à observer une dissociation chez un patient : un domaine lésé et l'autre préservé.

*Dans les tableaux ci-dessous, nous utiliserons un S pour désigner le domaine symbolique, un A pour le domaine analogique, un + pour signifier que le domaine est préservé et un – pour signifier qu'il est déficitaire.*

Dans le premier tableau, on va considérer qu'un domaine est déficitaire si 2 épreuves au moins sont échouées.

	S+	S-
A+	7	2
A-	2	8

**Tableau 4 : Seuil à 2**

Le seuil à 2 montre que sur les 19 patients, 7 n'ont pas de trouble, 8 ont tout échoué, et **4 présentent une dissociation analogique / symbolique.**

Dans le second tableau, on va considérer qu'un domaine est déficitaire si 3 épreuves au moins sont échouées.

	S+	S-
A+	9	3
A-	3	4

**Tableau 5 : Seuil à 3**

Le seuil à 3 montre que sur les 19 patients, 9 n'ont pas de trouble, 4 ont tout échoué, et **6 présentent une dissociation analogique / symbolique.**

Des résultats différents sont obtenus selon le niveau de sensibilité retenu. Cependant, tout s'accorde à prouver que **des patients présentent des dissociations entre les deux domaines.** La seconde hypothèse stipulant que l'étude de groupe permettra de retrouver des patients présentant une dissociation entre le domaine analogique et le domaine symbolique est donc vérifiée. En effet,

quel que soit le seuil d'échec choisi, on retrouve autant de patients présentant le domaine analogique déficitaire et le domaine symbolique préservé, que de patients présentant la dissociation inverse.

### III – Relations anatomiques

Avec le seuil à 2, on voit que 4 patients présentent une dissociation :

AA, BJ, ND et BMJ.

Avec le seuil à 3, on voit que 6 patients présentent une dissociation :

AA, BJ, ND, SM, AJ et LJM.

Cependant les 6 patients du seuil à 3 ne recouvrent pas exactement les 4 patients du seuil à 2. En effet, si l'on additionne tous les patients pour lesquels on a trouvé une dissociation, que ce soit en utilisant un seuil à 2 ou un seuil à 3, on trouve **7 patients**.

Pour chacun des 7 patients présentant une dissociation entre les domaines analogique et symbolique, nous allons résumer ses troubles et indiquer la localisation de sa lésion. Cela nous permettra ensuite de voir s'il y a un lien entre la dissociation fonctionnelle observée cliniquement et la localisation de la lésion observée à l'imagerie. Si l'on se fie au modèle du Triple Code, les patients présentant un domaine analogique préservé et un domaine symbolique déficitaire devraient souffrir d'une lésion temporale, tandis que les patients présentant la dissociation inverse devraient souffrir d'une lésion pariétale.

1. Patients présentant une dissociation entre un domaine analogique préservé et un **domaine symbolique déficitaire**.

#### a) AA

Monsieur AA est âgé de 63 ans et est de NSC 3. *Son identifiant est le n°25 dans les annexes 2 et 7 regroupant les informations sur les patients évalués pour cette étude.*

Il présente une acalculie affectant spécifiquement le domaine symbolique. Le code verbal dans ses modalités orales et écrites est très déficitaire. En revanche AA dispose d'excellentes capacités de compréhension du code arabe. De plus, les

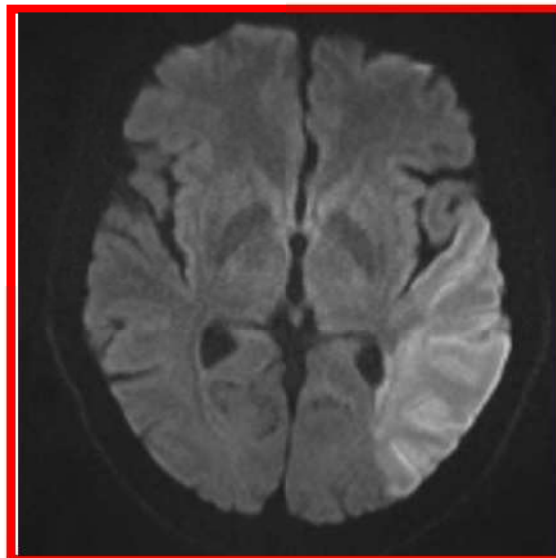


signes arithmétiques sont difficilement appréhendés, en particulier pour les soustractions.

Il présente en outre une aphasie fluente avec paraphasies et surdité à la forme des mots. L'expression orale est souvent jargonnée. La compréhension orale est particulièrement altérée : les mots ne sont pas appréhendés comme appartenant aux mots de la langue. Le système sémantique en revanche est épargné.

Enfin, AA présente une hémianopsie latérale homonyme droite.

Voici son IRM, montrant  
un AVC ischémique sylvien superficiel postérieur gauche, temporal:



**Figure 9 : IRM de AA**

b) BJ

Monsieur BJ (*identifiant n°20*) est âgé de 58 ans et est de NSC 2.

Il présente une acalculie affectant spécifiquement le domaine symbolique.

Il présente en outre une aphasie d'expression et de compréhension, ce qui gêne beaucoup la compréhension des consignes et l'efficacité des réponses fournies.

Enfin, BJ est très fatigable et les épreuves réussies l'ont été au prix d'importants efforts.

Voici son IRM, montrant une hémorragie profonde et insulaire gauche :



Figure 10 : IRM de BJ

c) SM

Madame SM (*identifiant n°28*) est âgée de 70 ans et est de NSC 1.

Elle présente une acalculie affectant spécifiquement le domaine symbolique.

Elle présente en outre une **importante alexie-agraphie** périphérique.

Madame SM souffre de plus d'une diplopie très importante ainsi que d'une hémianopsie latérale homonyme droite.

Enfin, une hémiparésie droite et une paralysie faciale droite gênent la patiente.

Voici son IRM, montrant une hémorragie pariétale gauche:

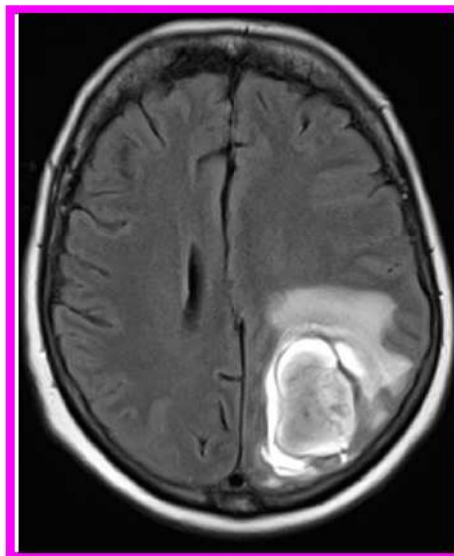


Figure 11 : IRM de SM

2. Patients présentant une dissociation entre un **domaine analogique déficitaire** et un domaine symbolique préservé.

a) AJ

Madame AJ (*identifiant n°32*) est âgée de 77 ans et est de NSC 1.

Elle présente une acalculie affectant spécifiquement le domaine analogique.

Elle présente en outre une aphasie d'expression et de compréhension, avec un **important trouble sémantique**.

Voici son IRM, montrant une hémorragie temporale gauche :

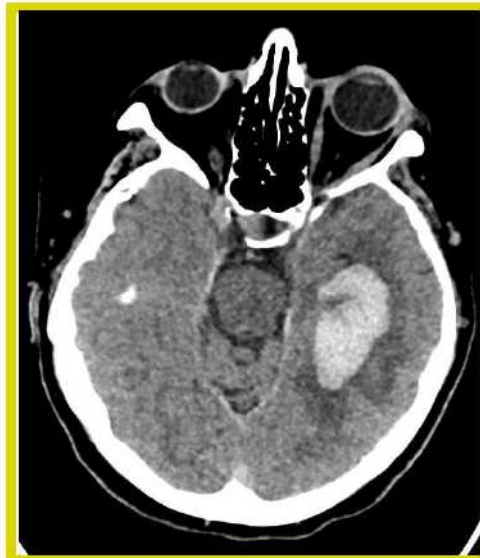


Figure 12 : IRM de AJ

b) LJM

Monsieur LJM (*identifiant n°30*) est âgé de 57 ans et est de NSC 1.

Il présente une acalculie affectant spécifiquement le domaine analogique.

Son langage est réduit et monotone, mais il ne s'agit pas pour autant d'une aphasie : LJM présente un « comportement hémisphère mineur ».

De plus, une dysarthrie est objectée, ainsi que des troubles de la déglutition.

Voici son IRM, montrant un AVC ischémique  
sylvien superficiel complet, fronto-insulaire-temporal-pariétal droit:

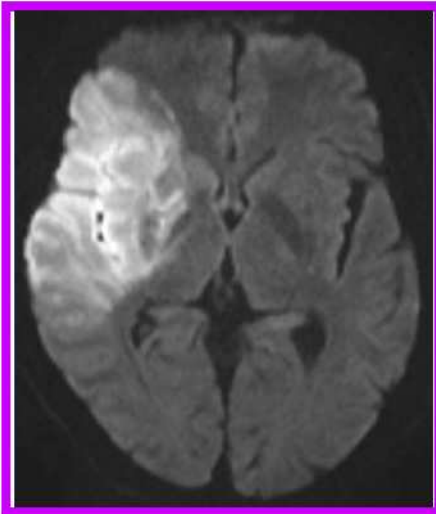


Figure 13 : IRM de LJM, coupe basse

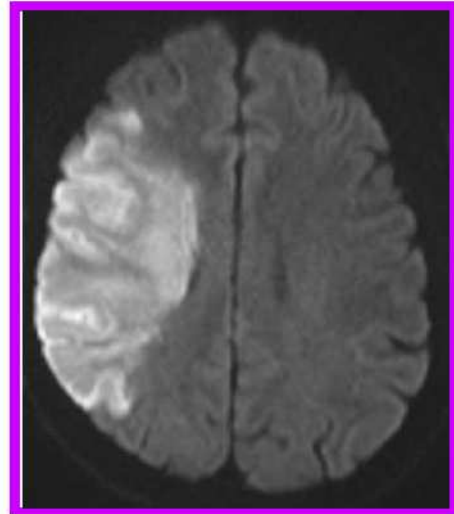


Figure 14 : IRM de LJM, coupe haute

c) **BMJ**

Monsieur BMJ (*identifiant n°27*) est âgé de 47 ans et est de NSC 1.

Il présente une acalculie affectant spécifiquement le domaine analogique.

Il souffre en outre d'une hémiparésie gauche, d'une paralysie faciale gauche.

Enfin, une négligence et une hémianopsie latérale homonyme gauche sont objectées.

Voici son IRM, montrant  
un AVC ischémique sylvien superficiel, insulaire et temporal-pariétal droit :

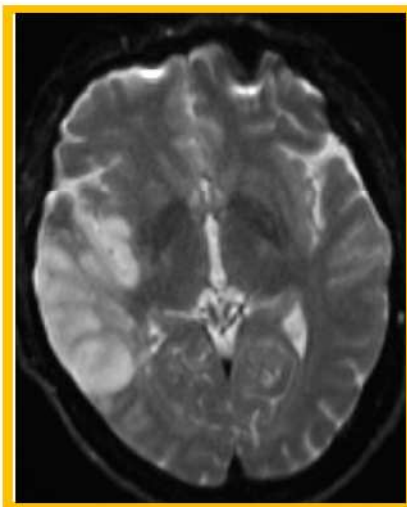


Figure 15 : IRM de BMJ, coupe basse

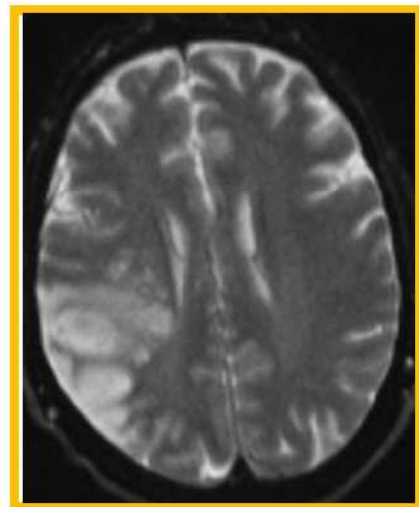
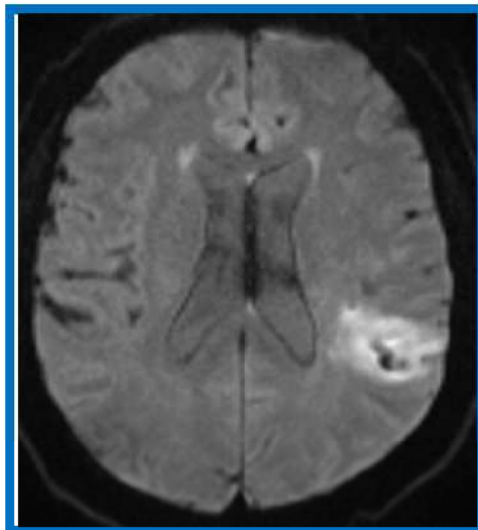


Figure 16 : IRM de BMJ, coupe haute

d) ND

Monsieur ND (*identifiant n°21*) est âgé de 67 ans et est de NSC 1.  
Il présente une acalculie affectant spécifiquement le domaine analogique.  
Il présente de plus une hémiparésie gauche.

Voici son IRM, montrant  
un AVC ischémique sylvien gauche, gyrus angulaire gauche :



*Figure 17 : IRM de ND*

### 3. La démarche du clinicien : le pari sur la dissociation d'après la lésion

Les IRM des 7 patients présentés précédemment ont été montrées à des examinateurs naïfs de leur histoire clinique. En effet, **ceux-ci savaient que chaque patient présentait une dissociation entre le domaine analogique et le domaine symbolique, mais ignoraient laquelle.**

Les examinateurs ont analysé les IRM de façon à faire ressortir un descriptif de la localisation de la lésion et prédire la dissociation fonctionnelle dont souffre le patient. Leur pari effectué sur la base de la lésion sera ensuite comparé à la réalité du trouble neuropsychologique du patient.

PATIENT	LESION	PREDICTION
AA	AVC ischémique sylvien superficiel postérieur gauche, temporal	A+ / S $\Theta$
BJ	Hémorragie profonde et insulaire gauche	Aucune
SM	Hémorragie pariétale gauche	A $\Theta$ / S+
AJ	Hémorragie temporale gauche	A+ / S $\Theta$
LJM	AVC ischémique sylvien superficiel complet, fronto-insulaire-temporal-pariétal droit	A $\Theta$ / S+
BMJ	AVC ischémique sylvien superficiel, insulaire et temporal-pariétal droit	A $\Theta$ / S+
ND	AVC ischémique sylvien gauche, gyrus angulaire gauche	Aucune

**Tableau 6 : Pari sur la dissociation d'après la lésion du patient**

**Légende :**

A	= domaine Analogique
S	= domaine Symbolique
+	= préservé
$\Theta$	= échoué

On remarque que pour deux patients, les examinateurs n'ont pas émis de prédiction. Pourquoi ? Le patient BJ souffre d'une lésion profonde, ne correspondant donc pas aux régions corticales ciblées par le modèle du Triple Code. Le patient ND quant à lui souffre d'une lésion du gyrus angulaire. Or celle-ci peut appartenir au système du nombre aussi bien qu'au système du langage. Les examinateurs n'ont donc pas pu se référer à la lésion pour prédire si le trouble est spécifiquement analogique ou spécifiquement symbolique.

#### 4. Comparaison entre le pari et la réalité

Pour chaque patient, nous allons comparer la prédiction du type de dissociation avec la dissociation observée en clinique :

PATIENT	DISSOCIATION PREDITE	DISSOCIATION REELLE
AA	A+ / S $\ominus$	A+ / S $\ominus$
BJ	Aucune	A+ / S $\ominus$
SM	A $\ominus$ / S+	A+ / S $\ominus$
AJ	A+ / S $\ominus$	A $\ominus$ / S+
LJM	A $\ominus$ / S+	A $\ominus$ / S+
BMJ	A $\ominus$ / S+	A $\ominus$ / S+
ND	Aucune	A $\ominus$ / S+

**Tableau 7 : Comparaison entre le pari et la réalité**

Il apparaît que parmi les 5 patients pour lesquels une dissociation a été pariée, 3 prédictions sont correctes, et 2 sont fausses. Etant donné que le pari est binaire, **le nombre de dissociations correctement trouvées ne dépasse pas le hasard.**

Pour résumer, sur les **33 patients évalués**, 19 seulement ont pu être analysés à cause des données manquantes. Sur les **19 patients analysés**, 7 présentent une dissociation entre le domaine analogique et le domaine symbolique. Et sur les **7 patients avec dissociation**, **3 présentent une lésion en accord avec la dissociation.**

## DISCUSSION

L'objectif de ce mémoire est de **montrer l'intérêt pour les orthophonistes d'utiliser le modèle du Triple Code en pratique quotidienne**, tant sur le plan de l'évaluation que de la rééducation des patients cérébrolésés.

Le modèle du Triple Code de Dehaene et Cohen rend compte du traitement du nombre par le cerveau. Il évoque l'existence de trois modules dissociés, dont deux relatifs aux représentations symboliques du nombre, et un relatif à la représentation du sens du nombre. **Le domaine symbolique est donc, d'après ce modèle, dissocié du domaine analogique.**

Ce modèle propose aussi une relation entre une fonction neuropsychologique et une région corticale. En effet, selon Dehaene, le domaine symbolique est soutenu par des réseaux neuronaux temporaux gauches, et le domaine analogique par un réseau neuronal pariétal, en particulier le sillon intra-pariétal.

Les **études de cas uniques** ont permis l'élaboration de ce modèle grâce à l'observation de doubles dissociations. A partir de celles-ci et par l'analyse de l'imagerie des patients, les déficits fonctionnels ont pu être reliés à des localisations lésionnelles.

Cependant, la dissociation numérique retrouvée grâce aux études de cas uniques est-elle fréquemment retrouvée à l'échelle d'une population ? Autrement dit : est-il efficace pour un orthophoniste de travailler avec son patient à la lumière de la distinction entre le domaine analogique d'une part et le domaine symbolique d'autre part ?

Afin de répondre à cette question, 33 patients ont été évalués entre 1 et 20 jours après leur accident vasculaire cérébral. **Quatre épreuves analogiques et quatre épreuves symboliques**, choisies parmi des épreuves de l'ECAN (sauf l'épreuve d'estimation de nuages de points) et d'après les données de la littérature, ont été administrées. Ces épreuves sont estimées spécifiques au domaine qu'elles testent.



## A/ LE TRIPLE CODE EN PRATIQUE

Les scores des patients montrent que les épreuves d'un même domaine s'associent entre elles, tel que cela était prédit. Cela montre que toutes les épreuves symboliques évaluent une même fonction cognitive et toutes les épreuves analogiques évaluent aussi une même fonction. Cela montre aussi que la fonction évaluée par les épreuves symboliques est distincte de la fonction évaluée par le domaine analogique.

Ce résultat soutient le modèle de Dehaene qui affirme l'existence de deux domaines distincts à l'origine des capacités numériques : le domaine analogique et le domaine symbolique. Cela renforce donc l'hypothèse d'**un Triple Code soutenant les traitements numériques** par le cerveau de l'homme.

Cette hypothèse étant vérifiée grâce aux résultats obtenus par des patients à des épreuves choisies de l'ECAN, cela montre aussi que **l'ECAN est un outil rendant compte de façon fiable de certains modèles théoriques**.

De plus, au cours de ce travail, j'ai développé **l'épreuve d'estimation de nuage de points** à partir de la littérature (notamment Dehaene, 2010). Elle évalue comme prévu le domaine analogique. Il serait alors intéressant de l'inclure dans une batterie et donc de la normaliser de façon comparable aux autres épreuves de la batterie.

## B/ LES DISSOCIATIONS FONCTIONNELLES

Après avoir montré la validité du modèle ainsi que la validité de l'outil, j'ai montré que **sur 19 patients retenus pour l'étude, 7 présentent une dissociation** entre le domaine analogique et le domaine symbolique.

**La plupart des patients ne présentent donc pas de dissociation.**

On remarque que les patients ayant les deux domaines déficitaires présentent aussi de nombreux troubles associés. Il est d'ailleurs souvent difficile d'affirmer si les épreuves ont été échouées à cause d'une acalculie ou à cause de troubles associés trop envahissants. Au premier plan de ces troubles entravant le déroulement optimal du bilan, on note les aphasies, les troubles attentionnels, la fatigabilité et les troubles exécutifs. On peut aussi ajouter à cela les troubles sensoriels, en particulier les

troubles visuels ou auditifs. Beaucoup de ces patients d'ailleurs échouent à la plupart des tests cognitifs. Il est difficile de dire alors si la fonction numérique est atteinte ou si elle n'a pas pu être évaluée.

D'autre part, les patients montrant une relative préservation des deux domaines numériques sont pour la plupart des patients qui souffrent de peu ou pas de troubles cognitifs. L'AVC n'a causé que de légers troubles sensoriels ou moteurs, voire aucune séquelle.

**On remarque donc que pour une grande partie des patients ne présentant pas de dissociation numérique, leur résultat aux épreuves de calcul est le reflet de l'ensemble des conséquences de l'AVC : soit presque tout est préservé, soit presque tout est atteint.**

On rappelle qu'un domaine décrété comme préservé ne signifie pas une parfaite préservation des compétences numériques, puisque la personne peut avoir échoué à 2 épreuves de calcul sur l'ensemble du bilan.

On compte en effet seulement 4 patients sur les 19 analysés (*identifiants n° 14, 16, 18 et 31*) pour lesquels les épreuves sont toutes chutées ou toutes réussies.

On compte 6 patients (*identifiants n° 13, 17, 19, 23, 24 et 26*) pour lesquels une seule épreuve présente un résultat différent des autres épreuves : si par exemple les deux domaines du patient sont considérés comme préservés, le patient présente une unique épreuve échouée. Ces patients, présentant alors un domaine totalement préservé et un domaine avec une légère imperfection, demeurent en accord avec le modèle du Triple Code. En effet, l'échec reste cloisonné à un domaine sans atteindre l'autre.

En revanche, 2 patients font exception : leurs échecs sont équitablement répartis entre les deux domaines.

En effet, le n°22 présente 2 épreuves analogiques échouées, 2 épreuves analogiques réussies, 2 épreuves symboliques échouées et 2 épreuves symboliques réussies. Ce patient souffre de plus d'une aphasie d'expression et de compréhension ainsi qu'un trouble de la mémoire de travail très handicapant. Cela rend ses performances assez aléatoires.

Le n°29 présente 1 épreuve analogique échouée et 1 épreuve symbolique échouée. Ce patient ne présente aucun trouble cognitif associé.

**On remarque donc 2 patients avec quelques troubles de la cognition numérique qui ne répondent pas au modèle du Triple Code.**

Il reste cependant **plus d'un tiers** des patients étudiés avec une dissociation. Cela montre que **l'on peut accéder à l'approche modulaire par des méthodes cliniques de routine**. D'où l'intérêt pour les orthophonistes de se référer à la distinction entre les deux domaines pour caractériser l'acalculie du patient et rééduquer ce-dernier.

## C/ LES RELATIONS ANATOMIQUES

Enfin, sur les 7 patients avec une dissociation neuropsychologique, 3 présentent une localisation lésionnelle en accord avec le modèle de Dehaene et Cohen.

Cependant, ce résultat apparemment hasardeux trouve une explication : on remarque que **les 2 patients pour lesquels le pari était faux, AJ et SM, présentent des troubles neuropsychologiques très spécifiques**. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, SM souffre d'une importante alexie-agraphie, tandis qu'AJ souffre d'un important trouble sémantique. **Ces troubles ont donc pu perturber le calcul dans un domaine spécifique** : l'alexie-agraphie a provoqué une acalculie sur le domaine symbolique, tandis que le trouble sémantique a provoqué une acalculie sur le domaine analogique.

En effet, à cause de son alexie, SM ne peut pas lire ou très difficilement. Comme l'objectif de la partie analogique est d'évaluer le domaine analogique, j'ai essayé de pallier le problème de lecture en lisant moi-même les items à la patiente : j'ai lu par exemple les nombres proposés pour l'épreuve d'estimation de nuage de points, ou encore les soustractions. En revanche, je n'ai pas lu les nombres de la première épreuve (le placement d'un nombre sur une échelle) car je ne m'attendais pas à ce que cela soit difficile pour SM. D'où l'échec (4/10) à cette épreuve. D'autre part, pour les épreuves symboliques, je n'ai pas lu les items puisque c'était justement

ce qui était évalué. **On peut donc considérer que l'acalculie de SM est secondaire à son alexie et la lésion cérébrale observée correspond à l'alexie-agraphie.**

En ce qui concerne AJ, son trouble sémantique affecte le sens des mots mais aussi apparemment le sens des nombres. **La lésion, temporelle gauche, doit correspondre au trouble sémantique. Celui-ci a dû provoquer un trouble du sens du nombre, d'où l'acalculie.**

**Ainsi, pour SM et AJ, la lésion ne permet pas de déduire le type de dissociation numérique dont souffre le patient, puisqu'elle correspond à un trouble associé plus important affectant secondairement le calcul.**

Selon Berger (1926), les acalculies se classent en deux groupes : les acalculies primaires et les acalculies secondaires. Or nous avons montré que l'on peut référencer les troubles du calcul et du traitement du nombre selon le domaine atteint : analogique ou symbolique. Le modèle du Triple Code propose donc une autre manière d'envisager l'analyse des acalculies.

Pourtant, **une constatation relance le débat sur les acalculies primaires ou secondaires.** En effet, nous avons vu que **le type d'acalculie ne peut pas être prédit simplement sur la base des lésions** car celles-ci peuvent correspondre aux **troubles associés** qui affectent le calcul et provoquent par conséquent une acalculie.

Cette constatation incite à la prudence quant aux conclusions tirées d'un bilan de calcul lorsque d'autres déficits neuropsychologiques associés ont été repérés. Il convient alors d'effectuer pour le calcul un **bilan plus approfondi** et de prévoir des examens précis des troubles associés. Cela aidera à faire la part des choses entre les causes et les conséquences, ou du moins ciblera les difficultés au premier plan.

Cependant, pour AA, LJM et BMJ, la localisation de la lésion est en accord avec le type de dissociation, si l'on s'en tient au modèle du Triple Code.

On remarque que la lésion d'AA est temporelle gauche. Comme le déficit symbolique ne concerne que les numéraux verbaux et non les numéraux arabes, et

que AA souffre aussi d'une aphasie, la question d'une acalculie secondaire se pose aussi pour ce patient.

En revanche pour LJM, il y a une lésion pariétale droite et pas de troubles cognitifs associés à l'acalculie analogique. Le cas de ce patient est donc sans conteste en accord avec ce qui est stipulé dans le modèle du Triple Code.

Enfin BMJ souffre d'une lésion pariétale droite. Il présente une acalculie analogique et, pour trouble cognitif associé, une négligence. Comme nous l'avons vu dans la partie théorique, les héminégligences peuvent parfois provoquer un déficit analogique. En effet la négligence de la moitié de la ligne numérique mentale décale tous les nombres de la ligne numérique du côté opposé à l'héminégligence. La personne surestime ou sous-estime alors les quantités. Dans le cas de BMJ, on ne voit pas d'influence de la négligence car les réponses erronées sont aléatoirement supérieures ou inférieures au résultat attendu. Le déficit analogique de BMJ semble donc primaire et en lien direct avec la lésion pariétale droite.

On remarque enfin que LJM et BMJ, dont le déficit est analogique, souffrent d'une lésion droite, ce qui est en accord avec les études montrant que le domaine analogique est prégnant à droite.

**On retrouve donc à l'échelle d'une population les dissociations fonctionnelles et anatomiques décrites par le modèle du Triple Code**, même si cela ne représente pas l'ensemble de la population évaluée.

Ainsi, si les dissociations fonctionnelles évoquées par le modèle de Dehaene et Cohen se retrouvent bien dans cette étude de population, les dissociations neur-anatomiques quant à elles sont moins nettes. Cela soulève la question de la **difficulté du passage d'études de cas uniques à des études de groupe**.

## **D/ UNE NOUVELLE METHODE DE REPARTITION DES PATIENTS**

**Cela soulève en outre la question de la définition de la dissociation**. En effet, lorsque l'on compte pour chacun des 7 patients le nombre d'épreuves

échouées par domaine, on remarque que toutes les dissociations ne se valent pas. En effet, les performances de tous ces patients ne sont pas dissociées avec la même netteté.

Pourquoi ? La méthode utilisée repose sur un seuil d'échec, appliqué indépendamment à chaque domaine. Certains patients sont alors considérés comme présentant une dissociation alors que la différence entre les deux domaines est faible.

Une nouvelle méthode peut être envisagée. Elle repose sur un **écart relatif entre les performances aux deux domaines**.

Voici un récapitulatif de la méthode précédemment utilisée : nous décrétons qu'à partir de 2 ou 3 épreuves échouées, un domaine était déficitaire. Nous reproduisons la même méthode pour l'autre domaine. Puis nous comparons les résultats pour déterminer si le patient présentait ou non une dissociation.

Voici la nouvelle méthode que nous proposons : nous comptons le nombre d'épreuves échouées par domaine. **Si la différence entre le nombre d'épreuves échouées dans un domaine et dans l'autre est d'au moins 2 épreuves, le patient présente une dissociation.** Sinon, il n'en présente pas.

Ci-après un tableau répartissant les 19 patients en fonction de cette nouvelle méthode.

Les cases vertes comptabilisent les patients avec une dissociation et les cases rouges ceux n'en présentant pas.

Le chiffre précédant un A ou un S indique le nombre d'épreuves échouées ; le A signifie « analogique » ; le S « symbolique » et le – « échouée ».

*Par exemple, « 2A- » signifie : « 2 épreuves analogiques échouées ».*

Dans chaque case est indiqué le nombre de patients répondant aux critères correspondants.

A \ S	0S-	1S-	2S-	3S-	4S-
0A-	2				1
1A-	4	1			1
2A-	1		1	1	
3A-		1	2		1
4A-				1	2

**Tableau 8 : Répartition des patients selon la nouvelle définition des dissociations**

On ne considère comme présentant une dissociation entre les domaines analogique et symbolique que les patients qui ont au moins 2 épreuves échouées de différence entre leurs deux domaines, soit les 4 patients notés dans les cases vertes.

On voit que **selon cette méthode, 15 patients sur 19 ne présentent pas de dissociation, ce qui concerne la grande majorité des patients.**

Voici le détail du tableau 8 avec seulement les 7 patients que nous avons décrétés comme présentant une dissociation selon la première méthode :

A \ S	0S-	1S-	2S-	3S-	4S-
0A-					AA
1A-					BJ
2A-	BMJ			SM	
3A-		ND	LJM + AJ		
4A-					

**Tableau 9 : Répartition détaillée, selon la nouvelle méthode, des 7 patients considérés comme ayant une dissociation avec la première méthode**

**On voit que les 4 patients présentant une dissociation fonctionnelle sont AA, BJ, BMJ et ND.**

Rappelons que pour AA et BMJ, la prédiction d'après la lésion était correcte. Or ces deux patients présentent encore une dissociation avec la nouvelle méthode.

**Pour SM et AJ à l'inverse, la prédiction était erronée. Or ces deux patients ne présentent pas de dissociation selon la nouvelle méthode.** Ceci signifie que les différences observées entre les deux domaines ne sont pas suffisantes pour que la dissociation soit prise en compte. On en déduit donc qu'**en plus des troubles associés, ce qui brouille la prédiction d'après la lésion est la faiblesse de la dissociation.**

Ainsi, parmi les 4 patients présentant une dissociation, 2 ont pu être prédits avec justesse simplement en analysant la localisation de la lésion cérébrale. Cela n'est pas énorme mais mérite que ces travaux soient poursuivis.



## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le Triple Code stipule que dans notre cerveau, les représentations du nombre se partagent en trois modules distincts : le code analogique dans le sillon intra-pariétal, le code verbal au niveau des zones corticales du langage et le code arabe dans les régions occipito-temporales.

Ce mémoire a évalué l'intérêt du choix du modèle Triple Code en pratique courante, en regroupant le code verbal et le code arabe dans un même domaine : le domaine symbolique. **Cette adaptation du Triple Code a permis de distinguer le domaine analogique du domaine symbolique et de simplifier l'étude.**

Il a été démontré grâce à une méthode la **pertinence du modèle fonctionnel** : en effet, une proportion non négligeable de patients peut n'avoir qu'un domaine perturbé et pas l'autre. Ainsi, une compréhension intime des dysfonctionnements de la cognition numérique doit permettre de guider au mieux la rééducation module par module.

En revanche, **la relation entre la lésion cérébrale et le type de dissociation n'est pas évidente**. Elle a été retrouvée chez 3 patients, en désaccord avec le modèle chez 2 patients, et impossible à déterminer chez 2 autres patients. En effet, le **rôle des troubles associés** n'est pas à ignorer et une lésion cérébrale n'est pas forcément un indicateur pour le type d'acalculie dont souffre le patient.

Les recherches dans le domaine de la cognition numérique ont beaucoup avancé et mériteraient d'être mises en valeur auprès des orthophonistes. Cela permettrait une meilleure prise en compte des troubles du calcul et du traitement des nombres. De plus, un modèle semble faire ses preuves et montrer son efficacité en pratique quotidienne : **le modèle du Triple Code**. La localisation des lésions cérébrales des patients ne doit pas être considérée sans précaution : elle permet éventuellement de fournir des indices au clinicien, mais ne doit pas être séparée du contexte sémiologique du patient, source d'indices bien plus pertinents.

Il conviendrait en outre de **définir clairement la manière de révéler une dissociation entre deux domaines cognitifs**. En effet, une nouvelle méthode a montré une faible adhérence des résultats des patients au modèle du Triple Code, rendant ce modèle peu utilisable en pratique quotidienne. En revanche, toujours selon cette méthode, la moitié des patients présentant une dissociation souffrent d'une lésion cérébrale en accord avec le modèle anatomo-fonctionnel de Dehaene.

Cela met donc en avant un critère de choix possible quant à la méthode permettant de déterminer si un patient présente une dissociation ou non : préfère-t-on une méthode sensible et peu spécifique comme la première, ou spécifique et peu sensible comme la seconde ?

En effet, la première méthode considère que les patients échouant à presque toutes les épreuves ou à presque aucune ne présentent pas de dissociation. La seconde méthode ajoute à ces patients ceux qui souffrent d'un déficit similaire dans les deux domaines, quelle que soit l'importance du déficit.

Au cours de cette étude, nous avons réuni deux fonctions au sein du Triple Code : le code verbal et le code arabe. Cette approche est une simplification nécessairement incomplète mais permettant de tirer des conclusions utiles pour la pratique clinique.

Nous avons cependant remarqué que le code arabe est plus rarement atteint que le code verbal ou que le code analogique. Il serait intéressant de comprendre pourquoi.

Il serait de plus utile de poursuivre le travail en identifiant clairement des épreuves pour ces trois composantes, ainsi que la méthode la plus pertinente pour caractériser les déficits d'un patient selon les codes.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1) Anderson, S., Damasio, A. & Damasio, H. (1990). Troubled letters but not numbers. Domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex. *Brain* (113), 749-766.
- 2) Ansari, D. & Dhital, B. (2006). Age-related changes in the activation of the intraparietal sulcus during nonsymbolic magnitude processing: an event-related functional magnetic resonance imaging study. *J. Cogn. Neurosci.* , 18 (11), 1820-1828.
- 3) Ansari, D., Garcia, N., Lucas, E., Hamon, K. & Dhital, B. (2005). Neural correlates of symbolic number processing in children and adults. *Neuroreport* , 16 (16), 1769-1773.
- 4) Antell, S. & Keating, D. (1983). Percetion of numerical invariance in neonates. *Child Development* (54), 695-701.
- 5) Ashcraft, M. (1992). Cognitive arithmetic: a review of data and theory. *Cognition* , 44, 75-106.
- 6) Banks, W. & Coleman, M. (1981). Two subjective scales of number. *Perception & Psychophysics* (29), 95-105.
- 7) Banks, W. & Hill, D. (1974). The apparent magnitude of number scaled by random production. *Journal of Experimental Psychology* , 102, 353-376.
- 8) Benton, A. (1987). Mathematical disability and the Gerstmann syndrome. Dans G. Deloche & X. Seron, *Mathematical Disabilities: A Cognitive Neuropsychological Perspective* (pp. 111-120). Hillsdale New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- 9) Berger, H. (1926). Über Rechenstörungen bei Herderkrankungen der Grosshirns. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* , 78, 238-263.

- 10)Boysen, S., Bernston, G., Hannan, M. & Cacioppo, J. (1996). Quantity-based interference and symbolic representations in chimpanzees (Pan troglodytes). *J. Exp. Psychol. Anim. Behav. Process.* , 22 (1), 76-86.
- 11)Brysbaert, M. (1995). Arabic number reading: on the nature of the numerical scale and the origin of phonological recoding. *Journal of Experimental Psychology: General* , 124, 434-452.
- 12)Butterworth, B., Cipolotti, L. & Warrington, E. (1996). Short-term memory impairment and numerical ability. *Quarterly Journal of experimental Psychology* , 49A (1), 251-262.
- 13)Campbell, J. (2004). *The Handbook of Mathematical Cognition*. Londres: Psychology Press.
- 14)Campbell, J. & Clark, J. (1992). Cognitive number processing: an encoding-complex perspective. Dans J. Campbell (Éd.), *The Nature and Origins of Mathematical Skills* (pp. 457-492). Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.
- 15)Cantlon, J., Brannon, E., Carter, E. & Pelphrey, K. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLoS Biol.* , 4 (5), e125.
- 16)Cappelletti, M., Butterworth, B. & Kopelman, M. (2001). Spared numerical abilities in a case of semantic dementia. *Neuropsychologia* , 39 (11), 1224-1239.
- 17)Caramazza, A. & Hillis, A. (1990). Spatial representation of words in the brain implied by studies of a unilateral neglect patient. *Nature* , 346, 267-269.
- 18)Chochon, F., Cohen, L., Van de Moortele, P. & Dehaene, S. (1999). Differential contributions of the left and right inferior parietal lobules to number processing. *Journal of Cognitive Neuroscience* (11), 617-630.
- 19)Chomsky, N. (1956). Three models for the description of language. *IRE Transactions on Information Theory* (2), 113-124.

- 20) Church, R. & Meck, W. (1984). The numerical attribute of stimuli. Dans H. Roitblat, T. Bever, & H. Terrace, *Animal Cognition*. Hillsdale NJ: Erlbaum.
- 21) Cipolotti, L. (1995). Multiple routes for reading words, why not numbers? Evidence from case of arabic numeral dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 12 (3), 313-342.
- 22) Cipolotti, L., Warrington, E. & Butterworth, B. (1995). Selective impairment in manipulating arabic numerals. *Cortex* (31), 73-86.
- 23) Cohen, L. & Dehaene, S. (2000). Calculating without reading: unsuspected residual abilities in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology*, 17 (6), 563-583.
- 24) Cohen, L. & Dehaene, S. (1996). Cerebral networks for number processing: evidence from a case of posterior callosal lesion. *NeuroCase* (2), 155-174.
- 25) Cohen, L. & Dehaene, S. (1991). Neglect dyslexia for numbers? A case report. *Cognitive Neuropsychology*, 8 (1), 39-58.
- 26) Cohen, L. & Dehaene, S. (1995). Number processing in pure alexia: the effect of hemispheric asymmetries and task demands. *Neurocase* (1), 121-138.
- 27) Cohen, L. & Revkin, S. (2008). Acalculie. Dans B. Lechevalier, F. Eustache & F. Viader, *Traité de neuropsychologie clinique* (pp. 545-559). Bruxelles: De Boeck.
- 28) Cohen, L., Dehaene, S. & Verstichel, P. (1994). Number words and number non words: a case of deep dylexia extending to arabic numerals. *Brain* (117), 267-279.
- 29) Cohen, L., Dehaene, S., Chochon, F., Lehéricy, L. & Naccache, L. (2000). Language and calculation within the parietal lobe: a combined cognitive, anatomical and fIRM study. *Neuropsychologia* (38), 1426-1440.
- 30) Cohen, L., Verstichel, P. & Dehaene, S. (1997). Neologistic jargon sparing numbers: a category specific phonological impairment. *Cognitive Neuropsychology* (14), 1029-1061.

- 31) Damasio, A. (1994). *Descartes' error: emotion, reason and the human brain*. (G. Putnam, Éd.) New York, NY.
- 32) Dehaene, S. (2007b). Symbols and quantities in parietal cortex: elements of a mathematical theory of number representation and manipulation. Dans P. Haggard & Y. Rossetti, *Attention & Performance XXII. Sensori-motor Foundations of Higher Cognition* (pp. 527-574). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- 33) Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths, nouvelle édition*. Paris: Odile Jacob.
- 34) Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition* (44), 1-42.
- 35) Dehaene, S. (2006). *Vers une science de la vie mentale*. Paris: Fayard.
- 36) Dehaene, S. & Akhavein, R. (1995). Attention, automaticity and levels of representation in number processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* (21), 314-326.
- 37) Dehaene, S. & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33, 219-250.
- 38) Dehaene, S. & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition* (1), 83-120.
- 39) Dehaene, S. & Cohen, L. (1991). Two mental calculation systems: a case study of severe acalculia with preserved approximation. *Neuropsychologia* (29), 1045-1074.
- 40) Dehaene, S. & Cohen, L. (2000). Un modèle anatomique et fonctionnel de l'arithmétique mentale. Dans M. Pesenti & X. Seron, *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres* (pp. 191-232). Marseille: Solal.
- 41) Dehaene, S., Bossini, S. & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General* (122), 371-396.

- 42)Dehaene, S., Dehaene-Lambertz, G. & Cohen, L. (1998). Abstract representations of numbers in the animal and human brain. *Trends in neuroscience* (21), 355-361.
- 43)Dehaene, S., Dupoux, E. & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital: analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* (16), 626-641.
- 44)Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P. & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology* (20), 487-506.
- 45)Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R. & Tsivkin, S. (1999). Source of mathematical thinking: behavior and brain-imaging evidence. *Science* , 284, 970-974.
- 46)Dehaene, S., Tzourio, N., Frak, V., Raynaud, L., Cohen, L., Mehler, J. & Mazoyer B. (1996). Cerebral activations during number multiplication and comparison: a PET study. *Neuropsychologia* (34), 1097-1106.
- 47)Delazer, M. (2000). Neuropsychologie des faits arithmétiques. Dans M. Pesenti & X. Seron, *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres* (pp. 167-190). Marseille: Solal.
- 48)Delazer, M. & Girelli, L. (2004). Le modèle modulaire de McCloskey. Dans M. Pesenti & X. Seron, *La cognition numérique* (p. 58). Hermès-Lavoisier.
- 49)Delazer, M., Domahs, F., Bartha, L., Brenneis, C., Lochy, A., Trieb, T. & Benke T. (2003). Learning complex arithmetic-an fIRM study. *Cognitive Brain Research* (18), 76-88.
- 50)Deloche, G. & Seron, X. (1982a). From one to 1: an analysis of a transcoding process by means of neuropsychological data. *Cognition* (12), 119-149.
- 51)Deloche, G. & Seron, X. (1982b). From three to 3: a differential analysis of skills in transcoding quantities between patients with Broca's and Wernicke's aphasia. *Brain* (105), 719-733.

- 52) Deloche, G. & Seron, X. (1987). Numerical transcoding: a general production model. Dans G. Deloche & X. Seron, *Mathematical disabilities: a cognitive neuropsychological perspective*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- 53) Deloche, G. & Seron, X. (1984). Semantic errors reconsidered in the procedural light of stack concepts. *Brain and language*, 21 (1), 59-71.
- 54) Dormal, V., Andres, M. & Pesenti, M. (2012). Contribution of the right intraparietal sulcus to numerosity and length processing: an fMRI-guided TMS study. *Cortex* (48), 623-629.
- 55) Eger, E., Sterzer, P., Russ, M., Giraud, A. & Kleinschmidt, A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron*, 37 (4), 719-725.
- 56) Fayol, M. (2004). Nombres, langage et systèmes de notation. Dans M. Pesenti & X. Seron, *La cognition numérique* (pp. 189-218). Paris: Hermès-Lavoisier.
- 57) Feigenson, L., Carey, S. & Hauser, M. (2002). The representations underlying infants' choice of more: object files versus analog magnitudes. *Psychol. Sci.*, 13 (2), 150-156.
- 58) Feigenson, L., Dehaene, S. & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends Cogn. Sci.*, 8 (7), 307-314.
- 59) Fias, W. & Pesenti, M. (2004). Le modèle du triple code de Dehaene. Dans M. Pesenti & X. Seron, *La cognition numérique* (pp. 69-94). Paris: Hermès-Lavoisier.
- 60) Fias, W., Brysbaert, M., Geypens, F. & d'Ydewalle, G. (1996). The importance of magnitude information in numerical processing: evidence from the SNARC effect. *Mathematical Cognition* (2), 95-110.
- 61) Fias, W., Lammertyn, J., Reynvoet, B., Dupont, P. & Orban, G. (2003). Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude. *J. Cogn. Neurosci.*, 15 (1), 47-56.



- 62)Fias, W., Lauwereyns, J. & Lammertyn, J. (2001). Irrelevant digits affect feature-based attention depending on the overlap of neural circuits. *Cognitive Brain Research* , 12 (3), 415-423.
- 63)Fias, W., Reynvoet, B. & Brysbaert, M. (2001). Are arabic numerals processed as pictures in a Stroop interference task? *Psychological Research-Psychologische Forschung* (65), 242-249.
- 64)Fischer, M., Castel, A., Dodd, M. & Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nat. Neurosci.* , 6 (6), 555-556.
- 65)Funnel, M., Colvin, M. & Gazzaniga, M. (2007). The calculating hemispheres: studies of a split-brain patient. *Neuropsychologia* (45), 2378-2386.
- 66)Gall, F. J. & Spurzheim, J. C. (1808). *Recherches sur les systèmes nerveux en général et sur celui du cerveau en particulier*. Amsterdam: E.J. Bonset.
- 67)Gallistel, C. (1990). *The Organization of Learning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- 68)Gazzaniga, M. & Hillyard, S. (1971). Language and speech capacity of the right hemisphere. *Neuropsychologia* (9), 273-280.
- 69)Gerstmann, J. (1940). Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia and acalculia. *Archives of Neurology and Psychiatry* (44), 398-408.
- 70)Geschwind, N. & Galaburda, A. (1985). Cerebral lateralization. Biological mechanisms, associations, and pathology: I. A hypothesis and a program for research. *Arch. Neurol.* , 42 (5), 428-459.
- 71)Grafman, J., Kampen, D., Rosenberg, J., Salazar, A. & Boller, F. (1989). Calculation abilities in a patient with a virtual left hemispherectomy. *Behavioural Neurology* (2), 183-194.
- 72)Gruber, O., Indefrey, P., Steinmetz, H. & Kleinschmidt, A. (2001). Dissociating neural correlates of cognitive components in mental calculation. *Cortex* , 11, 350-359.

- 73) Hécaen, H., Angelergues, R. & Houiller, S. (1961). Les variétés cliniques au cours des lésions rétrorolandiques: approche statistique du problème. *Revue Neurologie* , 2, 85-103.
- 74) Henschen, S. E. (1926). Clinical and anatomical contributions on brain pathology. *Archives of Neurology and Psychiatry* (13), 226-249.
- 75) Henschen, S. E. (1919). Über Sprach-, Musik- und Rechenmechanismen und ihre Lokalisation im Grobhirn. *Zeitschrift für die Gesamte Neurologie und Psychiatrie* (52), 273-298.
- 76) Hermite, C. (1905). Correspondance entre Charles Hermite et Joannes Stieltjes.
- 77) Hilbert, D. (1899). *Grundlagen der Geometrie*. Leipzig: Teubner.
- 78) Hubbard, E., Piazza, M., Pinel, P. & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nat. Rev. Neurosci.* , 6 (6), 435-448.
- 79) Hubbard, E., Piazza, M., Pinel, P. & Dehaene, S. (2009). Numerical and spatial intuitions: a role for posterior parietal cortex? Dans L. Tommasi, L. Nadel, & M. Peterson, *Cognitive Biology: Evolutionary and Developmental Perspectives on Mind, Brain and Behavior* (pp. 221-246). Cambridge, MA: MIT Press.
- 80) Hyde, D. & Spelke, E. (2009). All numbers are not equal: an electrophysiological investigation of small and large number representations. *J. Cogn. Neurosci.* , 21 (6), 1039-1053.
- 81) Ito, Y. & Hatta, T. (2004). Spatial structure of quantitative representation of numbers: evidence from the SNARC effect. *Mem. Cognit.* , 32 (4), 662-673.
- 82) Izard, V., Dehaene-Lambertz, G. & Dehaene, S. (2008). Distinct cerebral pathways for object identity and number in human infants. *PLoS Biol.* , 6 (2), 275-285.
- 83) Izard, V., Sann, C., Spelke, E. & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* , 106 (25), 10382-10385.

- 84)JMB. (2013). [www.jmb-electronique.com/document/signaux Anal logique.pdf](http://www.jmb-electronique.com/document/signaux%20Anal%20logique.pdf). Consulté en 2013, sur JMB Electronique.
- 85)Kaufmann, L., Koppelstaetter, F., Siedentopf, C., Haala, I., Haberlandt, E., Zimmerhackl, L., Felber S. & Ischebeck A. (2006). Neural correlates of the number-size interference task in children. *Neuroreport* , 17 (6), 587-591.
- 86)Knops, A., Thirion, B., Hubbard, E., Michel, V. & Dehaene, S. (2009). Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science* , 324 (5934), 1583-1585.
- 87)Knops, A., Viarouge, A. & Dehaene, S. (2009). Dynamic representations underlying symbolic and nonsymbolic calculation: evidence from the operational momentum effect. *Atten. Percept. Psychophys.* , 71 (4), 803-821.
- 88)Kucian, K., Von Aster, M., Loenneker, T., Dietrich, T. & Martin, E. (2008). Development of neural networks for exact and approximate calculation: a fMRI study. *Dev. Neuropsychol.* , 33 (4), 447-473.
- 89)Lefevre, J., Bisanz, J. & Mrkonjic, L. (1988). Cognitive arithmetic: evidence for obligatory activation of arithmetical facts. *Memory and Cognition* , 16, 45-53.
- 90)Lemaire, P., Barrett, S., Fayol, M. & Abdi, H. (1994). Automatic activation of addition and multiplication facts in elementary school children. *Journal of Experimental Child Psychology* , 57, 224-258.
- 91)Lemer, C. (2004). L'arithmétique mentale: du novice à l'expert. Dans M. Pesenti, & X. Seron, *La cognition numérique* (p. 136). Paris: Hermès-Lavoisier.
- 92)Lemer, C., Dehaene, S., Spelke, E. & Cohen, L. (2003). Approximate quantities and exact number words: dissociable systems. *Neuropsychologia* , 41, 1942-1958.
- 93)Loetscher, T., Bockisch, C., Nicholls, M. & Brugger, P. (2010). Eye position predicts what number you have in mind. *Curr. Biol.* , 20 (6), R264-265.

- 94) Luria, A. R. (1970). *Traumatic aphasia: its syndromes, psychology and treatment*. The Hague: Mouton.
- 95) Macaruso, P., McCloskey, M. & Alimonsa, D. (1993). The functional architecture of the cognitive numerical-processing system: evidence from a patient with multiple impairments. *Cognitive Neuropsychology*, 10 (4), 341-376.
- 96) Mandler, G. & Shebo, B. (1982). Subitizing: an analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General* (111), 1-22.
- 97) Matsuzawa, T. (2009). Symbolic representation of number in chimpanzees. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 19 (1), 92-98.
- 98) Matsuzawa, T. (1985). Use of numbers by a chimpanzee. *Nature*, 315 (6014), 57-59.
- 99) McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numeral processing: evidence for acquired dyscalculia. *Cognition*, 44, 107-157.
- 100) McCloskey, M. & Caramazza, A. (1987). Cognitive mechanisms in normal and impaired number processing. Dans G. Deloche, & X. Seron, *Mathematical Disabilities: A Cognitive Neuropsychological Perspective* (pp. 201-219). Hillsdale NJ: Erlbaum.
- 101) McCloskey, M., Alimonsa, D., & Sokol, S. (1991). Facts, rules and procedures in normal calculation: evidence from multiple single-patient studies of impaired arithmetic fact retrieval. *Brain and Cognition* (17), 154-203.
- 102) McCloskey, M., Caramazza, A. & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation: evidence from dyscalculia. *Brain and cognition* (4), 171-196.
- 103) McCloskey, M., Macaruso, P. & Whetstone, T. (1992). The functional architecture of numerical processing mechanisms: defending the modular view. Dans J. Campbell (Éd.), *The nature and origins of mathematical skills* (pp. 493-538). Amsterdam: Elsevier Science.

- 104) McCloskey, M., Sokol, S. & Goodman, R. (1986). Cognitive processes in verbal-number production: inferences from the performance of brain-damaged subjects. *Journal of Experimental Psychology: General* , 115, 307-330.
- 105) McCloskey, M., Sokol, S., Goodman-Shulman, R. & Caramazza, A. (1990). Cognitive representations and processes in number production: evidence from cases of acquired dyscalculia. Dans A. Caramazza, *Advances in cognitive neuropsychology and neurolinguistics*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- 106) McCulloch, W. S. (1965). *Embodiments of mind*. (M. Press, Éd.)
- 107) McGarrigle, J. & Donaldson, M. (1974). Conservation accidents. *Cognition* (3), 341-350.
- 108) McNeil, J. E. & Warrington, E. K. (1994). A dissociation between addition and subtraction with written calculation. *Neuropsychologia* , 32, 717-728.
- 109) Mechner, F. (1958). Probability relations within response sequences under ratio reinforcement. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior* (1), 109-121.
- 110) Meck, W. & Church, R. (1983). A mode control model of counting and timing processes. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes* (9), 320-334.
- 111) Miozzo, M. & Caramazza, A. (1998). Varieties of pure alexia: the case of failure to access graphemic representations. *Cognitive Neuropsychologie* , 15 (1/2), 203-238.
- 112) Mirassou, A. (2010). Des calculi aux dyscalculies. Dans S. Chokron, & J. Demonet, *Approche neuropsychologique des troubles de apprentissages* (pp. 209-224). Marseille: Solal.
- 113) Moyer, R. & Landauer, T. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature* (215), 1519-1520.

- 114) Naccache, L. & Dehaene, S. (2001a). The priming method: imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal lobes. *Cereb. Cortex* , 11 (10), 966-974.
- 115) Naccache, L. & Dehaene, S. (2001b). Unconscious semantic priming extends to novel unseen stimuli. *Cognition* , 80 (3), 215-229.
- 116) Nieder, A. (2005). Counting on neurons: the neurobiology of numerical competence. *Nat. Rev. Neurosci.* , 6 (3), 177-190.
- 117) Nieder, A. & Dehaene, S. (2009). Representation of number in the brain. *Annual Review of Neuroscience* (32), 185-208.
- 118) Nieder, A. & Miller, E. (2004). A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* , 101 (19), 7457-7462.
- 119) Nieder, A. & Miller, E. (2003). Coding of cognitive magnitude. Compressed scaling of numerical information in the primate prefrontal cortex. *Neuron* , 37 (1), 149-157.
- 120) Nieder, A., Freedman, D. & Miller, E. (2002). Representation of the quantity of visual items in the primate prefrontal cortex. *Science* , 297 (5587), 1708-1711.
- 121) Noël, M. & Seron, X. (1995). Lexicalization errors in writing arabic numerals. *Brain and Cognition* (29), 151-179.
- 122) Noël, M., Fias, W. & Brysbaert, M. (1997). About the influence of presentation format on the retrieval of arithmetical facts. *Cognition* (63), 335-374.
- 123) Notari, C. (2010). *Chomsky et l'ordinateur. Approche critique d'une théorie linguistique*. Toulouse: Presses Universitaires du Mirail, coll. "Linguistique et didactique".

- 124) Pearson, J., Roitman, J., Brannon, E., Platt, M. & Raghavachari, S. (2010). A physiologically-inspired model of numerical classification based on graded stimulus coding. *Front. Behav. Neurosci.* (4), 1.
- 125) Pesenti, M., Zago, L., Crivello, F., Mellet, E., Samson, D., Duroux, B., Seron X., Mazoyer N. & Tzourio-Mazoyer B. (2001). Mental calculation in a prodigy is sustained by right prefrontal and medial-temporal areas. *Nature Neuroscience* (4), 1-6.
- 126) Piaget, J. & Szeminska, A. (1941). *La Génèse du nombre chez l'enfant*. Neuchâtel: Delachaux & Niestlé.
- 127) Piazza, M. (2004). Processus de quantification: subitizing, dénombrement et estimation de numérosités. Dans M. Pesenti, & X. Seron, *La cognition numérique* (p. 115). Paris: Hermès-Lavoisier.
- 128) Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Dehaene S. & Zorzi M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition* , 116 (1), 33-41.
- 129) Piazza, M., Mechelli, A., Price, C. & Butterworth, B. (2006). Exact and approximate judgements of visual and auditory numerosity: an fIRM study. *Brain* (1106), 177-188.
- 130) Piazza, M., Pinel, P., Le Bihan, D. & Dehaene, S. (2007). A magnitude code common to numerosities and number symbols in human intraparietal cortex. *Neuron* (53), 293-305.
- 131) Pica, P., Lemer, C., Izard, V. & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science* (306), 499-503.
- 132) Pinel, P., Dehaene, S., Riviere, D. & Le Bihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage* , 14 (5), 1013-1026.

- 133) Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D. & Dehaene, S. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size and luminance during comparative judgments. *Neuron* , 41 (6), 983-993.
- 134) Platt, J. & Johnson, D. (1971). Localization of position within a homogeneous behavior chain: effects of error contingencies. *Learning and Motivation* (2), 386-414.
- 135) Poincaré, R. (1905). *L'analyse de la physique*.
- 136) Revkin, S., Piazza, M., Izard, V., Cohen, L. & Dehaene, S. (2008). Does subitizing reflect numerical estimation? *Psychol. Sci.* , 19 (6), 607-614.
- 137) Reynvoet, B., Brysbaert, M. & Fias, W. (2002). Semantic priming in number naming. *Q. J. Exp. Psychol. A.* , 55 (4), 1127-1139.
- 138) Rickard, T., Romero, S., Basso, G., Wharton, C., Flitman, S. & Grafman, J. (2000). The calculating brain: an fIRM study. *Neuropsychologia* (38), 325-335.
- 139) Rivera, S., Reiss, A., Eckert, M. & Menon, V. (2005). Developmental changes in mental arithmetic: evidence for increased functional specialization in the left inferior parietal cortex. *Cereb. Cortex* , 15 (11), 1779-1790.
- 140) Roitman, J., Brannon, E. & Platt, M. (2007). Monotonic coding of numerosity in macaque lateral intraparietal area. *PLoS Biol.* , 5 (8), e208.
- 141) Rossor, M., Warrington, E., & Cipolotti, L. (1995). The isolation of calculation skills. *Journal of Neurology* , 242, 78-81.
- 142) Rumbaugh, D., Savage-Rumbaugh, S. & Hegel, M. (1987). Summation in the chimpanzee (Pan troglodytes). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes* (13), 107-115.
- 143) Sawamura, H., Shima, K. & Tanji, J. (2002). Numerical representation for action in the parietal cortex of the monkey. *Nature* , 415 (6874), 918-922.



- 144) Seron, X. & Fayol, M. (2004). Chapitre 8: Nombres, langage et systèmes de notation. Dans M. Pesenti, & X. Seron, *La cognition numérique* (pp. 189-218).
- 145) Shaki, S. & Fischer, M. (2008). Reading space into numbers - a cross-linguistic comparison of the SNARC effect. *Cognition* , 108 (2), 590-599.
- 146) Shepard, R., Kilpatrick, D. & Cunningham, J. (1975). The internal representation of numbers. *Cognitive Psychology* (7), 82-138.
- 147) Shipley, E. & Shepperson, B. (1990). Countable entities: developmental changes. *Cognition* (34), 109-136.
- 148) Simon, O., Kherif, F., Flandin, G., Poline, J., Riviere, D., Mangin, J., Le Bihan D. & Dehaene S. (2004). Automated clustering and functional geometry of human parietofrontal networks for language, space and number. *NeuroImage* , 23 (3), 1192-1202.
- 149) Simon, O., Mangin, J., Cohen, L., Le Bihan, D. & Dehaene, S. (2002). Topographical layout of hand, eye, calculation and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron* , 33 (3), 475-487.
- 150) Sokol, S., McCloskey, M., Cohen, N. J. & Alimonsa, D. (1991). Cognitive representations and processes in arithmetic: inferences from the performances of brain-damaged subjects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* , 17, 355-376.
- 151) Starkey, P. & Cooper, R. (1980). Perception of numbers by human infants. *Science* (210), 1033-1035.
- 152) Takayama, Y., Sugishita, M., Akiguchi, I. & Kimura, J. (1994). Isolated acalculia due to a left parietal lesion. *Archives of Neurology* , 21, 286-294.
- 153) Thioux, M. (2000). Le transcodage des numéraux: revue critique des études de cas en neuropsychologie et leurs implications sur la modélisation des traitements numériques. Dans M. Pesenti, & X. Seron, *Neuropsychologie*

*des troubles du calcul et du traitement des nombres* (pp. 127-166). Marseille: Solal.

- 154) Tudusciuc, O. & Nieder, A. (2007). Neuronal population coding of continuous and discrete quantity in the primate posterior parietal cortex. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* , 104 (36), 14513-14518.
- 155) Van Loosbroek, E. & Smitsman, A. (1990). Visual perception of numerosity in infancy. *Developmental Psychology* (26), 916-922.
- 156) Viarouge, A., Hubbard, E., Dehaene, S. & Sackur, J. (2008). Number line compression and the illusory perception of random numbers. *Cognition*, Submitted .
- 157) Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends Cogn. Sci.* , 7 (11), 483-488.
- 158) Warrington, E. K. (1982). The fractionation of arithmetical skills: a single case study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* , 34A, 31-51.
- 159) Warrington, E. (1982). The fractionation of arithmetical skills: a single case study. *The Quarterly Journal Experimental Psychology* , 34A, 31-51.
- 160) Washburn, D. & Rumbaugh, D. (1991). Ordinal judgments of numerical symbols by macaques (*Macaca mulatta*). *Psychological Science* (2), 190-193.
- 161) Woodruff, G. & Premack, D. (1981). Primitive mathematical concepts in the chimpanzee: proportionality and numerosity. *Nature* , 293 (5833), 568-570.
- 162) Wynn, K. (1996). Infants' individuation and enumeration of actions. *Psychological Science* (7), 164-169.
- 163) Zago, L., & Pesenti, M. (2004). Bases neurales des activités numériques. Dans M. Pesenti, & X. Seron, *La cognition numérique* (pp. 249-278). Paris: Hermès-Lavoisier.

- 164) Zago, L., & Tzourio-Mazoyer, N. (2002). Distinguishing visuospatial working memory and complex mental calculation areas within the parietal lobes. *Neuroscience Letters* , 331, 45-49.
- 165) Zago, L., Pesenti, M., Mellet, E., Crivello, F., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Neural correlates of simple and complex mental calculation. *NeuroImage* , 13, 314-327.
- 166) Zago, L., Turbelin, M., Andersson, F., Vigneau, M. & Tzourio-Mazoyer, N. (2008). How verbal and spatial manipulation networks contribute to calculation: an fMRI study. *Neuropsychologia* , 46, 2403-2414.
- 167) Zebian, S. (2005). Linkages between number concepts, spatial thinking, and directionality of writing: the SNARC effect and the REVERSE SNARC effect in english and arabic monoliterates, biliterates and illiterate arabic speakers. *Journal of Cognition and Culture* , 5 (1-2), 165-191.
- 168) Zorzi, M., Priftis, K. & Umiltà, C. (2002). Brain damage: neglect disrupts the mental number line. *Nature* , 417 (6885), 138-139.

## ANNEXES

<b>Annexe 1</b> : Normes des épreuves utilisées pour l'étude de groupe.....	103
<b>Annexe 2</b> : Informations concernant les 33 patients évalués.....	104
<b>Annexe 3</b> : Les épreuves initiales.....	105
<b>Annexe 4</b> : Epreuve d'estimation de nuage de points.....	106
<b>Annexe 5</b> : Informations concernant les 30 sujets témoin de l'épreuve d'estimation de nuage de points.....	110
<b>Annexe 6</b> : Epreuves administrées à la population AVC.....	111
<b>Annexe 7</b> : Notes brutes des 33 patients aux 8 épreuves administrées.....	117

## ANNEXE 1 : NORMES DES EPREUVES UTILISEES POUR L'ETUDE DE GROUPE

Normes réalisées grâce aux scores de 423 sujets contrôle pour le test de l'ECAN.

TABLEAU 10 : NORMES DES SCORES POUR L'ECAN (1)

		Placement de nombres sur une échelle graduée	Comparaison de nombres arabes	Comparaison de numéraux verbaux écrits	Comparaison de numéraux verbaux oraux
N	Valide	422	423	422	423
	Manquante	1	0	1	0
	Moyenne	9,35	19,77	18,84	19,65
	Ecart type	0,962	0,523	12,37	0,729
Centiles	5	8,00	19,00	17,00	18,00
	95	10,00	20,00	20,00	20,00

TABLEAU 11 : NORMES DES SCORES POUR L'ECAN (2)

		Soustractions	Désignation de nombres arabes	Désignation de numéraux verbaux écrits	Lecture de nombres arabes
N	Valide	423	423	423	422
	Manquante	0	0	0	1
	Moyenne	24,60	9,77	9,57	19,91
	Ecart type	0,928	0,492	0,674	0,299
Centiles	5	23,00	9,00	8,00	19,00
	95	25,00	10,00	10,00	20,00

TABLEAU 12 : NORMES DES SCORES POUR L'ECAN (3)

		Ecriture sous dictée de nombres arabes	Ecriture de numéraux verbaux écrits à partir de nombres arabes	Ecriture de nombres arabes à partir de numéraux verbaux écrits	Multiplications
N	Valide	420	422	423	423
	Manquante	3	1	0	0
	Moyenne	19,91	9,92	9,81	23,09
	Ecart type	0,371	0,291	0,478	2,037
Centiles	5	19,00	9,00	9,00	19,00
	95	20,00	10,00	10,00	25,00

## ANNEXE 2 : INFORMATIONS CONCERNANT LES 33 PATIENTS EVALUES

	Initiales	Date de passation	Age	NSC	Latéralité	Aphasie	Lésion
1	C.H.	18.09.12	68	1	D	E	G
2	G.J.	26.09.12	75	3	D	E + C	?
3	T.J-P.	26.09.12	50	1	G	E	D
4	R.K.	27.09.12	63	1	D	E + C	G
5	M.F.	27.09.12	63	2	D	E	?
6	A.F.	28.09.12	54	?	D	E	G
7	B.F.	28.09.12	43	1	D	E + C	G
8	B.J-M.	27.11.12	48	1	D	E + C	G
9	B.B.	03.12.12	63	?	D	E + C	G
10	LG.P.	20.11.12 + 03.12.12	46	?	?	E + C	G
11	B.D.	27.11.12 + 04.12.12	57	?	?	E + C	G
12	D.G.	03.12.12 + 04.12.12	89	?	D	E + C	G
13	D.M.	04.12.12	54	1	D	non	D
14	D.P.	10.12.12	76	1	D	non	G
15	H.G.	10.12.12	82	1	?	E + C	G
16	F.J.	17.12.12	73	?	?	E + C	G
17	D.A.	17.12.12 + 18.12.12	62	3	D	non	D
18	C.J-L.	07.01.13	75	2	D	non	G
19	G.B.	07.01.13 + 08.01.13	57	1	?	E + C	G
20	B.J.	28.01.13 + 29.01.13	58	2	D	E + C	G
21	N.D.	05.02.13	67	1	D	?	G
22	G.Y.	18.02.13 + 19.02.13	57	1	D	E + C	G
23	G.N.	19.02.13	43	3	D	E	G
24	C.L.	25.02.13	79	1	D	non	D
25	A.A.	04.03.13	63	3	D	E + C	G
26	P.A.	06.03.13	24	2	D	E + C	G
27	B.M-J.	25.03.13	47	1	D	non	D
28	S.M.	25.03.13	70	1	D	alexie-agraphie	D + G
29	R.M-C.	26.03.13	68	1	G→D	non	G
30	L.J-M.	26.03.13	57	1	D	non	D
31	C.P.	26.03.13	47	1	D	non	D
32	A.J.	08.04.13 + 09.04.13	77	1	D	E + C	G
33	V.X.	23.04.13	59	1	D	E + C	?

**Tableau 13 : Informations concernant les 33 patients évalués**

### **Légende :**

- NSC = Niveau Socio-Culturel (1 = sans BAC ; 2 = Bac à Bac +2 ; 3 ≥ Bac + 3)
- D = Droitier ou Lésion de l'hémisphère droit
- G = Gaucher ou Lésion de l'hémisphère gauche
- G → D = Gaucher contrarié
- E = Aphasie d'expression
- C = Aphasie de compréhension

## ANNEXE 3 : LES EPREUVES INITIALES

Au début, 13 épreuves étaient proposées :

EPREUVES ANALOGIQUES	EPREUVES SYMBOLIQUES
Placement d'un nombre arabe sur une échelle de 0 à 100	Désignation de nombres arabes
Jugement de grandeur entre deux nombres arabes	Désignation de numéraux verbaux écrits
Jugement de grandeur entre deux numéraux verbaux écrits	Lecture à haute voix de nombres arabes
Jugement de grandeur entre deux numéraux verbaux oraux	Ecriture sous dictée de nombres arabes
Estimation de nuages de points	Ecriture de numéraux verbaux écrits à partir de nombres arabes
Soustraction	Ecriture de nombres arabes à partir de numéraux verbaux écrits
	Multiplication

**Tableau 14** : Les épreuves initiales

Cependant, certaines épreuves manquaient de spécificité pour l'évaluation d'un domaine et provoquaient de plus de nombreuses données manquantes. C'est pourquoi le nombre d'épreuves a été réduit à 8, soit 4 par domaine.

## ANNEXE 4 : EPREUVE D'ESTIMATION DE NUAGE DE POINTS

Objectif de l'épreuve : évaluer les capacités d'estimation associées au **domaine analogique**.

Fondements théoriques : l'estimation est un processus de quantification reposant strictement sur la représentation analogique (Dehaene, 2010). En effet, celle-ci est **approximative** et **continue** et intervient donc notamment lors des calculs approximatifs et des estimations de quantités. En revanche, la notation numérique ne permet pas d'effectuer des approximations. C'est pourquoi, même si la réponse repose sur le code arabe, les performances à cette épreuve sont considérées comme représentatives de l'intégrité de la fonction analogique.

Modalités de passation : le patient doit désigner le nombre arabe correspondant à la valeur approximative de l'ensemble. Chaque réponse correcte est cotée 1 point, une absence de réponse ou une réponse fausse sont cotées 0. La note finale est sur 10 points.

Consigne : « Montrez-moi parmi les trois nombres proposés celui qui correspond à peu près au nombre de points que vous voyez. »

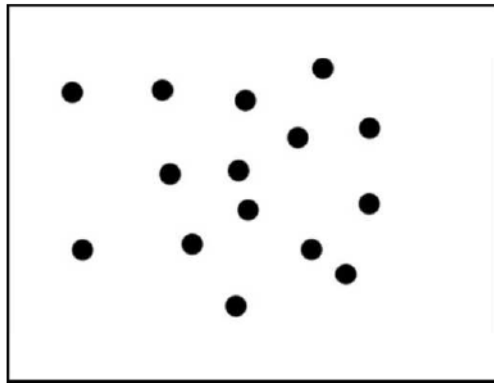
The figure displays two dot estimation tasks. Each task consists of a square containing a set of black dots and a box with three numerical options.

**Task 1:** A square contains 10 dots. The options are 5, 10, and 30.

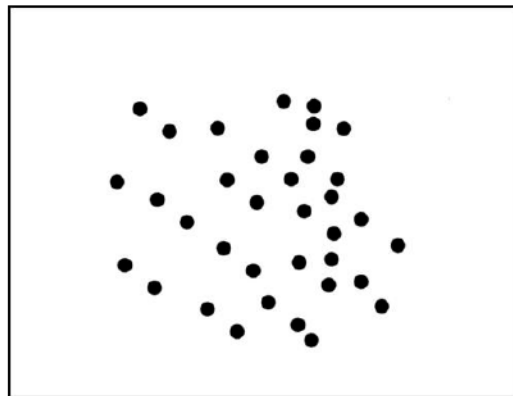
**Task 2:** A square contains 20 dots. The options are 10, 20, and 90.

**Figure 18** : Items de l'épreuve d'estimation de nuage de points (1)

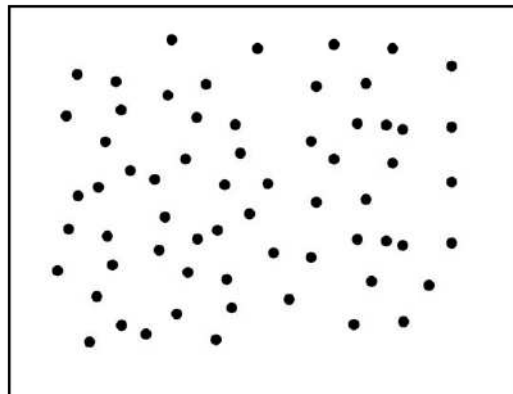




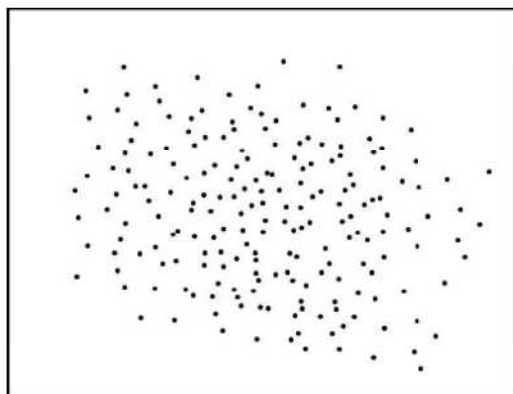
50  
5  
15



30  
100  
10

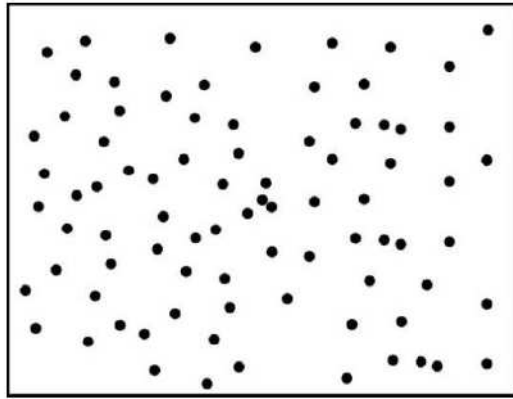


15  
60  
300

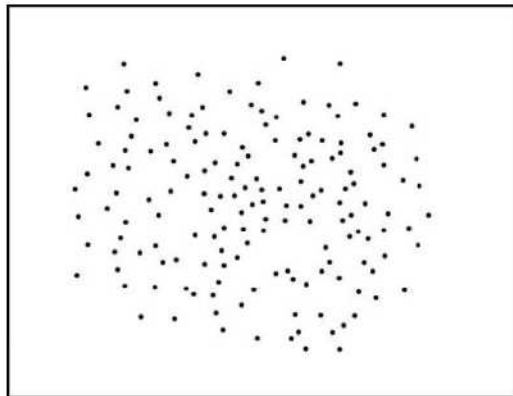


200  
50  
2000

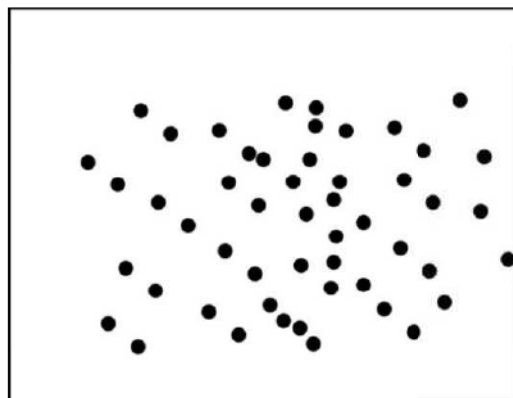
***Figure 19 : Items de l'épreuve d'estimation de nuage de points (2)***



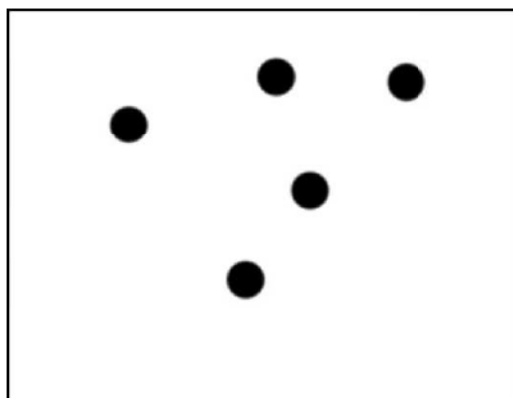
20  
80  
400



30  
120  
600



50  
10  
150



10  
5  
2

**Figure 20** : *Items de l'épreuve d'estimation de nuage de points (3)*

**Estimation de points : choix code arabe**

**Consigne :** « Entourez le chiffre correspondant approximativement au nombre de points. »

10	20	15	30	60	200	80	120	50	5

Commentaires : .....

.....

.....

.....

<b>SCORE</b>	<b>10</b>	<b>TEMPS</b>	
--------------	-----------	--------------	--

**Figure 21 : Carnet de notation de l'examineur pour l'épreuve d'estimation de nuage de points**

## ANNEXE 5 : INFORMATIONS CONCERNANT LES 30 SUJETS TEMOINS POUR LA NORMALISATION DE L'ÉPREUVE D'ESTIMATION DE NUAGE DE POINTS

L'épreuve d'estimation de nuages de points ne fait pas partie de la batterie de tests de l'ECAN. Une rapide normalisation a été effectuée dans le cadre de ce mémoire auprès de 30 personnes tout-venant.

Ces témoins sont majeurs, francophones, ne souffrent pas de dyscalculie diagnostiquée et ne sont pas illettrés. De plus, leur répartition est la suivante : il y a 67% de femmes, l'âge moyen est de 59 ans et le niveau socio-culturel est le niveau 1 à 37%, de même que le niveau 3.

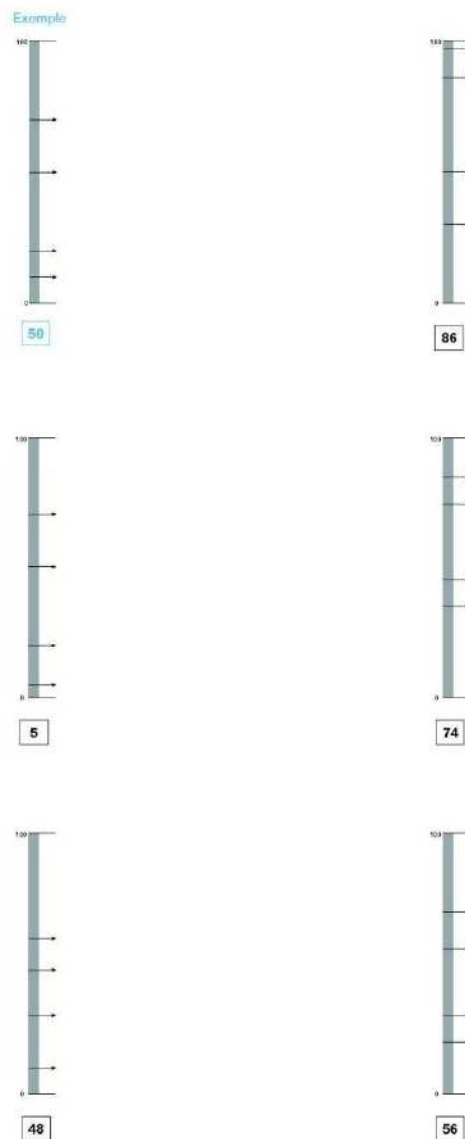
N°	Initiales	Age	Sexe	NSC	Profession	Score
1	MLD	58	F	3	Professeur de français	10
2	LD	18	F	2	Etudiante Droit 2ème année	10
3	RD	63	H	3	Docteur économie	8
4	DF	81	H	3	Directeur général (bac+5)	9
5	AJ	58	F	1	Auxiliaire de puériculture	8
6	CF	55	F	3	Universitaire - Médecin	10
7	RF	82	F	3	Retraitée - Chimiste	10
8	SH	59	F	2	Secrétaire de direction	9
9	PB	58	F	2	Attachée commerciale	9
10	DD	83	H	1	Serrurier-ferronnier	9
11	CP	68	H	3	P.D.G.	10
12	PN	64	F	1	Retraitée	8
13	PH	90	F	1	Mère foyer - Secrétaire bilingue	9
14	MV	70	F	1	Retraité	10
15	MM	84	F	3	Enseignante (bac+5)	10
16	MFH	73	F	1	Mère au foyer	10
17	HC	80	F	1	Mère au foyer	10
18	MAS	66	F	2	Assistante maternelle	10
19	ML	80	F	1	Retraitée - Vendeuse de prêt-à-porter	9
20	MMA	60	F	2	Assistante maternelle (bac S)	10
21	AM	23	F	3	Etudiante médecine 4ème année	10
22	SD	23	H	3	Etudiant médecine 4ème année	10
23	IB	18	F	2	Etudiante médecine 1ère année	10
24	AS	19	H	1	Barman	10
25	AC	70	F	2	Gestionnaire (bac + 2)	10
26	GB	60	H	3	Opticien (bac + 3)	9
27	SC	38	F	2	Buraliste	10
28	RV	76	H	1	Chauffeur d'autobus	10
29	FH	43	H	3	Musicien (bac + 4)	10
30	JCR	46	H	1	Sérigraphe	10

**Tableau 15 : Recueil de données pour la normalisation  
de l'épreuve d'estimation de nuage de points.**

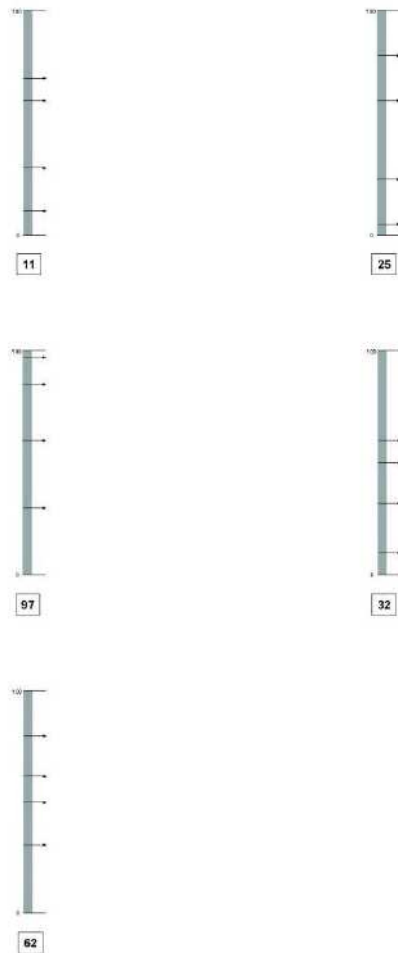
## ANNEXE 6 : EPREUVES SOUMISES A LA POPULATION AVC

Les sept épreuves suivantes proviennent de l'ECAN. Avec l'épreuve d'estimation de nuages de points, cela forme l'ensemble des tests administrés aux 33 patients de l'Unité Neuro-Vasculaire : quatre épreuves analogiques et quatre épreuves symboliques.

### EPREUVES ANALOGIQUES



**Figure 22 : Feuilles de passation montrées au patient pour l'épreuve de placement d'un nombre arabe sur une échelle graduée de 0 à 100 (1)**



**Figure 23 :** Feuilles de passation montrées au patient pour l'épreuve de placement d'un nombre arabe sur une échelle graduée de 0 à 100 (2)

**Placement d'un nombre arabe sur une échelle de 0 à 100**

**Consigne :** « Vous voyez ici une ligne représentant les nombres de 0 à 100. Comme vous le voyez, il y a quatre marques sur cette ligne. J'aimerais que vous me montriez la marque correspondant au nombre que je vais vous montrer... »  
 Exemple : marques à 10, 20, 50, 70 - cible : 50 - Tirez n°3

0	CIBLE	86	5	74	48	56	11	25	97	32	62
1	REPOSE	3	1	3	3	3	1	2	4	2	3
2											
3											
4											
100											

Commentaires : \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

SCORE	/ 10	TEMPS	
-------	------	-------	--

**Figure 24 :** Carnet de notation de l'examinateur pour l'épreuve de placement d'un nombre arabe sur une échelle de 0 à 100

7            6            12            19            97

4            9            21            14            70

80           6            200           120           1 040

20           10           102           203           4 000

189           9 016           3 210           256           5 206

636           3 150           2 310           258           5 204

73 352           55 120           90 803           26 222           40 100

73 353           55 102           90 527           26 224           41 000

155 000

150 500

**Figure 25 :** Feuilles de passation montrées au patient pour l'épreuve de jugement de grandeur entre deux nombres arabes

**Jugement de grandeur entre deux nombres arabes**

**Consigne :** « Sur chaque page il y a deux nombres, montrez-moi le plus grand des deux »  
 Exemple : 7 vs 4

CIBLE	6 vs <b>9</b>	12 vs <b>21</b>	19 vs 14	97 vs 70	80 vs 20	6 vs <b>10</b>	200 vs 102	120 vs <b>203</b>	1 040 vs <b>4 000</b>	189 vs <b>636</b>
REPONSE										
CIBLE	<b>9 016</b> vs 3 150	<b>3 210</b> vs 2 310	256 vs <b>258</b>	<b>5 206</b> vs 5 204	73 352 vs <b>73 353</b>	<b>55 120</b> vs 55 102	<b>90 803</b> vs 90 527	26 222 vs <b>26 224</b>	40 100 vs <b>41 000</b>	<b>155 000</b> vs 150 500
REPONSE										

Commentaires : .....

.....

.....

.....

<b>SCORE</b>	/	<b>TEMPS</b>	
	<b>20</b>		

**Figure 26 :** Carnet de notation de l'examinateur pour l'épreuve de jugement de grandeur entre deux nombres arabes

2-1	8-7	10-5
9-6	8-2	3-2
6-2	6-3	5-2
4-0	9-4	4-2
5-4	7-2	1-0
9-2	6-1	7-5
8-6	3-3	4-3
5-5	8-5	
9-5	7-0	

**Les soustractions**

**Consigne :** « Je vais vous montrer des soustractions. Vous devez les résoudre correctement le plus vite possible »

2-1	1	
9-6	3	
6-2	4	
4-0	4	
5-4	1	
9-2	7	
8-6	2	
5-5	0	
9-5	4	

8-7	1	
8-2	6	
6-3	3	
9-4	5	
7-2	5	
6-1	5	
3-3	0	
8-5	3	
7-0	7	

10-5	5	
3-2	1	
5-2	3	
4-2	2	
1-0	1	
7-5	2	
4-3	1	

SCORE	25
TEMPS	

Commentaires : \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Figure 27 :** Feuille de passation montrée au patient pour l'épreuve de soustraction

**Figure 28 :** Carnet de notation de l'examinateur pour l'épreuve de soustraction

**EPREUVES SYMBOLIQUES**

43	66	54	109
11	45	290	130 600
50 021	8	326	19
70	5 021	286	13 600

**Figure 29 :** Feuille de passation montrée au patient pour l'épreuve de désignation de numéraux arabes



**Désignation de nombres arabes**

**Consigne :** « Sur cette page, montrez moi ... »

CIBLE	8	11	19	326	70
REPONSE					
CIBLE	5 021	43	290	54	13 600
REPONSE					

Commentaires : .....

.....

.....

.....

SCORE	/ 10	TEMPS	
-------	------	-------	--

**Figure 30 : Carnet de notation de l'examinateur pour l'épreuve de désignation de numéraux arabes**

cinquante mille vingt et un	cinquante-quatre	quarante-cinq	onze
cinq mille vingt et un	deux cent quatre-vingt-six	soixante-dix	cent trente mille six cents
dix-neuf	quarante-trois	treize mille six cents	huit
trois cent vingt-six	deux cent quatre-vingt-dix	soixante-six	cent neuf

**Figure 31 : Feuille de passation montrée au patient pour l'épreuve de désignation de numéraux verbaux écrits**

**Désignation de numéraux verbaux écrits**

**Consigne :** « Sur cette page, montrez moi ... »

CIBLE	8	11	19	326	70
REPONSE					
CIBLE	5 021	43	290	54	13 600
REPONSE					

Commentaires : .....

.....

.....

.....

SCORE	/ 10	TEMPS	
-------	------	-------	--

**Figure 32 : Carnet de notation de l'examinateur pour l'épreuve de désignation de numéraux verbaux écrits**

**Figure 33 : Feuilles de passation montrées au patient pour l'épreuve de lecture à haute voix de nombres arabes**

5  
12  
35  
53  
60  
71  
104  
218  
370  
609

**Lecture à haute voix de nombres arabes**

**Consigne :** «Vous allez lire à haute voix les nombres que je vais vous montrer »  
Exemple : 4 → « quatre »

850  
853  
2 499  
2 600  
3 001  
3 510  
27 999  
40 100  
65 300  
200 000

5 : \_\_\_\_\_ 850 : \_\_\_\_\_  
12 : \_\_\_\_\_ 853 : \_\_\_\_\_  
35 : \_\_\_\_\_ 2 499 : \_\_\_\_\_  
53 : \_\_\_\_\_ 2 600 : \_\_\_\_\_  
60 : \_\_\_\_\_ 3 001 : \_\_\_\_\_  
71 : \_\_\_\_\_ 3 510 : \_\_\_\_\_  
104 : \_\_\_\_\_ 27 999 : \_\_\_\_\_  
218 : \_\_\_\_\_ 40 100 : \_\_\_\_\_  
370 : \_\_\_\_\_ 65 300 : \_\_\_\_\_  
609 : \_\_\_\_\_ 200 000 : \_\_\_\_\_

SCORE	20	TEMPS	
-------	----	-------	--

**Figure 34 : Carnet de notation de l'examinateur pour l'épreuve de lecture à haute voix de nombres arabes**

**Écriture sous dictée de nombres arabes**

**Consigne :** «Vous allez écrire en chiffres les nombres que je vais vous dicter »  
Exemple : quatre → « 4 »

2	9	13	20	44	51	195	307	469	701
883	920	960	2 005	3 365	5 100	8 270	42 300	98 010	300 000

Commentaires : \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

SCORE	20	TEMPS	
-------	----	-------	--

**Figure 35 : Carnet de notation de l'examinateur pour l'épreuve d'écriture sous dictée de nombres arabes**

## ANNEXE 7 : NOTES BRUTES DES 33 PATIENTS AUX 8 EPREUVES

Obs	PlmtEch	JgtGdrNA	EstimNuagPts	Soustract	DésignNA	DésignNVE	LHVNA	DictéeNA
1	9	20		21			18	19
2	0	16		0				
3	8	17		0	8	5		10
4	8	18		20	8	6	12	16
5	8	20		24	8	9	19	19
6	9	20		25	9	5	6	16
7	8	19		25	9	9	19	17
8	4	17	6	2			3	
9	10	20	10	1	5	7	0	
10	1	15	2	15				
11	5	14	8				0	3
12	1	12	7	2		3	8	
13	7	19	9	24	9	10	19	20
14	2	18	3	15	6	5	16	4
15	4	10	0	0	4			
16	1	15	3	1	2	0	1	0
17	7	19	9	24	9	9	19	20
18	10	20	9	25	10	10	20	20
19	2	20	2	18	0	0	15	3
20	5	20	10	24	8	1	8	3
21	9	18	7	22	9	8	18	19
22	6	20	10	18	9	8	7	13
23	4	16	5	6	8	8	12	4
24	8	19	7	24	10	9	20	19
25	10	20	10	24	2	0	5	6
26	9	20	5	24	9	9	19	20
27	7	20	10	21	10	8	20	19
28	4	19	9	20	9	5	5	16
29	9	20	9	21	8	9	19	20
30	7	15	6	24	9	7	20	17
31	10	20	8	25	10	9	20	20
32	2	19	3	19	9	9	18	16
33	7	18	9	13	7		16	8

**Tableau 16 : Scores des 33 patients aux 8 épreuves**

Les notes en vert sont supérieures ou égales au percentile 5 et sont donc considérées comme correctes.

Les notes en rouge sont inférieures au percentile 5 et sont donc considérées comme déficitaires.

Chaque ligne correspond à un patient et les numéros d'identification sont les mêmes que pour le tableau 11 de l'annexe 2.

**L'ACALCULIE CHEZ LES PATIENTS AVC :**  
**REPRESENTATIONS SYMBOLIQUES ET SEMANTIQUES DU NOMBRE**

**Résumé :**

Cette étude vise à prouver l'intérêt d'utiliser le modèle du Triple Code en pratique orthophonique de routine pour des patients acalculiques. Ce modèle repose sur des études de cas uniques et dissocie les domaines analogique et symbolique lors du calcul et du traitement du nombre par le cerveau. Peut-on pour autant fonder une analyse diagnostique et un plan de rééducation sur cette dissociation ? Sur la base d'une étude de population effectuée chez 33 patients AVC grâce à des épreuves choisies de l'ECAN, ce mémoire montre que la dissociation se retrouve souvent et représente de fait un angle pertinent de prise en charge.

**Abstract :**

*This study aims to prove the interest of using the Triple Code model in ordinary speech therapy for patients with acalculia. That model is based on studies of single cases and separates the symbolical and analogical fields during calculation and treatment of number by brain. Then is it possible to base a diagnosis and a reeducation program on that dissociation? From a population study of 33 stroke patients with tests chosen in ECAN, we often find that dissociation, which therefore seems an appropriate way of treatment.*

**Mots clés:**

Acalculie  
 Domaines analogique et symbolique  
 Etude de population  
 AVC

**Key words :**

*Acalculia  
 Analogical and symbolical fields  
 Population study  
 Stroke*

**Nombre de pages :** 84 pages et 15 en annexe

**Nombre de références bibliographiques :** 168